



RESULTADOS SLOW

OPORTUNIDADES EN LA MISIÓN REGIONAL DE REDUCCIÓN DE
EMISIONES Y GASES DE EFECTO INVERANDERO HABILITADA POR
LA INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS W3C

1. MEMORIA TÉCNICA

Introducción

El proyecto SLOW (Oportunidades en la Misión Regional de Reducción de Emisiones y Gases de Efecto Invernadero Habilitada por la Investigación en Tecnologías W3C) es ejecutado por Fundación CTIC – Centro Tecnológico entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de diciembre de 2023. **En esta memoria se recoge la descripción de los trabajos realizados durante las tres anualidades.**

El proyecto SLOW se plantea con el objetivo general de diseñar una metodología analítica de estimación de gases de efecto invernadero (GEI) mediante la investigación y aplicación de tecnologías avanzadas en un entorno hiper-sensorizado bajo estándares W3C. Con esta metodología se persigue realizar una estimación de las emisiones y absorciones de los GEI con aplicación particular en el ámbito del sector agroganadero, responsable de una gran cantidad de estas emisiones. Además, se proponen una serie de herramientas tecnológicas basadas en la Inteligencia Artificial, el Internet de las Cosas (particularizado en el estándar W3C WoT) y las Tecnologías Inmersivas, que complementen a esta metodología permitiendo a usuarios no expertos en ciencias de datos consumir la información generada de forma intuitiva y sencilla. Este planteamiento se resume de forma gráfica en la siguiente figura.

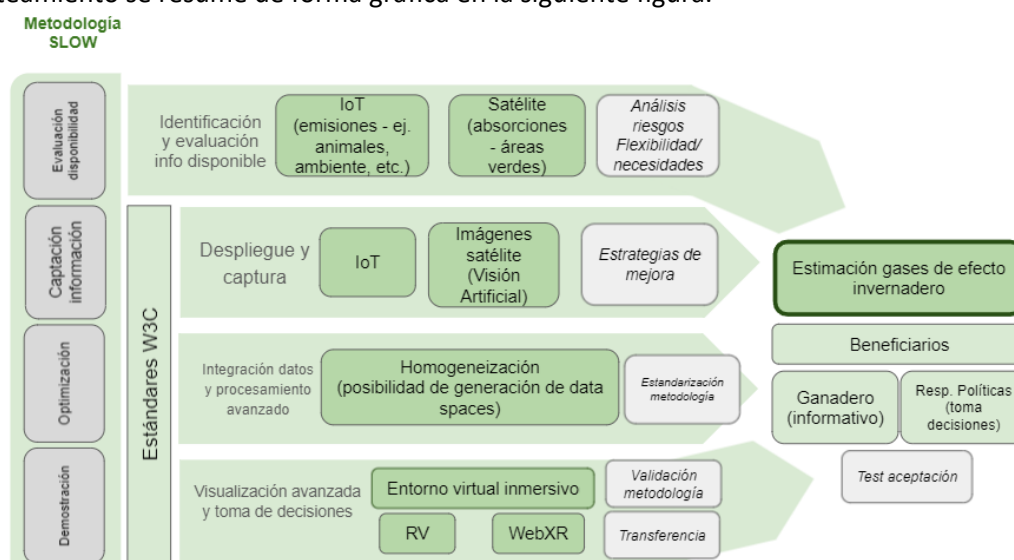


Figura 1: Esquema conceptual de SLOW

A continuación, se describen las tareas realizadas en este hito de trabajo y los resultados conseguidos.

JUSTIFICACIÓN 2021

Bloque 1: Metodología

Este bloque se corresponde con el primer paquete de trabajo (PT1), enfocado al *Diseño, desarrollo y validación de la metodología*, relacionado directamente con el objetivo específico OE1 de SLOW, de “definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de

gases de efecto invernadero”. Se pretende, pues, investigar y diseñar una nueva metodología de estimación de GEI estandarizada y uniforme, que complemente información procedente de múltiples fuentes de datos. Para ello, es necesario realizar un estudio del estado del arte en materia de monitorización de los GEI y la medición o estimación de emisiones y absorciones, localizando los datos que sirven como indicadores relevantes y las fuentes disponibles. Esto permitirá alcanzar una definición, a optimizar de forma iterativa, de una propuesta de metodología que pretende evolucionar con la información extraída a medida que se continúe la investigación sobre SLOW y se identifiquen necesidades y mejoras.

Este bloque se organiza en tres tareas, de las cuales las dos primeras han sido finalizadas durante 2021, mientras que la tercera permanece en ejecución hasta el final del proyecto, pues se espera que el diseño de la metodología se retroalimente de la investigación y los resultados obtenidos a lo largo de su ejecución.

PT1: Diseño, desarrollo y validación de la metodología

T1.1: Análisis del estado de la técnica en inventariado de GEI

T1.2: Estudio de disponibilidad de datos indicadores en emisión/absorción de GEI

T1.3: Diseño de metodología de estimación de GEI

A continuación, se describen las acciones desarrolladas en el marco de estas tareas, así como los principales resultados alcanzados en cada una de ellas.

T1.1: Análisis del estado de la técnica en inventariado de GEI

1. Introducción al cambio climático

El cambio climático es uno de los problemas actuales más impactantes a nivel mundial sobre los que se está poniendo el foco en los últimos años. Los cambios a largo plazo de las temperaturas medias y de los patrones climáticos pueden deberse a factores naturales como variaciones del ciclo solar, pero también pueden ser resultado de la actividad humana. Esto, según Naciones Unidas, se está viendo incrementado desde el siglo XIX, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas.

La quema de combustibles fósiles genera emisiones de **gases de efecto invernadero** (GEI) que actúan como una manta que envuelve a la Tierra, atrapando el calor del Sol y elevando las temperaturas. Algunos ejemplos, a muy alto nivel, de emisiones de GEI que pueden provocar el cambio climático son:

- El **dióxido de carbono** (CO₂): emitido principalmente por la gasolina, carbón y otros combustibles fósiles (usados principalmente en la industria o transporte) como por el desmonte de tierras y bosques o la construcción de zonas urbanas.
- El **metano** (CH₄): emitido principalmente por vertederos de basura y por el sector agroalimentario.

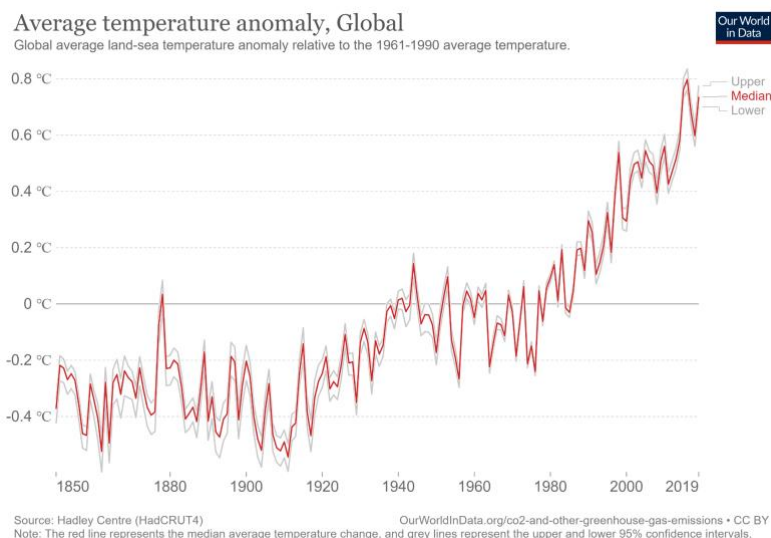


Figura 1: Aumento de la temperatura media global.

Como consecuencia de estas emisiones, la temperatura de la Tierra ha aumentado 1,1 °C desde finales del siglo XIX. Esta temperatura ha ido aumentando progresivamente de década en década, de tal manera que la última (2011-2020) fue la más cálida registrada.

Por último, cabe destacar que, al contrario de lo que generalmente se piensa, el cambio climático no significa principalmente el aumento de la temperatura global. Debido a que la Tierra es un sistema en el que todo está conectado, los cambios en una zona pueden dar lugar a variaciones en todas las demás. De esta forma, las consecuencias del cambio climático incluyen, entre otras: sequías intensas, escasez de agua, incendios graves, aumento del nivel del mar, inundaciones, temperaturas extremas, deshielo de los polos, tormentas catastróficas y disminución de la biodiversidad.

2. Gases de efecto invernadero (GEI)

Los GEI o gases de efecto invernadero son componentes gaseosos de la atmósfera terrestre con la capacidad de absorber y emitir radiación dentro de un rango determinado de longitudes de onda. Esta propiedad ocasiona el llamado efecto invernadero.

Principalmente el dióxido de carbono (CO₂), seguido por el vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) junto con halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromo, son los principales gases de producción natural que componen la lista de los considerados GEI. También existen una gran variedad de gases considerados de efecto invernadero que son producto directo de la actividad humana, entre los que se encuentran los gases F o gases fluorados, utilizados para la fabricación de aerosoles o por su condición de refrigerantes, y que resultan ser una de las fuentes de mayor impacto en la capa de Ozono.

El problema ocasionado por la generación de estos gases, viene dado por un **incremento muy significativo en su producción**. Los inicios de la revolución industrial (año 1750), supusieron transformaciones sociales y económicas que propiciaron un gran cambio en nuestra forma de interactuar con el entorno. El uso intensivo de combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas metano), los cambios en los métodos de producción ganadera y agrícola (llevándolo a un modelo más intensivo), junto con un incremento en la deforestación y la erosión del suelo, ocasionaron un gran impacto, contribuyendo al aumento de emisiones de GEI. Este aumento está afectando no solo al cambio climático, sino también a la acidificación de los océanos y a la reducción del fitoplancton.

En la actualidad, nos encontramos en una lucha constante por contrarrestar los efectos de los GEI en las diferentes áreas de producción. A pesar de los continuados esfuerzos por parte de diversas organizaciones en pos de alcanzar el objetivo a largo plazo de eliminar las emisiones netas de GEI, las reducciones en la producción de gases de los últimos años son insuficientes para contrarrestar estos efectos y alcanzar los objetivos propuestos para 2050 por la Comisión Europea en el denominado Pacto Verde.

Emisiones por tipo y sector de producción

Una de las claves para afrontar este problema pasa por el análisis del impacto de las **diversas fuentes de generación** de gases y de los tipos de gases emitidos en estas.

Como se puede ver en el gráfico anterior, las emisiones tanto de la generación de **energía** como de su uso en diferentes sectores de la industria o el transporte abarcan la mayoría de las emisiones de GEI en todo el mundo (73,2%), encontrándose en segundo lugar el **sector agroganadero** y el uso de la tierra, que produce un 18,4% de las mismas.

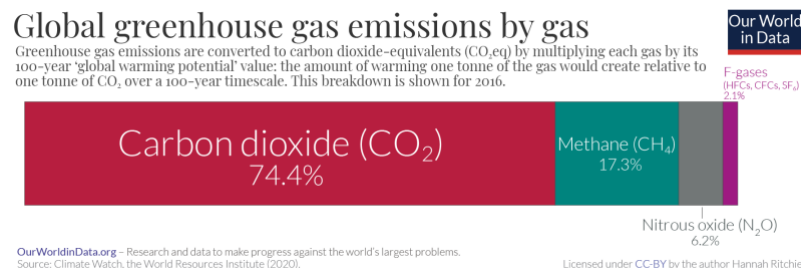


Figura 2: Distribución de emisiones globales por tipo de gas en 2020.

Por otro lado, al estudiar las emisiones por tipo de gas de efecto invernadero emitido, se identifica el **CO₂** como componente principal, con un 74,4% de las emisiones, seguido del **metano** con un 17,3%, el **óxido nítrico** con un 6,2% y los **gases F** con un 2,1%.

Y, por último, concretamente en España y siguiendo los datos de su inventariado en el año 2020, se puede comprobar cómo las proporciones se repiten. Las emisiones mayoritarias se producen en el sector de la energía con un 72% de estas, y el CO₂ con representa un 77% del total. Como segundos culpables: **la agricultura y el gas metano**.

GEI en el sector agroganadero

Como se indicó en el apartado anterior, los residuos provenientes de la agroganadería suponen la segunda gran partida de la emisión de gases de efecto invernadero, siendo **una de las principales fuentes de impacto** en las emisiones globales con un 18,4% del total. Según el SEI, en España las emisiones de este sector forman un 14,1% de las totales del país, respondiendo aproximadamente dos tercios al sector ganadero y el tercio restante al sector agrícola; contribuyendo así en gran medida al cambio climático principalmente por sus emisiones de **óxido nítrico** (y otros nitrógenos) así como **metano** provocadas por un modelo de ganadería intensiva. Además, si se comparan las emisiones de este sector en España en años anteriores respecto a las emitidas en el año 2020, se puede comprobar que la proporción de emisiones aumenta mientras que en otros sectores se ve reducida (e.g. generación eléctrica, transporte o industria). En concreto, las actividades relacionadas con la agroganadería responsables de emisiones de GEI en nuestro país, se corresponden con las cabañas ganaderas (64,8% de las emisiones), gestión del estiércol (2%) y, en menor medida, las actividades de fermentación entérica (0,2%). Además, por un lado, la gestión de suelos agrícolas emite, con el uso de fertilizantes inorgánicos, óxido nítrico (1,5%) y, por otro lado, el

uso de urea para el mismo fin emite CO₂ (21%). Por último, el uso de maquinaria, electricidad o refrigeración (entre otros aspectos) también afecta a la cantidad de emisiones de este sector.

Gas metano

Según el IPCC, las emisiones de **metano** son unas de las **mayores responsables del aumento del llamado efecto invernadero**, debido a que entre un 30 y un 50% del incremento de las temperaturas se debe a las emisiones de este gas en concreto.

Bien es cierto que el gas metano, en comparación con el CO₂, tendría una menor incidencia en las alzas de temperatura debido a que su producción es mucho menor, pero sus consecuencias son de más larga duración y más difíciles de combatir. El metano **calienta aproximadamente 24 veces más que el CO₂ y daña en mayor medida la atmósfera** terrestre aunque, por el contrario, dura menos en el aire.

En concreto, en la década de 2010-2020, y en un país como es España:

- Un 14% sobre el total de emisiones de GEI se corresponde con gas metano, frente a un 7% de óxido nitroso. Por otro lado, un 77,6% se trata de CO₂.
- De ese 14% de GEI correspondiente al metano, un 60% proviene del sector agroganadero. El resto de emisiones de este gas proceden de otros procesos como el cultivo de arroz, producción de combustibles fósiles o la quema incompleta de bosques o desechos agrícolas.
- Del 6,4% de óxido nitroso, un 80% es debido al sector agroganadero.

Es por esto que se debe realizar un gran esfuerzo para mejorar este sector en concreto, con el objetivo de reducir estas emisiones y fortalecer las medidas de compensación analizando y aprovechando las áreas verdes como sumideros para alcanzar los objetivos de reducción marcados por la Unión Europea para el año 2050.

3. Medición de los gases de efecto invernadero

Uno de los primeros pasos a la hora de luchar contra el cambio climático es disponer de las herramientas adecuadas para responder a las preguntas: ¿cuántos gases emitimos? ¿Cómo podemos mitigar esas emisiones? ¿Cuántas emisiones conseguimos amortiguar con las medidas aplicadas?

En este apartado se pretende hacer un estudio que responda a estas preguntas, realizando un análisis sobre las diferentes técnicas de inventariado de emisiones, continuando con las diversas metodologías o técnicas de absorción de gases y finalizando con métodos para calcular de una manera y concisa cuántos gases emitimos en un territorio y cuántos conseguimos absorber.

Medición de emisiones

En primer lugar, y habiendo introducido el problema del cambio climático e identificados los gases que afectan a esta cuestión, se debe de realizar un estudio sobre las actuales **técnicas de medición e inventariado** de gases de efecto invernadero.

Los inventariados de gases de efecto invernadero buscan ser un instrumento en las estrategias nacionales para la lucha contra emisiones de GEI, según lo previsto en la convención Marco sobre el cambio Climático (UNFCCC), en el Protocolo de Kioto y en el Reglamento (UE) 525/2013. Tienen como objetivo elaborar, de forma periódica, **evaluaciones sobre la cantidad de gases emitidos** a la atmósfera organizándose en tipos de gases y sectores de actividad. Asimismo, también se busca registrar la cantidad de estos gases que son **absorbidos** por las diferentes técnicas para luchar contra el cambio climático.

Existen diferentes técnicas, protocolos o métodos para realizar las mediciones de emisiones de GEI. Estos se muestran en la siguiente tabla y, en los siguientes apartados, se detallarán los más relevantes.

Nombre	Organismo	Objetivo
UNE-EN ISO 14.064	Organización Internacional de Normalización	Inventario de emisiones
UNE-EN ISO 14.065	Organización Internacional de Normalización	Validación y verificación de la contabilización de emisiones
GHG Protocol Alcance 1 y 2	World Business Council for Sustainable Development - World Resources Institute	Inventario de emisiones
GHG Protocol Alcance 3	World Business Council for Sustainable Development - World Resources Institute	Huella de carbono
The Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI)	Intergovernmental Panel on Climate Change	Inventario de emisiones
Bilan Carbone	ADEME	Huella de carbono
PAS 2060:2010	British Standard Institute	Huella de carbono
UNE-EN ISO 14.069	Organización Internacional de Normalización	Huella de carbono

Tabla 1. Protocolos y técnicas para la medición de emisiones.

TFI - The Task Force on National Greenhouse Gas Inventories

El grupo de trabajo sobre Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (TFI) ha sido establecido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para supervisar su programa de inventarios nacionales de Gases de Efecto invernadero (IPCC-NGGIP), el cual por su parte también contiene una base de datos de factores emisión.

Su objetivo no es otro que **desarrollar y perfeccionar metodologías y software** acordados internacionalmente para el cálculo y el reporte de las emisiones y absorciones de GEI por parte de una nación. Se busca fomentar el uso de esta metodología por parte de los países que participan en el IPCC y de los firmantes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (UNFCCC).

ISO - International Organization for Standardization

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) es una organización independiente construida para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de normalización. En el ámbito de las emisiones de GEI, cuenta con **una serie de normativas** destinadas a garantizar la correcta gestión del **inventario** (UNE-EN ISO-14.064), la **contabilización** (UNE-EN ISO-14.065) y el cálculo de la **huella de carbono** (UNE-EN ISO-14.069), con el objetivo de encauzar el desarrollo de diversas tecnologías y proporcionar metodologías de análisis para el correcto estudio de los gases y su efecto invernadero.

Las propuestas definidas en la ISO-14.064 definen los límites que se establecen durante el cálculo y el informe de la huella de carbono de una empresa, definiendo el alcance y la separación en categorías de las emisiones directas e indirectas de GEI. En este análisis, se hace un fuerte hincapié en la división de las emisiones consideradas indirectas, definiendo una serie de criterios para conocer el impacto y el grado de inclusión que deberían tener dentro del inventario de gases. Esta norma junto con el apoyo de los principios

establecidos en la ISO-14.096, garantizan el correcto análisis y desarrollo del informe de emisiones GEI por parte de las organizaciones.

Durante las tareas de inventariado y análisis del impacto, la interpretación de las diferentes normativas por parte de las empresas, puede llegar a provocar grandes disparidades en las declaraciones de emisiones de GEI. Con el objetivo de resolver esta problemática, la norma ISO-14.065 especifica los principios y requisitos para la validación y verificación de las declaraciones, ofreciendo garantías de calidad e imparcialidad a las auditorías internas o externas y a los procesos de acreditación.

GHG Protocol

El protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol por sus siglas en inglés) es la **herramienta internacional más utilizada para el inventariado** de emisiones. Ha sido desarrollado tomando como principal referencia el Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI (ECCR), por el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) y por el World Resources Institute (WRI), participando también empresas, ONGs, gobiernos y grupos ecologistas de todo el globo.

Este protocolo aúna tanto el estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte del Protocolo de GEI (cuantificar emisiones de empresas concretas) y el Estándar de Cuantificación de Proyectos del Protocolo de GEI (para cuantificar reducciones de emisiones provenientes de proyectos concretos).

Por tanto, se incluyen estándares y guías para la contabilidad de GEI, diseño de inventarios para GEI, seguimiento y cálculo de emisiones, gestión de calidad, contabilidad de reducción de GEI y verificaciones de emisiones entre otros aspectos. Por tanto, su objetivo no es otro que asesorar a las compañías en el control de sus emisiones a través del inventariado de las mismas, ayudándoles también a disminuir costes en la construcción de dicho inventariado y facilitándoles una metodología eficaz y transparente para la reducción de sus emisiones.

Se trata de una extensa metodología que permite contabilizar las emisiones de cualquier sector, incluyendo tanto las emisiones directas como las indirectas (incluso las no emitidas por la propia compañía).

En concreto, este protocolo se divide en dos, dependiendo del tipo o alcance (basados en los indicados en la norma ISO-14.064) de las emisiones.

Un **primer protocolo** para las emisiones de Alcance 1 y 2:

- Siendo las emisiones de **Alcance 1** las directas procedentes de las actividades de la organización emisora. Por ejemplo, consumo de combustible por sus transportes o las emisiones resultantes de los residuos generados durante la actividad.
- Siendo las emisiones de **Alcance 2** las indirectas que generan las centrales de producción de electricidad externas como consecuencia del consumo del propio emisor. Por ejemplo, uso de electricidad, vapor, calefacción o refrigeración.

Un **segundo protocolo**, publicado posteriormente y convirtiéndose en el único método aceptado internacionalmente para medir las emisiones de **Alcance 3**. Estas emisiones se corresponden con las indirectas consecuencia de actividades que no son propiedad del emisor ni están controladas por él. Por ejemplo, uso de vehículos de usuarios externos, producción y transporte de los bienes adquiridos, emisiones de la extracción del combustible consumido por la compañía, etc.

Instrumentación para la medición de GEI

Determinar la **instrumentación existente para la monitorización de los gases** de efecto invernadero es clave para el desarrollo de la metodología SLOW.

Por un lado, se dispone de soluciones manuales tradicionales que se basan en tomas de muestra y posterior análisis para el procesamiento de la información obtenida para generar un informe. Este enfoque comprende un proceso tradicional cuyo análisis queda fuera del alcance de este documento.

Por otro lado, y siguiendo la ilustración anterior, disponemos de **soluciones tecnológicas IoT** cuyo enfoque, en su mayoría, se basa en una serie de **sensores inalámbricos** capaces de recolectar datos y enviarlos a dispositivos **gateway** que dotan de conectividad a la infraestructura, utilizando tecnologías de transmisión como LoRa, ZigBee o 4G. Existen multitud de objetivos para estos sistemas orientados a todo tipo de situaciones y aplicaciones, si bien en el caso concreto del cambio climático nos podemos encontrar sistemas de control de residuos, manejo de agua o calidad del aire, entre otros. Para el caso específico de propuesta de esta metodología se estudiarán los referidos a la **calidad del aire**.

Los sensores de calidad de aire que utilizan estas soluciones IoT son de diversos tipos, pudiendo ser capaces de detectar gases específicos (como CO₂, NH₃, CH₄ y Ozono), contaminación ambiental, temperatura o humedad, entre otros. Toda la información captada por estos sensores, se envía por red para su posterior análisis y reporte.

Por último, el uso de **bases meteorológicas o satélites** también está a la orden del día para el control de emisión de gases de efecto invernadero. Hasta la fecha, se han lanzado a la órbita terrestre diversos satélites capaces de medir estas emisiones (fundamentalmente de CO₂ y CH₄) gracias a sus avanzados sensores. Podemos encontrar, por ejemplo, los satélites pertenecientes al programa **Copernicus** (e.g. el satélite GHGSat lanzado en el año 2016). En apartados posteriores del presente documento se estudiarán como alternativas a la toma de imágenes y recolección de datos.

Medición de absorciones

Desde el Acuerdo de París, en todas las conversaciones sobre el cambio climático se utiliza un término: **mitigación**. Este término indica que el objetivo es reducir o suavizar las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Para perseguir este objetivo se han seguido diferentes enfoques a lo largo del tiempo, entre los que podemos destacar la reducción del transporte de combustión, la propulsión de medidas de eficiencia energética en productos o edificaciones, la descarbonización de la economía o promover modelos más ecológicos de producción.

Otra medida a destacar se corresponde con el **Comercio de derechos de emisión** de la Unión Europea con el que, desde 2005, se busca sancionar de forma económica el exceso de emisiones permitidas y limitar las emisiones de GEI totales de la siguiente forma. Las industrias deben solicitar autorización para emitir gases y obtienen un número de derechos limitado (siendo un *derecho* el equivalente a la posibilidad de emitir una tonelada de CO₂); si dicha organización emite por debajo de los derechos que posee, puede vender en la subasta de emisiones sus derechos sobrantes a industrias que hayan emitido más gases que los derechos que tenían.

No obstante, en el enfoque de la metodología SLOW resulta más interesante el análisis de otras medidas denominadas "de **absorción**". Una de las formas de absorber emisiones consiste, por ejemplo, en aumentar la presencia de **sumideros de carbono** en el planeta.

Los bosques del mundo absorben alrededor de un total de 15,6 gigatoneladas de CO₂ al año. Esto es en términos relativos, tres veces las emisiones anuales de Estados Unidos. Alrededor de la mitad de esta cantidad es enviada de nuevo a la atmósfera a causa de la deforestación y los incendios forestales. En todo el mundo, la deforestación representa una quinta parte de todos los gases de efecto invernadero producidos por el ser humano.

La selva amazónica es, gracias a su extensión, uno de los sumideros de carbono más valiosos del planeta. No obstante, la conversión de bosques en tierras agrícolas ha desencadenado que la cuenca del Amazonas ahora emita tanto carbono como el bosque restante puede procesar. Algunas selvas tropicales ya emiten

más carbono del que almacenan, y la tendencia parece indicar que en un futuro próximo se extienda este comportamiento como ocurre con los bosques tropicales del sudeste asiático que, durante años, han estado emitiendo más CO₂ del que absorben.

El establecimiento de más bosques podría ayudar a aumentar el sumidero de carbono de la vegetación, considerando además que los nuevos bosques también absorben más carbono que los antiguos, al producir mucha biomasa nueva.

Sumideros de GEI

Según el protocolo de Kioto, el ritmo de acumulación de CO₂ en la atmósfera puede reducirse aprovechando que el **CO₂ atmosférico puede concentrarse como carbono en la vegetación** y en los suelos de los ecosistemas terrestres.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático denomina **sumidero** a cualquier proceso, actividad o mecanismo que elimine un gas de efecto invernadero de la atmósfera. La actividad humana afecta a estos sumideros terrestres a través de las actividades de uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF) por lo que altera el intercambio de CO₂ (ciclo de carbono) entre el sistema de la biosfera terrestre y la atmósfera.

Como se ha indicado, el principal GEI que se emite es el **CO₂**, si bien es el gas que puede absorberse con mayor facilidad gracias a los sumideros de carbono. Como puede observarse en los gráficos siguientes, un total de 38,8 toneladas de emisiones (un 45% del total en 2017) viene de fuentes antropogénicas. Más de la mitad de estas emisiones se consigue mitigar con los sumideros, tanto terrestres (formados por masas forestales y el suelo) como oceánicas.

Las formaciones vegetales actúan como sumideros mediante su función vital: la **fotosíntesis**, proceso mediante el cual los vegetales obtienen CO₂ de la atmósfera o disuelto en agua y gracias a la luz solar sintetizan moléculas sencillas de azúcares.

Asimismo, también se pueden encontrar sumideros de **gas metano** en la naturaleza:

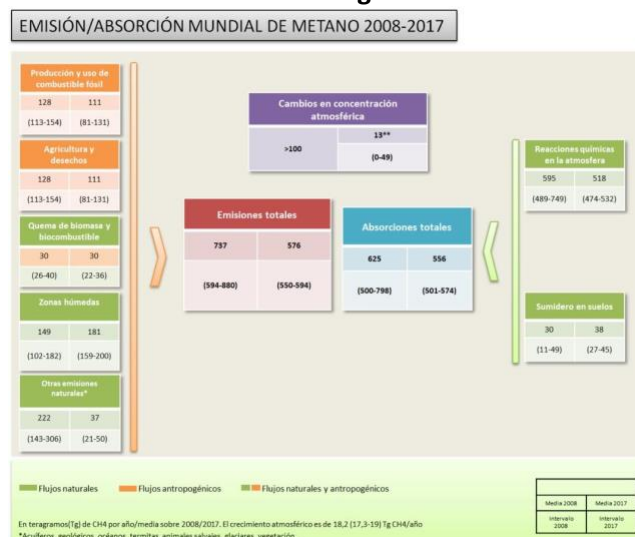


Figura 3: Saldo global de la huella de Carbono entre los años 2011 y 2020.

Radical Hidroxilo

En la **troposfera** se encuentra el Radical Hidroxilo u **OH**, de los gases más reactivos que se encuentran en la atmósfera. Este es capaz de **limpiar el aire** rompiendo otros gases entre los que se encuentran los GEI y, especialmente, el metano al que oxida y transforma en H₂O y CO₂. Si el OH no es capaz de destruir el

metano, este durará años hasta ser finalmente destruido en la siguiente capa de la atmósfera, la **estratosfera**. La destrucción se lleva a cabo de manera similar: el metano se oxida y se transforma en H₂O y CO₂. Ambas en total consiguen absorber una media de 595 millones de toneladas de CO₂eq de metano en 2008 (un 80,73% de las emisiones de este gas en ese año) y 518 en 2017 (un 89,93% de las emisiones de CH₄ en ese año).

El OH, además, es capaz de reciclarse a sí mismo. Los gases resultantes de la reacción entre el OH y el metano vuelven a formar OH al entrar en contacto con óxidos de nitrógeno y, además, la incisión de luz ultravioleta con H₂O y Ozono forma también este gas. Es por esto que mantiene sus niveles constantes en la atmósfera, aunque se debe destacar que el aumento de niveles de metano hace que este sumidero no resulte tan eficaz como en el pasado.

Metanotrofos en suelos

Los **suelos con baja humedad y alta porosidad** presentan condiciones óptimas para realizar la oxidación del metano, pero también son unos importantes sumideros de este gas gracias a las **bacterias metanotrofas** (biochar) que residen en ellos. Estas bacterias crecen en áreas de alta concentración de metano, como humedales, y son capaces de **oxidar el metano** generando H₂O y CO₂. Resulta interesante señalar, además, que se han descubierto evidencias de que los biochar generados en procesos de pirólisis (temperaturas superiores a 600° C) incrementan el efecto sumidero de CH₄ en el suelo y que este puede ser generado llevando residuos de origen orgánico a dicho proceso de pirólisis en ausencia de oxígeno.

Este sumidero ha conseguido absorber 30 millones de toneladas de CO₂eq de metano en 2008 (un 4,07% de las emisiones de este gas en ese año) y 38 en 2017 (un 6,6% de las emisiones de CH₄ en ese año).

Entornos subterráneos

Recientemente se ha descubierto que **el metano desaparece en los entornos subterráneos** conectados al exterior con un elevado nivel de humedad con presencia de rocas porosas, como las cuevas, túneles u otras localizaciones por encima del nivel freático. Esto se consigue gracias a un fuerte grado de ionización del aire en las cavidades que permite **proliferar metanotrofos que oxidan el metano**, si bien es algo que aún se sigue investigando.

Conclusiones sobre las absorciones de gases

Como se observa con los datos anteriores, se estima que en 2008 se consiguió absorber un 84,80% de las emisiones de metano, mientras que en 2017 este porcentaje asciende a un 96,52%. A pesar de este alto porcentaje de absorciones, los efectos del metano en la atmósfera siguen siendo extremadamente preocupantes. Además, gran parte de las emisiones de metano (38,96% en 2008 y casi la mitad en 2017: un 47,23%) se deben a actividades realizadas por el ser humano.

Es por ello que los expertos concluyen, con todos los datos analizados en este apartado y en los anteriores, que **reducir las emisiones de metano es más sencillo y ofrece mejoras a un plazo mucho más corto que, por el contrario, reducir las emisiones de CO₂**.

Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono del MITECO

La metodología de cálculo de absorciones de CO₂ desarrollada por el MITECO, centra sus esfuerzos en proporcionarnos una **estimación a nivel nacional de los efectos sumidero** de todas las especies forestales arbóreas. Estas estimaciones entran en consonancia con el protocolo de Kioto, estableciendo las definiciones de bosque según su fracción cubierta, superficie y altura mínima, a efecto de informar y comprender las características forestales arbóreas del territorio.

Dadas las estimaciones de absorción de CO₂ de las zonas forestales arbóreas y en consonancia con las directrices marcadas por el IPCC en el marco de directrices y orientaciones sobre buenas prácticas para el

inventario de GEI, el MITECO define dos metodologías de cálculo de absorciones simplificado determinadas por el momento en el que se realiza el cálculo:

- Cálculo **EX ANTE**, en base a estimaciones del crecimiento de las especies para el periodo de permanencia del proyecto. Este dato nos permite aproximar las absorciones que conseguirá un proyecto a lo largo del tiempo.
- Cálculo **EX POST**, en base a los datos reales de la repoblación en un momento concreto.

En ambos casos, los cálculos se limitan al estudio de la biomasa viva y al impulso de la repoblación de especies autóctonas como clave para la reducción de los efectos de los GEI por medio de sumideros de carbono.

Metodologías para el cálculo de absorciones en bosques

A la hora de **contabilizar las capacidades de absorciones** de GEI por parte de los **bosques** nos encontramos con varias metodologías existentes. Si bien los investigadores aún se encuentran en la búsqueda de un método que arroje resultados fiables, debido a las grandes dificultades que surgen durante el desarrollo de una metodología de esta índole, resulta interesante comentar algunas propuestas destacando sus objetivos y los problemas que conlleva su uso.

RAFCB, VNIILM y CBM-CFS3

En una primera iteración se pueden encontrar estos tres métodos de los que se puede destacar, principalmente, que sus inconvenientes afectan de forma significativa al resultado final.

En primer lugar, la metodología para la evaluación regional del presupuesto de carbono forestal (**RAFCB**) desarrollada por el Centro de Ecología y Productividad Forestal de la Academia Rusa de las Ciencias, propone la aplicación de los datos de absorción de carbono proveniente de las masas forestales durante el cálculo de las emisiones de GEI.

Lamentablemente hace uso de datos obsoletos, deja de lado algunos bosques (sólo tiene en cuenta en los que se lleve a cabo actividad económica y sean accesibles) y cuenta como pérdidas de absorción tanto deforestación como incendios (duplica datos), lo que hace que los expertos dictaminen que subestima la capacidad de absorción de los bosques.

Por ello, se intentó llevar a cabo el desarrollo de otras dos metodologías alternativas para obtener mejores resultados:

Silvicultura y mecanización forestal (VNIILM): Del instituto de investigación All-Russian. Este procedimiento para la estimación de absorciones de CO₂ de los bosques de la federación rusa se basa en la metodología para el inventario nacional de GEI (siguiendo las indicaciones del IPCC). Utilizando en pruebas bosques de regiones Rusas se obtienen datos que consiguen mejorar la fiabilidad de RAFCB.

Modelo de Inventario de Carbono del Sector Forestal Canadiense (CBM-CFS3): Esta metodología desarrollada por el Servicio Forestal Canadiense ha sido probada en más de cuarenta países del globo. Se desarrolló para contabilizar la absorción de carbono de los bosques de todo Canadá. Cumple las directrices de la IPCC y utiliza datos como las curvas de edad de los árboles, el inventario forestal detallado de la zona, el histórico de desastres, cambios en el uso de la tierra, cronograma de las cosechas, etc.

No obstante, siguen presentado inconvenientes y es que, a pesar de mejorar RAFCB y solucionar algunos de sus errores, nos encontramos con la **falta de algunos indicadores** que afectan al resultado final del análisis: no tienen en cuenta la acumulación de carbono en pantanos o en hojarasca de los bosques ni tampoco el clima o los cambios de temporada, sobreestimando las capacidades de absorción de los bosques y obviando otras fuentes de absorción de gran importancia, que dan como resultado análisis poco esclarecedores.

FORCARB2

El Modelo de inventario de carbono de EEUU (**FORCARB2**) es el resultado de la actualización de la metodología FORCARB, ha sido desarrollada en Estados Unidos y basa sus estudios en colecciones especializadas de áreas forestales.

Trata de producir estimaciones de las reservas de carbono y cambios en los ecosistemas del país en un plazo de 5 años. Esta metodología incluye nuevos aspectos como la absorción de carbono en la reutilización de madera, datos de inventario actualizados, un nuevo algoritmo para revisar la madera muerta y la inclusión de terrenos forestales públicos, reservados y también de difícil acceso o baja productividad. También ha servido como base para realizar la Ley de Planificación de Recursos y los Inventarios de GEI de los bosques de EEUU.

De esta forma, los **análisis realizados resultan mucho más eficientes y esclarecedores**, teniendo en cuenta factores de gran importancia que otros métodos obvian. En contraposición, los estudios realizados mediante esta técnica requieren un conocimiento en detalle de la superficie forestal y sus características, tema que dificulta los análisis a la hora de obtener la información necesaria.

Cuantificación y cruce de emisiones frente absorciones de GEI

Como ya se ha indicado, los GEI son un **conjunto de gases de diferente tipo y composición**, y es por ello que cada uno de estos gases afecta de forma muy diferente al problema del cambio climático.

Se precisa de un método para poder estudiar en conjunto el total de emisiones a la atmósfera. Para ello se ha desarrollado el **uso de los índices GWP** (Potencial de Calentamiento Global) y **ODP** (Potencial de destrucción de la capa de Ozono, que tiene valores más significativos en gases F): cuanto mayores sean estos índices, más perjudicial es el gas.

El GWP se calcula teniendo en cuenta:

- La absorción de radiación infrarroja por el gas.
- La ubicación del espectro de absorción de las longitudes de onda.
- La duración del gas en la atmósfera.

Y utiliza la relación entre el forzamiento radiativo de un kilogramo de GEI emitido a la atmósfera y el de un kilogramo de CO₂ (su GWP es 1) durante el mismo periodo de tiempo (actualmente se utiliza un horizonte de 25, 100 o 500 años). Es por ello que **todas las mediciones** (tanto de emisión como de absorción) se basan en **equivalencia de CO₂** y tienen como unidad toneladas de **CO₂eq**.

Para realizar este cálculo en un gas específico se hace uso de la función:

$$\text{CO}_2\text{eq} = \text{MasaGas} * \text{GWP}$$

Los valores de GWP y ODP de los principales GEI son los siguientes:

GEI	GWP (20 años)	GWP (100 años)	ODP
CO₂	1	1	0
Metano (CH₄)	62	23	0
Óxido Nitroso (N₂O)	275	296	0,017

Tabla 2. Índices de equivalencia de CO₂ en GEI.

Como se puede extraer, por ejemplo en el gas metano, el índice desciende de manera notoria con el paso de los años indicando que el gas tiene poca duración en la atmósfera pero siendo mucho más perjudicial

que el CO₂, confirmando lo indicado en apartados anteriores. En el caso del óxido nitroso, se presenta un gas de enorme aportación al cambio climático y muy larga duración, si bien es menos frecuente. También cabe destacar que el vapor de agua (H₂O) no tiene un valor en este índice, pues se considera un gas cuya presencia es mayormente natural.

Una vez indicada la manera de estudiar las emisiones y las absorciones de GEI y la forma de cuantificarlas de modo que se representen con la misma unidad homogénea, el modelo analítico para calcular la compensación total cruzando ambos datos es sencillo:

$$\text{GEI_Totales (CO}_2\text{eq)} = \text{Emisiones_GEI (CO}_2\text{eq)} - \text{Absorciones_GEI (CO}_2\text{eq)}$$

Por tanto, la manera de cruzar los datos de emisiones y absorciones para calcular la eficacia de métodos de absorción se trata de una simple **diferencia entre emisiones y absorciones, medidas en CO₂eq**.

T1.2: Estudio de disponibilidad de datos indicadores en emisión/absorción de GEI

Se han identificado las metodologías existentes para el análisis e inventariado de datos sobre las emisiones y absorciones de los GEI en la atmósfera, aportándose un conocimiento básico sobre las necesidades de cada una de ellas en términos de datos para lograr la mayor eficacia durante el estudio. Analizaremos, durante este apartado, las diferentes **fuentes de datos e indicadores medioambientales** que nos ayudarán a definir los posibles **procesos de recogida y evaluación** de cara al análisis global de un plan de estudio destinado a determinar el estado de la situación en términos medioambientales.

1. Indicadores medioambientales

Los indicadores medioambientales son sistemas de **medición del medio ambiente**, que nos permiten determinar el estado y evolución de una situación o un fenómeno en particular de manera cuantitativa, verificable y objetiva.

A la hora de determinar los posibles indicadores medioambientales para la medición de emisiones y absorciones de GEI aplicados a una situación objetivo, debemos de tener en cuenta cuáles son las áreas de efecto más influyentes a la vez que consideramos los diferentes factores que de manera directa o indirecta forman parte del proceso a estudiar. De este modo, definiremos un **conjunto básico de indicadores medioambientales** generales para el desarrollo de un plan de análisis continuo, evaluable y eficaz en consonancia con los criterios y metodologías utilizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino en la preparación de informes de evaluación ambiental y complementado con la información recogida durante la fase de estudio de mediciones de emisiones y absorciones de GEI.

EMISIONES DE GEI	
Área de actividad	Indicadores
AIRE	Emisiones de gases acidificantes y eutrofizantes.
	Emisiones de gases precursores del ozono troposférico.
	Calidad del aire en áreas urbanas.
	Calidad del aire de fondo regional.
AGROGANADERÍA	Emisiones de gas metano.

	Emisiones de nitrógeno.
	Consumo de fertilizantes inorgánicos por hectárea de superficie fertilizable.
ENERGÍA	Intensidad de las emisiones de CO2 de origen energético.
TRANSPORTE	Emisión de contaminantes a la atmósfera procedentes del transporte.
ABSORCIONES DE GEI	
Área de actividad	Indicadores
AIRE	Cantidad de Radical Hidroxilo (OH) en la troposfera.
AGROGANADERÍA	Superficie de agricultura ecológica.
NATURALEZA Y BIODIVERSIDAD	Superficie de bosques y otras formaciones forestales.
	Defoliación de las masas forestales.
SUELOS	Generación de Metanotrofos en suelos.
	Superficie subterránea.

Tabla 3. Indicadores para medir emisiones y absorciones de GEI.

Este grupo de indicadores ha sido seleccionado teniendo en cuenta criterios de relevancia, disponibilidad y capacidades de interpretabilidad, con el objetivo de generar una **imagen global de** la situación medioambiental teniendo en consideración las diferentes áreas de actividad. Para poder hacer un seguimiento adecuado de estas medidas, haremos una selección de herramientas destinadas a la **extracción de datos** y la elaboración de informes para garantizar la correcta evaluación del estado del medio ambiente de la forma más actualizada, veraz y objetiva posible.

2. Bancos de datos abiertos de emisiones de GEI

Bases de datos de IPCC

El centro de distribución de datos (DDC por sus siglas en inglés) y la Emission Factor Database (EFDB) presentan las bases de datos propiedad del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), un conjunto de expertos a nivel mundial.

IPCC ha presentado multitud de informes sobre fenómenos extremos, desastres, energías renovables, impactos del calentamiento global y de las emisiones de GEI; si bien lo relevante en este contexto, para desarrollar la presente metodología, son precisamente los datos que dan origen a estos informes. Es por ello que se estudian como alternativa las bases de datos del IPCC, teniendo en cuenta que el vapor de agua (H2O) no está cubierto por sus directrices al ser considerado causante de un efecto invernadero mayormente natural.

Data Distribution Centre (DDC)

Por un lado, la base de datos DDC proporciona **datos climáticos, socioeconómicos y ambientales** desde el pasado, pasando por la actualidad e incluyendo escenarios proyectados para el futuro. Adicionalmente, se proporcionan pautas técnicas para una correcta selección de los tipos de datos.

Emission Factor Database (EFDB)

Por otro lado, la base de datos EFDB es propiedad del grupo de trabajo sobre Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (TFI) y respaldada por el programa nacional de inventarios de GEI (NGGIP). Esta base de datos pretende ser una **biblioteca de datos** donde encontrar **factores de emisión** y otros parámetros respaldados por documentación y referencias técnicas que puedan ser utilizados para estimar emisiones y absorciones de GEI. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta base de datos no busca ser aprobada por el proceso de IPCC: varias revisiones de expertos que buscan la metodología más óptima que debe ser transparente y documentada. Así, esta biblioteca tiene como objetivo obtener mayor difusión manteniéndose constantemente actualizada con nuevos datos para ser utilizada por compiladores del inventario **bajo su propia responsabilidad**.

Base Carbone (ADEME)

La base de datos pública Base Carbone ofrece toda la información necesaria para la **producción de informes** de emisiones de gases de efecto invernadero. Administrada por la organización francesa ADAME y con el objetivo de ayudar en las tareas de evaluación de GEI para empresas, ofrece una base de datos en constante crecimiento gracias a la colaboración de diversos actores en el ámbito de la transición ecológica francesa. Los contenidos de esta base de datos están enfocados al análisis de una gran diversidad de actividades de carácter cotidiano para conocer su impacto medioambiental en términos de gases desprendidos durante el proceso. De este modo, brinda la oportunidad de estudiar cualquier proceso y desglosarlo con el objetivo de determinar su impacto medioambiental y analizar los pasos necesarios para conseguir una reducción en la generación de GEI.

The Global Carbon Project

El proyecto de investigación a nivel mundial Global Carbon Project (GCP), se forma con el objetivo de sentar las bases del conocimiento sobre el análisis de GEI y dar soporte a las diferentes organizaciones para el desarrollo de contramedidas para disminuir las emisiones totales en el ámbito urbano y regional.

El GCP, en colaboración con expertos pertenecientes a diversos programas estratégicos como el World Climate Research Programme (WCRP), el International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), el International Human Dimensions Programme (IHDP) y Diversitas, forman el denominado Earth System Science Partnership (ESSP) con el objetivo de **cuantificar y analizar las causas de la producción de los GEI** en las diversas áreas de impacto, a la vez que ayuda a definir el ciclo de vida del carbono y sus repercusiones. Como punto de acceso a los avances, definiciones y análisis desarrollados por el grupo del GCP, se tienen a libre disposición dos herramientas clave para el análisis de la situación actual y el impacto de los GEI a lo largo del tiempo: *Global Carbon Budget* y *Global Carbon Atlas*.

En primer lugar, Global Carbon Budget es una **publicación anual** sobre los avances de los GEI en las diferentes áreas de impacto. Esta publicación desarrollada en colaboración con diferentes grupos de investigación a lo largo del mundo, incluye un análisis detallado de una variedad de datasets sobre el nivel de incremento de los gases, el impacto de las diferentes medidas de reducción de emisiones, el análisis de las principales fuentes de emisión, etc.

Por otro lado, Global Carbon Atlas presenta una herramienta de **visualización en línea** del ciclo de vida de las emisiones de carbono a lo largo de los años. Este Atlas se compone principalmente de 3 componentes definidos con la intención de cubrir los objetivos y las necesidades de múltiples grupos de usuarios con perfiles diversos.

El módulo OUTREACH, está dirigido a ofrecer información temporal, a modo de **histograma**, sobre las emisiones de GEI. Esta herramienta sirve como experiencia educativa, acercando al público en general las observaciones y modelos de datos más robustos y actualizados de la ciencia del cambio climático.

El módulo EMISSIONS, ofrece las herramientas para la exploración y **descarga de datos sobre las emisiones** de GEI de diversas fuentes. Gracias a una base de datos con diferentes niveles de detalle (nivel mundial, regional y nacional), ofrece la posibilidad de comparar, clasificar y visualizar los avances en materia de emisiones a lo largo del tiempo.

El módulo RESEARCH, nos proporciona las herramientas necesarias para la **creación de mapas** personalizados y series temporales a partir de conjuntos de datos colaborativos, provenientes de diversas fuentes en el ámbito de la investigación medioambiental. Entre estas fuentes, nos encontramos con: modelos de estudio sobre el uso de los combustibles fósiles y la superficie del suelo, modelos de estudio sobre la composición atmosférica, modelos de absorción a partir de datos provenientes del estudio de la superficie de los suelos, y modelos de estudio sobre las superficies oceánicas.

3. Bancos abiertos de imágenes satélite de absorción de GEI

Copernicus

Copernicus es el programa de **observación de la Tierra** y su medio ambiente coordinado y gestionado por la **Comisión Europea**, que ofrece un amplio abanico de servicios de acceso gratuito y abierto a la información. Los servicios de Copernicus recogen, tratan y analizan información proveniente de multitud de fuentes de datos de fuentes de satélites propios (las familias Sentinel), comerciales y públicos, además de diversos sistemas de recogida de información in situ. De este modo, se ofrece información destinada a facilitar el seguimiento de los cambios, las comparaciones y la búsqueda de información en las diferentes regiones a examinar.

Copernicus cuenta con seis líneas temáticas de servicios destinados a resolver las peculiaridades de cada uno de los ámbitos de uso y ofrecer valor añadido a los datos almacenados:



El servicio de Vigilancia atmosférica proporciona información sobre la composición atmosférica centrada en las áreas de: calidad del aire, capa de ozono, emisiones, radiación solar y forzamiento climático, y se encarga de definir la situación actual, formular predicciones y analizar registros pasados para la generación de datos retrospectivos.



El servicio de Vigilancia marina proporciona información sobre el estado físico y biogeoquímico de los ecosistemas oceánicos y marinos. Dichas observaciones dan lugar a análisis relacionados con la seguridad, los recursos marinos, las costas y la meteorología y su impacto en el medio.



El servicio de Vigilancia terrestre proporciona información geográfica con el objetivo de ofrecer servicios en los diversos ámbitos de aplicación dentro de los que se encuentran: la ordenación territorial y urbana, la gestión forestal y del agua, la agricultura y seguridad alimentaria, la conservación y restauración de la naturaleza, desarrollo rural, la contabilidad ecosistémica, y la mitigación/adaptación al cambio climático entre otros.

Con el objetivo de cubrir los diferentes ámbitos de aplicación, se ofrecen cinco componentes principales destinados a la implantación del servicio por parte de los principales actores en el ámbito de la Comunidad Económica Europea, entre los que se encuentran: el seguimiento sistemático del estado y la evolución de la superficie terrestre, el análisis de la ocupación y el uso del suelo en un contexto paneuropeo y mundial, la cartografía detallada de “puntos calientes” y la generación de mosaicos de imágenes satélite y datos de referencia de alta calidad.



El servicio de Cambio climático proporciona información fidedigna sobre la situación climática terrestre presente, pasada y futura, con la misión de realizar un apoyo a las políticas de adaptación y mitigación europeas sobre el cambio climático.



El servicio de Seguridad ofrece herramientas para la prevención, preparación y respuesta ante crisis políticas mediante la vigilancia activa de fronteras, la vigilancia marítima y el apoyo a la acción exterior de la Unión Europea con el objetivo de garantizar la promoción de condiciones de estabilidad para el desarrollo humano, económico, de derechos humanos, de la democracia y las libertades fundamentales.



El servicio de Emergencias participa en la gestión de catástrofes naturales, situaciones de emergencia y crisis humanitarias, ofreciendo a todos los agentes responsables información geoespacial puntual y precisa sobre datos de teledetección por satélite completada mediante fuentes de datos in situ.

GHGSat

GHGSat es una empresa líder en la **detección remota de gases de efecto invernadero** mediante la visión desde el espacio, facilitando la obtención de datos globales sobre emisiones de gases y ayudando a la toma de decisiones. En el caso concreto de la presente metodología SLOW, se presenta interesante la obtención de imágenes del satélite GHGSat Pulse. Esta herramienta de visualización se aprovecha de los datos obtenidos a través del instrumento de monitorización Sentinel-5P TROPOMI, para ofrecer **imágenes actualizadas semanalmente sobre la concentración de CH₄** (gas metano) en nuestro planeta. Al igual que el resto de satélites de la familia Sentinel, los datos son accesibles a través del programa europeo de observación, Copernicus.

Como ya se ha destacado anteriormente, el gas metano es una de las causas en gran medida del cambio climático y es emitido mayormente por el sector agroganadero, por ello resulta interesante hacer un estudio focalizado en las emisiones de este tipo de gases de cara a su utilización en la metodología SLOW. La visualización de las imágenes del satélite nos permitirá identificar los puntos de mayor concentración de metano y, con el paso del tiempo y gracias a la recolección de datos, los efectos de las técnicas de absorción del mismo.

Plan Nacional de Observación del Territorio

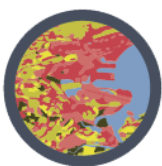
El Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), llevado a cabo por el Consejo Superior Geográfico Español, surge con el fin de impulsar la coordinación en la obtención y difusión de **información geográfica dentro del territorio español**. Con este objetivo, el PNOT define la estructura de tres planes nacionales destinados a cubrir y coordinar las diferentes áreas de información territorial:



El Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), tiene como objetivo la obtención de ortofotografías aéreas digitales en color y con resoluciones de entre 25 y 50 cm y modelos digitales de elevaciones de alta precisión de todo el territorio español. Este proyecto cooperativo entre la Administración General del Estado y las Comunidades Autónomas, cuenta además con el proyecto PNOA-LiDAR, destinado a la cobertura del territorio mediante mapas de nubes de puntos georeferenciados y atributos de clasificación y color con densidades de entre 0.5 y 4 puntos/m².



El Plan Nacional de Teledetección (PNT), tiene como objetivo la definición y el análisis de los procesos productivos de imágenes satélite para la cobertura del territorio nacional de alta, media y baja resolución. Los datos obtenidos provienen de los satélites Sentinel y forman parte del programa definido por la Comisión Europea para el desarrollo del programa Copernicus.



El Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE), nos ofrece una base de datos de Ocupación del Suelo para todo el territorio nacional a escala 1:25.000. Generado de manera descentralizada y coordinada por las distintas administraciones autonómicas, el programa SIOSE tiene como objetivo la generación de una herramienta de análisis, diagnóstico y pronóstico de los territorios en base a la ocupación del suelo y la definición de parámetros para el análisis de los estados pasados, presentes y futuros de cualquier sistema territorial, de naturaleza natural o antrópica.

T1.3: Diseño de metodología de estimación de GEI

Esta tarea supone un proceso iterativo de definición y optimización de la metodología SLOW a proponer, evolucionando con la nueva información extraída a medida que se realizan avances en el proyecto. En el periodo correspondiente a 2021 se ha iniciado esta tarea, habiendo desarrollado aproximadamente una tercera parte de su trabajo asociado.

En primer lugar, se ha identificado la **necesidad** de esta metodología, al exponer que el problema del **cambio climático**, causado en gran medida por la emisión de **gases de efecto invernadero** debida a actividades antropogénicas (entre las que se encuentra como un gran responsable el **sector agroganadero**), sigue suponiendo un enorme reto para la humanidad y precisa de constante estudio para intentar paliar sus consecuencias.

Las técnicas para el cálculo de emisiones son extensas y permiten realizar inventariados, de forma estándar, de los gases de efecto invernadero que las empresas o países emiten a la atmósfera. Esto permite realizar un fuerte control sobre las emisiones consiguiendo reducirlas con éxito pero, lamentablemente, de forma insuficiente. Reducir las emisiones resulta clave, pero no es más importante que conseguir mitigarlas o absorberlas. En el caso de las absorciones de GEI nos encontramos con procesos mayoritariamente naturales que son realmente eficaces pero insuficientes para prevenir por sí solos el

cambio climático gracias a los cambios que el ser humano realiza en el entorno y a los altos niveles de emisiones.

Dentro del ámbito de la recolección de datos se ha podido observar que en la actualidad, por un lado, existen **diversas fuentes de información** extensas y fiables para recolectar datos sobre la emisión de gases de efecto invernadero en todo el mundo y en todos los sectores de actividad. Pero, por otro lado, nos encontramos con la **nula integración de estos datos** entre sí y con menos formas posibles de realizar cálculos de absorciones, que se basan en estimaciones del entorno o en cálculos de emisiones en momentos determinados.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se llega a la conclusión que los resultados de los métodos de absorción se obtienen mediante un análisis pobre en cantidad y calidad de datos. Además, todas las mediciones de absorciones de GEI se centran en el cálculo de zonas verdes como bosques, pero ninguno se centra en la medición específica del sector agroganadero. Es por esto que realizar y desarrollar la metodología SLOW resulta clave para conseguir **estandarizar un método de estimación de emisiones y absorciones en el ámbito agroganadero** que permita, gracias a la tecnología y a un entorno hipersensorizado, innovar en este campo consultando y analizando una alta cantidad de datos provenientes de diversas fuentes de datos simultáneamente, con el fin de llevar a cabo una toma de decisiones enfocada a amortiguar el gran problema del cambio climático para prevenir consecuencias potencialmente catastróficas.

Con los avances realizados en el marco de esta tarea T1.3 se ha estudiado la aplicación de las metodologías de estimación de GEI en el ámbito de la agroganadería, detectando que, a pesar de que existen multitud de metodologías destinadas a resolver los problemas de cálculo de las capacidades de absorción de GEI por parte de bosques y zonas verdes, las propuestas más extendidas centran sus esfuerzos en la generalización y la utilización de herramientas existentes y accesibles a nivel global. Dicho enfoque genera dos vertientes principales, la primera de ellas centrada en la extracción de datos actualizados en tiempo real y de baja calidad, en contraposición, la segunda se centra en el uso de datos desactualizados de mayor resolución. Dadas las limitaciones provenientes del uso de cualquiera de las dos vertientes más utilizadas, se producen **resultados poco esclarecedores** fruto de un análisis pobre en cantidad o calidad de los datos. Por ello, se han definido, en una primera iteración, las **bases generales de la metodología** de estimación de GEI propuesta por SLOW, atendiendo a los factores que intervienen, sistemas de medición y cálculo de resultados. Asimismo, se ha realizado un **análisis preliminar de necesidades y estrategias de mejora** para incorporarlas en la metodología diseñada, con el fin de generar una solución innovadora, sostenible y escalable, que facilite la obtención de resultados objetivos, estandarizados y verificables.

Continuar el análisis de necesidades y estrategias de mejora, refinar la metodología básica propuesta, así como identificar un conjunto de recomendaciones para la toma de decisiones basadas en el resultado derivado del cruce entre emisiones y absorciones, son acciones que se llevarán a cabo durante las siguientes anualidades para completar esta tarea.

Bloque 2: Herramientas tecnológicas

Este bloque da un marco para los desarrollos tecnológicos que resultarán en las herramientas de soporte para la metodología definida, suponiendo un punto de entrada para usuarios que quieran consultar la información y los resultados obtenidos con ella de una forma amigable y accesible, a través de interfaces de visualización avanzada. Así, este bloque se corresponde con los paquetes de trabajo PT2, PT3, PT4 y PT5; si bien son los dos primeros los que presentan avances según la planificación planteada hasta la fecha. Con ello, se ha comenzado la *Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos* (PT2) en pos de alcanzar los objetivos específicos OE2 “detección y evaluación de fuentes de datos disponibles” y OE3

“diseño de protocolo para la captación de datos heterogéneos”. Estos datos alimentarán la *Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos* a diseñar (PT3), relacionada directamente también con el OE3, así como con el OE4 de “exploración de técnicas para la integración y el procesamiento avanzado de datos”.

De esta forma, los trabajos de 2021 se organizan en torno a cuatro tareas correspondientes a las investigaciones iniciales para cada uno de estos dos PTs, las cuales se continuarán durante las siguientes anualidades. Ambos paquetes de trabajo se completan con tareas que iniciarán en enero de 2022.

PT2: Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos

T2.1: Análisis de sensores en el dominio de GEI

T2.2: Análisis de fuentes públicas de imágenes por satélite

T2.3: Diseño y despliegue de prototipos de sensores de GEI (inicio 2022)

T2.4: Diseño de algoritmos de procesamiento de imágenes por satélite (inicio 2022)

PT3: Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos

T3.1: Diseño de la capa de almacenamiento

T3.2: Diseño de la capa de procesamiento escalable

T3.3: Diseño de interfaces y capa de interoperabilidad (inicio 2022)

A continuación, se sintetizan las acciones desarrolladas en el marco de estas tareas, si bien los resultados finales serán entregados en 2022 y 2023, una vez sean completadas según la planificación inicial.

T2.1: Análisis de sensores en el dominio de GEI

Con esta tarea se pretenden estudiar las distintas alternativas disponibles para la hipersensorización del entorno, en cuanto a sensores y componentes para medición de composición del aire y emisiones de GEI, atendiendo a los parámetros que se han identificado claves en la metodología propuesta (dióxido de carbono y metano). El objetivo es realizar una selección de aquellos dispositivos compatibles con los planteamientos de SLOW. Durante el periodo de 2021 se ha acometido aproximadamente 2/3 de su desarrollo, revisándose en primer lugar las ventajas e inconvenientes de las distintas alternativas en cuanto a estaciones de monitorización frente a redes sensóricas de bajo coste, hasta alcanzar una propuesta adecuada para la metodología planteada.

Estaciones de monitorización

En la actualidad, la adquisición de datos asociados a la calidad del aire atmosférico se realiza, de forma generalizada, mediante estaciones fijas distribuidas de manera dispersa por el territorio. Estas estaciones están integradas por sistemas de monitorización de la calidad del aire que emplean equipamiento muy especializado con el objetivo de lograr mediciones de alta fiabilidad. Las medidas se realizan de forma periódica y los datos deben ser administrados por un operador de la estación, aunque muchas soluciones en la actualidad ya pueden realizarse de forma online y las estaciones están interconectadas con sistemas de supervisión y control (normalmente mediante redes 3G/4G).

Sin embargo, y pese a la fiabilidad de las medidas, la solución actual presenta ciertos inconvenientes. Una de las principales desventajas es la dificultad para escalar adecuadamente la solución con el objetivo de cubrir más terreno o aumentar la resolución espacial de las medidas. El equipamiento que se emplea en estas estaciones se distingue por ser instrumentación muy especializada y precisa, y esto es a costa de tener un consumo energético y un coste económico muy elevado. Además, son sistemas que requieren de un mantenimiento y control periódico llevado a cabo por personal muy especializado; si bien se debe

destacar que se está teniendo a generando soluciones más autónomas que las actuales, por ejemplo, mediante el uso de algoritmos predictivos para conocer las necesidades reales de mantenimiento.

Los **elevados costes asociados**, además de otros aspectos como la **falta de portabilidad** o la necesidad de personal especializado para su operación, suponen un problema para su amplia adaptación e integración en el territorio, ya que sólo puede ser promovido por agentes con la capacidad para instalar y mantener este tipo de estaciones.

Redes de sensores de bajo coste

La sensorización de bajo coste, enmarcada en el paradigma del IoT, está ganando relevancia en la actualidad como una alternativa a este tipo de instalaciones gracias a una gran promesa de resolución espacial y temporal, así como una fácil implementación sobre el territorio. Realizar una supervisión y control de la presencia de agentes contaminantes en la atmósfera mediante el uso de dispositivos de **menor consumo energético y un mayor grado de autonomía** podría reducir en gran medida el impacto de los problemas anteriormente descritos. Esta aproximación sugiere un despliegue de un mayor número de unidades sensoriales que las que contemplan las metodologías actuales, generando una **red hiper-sensorizada** que permita una lectura de mayor resolución espacial a lo largo de grandes superficies del territorio. Por otro lado, los sensores que se emplean en este tipo de dispositivos se basan en principios de funcionamiento con tiempos de adquisición más bajos. Este aspecto, en conjunción con el uso de tecnologías para la comunicación continua entre el sensor y el sistema de control, implicaría actualizaciones en tiempo real del estado de la calidad del aire, lo que permitiría la detección temprana de eventos contaminantes, entre otras posibilidades.

Por lo tanto, el uso de dispositivos interconectados de bajo coste permite un control más individualizado y representativo que las soluciones actuales. Permite también realizar un análisis más dinámico de la evolución de agentes contaminantes en la atmósfera, conociendo así tendencias o movimientos de masas de gases a lo largo del territorio. Esta nueva topología de sistemas promueve una posible alternativa al paradigma actual con el objetivo tanto de proporcionar una **mayor resolución espacial y temporal**, como una **mayor accesibilidad** para los usuarios.

Sin embargo, su uso en la actualidad es **todavía difícil de implementar** debido a la insuficiente fiabilidad de las medidas o el error de deriva que se produce en los sensores más comunes. Existen varios casos de uso en la actualidad así como soluciones comerciales para la detección temprana de fugas de gases o la evaluación continua de la calidad del aire en sistemas cerrados (o al menos cerrados en cierta medida). Es común ver este tipo de soluciones en distintos sectores como en la de monitorización del estado de confort en oficinas, monitorización de la calidad del aire en zonas urbanas, control en procesos industriales o, incluso, en el sector agroalimentario para la monitorización de emisiones del ganado, si bien suele ser para el caso de ganadería intensiva. Sin embargo, su uso para la monitorización de la calidad del aire en espacios no controlados parece desaconsejado hasta la fecha, principalmente por la falta de resolución y precisión de los sensores valorados. Tras haber señalado esta cuestión, es importante destacar también la posible coexistencia de ambas metodologías, integrando datos de alta resolución espacial y temporal con mediciones de alta fiabilidad.

Sistema sensor para propuesta SLOW

El objetivo general perseguido es diseñar una metodología analítica de estimación de GEI mediante la investigación y aplicación de tecnologías avanzadas en un entorno hiper-sensorizado bajo estándares W3C. Si bien, tal y cómo se indica previamente, los métodos actuales para realizar las mediciones a bajo coste aún se encuentran en una fase temprana de desarrollo, las tecnologías existentes de procesamiento y comunicación habilitan la posibilidad de generar un modelo de infraestructura estandarizada con un alto

grado de sostenibilidad y escalabilidad. Por ello, en las primeras fases de este nuevo paradigma se pueden realizar compromisos en la parte sensórica ya que, en lo sucesivo y siempre que se sigan los estándares establecidos con el proyecto, se podrá integrar fácilmente sensores más avanzados en los sistemas de monitorización.

A modo demostrativo/valorativo se pretende generar un **prototipo funcional** a partir de las herramientas tecnológicas que se proponen como complemento a esta metodología. Para ello, es necesario realizar un análisis de varios sensores y soluciones disponibles en el mercado, sus principios de funcionamiento y componentes necesarios para realizar un control de los mismos, teniendo siempre en cuenta los objetivos de bajo consumo y conectividad que requieren la topología estudiada.

Ya que con SLOW no se pretende generar una solución específica, sino que se trata de establecer una serie de estrategias y metodologías, no se acotará el diseño de la arquitectura en torno a un tipo específico de protocolos o dispositivos. Se buscarán aquellos métodos que permitan la coexistencia de diversos agentes, aunque empleen protocolos o tecnologías diferentes entre sí.

Recapitulando los puntos anteriores, se establece finalmente que para SLOW se busca plantear un **diseño o arquitectura** que cumpla los **siguientes objetivos**:

- Distribución de varios nodos sensores de GEI con una densidad espacial mayor a la de las actuales estaciones de medición a lo largo del terreno analizado.
- Accesibilidad para su adquisición e instalación. Debe seguir buenas prácticas para el autodescubrimiento de nuevos nodos, o que no sea necesario reescribir el firmware cada vez que se debe instalar un nuevo dispositivo.
- Precio unitario por dispositivo sensor inferior al de las actuales estaciones de monitorización para evitar una barrera económica elevada al escalar la solución a un número mayor de nodos.
- Mantenimiento reducido para evitar un desplazamiento periódico a los nodos sensores, por ejemplo, para cambiar las baterías o realizar alguna otra actividad de mantenimiento como limpieza de filtros, calibración de señales... Esto se puede relacionar directamente con el consumo energético, que debe ser bajo, o incluso extraer energía del entorno mediante células fotovoltaicas, por ejemplo.
- Uso de tecnologías para la telecomunicación de largo alcance con las que cubrir grandes áreas del territorio.

Instrumentación para medir índices de GEI

A partir de los análisis realizados en etapas anteriores (es decir, los estudios realizados durante el paquete de trabajo PT1) se ha concluido que los gases de producción natural que componen la lista de los considerados GEI son, principalmente: el dióxido de carbono (CO₂); el vapor de agua (H₂O); el óxido nitroso (N₂O); el metano (CH₄); el ozono (O₃); halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromo; y los gases fluorados, que son los usados para refrigerar o para los aerosoles y que también tienen impacto en la capa de ozono.

Para el caso que nos ocupa, el sector agroalimentario, se ha concluido que los índices más relevantes son el **dióxido de carbono (CO₂)** y el **metano (CH₄)**, ya que son los dos componentes que más impacto generan en el efecto invernadero y que más presencia tienen en este tipo de actividades. No obstante, la adición de otros índices también podrá ser tomada en cuenta, pues siguen aportando un gran valor añadido a las anteriores mediciones.

Una vez analizadas las alternativas disponibles, se puede observar una presencia mayoritaria de sensores de CO₂ en el mercado, ya que es el GEI dominante y que más refleja el aumento de la contaminación

atmosférica, con una gran importancia para el control de la calidad de aire en entornos cerrados. Llegados a este punto, también es necesario discernir entre sensores empleados para realizar un seguimiento de la calidad de aire de aquellos empleados para analizar específicamente gases de efecto invernadero, ya que parece haber mucha más información sobre los primeros. Este grupo incluye también, por ejemplo, a los sensores de partículas. El motivo principal de esto es el caso de uso para el que se suele emplear este tipo de sensores. En la actualidad, alimentado sobre todo por la rápida expansión del Covid-19, existe un gran interés por el control de calidad del aire en entornos cerrados o en zonas urbanas para conocer su impacto en la salud de las personas, un problema de gran relevancia con los conocimientos que tenemos actualmente sobre los efectos de la contaminación atmosférica.

Por ello, se ha realizado un estudio de distintos **principios analíticos** para la medición de concentraciones de gases en el aire, incluyendo sensores NDIR, PID, MOS o químico-resistivos, que ha permitido elaborar un catálogo de **sensores** existentes en el mercado que se emplean para lectura de GEI, detectando finalmente que las resoluciones y precisiones manejadas son inferiores a las necesarias como para poder hacer una evaluación correcta de la calidad del aire en espacios rurales y abiertos. Todos los casos de uso que se han visto pertenecen a otros sectores y a otros dominios: control de procesos industriales, detección temprana de fugas de gases contaminantes, confort en espacios cerrados o monitorización del aire en entornos urbanos.

Sin embargo, son especialmente interesantes los sensores basados en **principios electroquímicos** para la detección de gases específicos. Estos son los que más cerca se han visto del caso de la monitorización de la calidad del aire en espacios abiertos, localizándolos en sectores en el agroalimentario o en la monitorización de la cercanía de carreteras. Será necesario hacer pruebas con estos sensores para comprobar si realmente pueden realizar medidas con la suficiente exactitud como para realizar una valoración adecuada de la calidad del aire, por lo que se priorizará la adquisición de los mismos durante la fase de prototipado del sistema. Aún así, hay que tener en cuenta sus otros inconvenientes, como la dificultad para la adaptación de la señal y un cierto grado de mantenimiento, ya que suelen tener una vida útil aproximada de uno a dos años.

Placas de desarrollo

A la hora de emplear los sensores de GEI catalogados, se necesita realizar una **evaluación de las placas de desarrollo** compatibles. En cuanto a las comunicaciones, uno de los métodos que mejor se adapta a las necesidades del problema para establecer un sistema de interconexión entre los distintos nodos del sistema consistiría en crear una **red LPWAN** (*Low Power Wide Area Network*). Este tipo de redes son óptimas para sensores y dispositivos que requieran de una baja disponibilidad y un amplio rango de acción y despliegue. También son adecuadas para sensores con bajas capacidades energéticas, ya sea por una alimentación por baterías, pilas o solar. Existen en el mercado distintas soluciones que se adaptan a este tipo de red, como por ejemplo SigFox, Lo-Ra o 6LoWPAN.

En estas etapas iniciales no se buscará una solución de desarrollo personalizada. Se buscan dispositivos flexibles, de propósito general, que nos permita tener un nivel de personalización y pruebas más amplio, permitiéndonos desarrollar un protocolo y un conjunto de herramientas con más opciones que las de una solución ad-hoc. En este sentido, el uso de **placas de desarrollo comerciales** es lo más adecuado, ya que podremos usar múltiples sensores en una sola placa, probar distintos protocolos y además disponen de múltiples interfaces y entradas/salidas para conectar y leer una gran variedad de sensores.

Así, se elaboró un catálogo de placas de desarrollo disponibles en el mercado considerando alternativas populares, con especial énfasis en las características más relevantes en relación con las necesidades justificadas en el marco propuesto por SLOW. Todas las soluciones valoradas tienen unas prestaciones que se adecúan a un gran abanico de posibles sensores, así como de interfaces de red. Sin embargo, se debe

destacar que, de entre las alternativas valoradas, la que puede resultar más adecuada para una arquitectura como la propuesta es el Arduino MKR WAN 1300. El ecosistema arduino facilita en gran medida los desarrollos y así como la presencia de una comunidad de desarrolladores muy activa.

Conclusiones

Del estudio realizado se pudo extraer que los sensores valorados no son idóneos para una monitorización continua del aire en entornos rurales, al menos no en su estado de desarrollo actual. Sin embargo, la tendencia indica que existe un gran interés por generar sensores de bajo precio y consumo, y el estado de la técnica muestra los avances que se están realizando en este área. Por lo tanto, todo parece indicar que se pueden esperar avances en un futuro próximo, y la adecuación de los mismos podrá ser revisada.

Además, el objetivo perseguido por SLOW no se concentra única y exclusivamente en la medición de estas variables, si no que contempla otras cuestiones (la generación de un ecosistema, protocolos de comunicación, visualización inmersiva...) que pueden verse igualmente respaldadas por los dispositivos estudiados. Aunque los estudiados hasta la fecha no se adaptan completamente a las necesidades del problema, sobre todo teniendo en cuenta el grado de fiabilidad de las medidas realizadas, siguen permitiendo una validación de la tecnología con el fin de generar una metodología funcional y estandarizada para la medición de GEI en entornos dedicados a la agroganadería. Además, esta capa podrá ser actualizada una vez exista la sensórica adecuada para este tipo de variables, sin necesidad de modificar otros aspectos de la metodología. No se debe, sin embargo, descartar la adopción de una solución comercial para el desarrollo del prototipo de la arquitectura, cuyo análisis más detallado se llevará a cabo durante la segunda anualidad del proyecto, continuando la tarea según el plan de trabajo propuesto.

T2.2: Análisis de fuentes públicas de imágenes por satélite

Las observaciones satelitales brindan información valiosa sobre los gases de efecto invernadero y sus emisiones, que pretenden utilizarse de forma complementaria a la información recogida por sensórica. Desde el lanzamiento de los primeros satélites con este cometido a principios de los años 2000, las concentraciones en la atmósfera promediadas en columna de los principales gases de efecto invernadero, en concreto dióxido de carbono y metano, se han medido de forma remota desde el espacio. Estas mediciones sirven de gran ayuda para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero de los incendios, estimar la distribución espacial del consumo de energía y detectar patrones y tendencias a gran escala en la productividad de los ecosistemas.

Esta tarea T2.2 plantea la búsqueda de fuentes de imágenes satelitales de potencial aplicación en el dominio del estudio de los GEI, identificando técnicas o algoritmos para extracción de datos de utilidad sobre las mismas. Durante 2021 se acometen aproximadamente 2/3 de su desarrollo, realizándose un estudio de las fuentes de datos y tecnologías disponibles de observación de GEI en la Tierra; comenzando por una revisión sobre el **estado de la tecnología** relativa a obtención de imágenes satelitales para la observación y el estudio del efecto de los GEI.

Estado de la tecnología

En comparación con las mediciones terrestres, la principal ventaja de las mediciones satelitales es su capacidad para proporcionar una **cobertura global**. Las mediciones satelitales obtienen las concentraciones atmosféricas de los gases basándose en las propiedades de éstos para absorber la radiación electromagnética a determinadas longitudes de onda. Principalmente se utilizan instrumentos que miden la radiación solar que se refleja en la superficie de la Tierra, aunque a veces también se mide la radiación emitida por la Tierra o por los láseres a bordo del satélite. Estos instrumentos que miden la radiación a longitudes de onda específicas se conocen como **espectrómetros**.

Los espectrómetros de satélites utilizan varias longitudes de onda para medir el **dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄)** según sus espectros de absorción. Los satélites que observan longitudes de onda del infrarrojo cercano más cortas son sensibles a las concentraciones de CO₂ cerca de la superficie y, por tanto, han demostrado ser muy útiles para analizar las emisiones de este gas en la misma. También, se han utilizado otros satélites para detectar concentraciones de CO₂ en la troposfera media, aproximadamente entre 6 y 11 km sobre la superficie de la Tierra. Para ello se utilizan longitudes de onda infrarrojas térmicas más largas.

La abundancia de dióxido de carbono en la superficie terrestre se mide mediante lo que se denomina el **CO₂ promediado en columna**, que es el promedio de concentración de CO₂ dentro de una columna vertical desde la superficie de la Tierra hasta la parte superior de la atmósfera. Esta medida se realiza calculando la absorción en tres bandas diferentes de longitud de onda del infrarrojo cercano, que son las bandas de absorción débil y fuerte de CO₂ en la vecindad de 1,58 y 2,06 μm , respectivamente, y la banda A del oxígeno molecular (O₂) en la vecindad de 0,76 μm .

La absorción en la banda débil de CO₂ a 1,58 μm permite medir el CO₂ promedio en columna ya que en esta longitud de onda no existe prácticamente absorción de otros gases atmosféricos. Sin embargo, esta absorción puede verse afectada por variaciones en la presión superficial debido a la topografía o a las condiciones climáticas locales, como la presencia de nubes o aerosoles. Para tener en cuenta estas variaciones en la absorción debidas a la presión superficial y para poder detectar la **presencia de nubes**, se utilizan espectros de absorción en la banda A de O₂ a 0,76 μm . Las concentraciones de O₂ atmosférico son constantes y, por lo tanto, los espectros de absorción en la banda A de O₂ se pueden utilizar para derivar la presión superficial y los efectos de la dispersión por nubes y aerosoles. Por último, las observaciones en la banda de fuerte absorción de CO₂ (a 2,06 μm) se utilizan para restringir aún más los impactos de los aerosoles en las estimaciones de CO₂ de columna completa, ya que la absorción en esta banda es muy sensible a la presencia de aerosoles.

En cuanto a las observaciones de la **concentración de metano en columna**, los métodos son similares y se basan en los mismos principios que se han explicado para la medición de dióxido de carbono. En este caso, las mediciones se realizan en base a la absorción de CH₄ de longitudes de onda cercanas a 1,67 μm .

En general, para realizar mediciones fiables de la concentración atmosférica de CO₂ y CH₄ se deben utilizar **solo las observaciones sin presencia de nubes**. Por esta razón, los satélites que están diseñados para medir las concentraciones de GEI en la atmósfera realizan mediciones simultáneas para la **detección de nubes junto con el espectrómetro de CO₂ y CH₄**. De esta forma es posible identificar y descartar las observaciones afectadas por este fenómeno. Debido a esto, las regiones frecuentemente nubladas, como los trópicos, tienden a tener una cobertura más pobre que las zonas más despejadas.

Para realizar estas mediciones, el instrumento a bordo del satélite se configura en el modo de visualización *nadir*. Esto significa que el instrumento apunta hacia la superficie, midiendo la absorción de la luz solar reflejada en la columna atmosférica directamente debajo del satélite. Debido a que las mediciones se basan en la luz solar reflejada, las mediciones *nadir* no se pueden realizar sobre superficies oscuras, como el océano, ni durante la noche o en latitudes altas durante los meses de invierno. Una opción para solucionar este problema es utilizar un modo de visualización alternativo, denominado el modo de *destello*, en el que el instrumento se inclina para apuntar a un punto de destello brillante en la superficie de la Tierra donde se produce el reflejo especular de la radiación solar.

La mayoría de satélites actuales que miden CO₂ y CH₄ orbitan a unos 600 km de altitud y pasan cerca de los polos de la Tierra. A medida que la Tierra gira debajo del satélite, por cada vuelta que hace el satélite sobre la superficie, se desplaza en longitud con respecto a la vuelta anterior, y por tanto es necesario realizar calibraciones y correcciones. El ancho de la superficie de la Tierra observado por el satélite se conoce como franja. Una huella se refiere al área de una medición individual dentro de la franja. Otro

posible enfoque de observación se basa en **satélites geoestacionarios**, que orbitan alrededor de la Tierra a unos 36.000 km de altitud, de modo que su período orbital está sincronizado con la rotación de la Tierra y permanecen a la vista de una **región en particular**. Los satélites geoestacionarios ofrecen múltiples mediciones al día y son particularmente útiles para observar áreas urbanas.

Dado que las propiedades de los instrumentos pueden cambiar y que las características orbitales del satélite pueden variar con el tiempo, cuando se lanza un satélite, sus medidores deben calibrarse regularmente para garantizar que proporcionen mediciones precisas y consistentes durante la vida útil de la misión. La Red TCCON (*Total Column Carbon Observing Network*) es un sistema de espectrómetros basados en la transformada de Fourier situados en la superficie de la Tierra que proporcionan mediciones precisas de CO₂, CH₄ y otros gases en columna y cuyo propósito principal es validar las observaciones de los satélites. Las lecturas de las columnas realizadas en los sitios individuales de TCCON se calibran utilizando observaciones aéreas de la composición atmosférica. Se utilizan aviones o globos para muestrear directamente el aire a diferentes altitudes, lo que permite obtener mediciones precisas de la cantidad de gases promediados en columna.

Servicios de observación de GEI por satélite

Una vez revisado el estado de la tecnología, se procedió a **analizar fuentes de datos** que permiten el acceso a las imágenes de satélite con información de emisiones de GEI, útiles para el planteamiento de la metodología y las herramientas tecnológicas abarcadas por SLOW.

A día de hoy, las dos **principales misiones satelitales activas** para medir las concentraciones de CO₂ y/o CH₄ promediado en columnas son **GOSAT y OCO-3**; si bien existen otros proyectos importantes, como **CAMS**, que utilizan estos y otros datos para generar información más precisa sobre los GEI en la Tierra. Los tres sistemas fueron analizados en detalle, documentando los métodos de observación que utilizan y los métodos de acceso disponibles a estas fuentes de datos.

Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT)

El Satélite de Observación de Gases de Efecto Invernadero "IBUKI", denominado GOSAT por sus siglas en inglés (*Greenhouse Gases Observing Satellite*), fue la primera nave espacial del mundo en medir las concentraciones de dióxido de carbono y metano desde el espacio. La nave se lanzó con éxito el 23 de enero de 2009 y ha estado funcionando correctamente desde entonces.

A través del análisis de los datos de observación de GOSAT, es posible determinar la **distribución global de dióxido de carbono y metano**, además de cómo las fuentes y los sumideros de estos gases varían con las estaciones, los años y las ubicaciones.

El Proyecto GOSAT surge como un esfuerzo conjunto del Ministerio del Medio Ambiente, el Instituto Nacional de Estudios Ambientales y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). El objetivo principal es estimar las emisiones y absorciones de GEI a escala subcontinental con mayor precisión y ayudar a la administración ambiental a evaluar el balance de carbono del ecosistema terrestre y hacer evaluaciones de las emisiones y absorciones regionales. Mediante el análisis de los datos de GOSAT, se obtienen conocimientos sobre la distribución global y la **variación temporal de los GEI**, así como sobre el ciclo global del carbono y su influencia en el clima. El proyecto también tiene como objetivo expandir las tecnologías satelitales de observación de la Tierra existentes, desarrollar nuevas metodologías para la medición de GEI y promover el desarrollo tecnológico necesario para los futuros satélites de observación de la Tierra.

La descarga de los datos GOSAT es gratuita tras realizar la solicitud de acceso y tener **autorización** por parte de una entidad oficial (por ejemplo, la Agencia Espacial Europea, ESA). Una vez autorizado, el usuario recibe unas credenciales para descargar los datos online a través de un servidor FTP.

En cuanto al **método de medición** de GEI empleado por GOSAT, este observa la luz infrarroja reflejada y emitida desde la superficie terrestre y la atmósfera, y la cantidad de CO₂ y CH₄ por columna se calcula a partir de los datos de observación, empleando un instrumento de observación denominado TANSO, compuesto de un espectrómetro de transformada de Fourier (FTS) y un generador de imágenes de nubes y aerosoles (CAI). Los espectros de absorción obtenidos a partir de los datos de observación del FTS y la información sobre nubes y aerosoles proporcionada por el CAI se combinan para calcular la abundancia de CO₂ y CH₄ en columnas sobre los puntos de observación donde las interferencias de nubes y aerosoles son bajas. Las fuentes y los sumideros, así como las distribuciones tridimensionales de CO₂ y CH₄, se estiman utilizando un **modelo de transporte atmosférico** global. Al calcular las estimaciones de fuentes y sumideros de CO₂ y CH₄ basándose únicamente en datos de observación terrestres, los errores son particularmente grandes en Siberia, Asia, África y América del Sur, donde las estaciones de monitoreo terrestres se encuentran dispersas.

Los datos de observación de GOSAT se procesan de manera rutinaria en las instalaciones de manejo de datos (DHF, Data Handling Facility) y los productos de datos se distribuyen a los usuarios generales a través del sitio web de distribución de productos de datos de GOSAT, el Servicio de Archivo de Datos GOSAT (GDAS). Para ello, se requiere el registro previo del usuario para acceder a los productos de datos, que se puede hacer directamente en la página de "autenticación de usuario" a la que se accede desde la página de "producto y servicio" en GDAS.

Orbiting Carbon Observatory 3 (OCO-3)

Entre los nuevos servicios lanzados por la NASA para investigar, analizar y combatir el cambio climático se encuentra el proyecto *Orbiting Carbon Observatory 3*, OCO-3. Los objetivos científicos de este servicio se basan en la recopilación de **mediciones espaciales** necesarias para cuantificar las **variaciones en la relación de mezcla de aire seco y dióxido de carbono** promediado por columna, XCO₂, con la precisión, resolución y cobertura necesaria para mejorar la comprensión de las fuentes y sumideros (flujos) de CO₂ en la superficie a escala regional (≥ 1000 km) y los procesos que controlan su variabilidad a lo largo del ciclo estacional.

Las mediciones de OCO-3 brindan la cobertura global, la resolución espacial y la precisión en una escala diaria para proporcionar una base para caracterizar y monitorear la distribución geográfica de las fuentes y sumideros de CO₂, así como cuantificar su variabilidad. Con base en estas mediciones, es posible **mapear los procesos naturales y artificiales que regulan el intercambio de CO₂** entre la superficie de la Tierra y la atmósfera **tanto a escala regional como continental**, permitiendo realizar pronósticos más fiables de la abundancia de CO₂ atmosférico y de su impacto en el clima de la Tierra.

La misión OCO-3 contribuye a un gran número de investigaciones científicas adicionales relacionadas con el ciclo global del carbono, entre las se encuentran:

- Estimaciones continuas del flujo mundial de CO₂.
- Dinámica estacional de los ecosistemas terrestres del hemisferio norte en Eurasia y América del Norte.
- Intercambio de carbono entre la atmósfera y los ecosistemas tropicales debido al crecimiento de las plantas, la respiración y los incendios.
- Movimiento de penachos de combustibles fósiles en América del Norte, Europa y Asia.
- Capacidad para observar y obtener una mejor comprensión de las emisiones antropogénicas en las megaciudades.

El **método de medición** de GEI empleado por OCO-3 es particular, pues el principal objetivo de la misión es recuperar una **distribución geográfica global de fuentes y sumideros de CO₂**. Sin embargo, la misión OCO-3 no mide directamente las fuentes y los sumideros de CO₂; en su lugar, utiliza complejos **modelos**

de asimilación de datos basados en computación que utilizan datos de XCO₂ para inferir la ubicación de estas fuentes y sumideros.

Para obtener los valores representativos de XCO₂, o la cantidad de CO₂ en el espacio medido, el instrumento OCO-3 mide en un lugar determinado la intensidad de la luz solar reflejada en la superficie de la Tierra en determinadas longitudes de onda. Las moléculas de gas en la atmósfera absorben la luz solar en longitudes de onda específicas, de modo que cuando la luz atraviesa la atmósfera de la Tierra, los gases que están presentes dejan una huella distintiva que puede ser capturada por los espectrómetros OCO-3, que funcionan como cámaras. De esta forma, los niveles de absorción que se muestran en estos espectros como una **imagen capturada**, indican cuántas moléculas había en la región donde se midió. El enfoque de medición de OCO-3 se concentra en recopilar datos **cerca de la superficie** de la Tierra, donde se encuentran casi todas las fuentes y sumideros de CO₂. Se presenta, entonces, el desafío para llegar a estas fuentes y sumideros: la luz detectada por el instrumento debe atravesar toda la atmósfera; incluyendo nubes y aerosoles ópticamente gruesos, así como irregularidades del terreno, lo que puede implicar mediciones incompletas de la columna. Para superar esto, OCO-3 adquiere una gran cantidad de muestras densamente espaciadas trabajando en tres bandas específicas de longitud de onda (O₂ en banda A, CO₂ débil y CO₂ fuerte), obteniendo la cantidad adecuada de sondeos de alta calidad, incluso en aquellas regiones donde hay nubes, aerosoles y variaciones topográficas.

Las observaciones objetivo son un componente clave del plan de validación OCO-3 y su antecesor OCO-2. A medida que las misiones continúen, apuntarán a 27 ubicaciones en todo el mundo, con observaciones especiales que permitirán una gran cantidad de observaciones en un área relativamente pequeña. Las ubicaciones objetivo se seleccionan debido a intereses científicos o geográficos, y la mayoría se seleccionan con respecto a los lugares TCCON (para validación) o sitios de calibración.



Figura 4: Mapa de observaciones objetivo de OCO-3 en España.

El acceso a los datos generados por OCO-3 es gratuito a través del centro de Servicios de Información y Datos (DISC: Data and Information Services Center) de la NASA Goddard Earth Sciences (GES). A través de su plataforma web se ofrecen diferentes herramientas y servicios que facilitan el acceso a los datos y la información de la NASA. En concreto, está disponible el repositorio de datos llamado EarthData, que permite realizar búsquedas por términos, filtrar por temática, tipos de mediciones, proyectos, etc. A través de este portal es posible **descargar directamente los datos** requeridos, pudiendo especificar la fecha de

inicio y de fin de las capturas y la región específica deseada, siendo posible además descargar documentación adicional relativa a las mediciones realizadas.

Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)

Copernicus es el Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea, cuya misión es capturar, analizar y ofrecer servicios de información basados en datos de **observación de la Tierra por satélite y en datos in situ** (no espaciales). Uno de los muchos servicios que ofrece es el Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), que se basa en la **monitorización de la atmósfera** y proporciona datos e información continua sobre su composición. Este servicio describe la situación actual, predice la situación a varios días vista y analiza datos retrospectivos de los últimos años. El CAMS da soporte a múltiples aplicaciones en diferentes ámbitos incluyendo salud, monitorización del entorno, energías renovables, meteorología y climatología. Este servicio está enfocado principalmente a cinco áreas: i) calidad del aire y composición atmosférica, ii) capa de ozono y radiación ultravioleta, iii) emisiones y flujos de la superficie, iv) radiación solar, y v) cambio climático.

El CAMS proporciona **información diaria** sobre la composición atmosférica global mediante el seguimiento y la previsión de componentes como los GEI (dióxido de carbono y metano), gases reactivos (p. ej., monóxido de carbono, compuestos de nitrógeno oxidado, dióxido de azufre), ozono y aerosoles. Además, analiza casi en tiempo real y ofrece pronósticos de 4 días de la calidad del aire en Europa, lo que permite una evaluación permanente del aire que respiramos.

De esta forma, aporta a las organizaciones públicas y privadas involucradas en el uso de la energía solar información adecuada y precisa sobre los recursos de radiación solar en la superficie de la Tierra, que es de gran importancia como se ha dicho en dominios como la salud, la agricultura y las energías renovables. A través de este servicio, se recopilan datos de emisiones y también **se estiman los flujos netos de CO₂ y CH₄** en la superficie de la Tierra. Esto ayuda a mejorar la comprensión de los factores clave que afectan al cambio climático. Entre las ventajas destacables de este servicio es que se trata de **datos de alta calidad** que además están disponibles gratuitamente, lo que da lugar a nuevas posibilidades en el seguimiento de la composición de la atmósfera. De hecho, no se impone ninguna restricción en cuanto al uso o reproducción y redistribución de los datos, con y sin adaptación, con fines comerciales o no comerciales.

CAMS monitorea y registra los niveles de dióxido de carbono y metano en la atmósfera usando **instrumentos en tierra, en el aire y a bordo de satélites**. Además, el servicio utiliza sistemas informáticos para simular las concentraciones de los dos gases de efecto invernadero en función de su conocimiento de la atmósfera, la biosfera y las emisiones notificadas. Al comparar observaciones y simulaciones, CAMS analiza dónde no coinciden. Esto permite que el servicio mejore su conocimiento y las estimaciones de las fuentes y sumideros naturales de los gases, lo que lleva a una mejor comprensión de los ciclos del carbono y el metano.

En cuanto al **método de medición**, CAMS se basa en **observaciones satelitales de GOSAT y OCO-2** para alimentar y validar sus modelos de la atmósfera, así como de **datos in situ**, que son recopilados por instrumentos que no están a bordo de un satélite.

De esta forma, las observaciones satelitales e in situ son **complementarias**. Los satélites miden el dióxido de carbono y el metano en toda la profundidad de la atmósfera y cubren todo el globo; sin embargo, actualmente los datos, como se ha visto, pueden no ser tan precisos como las mediciones in situ. Estos últimos toman muestras de las partes inferiores de la atmósfera con gran precisión, pero se encuentran principalmente en partes accesibles, sobre todo en los países más desarrollados. El proyecto CAMS trata de ofrecer los datos completos utilizando todas las herramientas disponibles con la mayor precisión posible. Por tanto, las observaciones in situ también son vitales para **mejorar la precisión y la consistencia** a largo plazo de las estimaciones CAMS, proporcionando datos muy precisos cerca de las fuentes y

sumideros en la interfaz entre la superficie de la Tierra y la atmósfera. CAMS se basa en una serie de infraestructuras europeas e internacionales para sus datos in situ. Por ejemplo, el *Integrated Carbon Observation System* (ICOS) es una infraestructura de investigación pan-europea compuesta por más de 100 estaciones para medir los niveles atmosféricos de gases de efecto invernadero, así como sus flujos. Junto con otras redes in situ, los datos de ICOS son una entrada esencial para el monitoreo CAMS de dióxido de carbono y metano. A escala global, el CAMS colabora especialmente con la Organización Meteorológica Mundial a través de su programa Vigilancia Atmosférica Global.

La observación de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera requiere capacidades de detección y calidad de procesamiento rigurosas. Gracias a la calidad cada vez mayor del procesamiento de las observaciones satelitales de OCO-2 y GOSAT y a los modelos numéricos mejorados del transporte atmosférico, **CAMS es capaz de mapear fuentes y sumideros de CO₂ con una calidad que coincide con la obtenida con mediciones terrestres**, pero con una cobertura mundial más amplia.

El **acceso a los datos** y la información de Copernicus se puede hacer a través de los servicios DIAS (siglas inglesas de "servicios de acceso a los datos y la información") o mediante las plataformas de datos convencionales. El servicio DIAS consiste en cinco plataformas en la nube que proporcionan un acceso centralizado a los datos y a la información de Copernicus, así como a las herramientas de procesamiento.

Métodos de procesamiento de imágenes por satélite

Se ha podido comprobar que la detección o la estimación de abundancia de GEI desde satélites se ha convertido en una herramienta para examinar los procesos del ciclo del carbono y del metano a escala global y local. De hecho, la tecnología satelital ha transformado la capacidad de observar el estado del planeta de tal manera que la comprensión de la Tierra y de sus claves ha mejorado significativamente desde el lanzamiento del primer satélite de observación en la década de los 60. Como se ha visto previamente, los satélites tienen la capacidad de proporcionar una cobertura global de la superficie de la Tierra y de la composición atmosférica que no se consigue con técnicas de monitoreo sobre la superficie. No obstante, los datos satelitales tienen que ser **procesados, corregidos y/o validados** para poder ser utilizados. Posteriormente, se distribuyen como "productos" que contienen las mediciones satelitales, imágenes y otros datos relacionados con sus formatos prescritos. Los productos a menudo se clasifican en varios niveles, dependiendo de si las correcciones aplicadas han sido muy básicas o más complejas, de la siguiente manera:

- Nivel 0: Datos provenientes directamente del sensor, normalmente sin procesar, incluyendo posibles errores de transmisión y/o registro, y a la máxima resolución.
- Nivel 1a: Datos a la máxima resolución, con referencia temporal de la adquisición, anotaciones de información auxiliar como coeficientes de calibración radiométrica y geométrica y parámetros necesarios para la georreferenciación.
- Nivel 1b: Datos de nivel 1a con algunas conversiones del tipo de unidades medidas por el sensor y realizadas con parámetros auxiliares.
- Nivel 2: Variables geofísicas derivadas de los datos de nivel 1 con la misma resolución y geolocalización.
- Nivel 3: Variables muestreadas con una determinada resolución espacial y temporal basados en la información de los parámetros de nivel 2 y estimaciones que incorporan los propios equipos para rellenar posibles regiones sin información.
- Nivel 4: salida resultado del procesamiento de los datos mediante modelos de análisis más o menos complejos.

Si se parte de datos de nivel 1a, es necesario realizar un **preprocesamiento** de las imágenes siguiendo el principio conocido como problema inverso. Como las variables que se desean conocer, en este caso la

abundancia de CO₂ o CH₄ en cada punto del terreno, no se pueden medir directamente, se utilizan otros parámetros que a través de una determinada modelización permiten **inferir las variables de interés**.

El **proceso de corrección de las imágenes satelitales** originales se suele descomponer en seis fases principales:

1. Calibración y corrección radiométrica
2. Corrección geométrica
3. Conversión a radiancia
4. Corrección topográfica
5. Conversión a reflectividad
6. Corrección atmosférica

Las seis técnicas anteriores implican sus correspondientes algoritmos de procesamiento de imagen para, entre otras cosas y sintetizando de forma considerable: eliminar manchas y bandeados de las mismas, ortorrectificar cada imagen, convertir los valores de los píxeles a radiancia espectral, realizar un normalizado para aplicar corrección topográfica, efectuar una conversión a reflectividad, y, por último, aplicar la corrección atmosférica para mitigar su impacto sobre los datos.

Es importante señalar que, de las fuentes de datos analizadas, CAMS y GOSAT ofrecen productos de los niveles 1 a 4 de forma gratuita, mientras que el OCO-3 proporciona los datos de nivel 1 y 2. Tras haber realizado un estudio de los métodos y técnicas de procesamiento de las imágenes necesarias para extraer información útil a partir de las imágenes satelitales, resulta mucho más conveniente el uso de datos de mayor nivel, **preferiblemente del 4**, proporcionados por los organismos oficiales; ya que además se consideran más fiables y precisos. Por ello y por la facilidad de acceso a los datos proporcionada, **se dará prioridad a CAMS** como fuente de datos en la investigación propuesta por SLOW. Además, y como planteamiento fundamental de la propuesta, se ha contrastado la conveniencia de emplear **sistemas híbridos** en cuanto a la estimación de emisiones y absorciones relacionadas con los GEI, utilizando información extraída por satélite de forma complementaria con mediciones realizadas en el terreno superficial.

T3.1: Diseño de la capa de almacenamiento

La metodología SLOW persigue el objetivo de realizar una estimación de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GEI) en el ámbito del sector agroganadero, entre los que se encuentran ejemplos como el dióxido de carbono (CO₂) o el metano (CH₄). La investigación propuesta por SLOW comprende el análisis de técnicas de estimación de estos gases, lo que conlleva el estudio de diversas fuentes de datos para su posterior uso y recogida de información. Por tanto, la información que se plantea manejar con la metodología se obtiene de diversas fuentes, lo cual implica el **desarrollo de una plataforma** para poder realizar procesos de almacenamiento, procesamiento y análisis de datos. Los trabajos que realizará la plataforma a desarrollar como parte de las herramientas tecnológicas complementarias a SLOW se pueden categorizar, a alto nivel, en tres grupos:

- Por un lado, los trabajos de diseño orientados a la capa de **almacenamiento**, es decir, el conjunto de componentes encargado de proporcionar servicios de persistencia y consulta de datos heterogéneos, de acuerdo a las necesidades del proyecto.
- Por otro lado, una capa de **procesamiento** capaz de ser escalada de forma horizontal para soportar los flujos de datos identificados en el proceso de elaboración de la metodología SLOW.
- Por último, una capa dedicada a las interfaces de comunicación y la **interoperabilidad** que permita interconectar los datos almacenados con otros servicios de análisis y/o visualización.

Esta tarea T3.1 está destinada al diseño de la primera capa, desarrollándose aproximadamente la mitad de la misma en el periodo de 2021; durante el cual se ha llevado a cabo un **análisis y selección** de las **tecnologías** disponibles para **almacenamiento** de datos, así como definido una versión preliminar del **diseño de la arquitectura** de esta capa.

Catálogo de tecnologías de almacenamiento de datos

Como se mencionaba anteriormente, los datos que debe manejar esta plataforma siguiendo los planteamientos de la metodología SLOW provendrán de fuentes de información muy variadas y heterogéneas. Estas fuentes, estudiadas anteriormente y en un resumen a alto nivel, son las siguientes:

- Información recogida por un entorno hipersensorizado. Existen una gran cantidad de sensores orientados a la medición de calidad de aire, temperatura/humedad o medición de gases específicos (e.g. CO₂, CH₄), se prevé hacer uso de múltiples sensores en zonas geográficas concretas para la recogida de datos específicos in situ.
- Bases de datos oficiales. Se encuentran a disposición de los usuarios diversas fuentes oficiales de organizaciones internacionales o gobiernos (e.g. IPCC con su DDC o EFDB).
- Imágenes vía satélite. Se han lanzado a la atmósfera múltiples satélites con sensores y ópticas de alta tecnología que permiten la medición de emisiones de grandes zonas geográficas desde el espacio. Nos encontramos, por ejemplo, con los lanzados en el proyecto Copernicus.

Todas estas fuentes de datos son muy diferentes entre sí, y por tanto se precisa de un análisis para conseguir obtener toda la información que ofrecen y unificarla en una misma plataforma. Por ello, se ha realizado un análisis de las diferentes tecnologías que pueden cumplir el cometido de trabajar en la capa de almacenamiento. La heterogeneidad de los datos, algunas características que podemos encontrar en ellos (imágenes, series de tiempo, etc.) y la poca relación que existe entre ellos puede hacer más interesante de algunas tecnologías en concreto, e incluso permitir hacer uso de varias alternativas a la vez. La **fiabilidad** o robustez de la tecnología, la **adecuación para su uso** en el caso presente, e incluso la continuidad o **soporte** que ofrece, son características clave como criterio de selección de una alternativa frente a otras. Además, el tratarse de código abierto (con la consecuencia de disminuir los costes de desarrollo), el uso de lenguajes específicos que permitan una curva de aprendizaje asumible, o permitir la integración con aplicaciones de terceros son otros aspectos que sumarán a la hora de indicar una selección preferente. A continuación, se presenta un resumen de la evaluación concluida tras realizar el estudio del catálogo de tecnologías candidatas para la capa de almacenamiento.

Tecnología	Características	Valoración
MinIO	- Almacenamiento de objetos en nube. - Código abierto. - Compatible con <i>Amazon Web Services</i>. - Soporte para colas de mensajes y otras BBDD.	Su condición la hace especialmente útil para almacenar imágenes (siendo uno de los planteamientos de la metodología propuesta), tiene soporte para trabajar con otras BBDD y con el servicio de Amazon Web Services.

PostgreSQL	- Base de datos relacional. - Código abierto muy confiable. - SQL. - Cumple ACID. - Escalabilidad vertical.	Buen rendimiento con datos relacionados y seguridad por cumplir ACID. No obstante, los datos del proyecto no tienen una naturaleza que los relacione entre ellos.
MongoDB	- Base de datos no relacional. - Código abierto maduro. - Recientemente ha comenzado a cumplir ACID.	Especialmente útil y segura para trabajar con datos no relacionados (como los de la presente metodología), además ofrece gran flexibilidad para el modelo de datos.
TimeScale	- PostgreSQL adaptado para series temporales. - Base de datos relacional. - SQL. - Flexibilidad en el modelo de datos.	Cumple con los requisitos para almacenar los datos de sensórica de la metodología, tiene flexibilidad para modificar el modelo de datos si fuese necesario y ofrece buen rendimiento cuando hay mucha carga de trabajo. Además, permite escalabilidad horizontal.
InfluxDB	- Base de datos no relacional para series temporales. - Lenguaje propio, optimizado para su modelo de datos y gestión de alertas.	Mejor compresión en disco que PostgreSQL, más rígida a la hora de modificar el modelo de datos, ofrece gestión de alertas y ofrece mejor rendimiento cuando hay una carga de trabajo menor. Como desventaja, no permite la escalabilidad horizontal de forma gratuita.

Tabla 4. Comparativa entre tecnologías para la capa de almacenamiento.

Tras este estudio se puede concluir que cualquiera de las alternativas analizadas serviría potencialmente para almacenar los tipos de datos relevantes para la metodología; si bien algunos aspectos concretos maximizan su adecuación para uso en un caso como el de SLOW:

- La poca relación entre los datos conlleva el descarte de opciones de bases de datos relacionales frente a las opciones no relacionales.
- La naturaleza de los datos periódicos a recoger por la red sensórica favorece el descarte de bases de datos convencionales (tanto SQL como noSQL) en favor de las series temporales.
- El uso de imágenes satelitales como fuente de información hace que, por ejemplo, el uso de MinIO sea ideal para la arquitectura propuesta. También se tiene en cuenta su fácil integración con AWS, lo que puede resultar útil en el futuro.

Diseño de arquitectura para capa de almacenamiento de datos

Una vez estudiadas las alternativas para persistencia de los datos implicados en la metodología SLOW, se propone la siguiente arquitectura como capa de almacenamiento de la plataforma:

Se propone el uso de MinIO para almacenar las imágenes capturadas vía satélite, pues esta alternativa está especialmente diseñada para el almacenamiento de objetos en nube. Se plantea también el uso de MongoDB para el almacenamiento de datos de propósito general (e.g. referencias a los objetos o imágenes almacenados en MinIO). La poca relación natural entre los datos a almacenar hace que el uso de una base de datos NoSQL sea óptima. Por otro lado, la seguridad y fiabilidad que ofrece MongoDB hace que sea la alternativa seleccionada para este propósito. Por último, se propone InfluxDB para el almacenamiento de datos de series temporales, que en este caso se corresponderán con los datos capturados por sensórica.

T3.2: Diseño de la capa de procesamiento escalable

Se han analizado durante la tarea anterior las diferentes tecnologías candidatas para su uso en la capa de almacenamiento, pero en cuestión de procesamiento se repite el conflicto: los datos, al provenir de diferentes fuentes, son muy diversos y heterogéneos. La persistencia por sí sola no provee del análisis necesario para tomar decisiones en base a la información recogida. El cruce de datos entre emisiones y absorciones precisa de un modelo matemático concreto, el cual ha sido estudiado previamente. Es preciso realizar una conversión de todos los datos a la misma unidad (CO₂eq; equivalente a CO₂) con el objetivo de poder estudiar todos los diferentes gases en conjunto, y posteriormente, teniendo las emisiones, se les sustraen las absorciones estimadas. Por tanto, es necesario diseñar una capa de procesamiento que permita recoger toda la información persistente en la capa de almacenamiento, analizarla y procesarla automáticamente de forma eficiente con el objetivo de realizar una futura toma de decisiones asistida por la Inteligencia Artificial. Así, en relación con la plataforma descrita en el apartado anterior, esta tarea T3.2 está destinada al diseño de la segunda capa, correspondiente al procesamiento de los datos almacenados. Aproximadamente una tercera parte de esta tarea se acomete en el periodo de 2021; durante el cual se ha llevado a cabo un **análisis y selección** de las **tecnologías** disponibles para **procesamiento** de datos que faciliten la rápida iteración y la escalabilidad para, potencialmente, manejar grandes conjuntos de información; incluyendo además una versión preliminar del **diseño de la arquitectura** de esta capa.

Catálogo de tecnologías de procesamiento escalable de datos

Procede un estudio análogo al de las tecnologías de almacenamiento para la capa de procesamiento. Una vez más, existen múltiples alternativas que pueden cumplir el objetivo, pero se debe analizar un conjunto de criterios y características concretas que resultan interesantes para la propuesta concreta de SLOW. Trabajar de forma **concurrente y paralela** será clave para optimizar al máximo los tiempos de procesamiento, y además la fácil **escalabilidad** (tanto horizontal como vertical) también es un factor muy importante pues se prevé que el volumen de datos pueda aumentar de forma significativa en el futuro. Una vez más, el uso de lenguajes de programación con una sencilla curva de aprendizaje, la calidad del soporte y continuidad del producto, junto con la característica de disponer de código *open source* son aspectos a valorar positivamente.

Con estos criterios establecidos para valoración, se ha realizado un análisis de un conjunto de tecnologías candidatas para la capa de procesamiento, organizándose en orquestadores de procesos, por un lado, y alternativas de procesamiento, por otro. Los **orquestadores de procesos** son tecnologías que permiten la **gestión y organización de series de tareas** o acciones complejas que trabajan entre sí para mejorar la producción, ofreciendo una solución automatizada y con alta disponibilidad para ejecutar procesamiento.

Por otra parte, las **librerías de procesamiento** ofrecen *frameworks* para llevar a cabo las tareas de **procesamiento de datos de forma paralela**, de forma que se favorezca la escalabilidad horizontal para garantizar el rendimiento en caso de incrementarse el volumen de información a manejar de manera significativa. A continuación, se presenta un resumen de la evaluación concluida tras realizar el estudio del catálogo de tecnologías candidatas para la capa de procesamiento, en base a los criterios descritos.

Tecnología	Características	Valoración
Apache Airflow	- Orquestación de procesos. - Código abierto. - Automatización de flujos de trabajo. - Dispone de interfaz de usuario.	Compatibilidad con otros sistemas, sólido y fiable con alto soporte. Cumple los requisitos necesarios para aplicar en el marco de la metodología SLOW.
Dagster	- Orquestación de procesos. - Lenguaje Python. - Más novedosa que Airflow. - Dispone de interfaz de usuario.	Presenta menor soporte que Airflow, si bien su API es más moderna. Cumple los requisitos necesarios para aplicar en el marco de la metodología SLOW.
Celery	- Librería para Python que permite tareas distribuidas y asíncronas.	Añade disponibilidad y escalabilidad de forma sencilla, integración con otras librerías o frameworks, y es útil para definir múltiples <i>workers</i> .
Dask	- Escalabilidad para el <i>stack</i> NumPy de Python.	Añade escalabilidad horizontal si se hace uso de NumPy, Pandas, u otras populares librerías de procesamiento para Python. Útil si las tareas son demasiado complejas para un solo proceso o <i>worker</i> .

Tabla 5. Comparativa entre tecnologías para la capa de procesamiento.

Una vez más, las alternativas ofrecen resultados similares, y por tanto todas serían susceptibles de aplicación en el desarrollo de la capa de procesamiento de la plataforma propuesta. No obstante, se pueden destacar pequeños matices:

- Apache Airflow es una alternativa con más tiempo en el mercado, ofreciendo mejor soporte que Dagster; mientras que esta ofrece una API más moderna.
- Celery permite trabajar de forma distribuida fácilmente usando Python, un lenguaje ampliamente empleado para procesamiento que además tiene una curva de aprendizaje muy asequible. Dask, por su lado, proporciona escalabilidad horizontal en caso de utilizar librerías de NumPy, también correspondientes al lenguaje Python.

Diseño de arquitectura para capa de procesamiento escalable de datos

Una vez estudiadas las alternativas tecnológicas, se propone la siguiente arquitectura como capa de procesamiento de la plataforma:

Se propone una capa de procesamiento basada en Apache Airflow o Dagster. Ambas alternativas son viables por lo que se realizará una selección final a medida que se avancen los trabajos de investigación y diseño de la plataforma durante las siguientes anualidades, pues las funcionalidades que ofrecen los dos sistemas son muy comparables y similares. Se propone emplear Celery, o una cola de trabajos equivalente, para gestionar un conjunto de workers o procesos encargados de llevar a cabo los trabajos de procesamiento de manera mantenible y escalable. Dask es la extensión que se plantea usar frente a Celery en el caso de que sea necesario procesar grandes volúmenes de datos que no encajen en un solo worker.

JUSTIFICACIÓN 2022

Bloque 1: Metodología

Este bloque se corresponde con el primer paquete de trabajo (PT1), enfocado al *Diseño, desarrollo y validación de la metodología*, relacionado directamente con el objetivo específico OE1 de SLOW, de “definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de gases de efecto invernadero”. Se pretende, pues, investigar y diseñar una nueva metodología de estimación de GEI estandarizada y uniforme, que complemente información procedente de múltiples fuentes de datos. Para ello, en la primera anualidad se abordó un estudio del estado del arte en materia de monitorización de los GEI y la medición o estimación de emisiones y absorciones, localizando los datos que sirven como indicadores relevantes y las fuentes de datos disponibles para obtenerlos; lo cual permitió alcanzar una definición preliminar de propuesta metodológica sobre la que iterar a medida que la investigación sobre SLOW continúa, identificando nuevas necesidades y mejoras que incorporar. En este sentido, cabe destacar el enfoque de retroalimentación basado en la experimentación y en el desarrollo de unas herramientas tecnológicas que acompañan a la metodología, pues la puesta en práctica de las conclusiones alcanzadas de forma teórica durante la investigación previa, en muchos casos no ha permitido alcanzar los resultados deseados. Ha sido necesario, por tanto, realizar una adaptación constante para mitigar a lo largo de esta anualidad limitaciones que no se podían haber anticipado, al no corresponderse con lo dictado por la literatura consultada durante los estudios previos.

Este bloque se organiza en tres tareas, de las cuales las dos primeras habían sido finalizadas durante 2021, mientras que la tercera permanece en ejecución hasta el final del proyecto, pues se espera que el diseño de la metodología se retroalimente de la investigación y los resultados obtenidos a lo largo de su ejecución.

PT1: Diseño, desarrollo y validación de la metodología

T1.1: Análisis del estado de la técnica en inventariado de GEI (2021)

T1.2: Estudio de disponibilidad de datos indicadores en emisión/absorción de GEI (2021)

T1.3: Diseño de metodología de estimación de GEI

Por ofrecer contexto, con la investigación realizada durante la anualidad anterior sobre el cambio climático y los GEI, así como el estudio generado acerca de metodologías y herramientas para su medición, se pudo determinar que las variables más relevantes para el objetivo perseguido se corresponden con los niveles de **dióxido de carbono** (CO₂) y **metano** (CH₄), quedando en tercer lugar de importancia el **óxido nítrico** (N₂O). Además, se concluyó que la manera de cruzar los datos de emisiones y absorciones para calcular la eficacia de métodos de absorción supone una simple diferencia entre emisiones y absorciones, medidas en toneladas de CO₂eq (equivalencia de CO₂). Por otro lado, se estudió la disponibilidad de fuentes de

información abiertas sobre datos climáticos, socioeconómicos y ambientales; y se analizaron bancos abiertos de imágenes satélite para calcular absorciones de GEI, de entre los que se pueden destacar los servicios **Copernicus** y el Plan Nacional de Observación del Territorio (**PNOT**).

A continuación, se describen las acciones desarrolladas en el marco de la tarea T1.3 abordada en la presente anualidad, así como los principales resultados alcanzados hasta la fecha.

PT1: Diseño, desarrollo y validación de la metodología

T1.3: Diseño de metodología de estimación de GEI

Esta tarea supone un proceso iterativo de definición y optimización de la metodología SLOW a proponer, evolucionando con la nueva información extraída a medida que se realizan avances en el proyecto. En el periodo correspondiente a 2022 se ha dado continuidad a esta tarea iniciada durante la primera anualidad, alcanzando aproximadamente dos terceras partes de su trabajo.

1. Análisis de necesidades y estrategias de mejora para la metodología

Tal como se recogía en la investigación de la primera anualidad, el sector agroganadero es uno de los mayores contribuyentes en lo que a las emisiones de GEI se refiere, pues aproximadamente un 15% de las emisiones totales tienen su fuente en este sector. De ellas, las asociadas a la generación de gas metano por parte de la producción, elaboración y transporte de piensos, representan alrededor del 45% de las emisiones del sector. La fermentación entérica es la segunda fuente de emisiones, pues contribuye con el 40% aproximadamente del total de las emisiones. Las emisiones derivadas del almacenamiento y elaboración del estiércol (sin incluir su aplicación y el depósito) representan alrededor del 10%. Y por último, las emisiones asociadas al consumo de energía se vinculan principalmente con la producción de piensos y, en particular, con la fabricación de fertilizantes. Cuando se suman a lo largo de las cadenas de suministro del sector, el consumo de energía contribuye con cerca del 5% del total de las emisiones del sector. Se puede observar, pues, que **no hay una fuente única de emisiones**, sino que hay multitud de ellas que pueden influir, directa o indirectamente, en la generación de GEI, lo cual complica su estudio. Además, estos datos sufren una interpretación sesgada debido, en último lugar, a una escasa (incluso nula) interpretación de las capacidades de absorción de gases de las áreas verdes, mantenidas fundamentalmente por estas actividades. Aunque existen muchas aproximaciones para estimar los GEI emitidos por el sector, el problema del cálculo de las capacidades de compensación de GEI por parte de bosques y zonas verdes está aún por resolver. Las propuestas más extendidas centran sus esfuerzos en la generalización y la utilización de herramientas existentes y accesibles a nivel global. Dicho enfoque genera dos vertientes principales, la primera de ellas centrada en la extracción de datos actualizados en tiempo real y de baja calidad; en contraposición, la segunda se centra en el uso de datos desactualizados de mayor resolución. Dadas las limitaciones provenientes del uso de cualquiera de las dos vertientes más utilizadas, se producen resultados poco esclarecedores fruto de un análisis pobre en cantidad o calidad de los datos. El diseño de una metodología destinada al análisis de las emisiones de gases provenientes del sector agroganadero debe comenzar por la definición de los **factores o variables que influyen** de manera significativa en el **ciclo de vida del carbono** para la toma de soluciones innovadoras en términos de diseño, desarrollo y validación. Los avances, no solo a nivel teórico, sino que también en términos tecnológicos asociados principalmente a la Inteligencia Artificial, resultan clave en el análisis de datos, la interpretación y la generación de modelos destinados a ofrecer información para la toma de decisiones con un potencial impacto positivo en el medio ambiente. De este modo, SLOW pretende sentar las bases de una nueva metodología de estimación de GEI dirigida al análisis en el ámbito de la agroganadería, aprovechándose

del uso de nuevas tecnologías para el apoyo en las mediciones mediante la utilización de nuevos instrumentos para la generación de datos y la simplificación del proceso de lectura e interpretación de los mismos, de cara al desarrollo de conclusiones medioambientales lo más veraces y objetivas que sea posible.

1.1. Factores relevantes para la estimación de GEI en agroganadería

La agroganadería, en general, contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero no solo a través del consumo de energía en la explotación, sino también a través de las emisiones de los animales domésticos y gestión de los purines y estiércol, lo cual depende mayoritariamente del **manejo de los animales en granja**. En este sentido hay que tener en cuenta que no todos los sistemas ganaderos son iguales, ni emiten de la misma forma; y aunque existe mucha variabilidad entre ellos, se pueden agrupar en dos grandes bloques: ganadería extensiva y ganadería intensiva. Por otro lado, hay que tener en cuenta cuáles son los principales gases de efecto invernadero asociados a la ganadería que tendrán una contribución diferente en función del sistema de manejo. El primero de ellos es el **dióxido de carbono**, cuyas emisiones se relacionan con los cambios en el uso de suelo, la producción de forrajes, el manejo de los pastos, el uso de insumos externos, y sobre todo la energía y el transporte. El segundo es el **óxido nítrico** procedente de las deyecciones de los purines y estiércoles y su manejo, así como de los fertilizantes usados en los cultivos forrajeros. El tercero sería el **metano** emitido por la fermentación entérica de los rumiantes, por la producción de forrajes vinculados a algunos tipos de cultivo, y purines y estiércoles.

Uno de los principales problemas hasta el momento ha sido equiparar el comportamiento de toda la ganadería con el de un único sistema productivo. Esto ha sesgado fuertemente los análisis y ha impedido asimilar adecuadamente la diversidad de los sistemas ganaderos, lo que repercute en la adopción de medidas inadecuadas para el sector. Precisamente este comportamiento ha generado una enorme confusión debido a la falta de diferenciación a la hora de estimar el balance neto de emisiones GEI por parte de la ganadería. En términos de sostenibilidad, ambos sistemas productivos ejercen un papel diferente sobre el cambio climático, tanto por las emisiones GEI que se derivan de ambos modelos, como por la capacidad de los ecosistemas que las sustentan para fijar carbono atmosférico y reciclar otros GEIs. Por ello, la primera estrategia para mejorar la metodología es contemplar la producción ganadera de forma diferenciada, es decir, **separar sistemas productivos** y considerar, de forma adecuada, el conjunto de actividades que se relacionan con ella. Esto incluye factores clave para el análisis de los efectos de la ganadería sobre los agrosistemas que la sustenta y el cambio climático, como son el sistema productivo, el tipo de alimentación, la producción asociada de piensos y forrajes, el consumo energético, el transporte de forrajes, animales vivos y animales sacrificados y otros insumos externos (desde aditivos a medicinas, antibióticos o suplementos).

Teniendo en cuenta que aproximadamente un 40% de las emisiones producidas se deben a la fermentación entérica, otro aspecto importante a considerar, ligado al sistema de producción, es la **alimentación del animal**. Aunque la genética animal tiene un efecto notable en la producción de metano entérico, la calidad del alimento influye significativamente en la emisión, cuanto más digerible y de mejor calidad sea, se produce menos metano porque se desecha menos durante la fermentación entérica. Por otro lado, destacando que el metano tiene un efecto invernadero superior al CO₂, es necesario poner sobre la mesa de nuevo la importancia de la conservación de los pastos, e incluir en el balance neto de emisiones la **capacidad de los pastizales para reducir la concentración atmosférica de metano**. En cuanto al óxido nítrico, la contribución es diferente en función del sistema productivo. Como ya se ha indicado, el óxido nítrico se emite principalmente desde la orina y heces. Si estas deyecciones se mezclan, como ocurre en los sistemas intensivos, se produce **amoníaco** que a su vez se oxida a óxidos de nitrógeno, que tienen un gran efecto en el calentamiento global. Sin embargo, en los sistemas extensivos, estas fracciones no se

mezclan y se incorporan de forma rápida al suelo, pudiendo ser utilizadas por las plantas y microorganismos.

1.2. Estudio de principales modelos específicos para el sector ganadero

Aunque existen muchos modelos que tratan de estimar la contribución de la ganadería al efecto invernadero, todavía hay una escasez de investigaciones basadas en datos reales y cuestiones clave en la gestión ganadera, como el metano entérico o el manejo de estiércol. Antes de estimar la huella de carbono de una determinada actividad económica hay que estudiar su ciclo de vida, que en ganadería va a depender fundamentalmente del tipo de explotación, la región geográfica, la composición paisajística del lugar, entre otros. Por eso es muy importante la investigación básica sobre los tipos y flujos de las emisiones-absorciones, especialmente en su **relación con los sistemas productivos y la gestión territorial**, para establecer una serie de indicadores de tipo económico, social y medioambiental necesarios para la toma de decisiones.

Sistema ECOGAN

En España, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación en coordinación con el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, ha creado un sistema informatizado **ECOGAN** que permite registrar las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs) aplicadas en la granja así como estimar las emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero. Permite también estimar el consumo de recursos de una granja concreta a lo largo del proceso productivo, teniendo en cuenta la alimentación de los animales, el diseño y manejo de los alojamientos; y el almacenamiento y gestión de los estiércoles y purines producidos. Las estimaciones de dichas emisiones se realizan de acuerdo con directrices actualizadas establecidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y el Programa Europeo de Evaluación y Control Ambiental (EMEP/EEA) y otras instituciones con competencia en la materia, posibilitando la estimación de las emisiones de amoníaco, metano y óxidos de nitrógeno. Aunque esta herramienta es útil para cumplir con la legislación vigente, presenta sus limitaciones, ya que **sólo estima las emisiones para la ganadería intensiva porcina y aviar**, sin tener en cuenta otros manejos y variables que también influyen en el balance como son el transporte y producción de insumos, entre otros.

Modelo GLEAM

Actualmente el modelo más utilizado por las principales organizaciones para estimar los gases procedentes de la actividad ganadera es el Modelo Global de Evaluación Ambiental de la Ganadería (**GLEAM**, por sus siglas en inglés) que utiliza un entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica) para **simular las actividades y procesos bio-físicos** de las cadenas de suministro de la ganadería siguiendo la metodología de análisis de ciclo de vida. El objetivo de GLEAM es cuantificar la producción ganadera y el uso de recursos naturales del sector, así como identificar los impactos ambientales de la ganadería a fin de contribuir para la evaluación de escenarios de mitigación para el desarrollo de un sector ganadero más sostenible.

Este modelo utiliza el método de la evaluación del ciclo biológico para **determinar todas las fuentes principales de emisión a lo largo de las cadenas de suministro**, desde la utilización de la tierra y la producción de piensos, pasando por la producción animal, hasta la elaboración y el transporte de los productos a los puntos de venta. Teniendo en cuenta la multitud de variables que contribuyen a la emisión de gases, ofrece una aplicación que permite agregar y visualizar datos relacionados con la especie animal, el número de cabezas de ganado, la producción animal, las emisiones de GEI y la intensidad de las emisiones por región, sistema de producción y fuente de las emisiones. Los datos introducidos en el modelo deben ser georreferenciados de manera precisa, y así GLEAM cuantifica las emisiones de GEI por unidades espaciales geográficamente definidas, basándose en módulos que reproducen los principales elementos de las cadenas de suministro ganadero. El modelo integra importantes **perfiles geográficos**, como la calidad

de los suelos, el clima y el uso de la tierra, lo que representa una mejora importante con respecto a las demás evaluaciones que se basan en promedios nacionales. Todo ello hace del GLEAM un modelo muy completo, todavía presenta algunas limitaciones, como es la ausencia de la estimación de las absorciones, un aspecto clave a la hora de diferenciar entre ganadería intensiva y extensiva en términos de sostenibilidad. Por eso este modelo se suele combinar con el Century.

Modelo Century

El modelo **Century** es uno de los modelos matemáticos más utilizados para investigar la **distribución y abundancia de los reservorios de carbono y nitrógeno en el suelo** a nivel de ecosistema y entender los efectos a corto y largo plazo de los disturbios naturales y humanos. Gracias a que incorpora modelos matemáticos que integran el conocimiento más relevante del sistema planta-suelo, se ha utilizado para simular cambios en la dinámica de la materia orgánica del suelo de numerosos ambientes (tropicales, subtropicales, templados) y diferentes ecosistemas (agrícolas, agrícola-ganaderos, bosques, sabanas, pastos y pastizales, etc.) a una escala mensual. Es un modelo que **simula mensualmente** a lo largo del periodo establecido por el usuario, la producción primaria neta, el contenido de carbono en los diferentes compartimientos de los árboles, el contenido en nutrientes y lignina, los ciclos biogeoquímicos del carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre, la dinámica de la materia orgánica en el suelo, así como la temperatura y el contenido de agua en el mismo. En resumen, el modelo engloba todos los procesos que intervienen en el **ciclo de vida del carbono en un sistema planta-suelo**: una proporción de la producción vegetal neta es transferida a los compartimientos vegetales. Al morir, el material biológico se acumula en el suelo. La descomposición del material orgánico gracias a la acción de la biota edáfica provoca que el carbono sea transferido y almacenado en el suelo.

El principal inconveniente del modelo tiene que ver con la simplificación del sistema planta-suelo, particularmente en relación con el efecto de la textura del suelo sobre la dinámica del carbono, así como la falta de caracterización de la mineralogía del suelo. Por tanto, la necesidad de obtener datos de campo y laboratorio relacionados con el efecto de la mineralogía del suelo, el pH, el contenido de aluminio y otras cuestiones sobre la formación y estabilización de la materia orgánica del suelo resulta imprescindible para la correcta **calibración y validación** de este modelo.

Modelos basados en observación de GEI por satélite

En los últimos años se puede identificar una proliferación de modelos que utilizan las **imágenes satelitales para estimar la huella de carbono** de cualquier actividad económica. Hasta el momento, las principales misiones satelitales activas para medir las concentraciones de GEI son GOSAT, OCO-3, CAMS (analizadas durante la anualidad previa) y GEDI. Sin embargo, los datos obtenidos mediante espectrometría todavía son **muy groseros** ya que las muestras tomadas proceden de áreas geográficas muy extensas. Por este motivo, estos modelos sirven, principalmente, para el cálculo de las emisiones derivadas de actividades que contribuyen en gran medida a la emisión de GEI. Es por ello que todavía se necesita mucha investigación para desarrollar herramientas que permitan estimar la capacidad de absorción de los bosques, pastos y pastizales para proponer medidas en este sentido. De todos ellos, la misión **Sentinel** de la ESA y la misión *Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)*, conjunta de la NASA y la Universidad de Maryland, son las que pueden ofrecer datos de mayor precisión en lo que a **absorciones** se refiere.

1.3. Necesidades detectadas y estrategias de mejora para la estimación de GEI

A lo largo de la documentación anterior ya se han ido identificando una serie de **necesidades** para estimar de una manera más precisa el balance de GEI. La mayoría de las limitaciones identificadas tienen que ver con las **absorciones**, ya que ninguno de los modelos propuestos en la actualidad para el sector ganadero contempla esa cuestión. Este es un aspecto que afecta principalmente a la ganadería extensiva, ya que

hasta el momento la mayoría de informes generados han **ignorado la capacidad de los pastos y pastizales para fijar CO₂** atmosférico y almacenarlo en forma de biomasa y materia orgánica del suelo. Por otra parte, es necesario establecer indicadores en diferentes unidades de medida. Si se tiene en cuenta la emisión en función de la producción de carne o leche, la ganadería extensiva saldría perjudicada en comparación, porque presenta una menor eficiencia, al necesitar más kilogramos de alimento para obtener una unidad de producto. Por ello surge la necesidad de disponer de una metodología que haga posible la estimación de emisiones, pero también de las absorciones de gases de efecto invernadero en el sector ganadero. Tras hacer una revisión exhaustiva sobre todas las variables y factores que pueden influir en el sistema, es necesario **combinar diferentes modelos y herramientas** para el cálculo de la huella de carbono, siempre teniendo en cuenta el tipo de explotación sobre la que recaiga el estudio. Considerando la heterogeneidad paisajística de Asturias y la legislación vigente sobre la obligatoriedad de las explotaciones ganaderas intensivas de porcino y aves de corral para el cálculo, seguimiento y notificación de las emisiones, se identifica una mayor necesidad para establecer una metodología con un enfoque orientado, en primera instancia, al cálculo del balance de GEI en **ganadería lechera**. A continuación se resumen las limitaciones que surgen con el uso de las técnicas actuales y las mejoras o soluciones identificadas, que potencialmente SLOW podrá ofrecer.

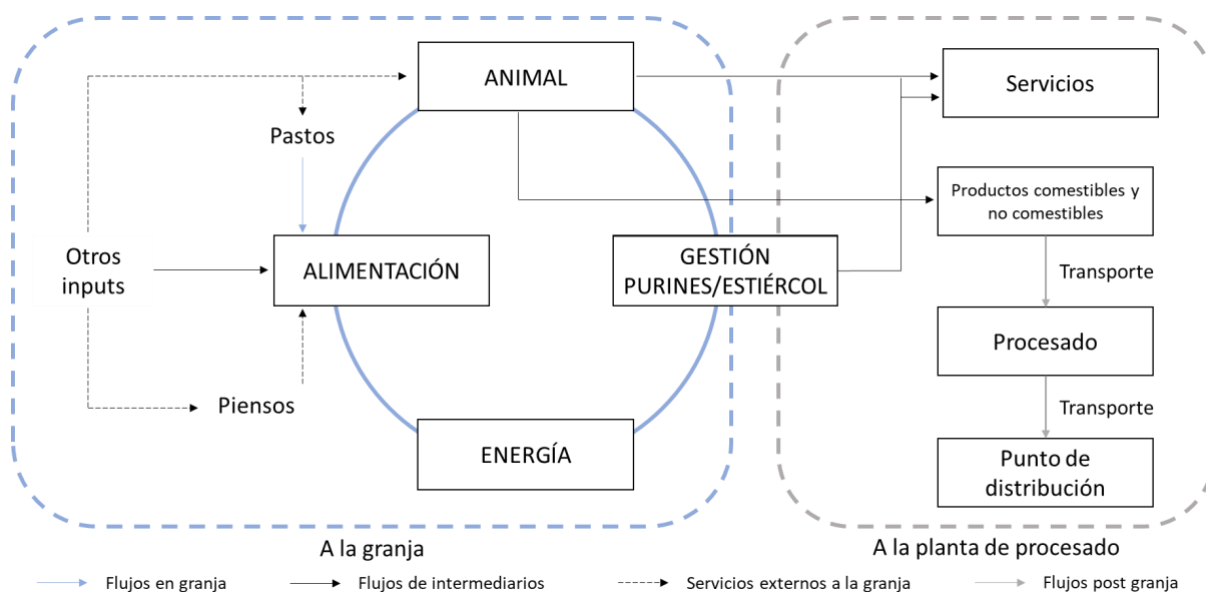


Figura 4. Procesos que intervienen en la cadena de suministro ganadera y que tienen un impacto sobre la producción de gases de efecto invernadero.

Estrategias y mejoras para el cálculo de emisiones

Como ya se ha documentado, existen multitud de metodologías destinadas al cálculo de las emisiones de GEI. Estas metodologías se centran principalmente en la vigilancia de zonas geográficamente amplias con el uso de satélites (no orientados al uso de regiones de carácter local) y en la definición de herramientas para el desarrollo de cálculos aproximados utilizando métodos de estimación existentes, como calculadoras de emisiones análogas a la de ECOGAN, plataformas de inventariado o bases de datos oficiales con actualizaciones periódicas de diversos factores de emisión. Además de las herramientas software de las que se nutren las metodologías más estandarizadas, también existen multitud de productos hardware orientados a la medición de emisiones, entre los que se encuentran sensores para la medición de gases

específicos (en su mayoría de CO₂), cuya integración con otros sensores o fuentes de datos dificulta el desarrollo de sistemas complejos.

Para la generación de un inventario de emisiones GEI, se pueden identificar múltiples **limitaciones y problemas que surgen con el uso de las técnicas actuales**:

- Las metodologías contempladas hasta el momento se han descrito de una manera general, sin buscar la aplicación específica para calcular la emisión de un proceso concreto de la cadena de suministro del sector ganadero.
- Los métodos o técnicas podrían considerarse tecnológicamente desfasadas, ya que hacen uso de cálculos aproximados utilizando datos conocidos, sin pasar por las mejoras u oportunidades que ofrecen el uso de tecnologías de Inteligencia Artificial, pudiendo arrojar datos de poca fiabilidad.
- Los sistemas de medición existentes se centran, en su inmensa mayoría, en el cálculo de emisiones de CO₂ y en el cálculo de emisiones procedentes de sectores como el energético (que emite la mayoría de GEI) o del transporte sin tener en cuenta otras fuentes de emisión como las que se han comentado anteriormente, y que están detalladas en el modelo GLEAM y la herramienta ECOGAN.
- Resulta complejo realizar integraciones entre diversas fuentes de datos, como las que pretende emplear la presente metodología.
- Para un usuario o responsable de una explotación medio, el cálculo de sus emisiones haciendo uso de los métodos existentes puede resultar una tarea demasiado compleja y con mucha carga de tiempo. Esto conlleva, en muchos casos, a que estos métodos sean ignorados y utilizados únicamente por gobiernos o grandes empresas.
- Resulta imposible cuantificar la contribución de todas las variables (especie animal, sistema de producción, variables de explotación, alimentación, producción agrícola para la alimentación animal, gestión de purines y estiércol, etc.) que intervienen en la emisión de los gases de efecto de invernadero debido a la falta de recursos.

El desarrollo de la metodología SLOW puede abordar los problemas indicados en los apartados anteriores en cuanto al cálculo de emisiones siguiendo las siguientes **estrategias de mejora** en su diseño:

1. Hacer el **estudio de las fuentes de emisiones** en base al ciclo de vida del carbono en la ganadería de leche, teniendo en cuenta los factores o variables que pueden influir directa o indirectamente en la emisión de gases de efecto invernadero. Dada la multitud de variables que influyen, es clave definir el **alcance de los factores a estudiar** para poder establecer una serie de recomendaciones. El alcance propuesto se documenta en la tabla de *"Definición de principales fuentes de emisión, actividades y operarios implicados en la emisión de GEI en el sector ganadero"*.
2. **Combinar metodologías específicas** para estimar la huella de carbono en base a las fuentes de emisión y cada uno de los gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O). En este sentido, hay que tener en cuenta que una fuente puede emitir diferentes tipos de gases. Por ejemplo, la producción de piensos engloba diferentes actividades (operaciones de campo, fertilización, transporte) que implica la emisión de diferentes tipos y cantidad de gases. Por ello, establecer una única metodología por fuente de emisión no tiene sentido: hay que establecerla por actividad, gas y fuente de emisión, tal y como se recoge en la tabla mencionada anteriormente.
 - a. Estimación del **CO₂**. Se sabe que el CO₂ depende principalmente de la energía utilizada en la explotación (combustible, electricidad, agua, gestión de aguas residuales), el transporte, la producción de forrajes, uso de pesticidas y fertilizantes, la alimentación. Para realizar un cálculo lo más aproximado posible de la emisión de este gas se necesita recoger

- información del resto de operadores que intervienen en la cadena de producción, tal y como establece la metodología GLEAM.
- b. Estimación del **CH₄**. La principal fuente de emisión de metano es la fermentación entérica resultado de la digestión anaeróbica de los rumiantes, pero otra fuente importante es la gestión de los purines. Aunque el IPCC ya dispone de ecuaciones para su cálculo teórico, lo más preciso es la utilización de sensores para realizar la medida. En este sentido, las jaulas metabólicas y sistemas GreenFeed o Sniffers son los equipos más utilizados para estimar el metano entérico, si bien se trata de una alternativa económicamente costosa para el sector. Por ello, se precisa de sensores más asequibles a la hora de plantear una alternativa a las estimaciones teóricas.
 - c. Estimación del **N₂O**. La emisión de N₂O puede ser directa o indirecta, es decir, una parte importante proviene de la gestión de purines y estiércol y otra, de la producción de forrajes y el uso de fertilizantes. Por tanto, se necesita información por parte de la empresa de producción de piensos sobre las emisiones relativas a la aplicación de fertilizantes.
3. Para el desarrollo de una metodología que engloba las principales fuentes de emisión del sector se necesita recopilar datos procedentes de distintos operadores del sistema de producción. Esto será posible gracias a la **integración de múltiples fuentes de información**, reforzadas mediante la instalación y el uso de sensores específicos para cada tipo de gas. Estos sensores se comunicarán e integrarán entre sí siguiendo un proceso de estandarización desarrollado para la metodología SLOW que garantice su facilidad de uso y escalabilidad.
 4. Dada la diversidad de técnicas y tipos de datos utilizados será necesario el desarrollo de una metodología bajo **estándares W3C** que facilite la integración de diversas fuentes de datos y la interoperabilidad. La obtención y transformación de datos referentes a las emisiones del consumo energético, producción de piensos, alimentación y gestión de residuos, junto con la inclusión de datos procedentes de un entorno hiper sensorizado con los métodos definidos anteriormente permitirá un análisis más profundo de todas las fuentes de emisión. Además, las consultas a bases de datos internacionales de proyectos independientes y el acceso a fuentes de información vía satélite como, por ejemplo, servicios de Copernicus (que además aúna también sensórica *in situ* en la superficie terrestre y realiza predicciones futuras) junto al uso de técnicas de análisis inteligente de datos o Inteligencia Artificial posibilita la comparación de datos para la obtención de conclusiones más fiables y avanzadas.
 5. El posterior lanzamiento de una **herramienta de visualización** a través de una aplicación web con presentación inmersiva permitirá el rápido acceso de usuarios con una amigable interacción.

Estrategias y mejoras para el cálculo de absorciones

Actualmente las mediciones de las absorciones se basan, principalmente y a muy alto nivel, en conocer las capacidades de absorción y de reducción de GEI que tienen las especies presentes en los diferentes sumideros de carbono. Sin embargo, la capacidad de absorción de las especies vegetales, los bosques, los pastos y pastizales va a depender de una serie de factores como son la temperatura, estación del año, humedad relativa, precipitación y radiación solar. Otro aspecto importante a considerar, y que también contempla el modelo Century, es la medición de las reservas de carbono que se encuentran en la biomasa del suelo. Por tanto, es necesario contemplar el **sistema planta-suelo en su conjunto**, ya que ambos forman parte del mismo ecosistema, es decir, el carbono fijado por unos (vegetales) es aprovechado por

otros organismos (biota edáfica). Por tanto, se pueden identificar algunas **limitaciones o problemas** también en este ámbito:

- No se tienen en cuenta los distintos agroecosistemas de los que dispone la explotación y que pueden contribuir a la compensación de la huella de carbono por medio de las absorciones.
- La estimación de las absorciones del sistema planta-suelo es compleja por la multitud de factores de los que depende e influyen en la medición.
- Conocer de antemano la capacidad de absorción de carbono de una especie en concreto y realizar la estimación en base a este dato junto a la cantidad de ejemplares plantados puede generar resultados poco precisos.
- Los cálculos de absorciones vuelven a ser en gran medida aproximados, ya que los modelos disponibles hasta el momento se basan en ecuaciones matemáticas que pueden distar mucho de la realidad.
- Existe una escasez de datos reales medidos en campo, como son los índices de vegetación (índice de área de las hojas, contenido en clorofila de las hojas, índice de vegetación de diferencia normalizada), humedad, temperatura, humedad relativa, radiación solar, la respiración del suelo, etc.
- Los métodos se centran, en su gran mayoría, en calcular la absorción de dióxido de carbono y rara vez se mide la absorción de otros gases de efecto invernadero como puede ser el metano o el óxido nítrico.
- En la literatura científica encontrada hasta el momento solamente se comprueba el nivel de carbono resultante, por tanto, la eficacia de los métodos utilizados se conoce a largo plazo.
- Desde un punto de vista tecnológico, los modelos disponibles están potencialmente desfasados, ya que no cruzan datos provenientes de diferentes fuentes ni se hace uso de datos medidos en campo ni técnicas de Inteligencia Artificial para el análisis de datos.
- La medición de absorciones por parte de un usuario medio o de un responsable de una pequeña explotación agroganadera resulta compleja y con una alta carga de tiempo. En muchos casos, los ganaderos ignorarán si tienen capacidades de absorber gases de efecto invernadero o bien desconocen qué cantidad logran absorber, y en consecuencia cuál es el balance de su explotación.

Como sucede en el caso de medición de emisiones, se pretende diseñar la futura metodología SLOW identificando una serie de **mejoras a proponer respecto a la situación actual**:

1. Hacer el **balance en base al ciclo de vida del carbono**, teniendo en cuenta las fuentes de absorción y los factores que pueden influir directa o indirectamente en la absorción de gases de efecto invernadero. La propuesta generada para SLOW se recoge en una tabla de *“Definición de principales fuentes de absorción, actividades y operarios implicados en la absorción de GEI en el sector ganadero”*.
2. Tener en cuenta los servicios ecosistémicos que presta la explotación y estimar la **capacidad de absorción** de los mismos. Considerar, además, la variabilidad de teselas paisajísticas (prados de siega, pastizales, áreas de matorral, áreas de bosque..) de la base territorial de la explotación para realizar la estimación de su capacidad de absorción. Profundizar en el reconocimiento de los pastos permanentes como “sumidero estanco” de carbono, así como su papel de “cortafuegos productivo” ante la expansión de los grandes incendios forestales que generan un efecto “liberador” del carbono almacenado en la biomasa arbórea y arbustiva.
3. Disponer de **diversas fuentes de datos** heterogéneas y complementarias; y recolectar datos a lo largo del tiempo para arrojar unos resultados más precisos, fiables y **particularizados a la región**.

- Esto mejora sustancialmente el método tradicional de estimación de emisiones, basado en el conocimiento de las capacidades de cada especie vegetal de forma teórica.
4. Uso de fuentes de información adicionales para **estudio de la composición paisajística** y estado de la explotación, con las que aportar estimaciones más precisas sobre las absorciones producidas por la masa vegetal.
 - a. Utilización de los datos satelitales (óptico, RADAR, LiDAR) proporcionados por fuentes como GEDI, PNOA y Sentinel para calcular la **cantidad de la biomasa** de la explotación (altura de la copa de los árboles, fracciones de cabida cubierta).
 - b. Cálculo de índices relacionados con el **estado de la vegetación**, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, de vigor fotosintético).
 - c. Consideración de los usos SIGPAC (Sistema de Información Geográfica de Parcelas Agrícolas) declarados como referencia en los diferentes recintos de cada explotación.
 - d. Potencial uso de estaciones públicas para estudio de condiciones agroclimáticas (ej. AEMET, SiAR).
 5. Definición de un conjunto de **técnicas adicionales para mejorar la precisión** de los resultados. Para estas técnicas debe considerarse su aplicación en la medida que sea posible en cada caso, proponiéndose como complementarias y **opcionales**, pues algunas implican disposiciones económicas y/o temporales que pueden repercutir considerablemente en el alcance de una implantación.
 - a. Uso de servicios satélite comerciales bajo demanda para aportar mayor resolución espacial (ej. MAXAR).
 - b. Uso complementario de información RADAR o LiDAR extraída mediante vuelos de drones sobre las explotaciones para mejorar la precisión de la información satelital.
 - c. Realizar análisis de muestras de suelo (textura, composición físico-química, mineralogía, etc.) a lo largo de diferentes estaciones para garantizar la fiabilidad de los modelos en diferentes épocas fenológicas.
 - d. Uso de jaulas metabólicas para medición *in situ* de las emisiones generadas por determinadas razas locales de animales, pudiendo abordar modelos de explotación extensivos en los que el ganado esté al aire libre y evitando recurrir a factores teóricos.
 6. Utilizar técnicas de **Inteligencia Artificial** para llevar a cabo el **análisis de datos** de diferentes fuentes de una manera más fiable y eficaz tecnológicamente hablando.
 7. Promover un **uso eficiente y sostenible** de las diferentes teselas paisajísticas que componen la base territorial de la explotación, en base a la estimación de las absorciones y en función de las posibilidades de combinación multiuso que presenten las mismas.
 8. El acceso vía web propuesto pretende ser habilitador para los usuarios y responsables de explotaciones agroganaderas en cuestión de conocer de forma rápida y sencilla el efecto beneficioso que sus hectáreas agrícolas ofrecen a la sociedad; enfocado desde la **visualización espacial** de los resultados, facilitando así su comprensión.

2. Avances en el diseño de la metodología de estimación de GEI

El análisis previo de necesidades y limitaciones del estado actual de la técnica ha permitido identificar un conjunto de estrategias de mejora que suponen piezas fundamentales en el diseño de la metodología SLOW, sobre la cual se ha iterado durante la anualidad de 2022. De esta forma, se han podido concretar y definir con mayor criterio distintos componentes preliminares propuestos durante la anterior anualidad; mientras que el propio **avance técnico** generado en el marco de la creación de las herramientas tecnológicas que acompañan a esta metodología (bloque 2) ha supuesto una **realimentación constante**.

En este sentido, la disonancia encontrada en algunos puntos entre el marco teórico y la puesta en práctica ha provocado, durante esta investigación, tener que abordar **múltiples reconsideraciones metodológicas**, al encontrar limitaciones no expuestas en la literatura manejada. El diseño completo de la metodología SLOW final se entregará documentado en el E1.3, planificado para la última anualidad del proyecto. No obstante, se resumen a continuación los avances realizados de forma breve por completitud y contexto.

2.1. Reconsideraciones metodológicas

La limitación que ha supuesto un mayor impacto en cuanto a la metodología a plantear tiene relación con la extracción de información directa de GEI a partir de fuentes satelitales públicas y abiertas. Esta fue revelada al abordar la experimentación técnica sobre las fuentes que se estudiaron de forma teórica durante la primera anualidad. Según la literatura científica consultada en 2021, los servicios proporcionados por la misión Copernicus (**CAMS**) debieran haber permitido obtener datos de alta calidad acerca de la presencia y flujos de **CO₂ y CH₄** en la superficie terrestre; y como tal se establecieron como las fuentes de información a priorizar para esta investigación. Esta aproximación tuvo que ser descartada, al **demostrarse su inviabilidad durante la experimentación** posterior con estos conjuntos de datos atmosféricos para alcanzar análisis a nivel de explotación ganadera, pues la **resolución** ofrecida dista mucho de la necesaria para trabajar a escala local. De forma resumida, se extrajo un *dataset* de observaciones de metano generadas por el Sentinel 5 para la región de Asturias a través de la plataforma diseñada para tal fin (*Copernicus Open Access Hub*), y tras su correspondiente homogeneización y preprocesado (eliminación de datos repetidos y valores ausentes), fueron tratados para generar una representación gráfica preliminar de las observaciones.

Como se puede observar, se obtienen únicamente 11 observaciones altamente dispersas del valor de ese gas para todo el conjunto de datos en la región, ofreciendo una resolución muy alejada de los objetivos que se persiguen con SLOW. De forma análoga, se realizó una experimentación para extraer variables de N₂O y de CO₂ de esta fuente, resultando en una única observación que, de hecho, cae fuera del territorio. Tras una investigación en mayor profundidad al respecto, se pudo concluir que **no es posible alcanzar resoluciones espaciales** para estudios a escala local empleando **datos atmosféricos de fuentes abiertas**. Esto tuvo su reflejo en la metodología a plantear, por lo que fue necesario realizar los ajustes correspondientes en la metodología preliminar propuesta hasta la fecha, basada únicamente en investigación teórica, generando un proceso iterativo en el que **la técnica realimenta a la metodología, y viceversa**.

Así, la nueva aproximación metodológica implica basar los cálculos de **emisiones** medibles en la información proveniente, fundamentalmente, de la **sensórica in situ**. Se genera con esta iteración un nuevo enfoque que propone abordar la estimación de **absorciones** a través de imagen satelital, pivotando alrededor de un cálculo elemental: la **cantidad de biomasa** presente en las explotaciones.

Siguiendo las recomendaciones de la Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica de España (MITECO) y la Oficina Española del Cambio Climático (OECC), "como punto de partida para el cálculo de las absorciones de dióxido de carbono (...) se tendrá en cuenta únicamente la variación de las reservas de carbono en la biomasa viva, incluyendo biomasa sobre el suelo y bajo el suelo". Para este cálculo "se considerará únicamente la biomasa viva (tanto aérea como subterránea) excluyendo de la contabilización la materia orgánica muerta y el carbono orgánico del suelo". La cantidad de carbono fijado en la biomasa se calcula aplicando el factor asociado a la fracción de carbono de la materia seca, que el IPCC toma por defecto como 0.5. La relación de pesos

atómico y molecular del carbono y el CO₂ respectivamente permite **estimar la absorción de CO₂ asociada al carbono fijado** a lo largo de la vida de un ejemplar o una formación forestal.

Absorción de carbono a través de la biomasa

El sector agrícola tiene la peculiaridad de ser el único capaz de actuar como sumidero de carbono gracias a la capacidad del suelo y los cultivos leñosos de fijar CO₂. De acuerdo con el GPG-IPCC, no se considera que los cultivos generen un efecto de almacenamiento de largo plazo del carbono en la biomasa, tal como sí lo hace la vegetación leñosa perenne de los huertos, las viñas y los sistemas agroforestales. En el mismo sentido, la Red Española de Ciudades por el Clima afirma que: "el balance de carbono anual de la fracción viva de un cultivo herbáceo es neutro, ya que el aumento de biomasa viva de un año es igual a la pérdida de la misma por recolección y mortalidad en ese mismo año. Durante el tiempo de instalación de los cultivos leñosos, la tasa de fijación de carbono será positiva, mientras que una vez alcanzada la madurez del sistema, el balance de almacenamiento volverá a ser neutro, al igual que en el caso de las herbáceas". En resumen, los esfuerzos para estimar la eficacia del sector agrícola como sumidero de CO₂ deben centrarse en cuantificar la **capacidad de absorción de los terrenos ocupados por prados y vegetación leñosa**, en los que la fijación de carbono puede considerarse permanente o, al menos, duradera. Por el contrario, los cultivos herbáceos anuales se consideran neutros en emisiones de origen natural, ya que el carbono absorbido durante el crecimiento de la materia vegetal se libera de nuevo a la atmósfera a través de la digestión de los alimentos producidos y la quema o la pudrición. Si bien es cierto que las prácticas de gestión agrícola y de aprovechamiento de los residuos vegetales -como abono orgánico, para la producción de biomasa, etc.- o su quema improductiva tienen efecto sobre el saldo neto de emisiones de la explotación agrícola y forestal, estos deben considerarse emisiones o ahorro de emisiones de origen antropogénico, cuya estimación cuantitativa no es medible a través de herramientas tecnológicas, y se aborda con métodos basados en las declaraciones de actividad y de las prácticas de gestión de las explotaciones agroganaderas y forestales.

Formaciones forestales

La **biomasa relevante** está compuesta de la porción aérea (**AGB** o *Above Ground Biomass*), correspondiente al fuste, ramas, hojas y frutos; y la subterránea (**BGB** o *Below Ground Biomass*) correspondiente a las raíces. La porción subterránea de biomasa no es observable salvo por medios destructivos, por lo que suele estimarse como una proporción constante de la porción aérea.

Los métodos tradicionales de **cálculo de la biomasa en un ejemplar forestal** pueden ser directos o indirectos. El método directo es destructivo y consiste en la tala, troceado y secado del ejemplar para determinar su peso. Es habitual que en el proceso se registren las medidas más características del ejemplar para identificar ecuaciones dendrométricas que relacionan sus medidas externas (altura, diámetro a la altura del pecho, etc.) con su biomasa para cada especie forestal y cada tipo de ecosistema, clima, etc. Los métodos de estimación indirecta tradicionales emplean las ecuaciones dendrométricas regionales adecuadas en cada caso para determinar, por procedimientos no destructivos, la biomasa de otros ejemplares a partir de sus medidas, que se recaban mediante trabajos de campo. En las últimas décadas se han desarrollado, además, nuevos métodos indirectos basados en datos recogidos por sensores remotos, principalmente de imagen óptica y LiDAR, entre los que se distinguen dos enfoques: el de árbol individualizado, que establece relaciones entre las mediciones remotas de un ejemplar y su biomasa, y el de masa, que relaciona la densidad de una formación forestal, su altura, etc. con su biomasa conjunta. En

la actualidad es posible obtener muchas de estas medidas de **fuentes de datos satelitales**. La misión **GEDI** (anteriormente mencionada), a bordo de la estación espacial internacional, ofrece gran parte de los datos crudos necesarios para el cálculo de la biomasa con una resolución de 30 m, además de una estimación procesada con un grano de 1 km. Está previsto que en 2024 sea lanzada la misión **BIOMASS** (ESA), que también ofrecerá datos y estimaciones útiles para conocer la biomasa de una zona forestal.

Para **SLOW** se descartan los métodos destructivos y los indirectos que requieren la recogida exhaustiva de mediciones de campo. Se emplearán en su lugar métodos de **estimación de biomasa** a partir de datos procedentes de sensores remotos que combinan registros de **imágenes satelitales u ortofotografía** con la información que ofrecen los instrumentos **LiDAR** que permiten profundizar en la **estructura vertical** de la vegetación. En concreto, las imágenes ópticas fotográfica y multiespectral permiten estimar la fracción de cabida cubierta (**FCC**), que informa del grado de recubrimiento del suelo por la proyección ortogonal de las copas del arbolado, y los registros **LiDAR** permiten desarrollar modelos de elevación que informan de la altura de los elementos sobre la superficie del terreno y, en concreto, de la **altura de las copas** del arbolado de interés. Estas medidas de la frondosidad y altura de la vegetación se combinan para ofrecer estimaciones de la biomasa asociada, ya sea mediante enfoques de masa para formaciones boscosas tratadas como un conjunto inseparable o mediante enfoques de árbol individual.

Fuentes de datos

Se propone el uso de datos de sensores **LiDAR** recogidos por la misión **GEDI** que, en combinación con las **series temporales** que ofrece **Landsat**, permiten construir mapas tridimensionales detallados de la altura del dosel forestal (mediante el modelo **GEDI** de altura de copas) y su estructura vertical con resolución de 30 m. Asimismo, se empleará como referencia la **biomasa estimada** por la misión **GEDI** con resolución de 1 km. Las **imágenes ópticas y multiespectrales** ofrecidas por la misión **Sentinel 2**, con resolución de 10 m, son útiles para estimar la **FCC** necesaria para la aplicación de métodos indirectos de cálculo de la biomasa forestal. Por último, los datos de sensores **LiDAR** ofrecidos por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (**PNOA**) para 2021, con una resolución por debajo de 0.5 m, servirán para complementar los datos de **GEDI** tal que se puedan obtener modelos de mayor resolución.

Propuesta metodológica

Se propone un método de **estimación de la biomasa** mediante modelos de aprendizaje automático que tome como verdad-terreno las estimaciones de biomasa elaboradas para Asturias por la misión **GEDI** para la misma fecha en la que fueron recogidos dos datos **LiDAR** del **PNOA** en 2021. La resolución de estos datos etiquetados **GEDI** es de 1 km. Los regresores del modelo serán las medidas de **FCC**, altura de copas y otros registros de sensores remotos que resulten significativos para estimar la biomasa adoptada como verdad-terreno. El propósito del modelo es que pueda ser utilizado para calcular estimaciones posteriores, actualizadas en tiempo real y con un grano tan fino como permitan las fuentes de datos crudos, previsiblemente los 30 m de resolución de los datos crudos ofrecidos por la misión **GEDI**.

Praderas

La capacidad de las praderas para fijar carbono reside principalmente en la complejidad y profundidad de su sistema radicular, que no es observable superficialmente. Esto dificulta su estimación mediante

métodos indirectos. Se empleará el modelo de altura de copas que ofrece la misión GEDI para establecer un umbral que permita **distinguir las zonas forestales de las praderas**. Se propone un modelo de aprendizaje automático específico para los prados, de modo que el conjunto de regresores o sus pesos en el modelo puedan ser distintos de los identificados para el estudio de las áreas arboladas.

2.2. Avances en la definición final de la metodología

De acuerdo a estos nuevos planteamientos se está documentando el informe correspondiente, en el que se recoge la **última iteración de las bases generales** de la metodología SLOW, definiendo por separado las técnicas de estimación propuestas para emisiones y para absorciones, identificando los alcances asumibles y los métodos de recopilación de información necesarios. Asimismo, se está trabajando en definir de forma sistemática una propuesta para **seguimiento del progreso y establecimiento de metas** a la hora de implantar la metodología SLOW en un caso de uso, de cara a comprobar la eficacia y la eficiencia de las medidas tomadas en base a ella.

Adicionalmente, se han generado avances en cuanto a la definición de un conjunto de **recomendaciones para la toma de decisiones**, basadas en los resultados medidos siguiendo la metodología propuesta. Una vez analizados todos los factores que influyen a la hora de estimar las emisiones y absorciones del sector agroganadero, se deben establecer una serie de recomendaciones con el objetivo de mitigar sus potenciales emisiones en lo que a cambio climático se refiere. En términos generales, a la hora de evaluar el efecto que tiene este sector en el cambio climático se pueden tomar en consideración una serie de recomendaciones con implicaciones de tipo **ambiental, económico y social**, que a ser posible deben buscar cruces y sinergias de cara a incrementar su potencial en la reducción de la huella ecológica. Si bien la enumeración concreta de potenciales resultados de salida para el sistema inteligente de toma de decisiones será definida durante la continuación de esta actividad de investigación en la última anualidad del proyecto, hasta la fecha se ha generado un **catálogo** de ámbitos potenciales de **acción y recomendaciones generales** que sientan sus bases:

- Aumento de la autonomía alimentaria y reducción de costes de la explotación encaminada a una menor dependencia externa de piensos y forrajes y la consiguiente reducción de emisiones por transporte.
- En ganadería intensiva, uso de piensos con una mayor digestibilidad para disminuir la fermentación entérica de los rumiantes manteniendo el equilibrio entre salud, alimentación y producción.
- Utilización de aditivos en la dieta que faciliten los procesos de digestión.
- Fomento de razas con mayor rendimiento medioambiental y con menor proclividad a la emisión de GEI, sin perder de vista el balance alimentación/producción (vacas *procross* como Kiwi Cross en Nueva Zelanda).
- Aprovechamiento de los purines y estiércol producidos en la explotación como fertilizantes orgánicos para aumentar la productividad de los cultivos.
- Uso de materia vegetal sobrante de siegas, desbroces y podas para cama del ganado y posterior abono de superficies descubiertas, reduciendo así costes por la compra de paja para cama a la vez que aumentando las superficies de pasto por revegetación y el *stock* de carbono en el suelo.
- Reaprovechamiento y reciclaje de purines sobrantes excedentarios para la producción de biogás.
- Empleo del estiércol sobrante para la producción de humus de calidad mediante el empleo de la técnica de la lombricultura.
- Promoción del pastoreo rotacional regenerativo bajo el método PRV (Pastoreo Racional Voisin).

- Implementación de sistemas de pastoreo inteligente que permitan vincular las cargas ganaderas a disponibilidades de pasto en estado aprovechamiento óptimo, así como las emisiones derivadas del transporte en el caso de vigilancia en el marco de sistemas extensivos.
- Favorecer la implantación de sistemas agroforestales donde la combinación de arbolado y pasto ayude a la compensación de las emisiones de la explotación en caso de ser excedentarias, a la vez que se incrementen las superficies forrajeras de las mismas.
 - o Cabe destacar a este respecto las extensas posibilidades con que cuenta Asturias en los denominados “montes comunales” en sentido amplio, que se estima que suponen alrededor de 500.000 ha, y que más del 30% de los mismos se encuentran recubiertos de matorrales improductivos de alta exposición a incendios forestales.
- Fomentar los sistemas agroalimentarios circulares inteligentes basados en la producción, venta y consumo de alimentos de proximidad para reducir las emisiones derivadas del transporte.
- Cómputo estricto de la totalidad de los servicios ecosistémicos que ofrece la explotación (servicios de regulación, aprovisionamiento y culturales) y su posterior valoración de cara a la compensación de posibles impactos medioambientales, si es que se dieran, en el desarrollo de la actividad (ej. conservación de agrobiodiversidad de los pastos permanentes, mantenimiento de mosaicos paisajísticos tradicionales...).
- Manejo eficiente de prados y pastizales mediante sistemas combinados de pastoreo y siega que permitan la recolección de forrajes de calidad y el aprovechamiento óptimo del pasto, así como favorecer el incremento de la absorción del CO₂ en función de un mayor crecimiento de la vegetación.
- Considerar la circularidad en todas las escalas y partes del ciclo de vida del producto.
- Creación de marcos reglamentarios específicos para el sector agroganadero en los que se diferencie claramente los sistemas de producción (intensivos, mixtos y extensivos) y los requisitos exigidos a cada uno de ellos.
- Creación de un “etiquetado de carbono” que premie las explotaciones y productos bajos en emisiones o con balance positivo de cara a generar una conciencia ambiental en el consumidor que se traduzca en una mayor demanda de “productos bajos en carbono, neutros y o capturadores”.
- Orientación de las ayudas de la PAC en general, y de sus medidas agroambientales en particular, hacia la compensación de las explotaciones más eficientes y sostenibles en cuanto a menor huella ecológica.

Bloque 2: Herramientas tecnológicas

Este bloque da un marco para los desarrollos tecnológicos que resultarán en las herramientas de soporte para la metodología definida, suponiendo un punto de entrada para usuarios que quieran consultar la información y los resultados obtenidos con ella de una forma amigable y accesible, a través de interfaces de visualización avanzada. Así, este bloque se corresponde con los paquetes de trabajo PT2, PT3, PT4 y PT5; habiéndose generado avances en todos ellos durante la anualidad de 2022. Así, se ha continuado con la *Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos* (PT2) en pos de alcanzar los objetivos específicos OE2 “detección y evaluación de fuentes de datos disponibles” y OE3 “diseño de protocolo para la captación de datos heterogéneos”. Estos datos alimentarán la *Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos* que se está diseñando (PT3), relacionada directamente también con el OE3, así como con el OE4 de “exploración de técnicas para la integración y el procesamiento avanzado de datos”. Esta plataforma supondrá, además, el punto central para comunicar dos componentes iniciados en

esta anualidad: el *Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones* (PT4), que responde también a ese OE4, y las *Herramientas de visualización avanzada* (PT5), propuestas para alcanzar el OE5 de “diseño e implementación de un entorno virtual inmersivo para la visualización avanzada de información”.

De esta forma, los trabajos de 2022 para este bloque se organizan en torno a doce tareas correspondientes a cuatro PTs, de las cuales siete se han concluido y las cinco restantes continuarán activas en 2023, según la planificación inicial. Los cuatro paquetes de trabajo llegarán a su conclusión en la siguiente anualidad.

PT2: Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos

- T2.1: Análisis de sensores en el dominio de GEI
- T2.2: Análisis de fuentes públicas de imágenes por satélite
- T2.3: Diseño y despliegue de prototipos de sensores de GEI
- T2.4: Diseño de algoritmos de procesamiento de imágenes por satélite

PT3: Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos

- T3.1: Diseño de la capa de almacenamiento
- T3.2: Diseño de la capa de procesamiento escalable
- T3.3: Diseño de interfaces y capa de interoperabilidad

PT4: Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones

- T4.1: Homogeneización y preprocesado de los datos
- T4.2: Generación de variables relevantes para la estimación de las emisiones de GEI
- T4.3: Diseño y desarrollo del sistema de toma de decisiones (inicio 2023)

PT5: Herramientas de visualización avanzada

- T5.1: Diseño de sistemas de visualización de datos y resultados
- T5.2: Entornos virtuales inmersivos interactivos
- T5.3: Interoperabilidad con Plataforma e integración de resultados
- T5.4: Integración bajo estándares W3C (inicio 2023)

PT2: Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos

T2.1: Análisis de sensores en el dominio de GEI

Con esta tarea se pretenden estudiar las distintas alternativas disponibles para la hipersensorización del entorno, en cuanto a sensores y componentes para medición de composición del aire y emisiones de GEI, atendiendo a los parámetros que se han identificado claves en la metodología propuesta (dióxido de carbono y metano). El objetivo es realizar una selección de aquellos dispositivos compatibles con los planteamientos de SLOW. Hasta la fecha, se había podido concluir que los sensores valorados a lo largo de 2021 no resultaban idóneos para una monitorización continua del aire en entornos al aire libre, si bien la tendencia indicaba un gran interés por generar sensores de bajo precio y consumo aptos. Independientemente del grado de fiabilidad de las medidas realizadas, los dispositivos identificados sí permiten la validación de la tecnología con el fin de generar una metodología funcional y estandarizada para la medición de GEI en entornos dedicados a la agroganadería. Durante el periodo de 2022 se ha completado este análisis, concluyendo el catálogo de alternativas planteado con nuevos dispositivos, de los que finalmente se ha seleccionado un subconjunto para experimentación y planteamiento de

prototipos en el marco de la tarea T2.3. Para esta selección fue necesario atender a criterios relacionados con los costes derivados del mantenimiento de los mismos, por lo que hubo que tomar también decisiones concretas en cuanto a la tecnología de transmisión de los datos en el ámbito IoT, de forma relacionada con la plataforma central abordada con el paquete de trabajo PT3.

1. Catálogo de sensórica disponible en el mercado

Completando el estudio iniciado en 2021, se ha elaborado un **catálogo de alternativas** relativas a dispositivos sensores que permiten medir alguno de los gases objetivo. Con la agregación de nuevos sensores que son sensibles al N₂O, se ha completado un directorio que recoge un conocimiento general y representativo de este mercado, indicando las consideraciones de interés y las características de cada sensor, distinguiéndolos por los principios analíticos que emplean para sus mediciones.

Se tiene, así, un estudio comparativo de hasta **9 familias de sensores** de diferentes fabricantes, dedicados a la medición bien de CO₂, CH₄, N₂O, o alguna combinación de estos y otros tipos de gas. Tras evaluar sus características y especificaciones, se extrae que las resoluciones y precisiones manejadas, de forma general, serían **insuficientes** para realizar evaluaciones de la calidad del aire en **espacios abiertos**; si bien se detecta en los sensores basados en **principios electroquímicos** para la detección de gases específicos (como son los MQ-X de Winsen o bien los del fabricante Alphasense) una mayor cercanía entre sus casos de aplicación a este tipo de despliegues. Se concluye, por tanto, que sería de gran utilidad hacer una experimentación con estos sensores para comprobar su viabilidad en cuanto a realizar medidas con la suficiente exactitud como para realizar una valoración adecuada de la calidad del aire, por lo que se propone priorizar este tipo de sensores durante la fase de prototipado. Aun así, hay que tener en cuenta sus otros inconvenientes, como la dificultad para la adaptación de la señal y un cierto grado de mantenimiento, ya que suelen tener una vida útil aproximada de uno a dos años.

Limitaciones del uso de sensórica en espacios abiertos

Se presentan limitaciones en cuanto a la medición del **óxido nítrico** y el **metano** empleando estos medios. Los sensores que son capaces de medir estos gases y que encajan en un alcance económico correspondiente al de las redes sensóricas de bajo coste (mayor cantidad de sensores para incrementar la resolución espacial) ofrecen resoluciones y precisiones suficientes para las mediciones en entornos cerrados. Se conoce que los sensores estándar para estos gases se emplean típicamente en entornos controlados o interiores, donde las concentraciones a registrar son mayores y pueden llegar a conllevar riesgos para la salud. Por otro lado, la baja concentración de estos gases en la atmósfera plantea **limitaciones en cuanto a las mediciones en espacios abiertos**.

Respecto al N₂O, la presencia de este gas en la atmósfera es mínima. Mientras que los sensores son capaces de medir concentraciones cuya unidad de medida es de PPM (partes por millón), las concentraciones naturales del óxido nítrico al aire libre se miden en el orden de las PPB (partes por billón americano, mil millones). Como ejemplo ilustrativo, la media global de concentración atmosférica de este gas en el año 2018 fue de aproximadamente 331 PPB según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Un problema análogo se presenta en el caso del CH₄, al identificar que los rangos de medida de los sensores correspondientes pueden resultar limitantes. En 2021 se registró una concentración media global de metano de aproximadamente 1.896 PPB según la National Oceanic and

Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos, lo cual se encuentra en un segmento muy bajo del rango de medición de los sensores analizados en el catálogo anterior.

Se puede anticipar pues que, en las implantaciones para modelos correspondientes a ganadería extensiva, la medición de estos gases mediante dispositivos sensores pueda suponer limitaciones derivadas de la baja concentración de los gases de interés. Atendiendo a esta casuística, se puede concluir que actualmente **es desaconsejable el uso de sensores de bajo coste para medición de N₂O y CH₄ en entornos de exterior**. No obstante, tal como se adelantó al inicio de este documento, el uso de estos dispositivos servirá, en todo caso, para comprobar su funcionamiento y validar la infraestructura diseñada, que, poniendo el foco en la escalabilidad e interoperabilidad, será susceptible de actualizarse con la integración de nuevos sensores cuando la tecnología avance lo suficiente para permitir realizar estas mediciones de una forma fiable y asequible. Por otro lado, en el caso de modelos de explotación intensivos, donde el ganado está estabulado en un recinto cerrado, no se anticipa la ocurrencia de este tipo de limitaciones (si bien se deberá atender a las medidas de ventilación, naturales o artificiales, que la instalación ofrezca).

2. Definición de la tecnología de transmisión de datos

Tras el estudio de placas de desarrollo realizado durante la anterior anualidad, se pudo concluir que, de entre las alternativas valoradas, las que podrían resultar más adecuadas para una arquitectura como la propuesta son las Arduino MKR WAN, tanto en su versión 1300 como 1310, y también las Pycom LoPy4. Asimismo, se pudo anticipar la conveniencia de crear una **red LPWAN** para abordar despliegues de sensores en el territorio. Durante 2022 se ha continuado la investigación en esta vía, de forma complementaria a los avances realizados en el marco del paquete de trabajo PT3 destinado a la plataforma central, pudiendo concluir que la **tecnología de comunicación más adecuada es LoRa**. Con ella, se cumplen los requisitos identificados de emplear una tecnología **inalámbrica**, pues los despliegues se realizarán en entornos dedicados a la agroganadería, de **bajo consumo**, para evitar necesidades de mantenimiento continuado, y de **largo alcance**, permitiendo cubrir amplias extensiones de territorio que puedan corresponderse con las fincas a monitorizar.

Esta tecnología, basada en radiofrecuencia, es útil para cubrir grandes distancias, o redes IoT que no necesiten o no dispongan de acceso a la corriente eléctrica; en las que se anticipen envíos poco periódicos de información, o compartición de información poco voluminosa. Características como su gran alcance y bajo consumo, sin necesitar de redes de soporte adicionales, hacen de LoRa la tecnología idónea para los casos de uso planteados como objetivo de la metodología SLOW. Concretamente, se empleará en su modo de funcionamiento **LoRaWAN**, el cual permite la comunicación entre una red de dispositivos a través de un *gateway* hacia el servidor, con topología en estrella. De esta forma se han de distinguir, además del servidor encargado de las tareas de gestión de dispositivos o autenticación, los dos tipos de dispositivos implicados: **end nodes**, que se encargan de tomar la información del entorno y comunicarla vía LoRa, y **gateways**, que reciben los paquetes enviados por los nodos, y los reenvían al servidor que integra la plataforma IoT desplegada.

Así, los **módulos sensores** a diseñar tendrán que incorporar esta funcionalidad de **actuación como end nodes**, permitiendo la recogida de datos ambientales para transmitirlos hacia la plataforma LoRaWAN, que presentará esta interfaz de comunicación integrada en la plataforma central diseñada y generada en el marco del paquete de trabajo PT3. Estos **end nodes** pueden diferenciarse en tres clases (A, B y C) en función

de la frecuencia con la que escuchen mensajes descendentes del servidor, y pueden registrarse en la red mediante dos tipos de autenticación, ABP y OTAA; siendo este último el método más seguro a priorizar.

Con estos estudios se considera que se ha **completado esta tarea** de análisis, que complementa la T2.3 de elaboración de prototipos sobre sensores de GEI.

T2.3: Diseño y despliegue de prototipos de sensores de GEI

Con esta tarea se pretende llevar a la práctica el estudio realizado en la tarea T2.1, seleccionando un conjunto de sensores que llevar a la experimentación diseñando los componentes de integración necesarios y construyendo **prototipos para validar su funcionamiento**. Para ello se ha realizado una primera **prueba de concepto** que permitió comprobar la funcionalidad de interconexión y comunicación de información sobre gases a través de la tecnología inalámbrica previamente seleccionada. Los dispositivos empleados para ello son fundamentalmente dispositivos *ad-hoc* (sensores conectados a placas) de bajo coste. Esto no solo resulta más asequible, lo cual es conveniente para poder iterar si se encuentran limitaciones, si no que también permite una alta personalización de las soluciones.

1. Despliegue de red de comunicación LoRa

La alternativa seleccionada para desplegar una plataforma LoRaWAN es ChirpStack, fundamentalmente, por su carácter *open source* y gratuito, además de ofrecer múltiples integraciones con otras tecnologías. Si bien los detalles del estudio e implementación de esta plataforma se contextualizan en el paquete de trabajo PT3 (concretamente, en la capa de interoperabilidad), se presenta a continuación un diagrama a muy alto nivel de la arquitectura propuesta, para facilitar la comprensión en lo referente a los módulos sensores, que actúan como *end nodes* en esta red.

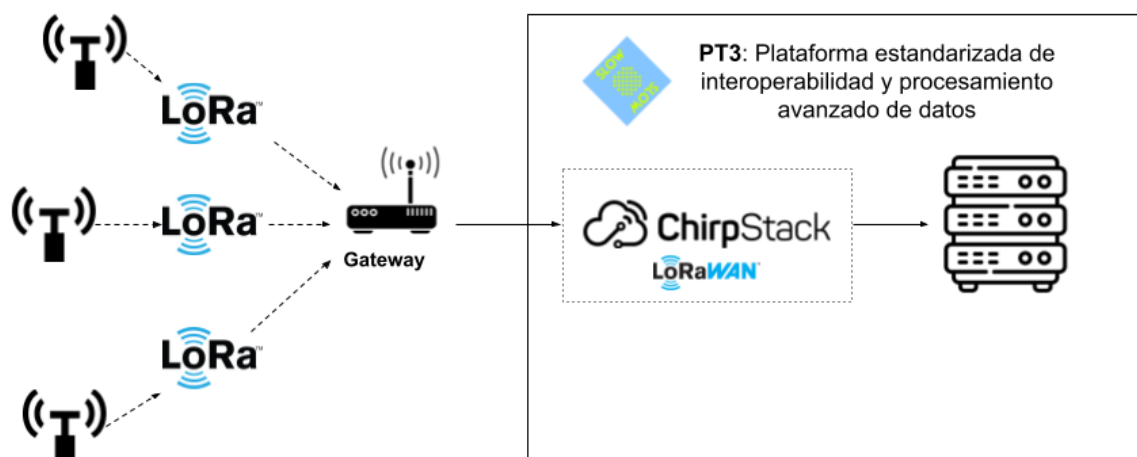


Figura 6. Arquitectura a alto nivel del despliegue LoRaWAN para los sensores.

De forma resumida, la ilustración anterior muestra el flujo que sigue la información de la prueba de concepto de comunicación con dispositivos sensores realizada:

1. El dispositivo, ya registrado en la red LoRaWAN y haciendo uso de sus sensores de GEI integrados, realiza la medición del entorno en el que se encuentra, obteniendo la concentración del gas correspondiente.
2. El dispositivo realiza el envío de esta información empleando la tecnología de transmisión LoRa. El paquete se encuentra encriptado, haciendo uso de claves negociadas durante el proceso de autenticación y registro en la red.
3. El gateway recibe el paquete del dispositivo y lo reenvía a través de la red (que puede ser Ethernet, 4G, WiFi, etc.) a la plataforma central de interoperabilidad, trabajada en el PT3. Esta plataforma integra el servicio ChirpStack, que recibe el mensaje.
4. ChirpStack descodifica el mensaje y elimina duplicados (si es que más de un gateway ha recibido el mismo paquete). También realiza las operaciones pertinentes para redirigir la información al resto de servicios de la plataforma, con el fin de que estos puedan implementar las capacidades necesarias de interoperabilidad, análisis, persistencia, etc.

Se ha podido comprobar con esta prueba de concepto la **factibilidad del despliegue de una red LoRaWAN** para la toma masiva de datos y su posterior envío, análisis y almacenamiento. Cabe señalar el alto grado de complejidad que refleja, no solo en el despliegue físico de dispositivos (y su programación correspondiente), si no también en todo el despliegue software necesario, que se complementa con la creación de la plataforma de interoperabilidad.

2. Prototipado de módulos sensores

Independientemente de la red de comunicación, para generar unos primeros prototipos que sirvan como dispositivos para medir GEI en el entorno, es necesario **diseñar estos módulos**. Se considera un módulo como un dispositivo *ad-hoc* formado por la combinación de diferentes partes hardware y software, independientes entre sí, pero que funcionan en conjunto para dar soporte a las funcionalidades necesarias: medir concentraciones de gas y enviar esa información a través de LoRa como *end nodes*.

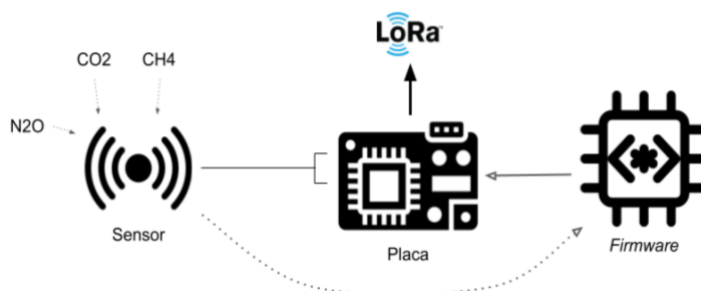


Figura 7. Esquema conceptual de módulos sensores de GEI.

En primer lugar, se dispone del **sensor particular** escogido para la toma de mediciones de un gas determinado. Este se conectará a la placa a través de sus pines. Esta **placa de desarrollo** a la que se conecta el sensor dispondrá de un microcontrolador para realizar las funciones de lectura y envío de datos. En la infraestructura propuesta para SLOW, esta placa debe tener soporte para LoRaWAN. Por último, el **firmware** se corresponde con el programa software desarrollado para ser cargado en la placa, incluyendo todas las instrucciones que debe seguir al ponerse en funcionamiento, que son entre otras, la configuración de placa y sensor, la lectura de datos medidos por este, y su envío a través de LoRa.

Así, los tres componentes se necesitan entre sí para ser operativos en una solución *ad-hoc* como la propuesta, pero son altamente independientes. Siguiendo este diseño, es posible conectar un sensor a otra

placa, o bien desarrollar el *firmware* para una placa y cargarla en otra que comparta su misma arquitectura. Esta modularidad favorece la escalabilidad del despliegue y la posibilidad de probar distintas configuraciones hasta encontrar las alternativas más adecuadas, o bien sustituir componentes en caso de que estos queden obsoletos a lo largo del tiempo por los avances tecnológicos que puedan darse. De esta forma, se contempla un gran abanico de posibilidades formado, entre otras alternativas, por el catálogo de placas y sensores estudiados durante la tarea de análisis, y por el desarrollo de *firmware* personalizado.

2.1. Prototipo MQ-X y Pycom Lopy4

En este primer prototipo se plantea el uso de un sensor de la familia MQ-X, ampliamente utilizado en el mundo maker. En concreto, se pueden encontrar diferentes tipos de sensores dentro de esta familia, que permiten tomar métricas de diferentes gases o conjuntos de ellos, pues se trata de una familia de sensores muy dinámicos y configurables. En este caso concreto, se ha integrado el **sensor MQ-135**, principalmente por su capacidad para medir **concentraciones de CO₂** en el aire.

El sensor se ha conectado a un **microcontrolador Lopy**, al que se conecta una antena LoRa, y a su vez se conecta a una **placa de desarrollo Pycom**, en la que se integra el sensor antes mencionado. Para desarrollar el *firmware* de lectura de datos del sensor se ha hecho uso de una librería *open-source*, llamada “MQ135”, que es compatible con Micropython (el lenguaje utilizado en estas placas) y permite realizar las acciones básicas de configuración de parámetros, funciones de calibración y lectura de los gases. Asimismo, para el envío de la información a través de LoRaWAN, se hace uso del módulo LoRa ubicado en la librería “*network*” de Pycom, que ya viene integrada en la memoria de la placa. Se generan, así, varios archivos que haciendo uso de esta librería permiten, a un alto nivel, obtener, configurar y autenticar las claves para comunicación, realizar el envío de paquetes de información (los datos medidos del sensor) e implementar el bucle para repetir este envío en intervalos de tiempo configurados.

Tras el despliegue de este prototipo en una primera prueba de concepto, se pudieron analizar los resultados obtenidos para extraer **conclusiones desfavorables**. En primer lugar, se observa que los **valores** obtenidos del sensor **MQ-135** son altamente **inestables y poco precisos**. Además, precisa de un largo periodo de calentamiento que repercute en un alto consumo energético. Por otro lado, la configuración de este sensor se vuelve tediosa, pues es necesario modificar el *firmware* cada vez que se calibra, lo cual se refleja en una **necesidad de mantenimiento continuo** para evitar que quede en un estado inservible a largo plazo. Adicionalmente, para realizar las tareas de calibración es necesario disponer de datos de temperatura y humedad del entorno, lo que implica la obligación de integrar un sensor externo que sea capaz de tomar estas medidas; si bien esto queda resuelto con el diseño de este módulo concreto, al ofrecer estas métricas la placa Pysense. Otra gran limitación detectada radica en que la **plataforma de desarrollo para microcontroladores Pycom** (*pymkr*) dispone de **poco soporte y estabilidad**; su alternativa para diferentes IDEs sufre de varios errores, y en la más estable se ha cancelado el soporte. Por último, la conexión del sensor para este tipo de microcontroladores conlleva realizar soldaduras o diseñar algún tipo de adaptador o interfaz, lo cual supone un ligero inconveniente que puede llegar a ser un problema para llevar a cabo diferentes pruebas.

2.2. Prototipo MQ-X y Arduino MKRWAN13X0

En vista de las limitaciones encontradas con el anterior diseño, se propone el despliegue de otro prototipo en el que se mantenga el **sensor MQ-135**, sustituyendo la placa de desarrollo por un **Arduino MKRWAN1300**, una placa de uso más extendido en el ámbito del IoT.

La primera desventaja identificada con el cambio es que el desarrollo del *firmware* se debe realizar en el lenguaje C++, en lugar de Micropython, lo que supone una curva de aprendizaje mucho más elevada;

siendo necesario además añadir un sensor externo para conocer datos de temperatura y humedad para las tareas de calibración. El sensor integrado para tal fin es, en este caso, el DHT22.

Se hace necesario, por lo anterior, desarrollar un nuevo *firmware* a medida para este diseño del módulo sensor, empleando una nueva librería *open source* dedicada al sensor MQ-135, que permite su manejo en entornos C++ para realizar funcionalidades básicas análogas a las anteriormente descritas. Para las tareas relacionadas con LoRaWAN se hace uso de la librería oficial del microcontrolador, que cuenta con gran respaldo y soporte: “MKRWAN”, compatible con los modelos 1300 y 1310. Con esta, se construye el archivo principal del *firmware*, que realiza las funciones de inicialización, configuración de claves y autenticación, envío de los mensajes y generación del bucle para establecer la periodicidad de los envíos.

Con este diseño y configuración se pudo concluir que todos los problemas relacionados con el uso del sensor MQ-135 persisten con la nueva placa. Por otro lado, el desarrollo en **Arduino**, a pesar de disponer de un lenguaje de programación mucho más complejo, supone **mayor estabilidad y soporte** por parte de los entornos de desarrollo. Además, se ha comprobado que la placa de desarrollo sufre menos problemas a la hora de funcionar con la tecnología inalámbrica LoRa, lo que supone menor pérdida de paquetes y **mayor calidad en la comunicación**. Otra ventaja menor, pero muy conveniente, es que los pines de la placa Arduino facilitan las pruebas y la conexión de diferentes sensores, lo que evita llevar a cabo soldaduras y facilita el proceso de iteración.

2.3. Prototipo Dynament y Arduino MKRWAN1300

Habiendo experimentado las limitaciones derivadas del uso del sensor MQ-135 y habiendo observado las ventajas del uso de una placa Arduino frente a una Pycom, este tercer prototipo se diseña **sustituyendo el sensor de gas por un Dynament**, y manteniendo la placa MKRWAN1300. En concreto, se dispone de sensores Dynament para CO₂, CH₄ y N₂O, abordando la prueba de concepto con el sensor de **CO₂**.

Las labores relacionadas con la comunicación LoRaWAN, se realizan de manera análoga a lo documentado en el apartado anterior, haciendo uso de la librería MKRWAN. Para la lectura de los datos de los sensores en el *firmware*, se ha utilizado código basado en una nueva librería proporcionada de forma *open source*. Esta permite la abstracción respecto de aspectos complejos como la lectura de los datos enviados por el sensor a través de puerto serie, y su reconstrucción y posterior lectura haciendo uso de *buffers* de memoria. Una gran ventaja que supone hacer uso de sensores Dynament con dicha librería, es que esta sirve para cualquier gas, sin necesidad de realizar cambios en el firmware. Es decir, es posible cargar el mismo software a una placa con un sensor Dynament de CO₂ y también a otra que haga uso de un sensor Dynament de CH₄, y el funcionamiento será el mismo en ambos casos. Esto también evita la necesidad de cargar el *firmware* o realizar cambios en su código o configuración si varía el sensor de Dynament instalado. Con este módulo sensor se obtiene el valor del gas en partes por millón, valor máximo de gas medido, valor mínimo de gas medido y absorbencia del sensor. Adicionalmente, este también proporciona mediciones de temperatura, lo que evita la necesidad de instalar un sensor externo para este propósito.

2.4. Conclusiones sobre la experimentación

Se ha llevado a cabo el proceso de diseño, análisis y evaluación de diferentes módulos sensores de GEI en forma de prototipos funcionales, pudiendo extraer las siguientes conclusiones hasta la fecha.

En primer lugar, las **placas Arduino** han resultado la opción **más recomendable** en comparación con otras alternativas, como las placas Pycom. La libertad de desarrollo, la estabilidad y el soporte proporcionado para la creación de firmware son aspectos superiores en el uso de placas Arduino.

En cuanto a **sensores**, los de la familia **MQ-X** pueden ser apropiados para pequeños trabajos de desarrollo con microcontroladores, pero **no son recomendables** para su incorporación en el marco de la metodología SLOW, ni para su uso en otros proyectos de similar calado, debido a su falta de precisión, dificultad de configuración y calibración, así como su necesidad de calentamiento previo.

Por otro lado, los sensores **Dynamment** ofrecen una **alternativa más eficiente y con un menor consumo** que los MQ-X. Presentan un tiempo de calentamiento menor y el *firmware* solo envía datos una vez que el sensor se encuentra caliente y calibrado (lo que no se daba en el caso del MQ-135). Además, su flexibilidad en el desarrollo del *firmware*, que no necesita de modificaciones para medición de distintos gases, y la disponibilidad de un *housing* apto para su uso en exteriores, hace de los sensores Dynamment una opción adecuada para implantaciones de la metodología SLOW.

Cabe destacar que, en general, en cuanto a la situación del mercado actual, en este campo se observa una falta de precisión en las mediciones al aire libre, a no ser que se recurra a alternativas de muy alto coste. Hasta la fecha, se ha podido comprobar la **potencialidad del uso de placas MKRWAN1300 o 1310 junto con sensores Dynamment** para la implantación de la metodología, si bien es posible que en el futuro se propicie un cambio en la sensórica para la instalación de dispositivos más precisos y aptos para el aire libre.

En lo restante de esta tarea a lo largo de la siguiente anualidad se continuará esta experimentación con un despliegue preliminar de dispositivos, evaluando el funcionamiento de los prototipos generados.

T2.2: Análisis de fuentes públicas de imágenes por satélite

Esta tarea plantea la búsqueda de fuentes de imágenes satelitales de potencial aplicación en el dominio del estudio de los GEI, identificando técnicas o algoritmos para extracción de datos de utilidad sobre las mismas. Durante 2022 se ha completado este estudio, que como se verá a continuación, fue realimentado con la investigación abordada en la tarea T2.4 de diseño de algoritmos para extracción de información sobre estas fuentes.

Si bien las conclusiones alcanzadas durante la investigación teórica en 2021, acerca de servicios de observación de GEI por satélite, apuntaban al uso de la información de CO₂ y CH₄ ofrecida por CAMS (Copernicus) como fuente prioritaria para esta investigación, la experimentación enmarcada en la tarea T2.4 reveló su inviabilidad para alcanzar las resoluciones necesarias para estudios a escala local. **No es posible emplear, de forma directa, información de GEI en la atmósfera proporcionada por datos satelitales abiertos y públicos**, ya que las observaciones son muy dispersas, lo que imposibilita hacer análisis a nivel de parcela de explotación agroganadera, tal como se pretende con SLOW. Se descarta, así, el uso de este tipo de fuentes para calcular presencia de GEI en las zonas de estudio, si bien otros tipos de información satelital se pueden utilizar para realizar estimaciones sobre la capacidad del terreno para actuar a modo de **sumidero de carbono**.

1. Estudio de la técnica para detección de sumideros de CO₂ por cobertura vegetal

De forma complementaria a la monitorización de los GEI, se puede utilizar la **tecnología satelital** para la **monitorización de sumideros de CO₂**, en especial de la **cobertura vegetal** y de los sistemas planctónicos en ecosistemas acuáticos; los mayores sumideros de este gas. Las tecnologías para este fin ya se han empleado además para otras tareas interseccionales de gran valor económico como la monitorización de cultivos, el control de plagas y la gestión de recursos hídricos y la conservación de la biodiversidad. Estos datos pueden ser integrados en sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) para generar modelos de cambio de uso de la tierra y de la cobertura vegetal. La combinación de estos datos

con otros tipos de información, como las condiciones climáticas y los patrones de uso de la tierra, permiten una comprensión más profunda de la dinámica de los sumideros de CO₂ y su papel en el cambio climático. Las coberturas vegetales terrestres (bosques, praderas, cultivos, etc.) son sistemas bióticos de altísima complejidad y susceptibles de cambios a escalas temporales múltiples (cambios diarios, estacionales, tendencias generales), por lo que la monitorización constante vía imágenes satélite ofrece la capacidad de acceder a una mayor cantidad de información de manera más económica que otras técnicas de monitorización, lo que en última instancia habilita para la estimación de la capacidad para actuar como sumidero de un determinado sistema.

Cuando una cobertura vegetal actúa como **sumidero neto**, se produce un **aumento de la biomasa** total en el terreno (tanto de manera directa vía crecimiento vegetativo, como de manera indirecta proveyendo de nutrientes a otros eslabones de la cadena trófica del ecosistema local). Dado que **la cantidad de biomasa es función directa del carbono fijado** por un sistema [Pan, Y. et al., 2011, "*A large and persistent carbon sink in the world's forests*"], se puede concluir que un aumento neto de la biomasa total implica denominar al sistema como un sumidero, aquel donde el balance (diferencia entre emisiones y captura) es negativo. Debido a las escalas temporales antes mencionadas, un sumidero neto puede ser descrito, en una escala temporal más concreta, como un emisor. Por ejemplo, una plantación de árboles de hoja caduca o una cobertura vegetal constituida principalmente por plantas pirófilas, puede, en momentos puntuales, ser un emisor neto, mientras que en otras resoluciones temporales se comporta como un sumidero neto. En terrenos dedicados al cultivo, se ha de tener en cuenta que la disminución de la biomasa de la cobertura vegetal no se tiene que deber a procesos necesariamente emisores sino también a aquellos propios de la actividad, como la siega o la colecta.

Para la **estimación de esta biomasa mediante imágenes satelitales** se pueden utilizar diferentes **índices radiométricos**, que son representativos del estado de la cubierta vegetal. Estos índices se calculan como funciones de las reflectancias medidas a distintas longitudes de onda. Uno de los índices más usados es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), que se basa en la medición de la reflectancia de la luz roja y la infrarroja sobre la superficie terrestre. Las plantas bien desarrolladas absorben más luz roja (por la mayor cantidad de clorofila) y reflejan mayor infrarroja (por su mayor contenido en agua) que plantas menos desarrolladas o en situación de marchitez.

Adicionalmente, satélites o misiones que incorporen sensores de teledetección tipo **LiDAR** (*Light Detection and Ranging*) o sistemas láser altímetro, también pueden aportar información muy relevante para este cálculo, pues ofrecen mediciones acerca de la **altura de la vegetación**, e incluso sobre la estructura tridimensional de la misma. De esta forma, es posible crear modelos que relacionen la altura de la vegetación, extraída de estas fuentes, con la cantidad de biomasa presente en un territorio; si bien es necesario contar con datos de campo que aporten la "verdad-terreno".

Por todo ello se considera conveniente **ampliar el estudio realizado sobre fuentes de datos satélite** públicas y abiertas, hasta ahora enfocado en el acceso a información de emisiones o presencia de GEI, y extenderlo a otras fuentes que proporcionen imágenes satelitales o datos de este tipo, con el fin de calcular la biomasa, y con ello estimar la capacidad de fijación de carbono por parte de la vegetación.

2. Estudio de fuentes satelitales para estimación de biomasa

Durante la investigación preliminar sobre bancos abiertos de imágenes satélite para absorciones de GEI ya se destacaron programas como Copernicus o el Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT), con los tres planes nacionales PNOA, PNT y SIOSE. Con la nueva información adquirida tras otra anualidad de

investigación, se considera relevante profundizar en un análisis sobre las fuentes públicas que se consideran de mayor interés para calcular la biomasa presente en un terreno. Así, durante 2022 se ha **estudiado en detalle la misión Sentinel-2**, como parte del programa Copernicus, para obtención de **imágenes ópticas** de alta resolución; y además se ha **identificado una nueva fuente** de datos no considerada hasta el momento: la misión satélite **GEDI**, que utiliza **LiDAR** con el objetivo de comprender la biomasa forestal a escala global.

Sentinel-2 (programa Copernicus)

Sentinel-2 es una misión de satélite de observación de la Tierra desarrollada por la ESA como parte del programa Copernicus de la Unión Europea. El objetivo principal de Sentinel-2 es proporcionar datos de **imágenes ópticas de alta resolución** de la superficie terrestre para una amplia variedad de aplicaciones, como la gestión de recursos naturales, la agricultura, la seguridad alimentaria, la prevención de desastres y la planificación urbana. Está conformada por el Sentinel-2A y el Sentinel-2B, dos satélites idénticos que trabajan en órbitas opuestas con un desfase de 180º entre sí y una frecuencia de 10 días por satélite. En cuanto a características generales de la misión, destaca la **imagen multispectral**: datos en 13 bandas en el espectro visible, en el infrarrojo cercano e infrarrojos de onda corta, además del espectro electromagnético. Al basarse en imagen óptica, cuestiones ambientales como la nubosidad pueden generar un gran impacto en los resultados; y además hay que tener en cuenta que la resolución puede ser distinta para diferentes bandas del espectro, si bien se establece que la resolución estándar aportada es de **10 metros por pixel**. Estas imágenes están corregidas atmosféricamente, ofreciendo resultados de nivel 1C (ortorectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera) y 2A (ortorectificadas y con niveles de reflectancia por debajo de la atmósfera, con mayor nitidez).

Gracias a la aplicación web gratuita Sentinel EO Browser es posible acceder a las imágenes y datos obtenidos por la familia de satélites Sentinel con una interfaz amigable, con diferentes filtros y configuraciones, ofreciendo además múltiples capas de visualización, como por ejemplo el índice NDVI de la región de interés. Por otro lado, para realizar peticiones procedurales, se identifica la herramienta **Sentinel Hub**, que ofrece una **API en la nube** a la que se pueden realizar peticiones configurando parámetros como la región de interés y las bandas deseadas, para integrar los resultados en otras aplicaciones.

GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation)

GEDI es una misión conjunta entre la NASA y la Universidad de Maryland que hace uso de herramientas instaladas en la Estación Espacial Internacional. Los datos adquiridos con los tres láseres del instrumento se utilizan para construir **imágenes tridimensionales** detalladas de **mapas forestales** con las alturas de sus bosques, e incluso la distribución de ramas y hojas. Así, ofrece información clave para estudiar la cantidad de biomasa y carbono en los bosques, además de permitir el análisis de lo que pierden cuando se perturban dichos bosques (por ejemplo, a raíz de incendios). Para ello, GEDI utiliza la **tecnología LiDAR**, previamente mencionada, que emite pulsos de luz láser y mide el tiempo que esta tarda en reflejarse en la superficie terrestre y volver al satélite, con lo que es capaz de conocer a qué distancia se encuentra. De esta forma, GEDI proporciona datos en alta resolución de la altura de la vegetación en un amplio rango de hábitats forestales, incluyendo bosques tropicales, boreales y templados. Estos datos pueden ser utilizados para la **estimación de la biomasa** de la vegetación, la modelización de la dinámica de los bosques y la evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales al cambio climático.

Para calibrar correctamente estas estimaciones en todo el mundo, GEDI depende de la recogida **de datos de campo** para generar un inventario de *plots* terrestres de referencia (“verdad-terreno”) que se enfrentan al dato del escaneo láser LiDAR para generalizar un modelo a partir de ello. Es decir, que emplear resultados de GEDI en una zona geográfica muy diferente de aquellas sobre las que se ha entrenado el modelo no sería fiable, ya que diferencias en la climatología repercutirán en diferentes tipos de especies arbóreas, con distintas densidades, alturas y estructuras. Bosques pertenecientes a diferentes zonas climáticas presentarán diferentes características estructurales que el modelo no habrá aprendido a generalizar.

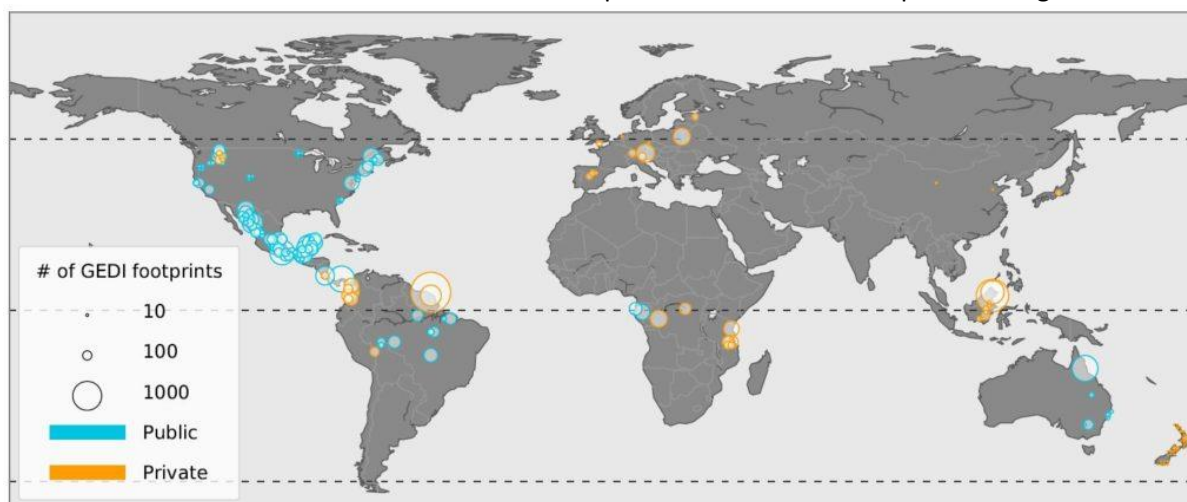


Figura 11. Localizaciones de los datasets de calibración de la ecuación de biomasa de GEDI.

Afortunadamente, España se encuentra entre los países de los que se han aportado datos de referencia privados para esta calibración, y los datos de GEDI ya se han aplicado con éxito en investigaciones muy recientes en regiones limítrofes, en el noroeste del país [J. Guerra y A. Pascual, 2021, “*Using GEDI lidar data and airborne laser scanning to assess height growth dynamics in fast-growing species: a showcase in Spain*”]. Es de esperar, por tanto, que por proximidad geográfica y similitud en la climatología y en el ecosistema, se pueda utilizar esta fuente para obtener información de Asturias con alta fiabilidad.

Con estos avances, se considera **completa esta tarea** de análisis, que complementa la T2.4 de diseño de algoritmos de procesamiento para imágenes satélite.

T2.4: Diseño de algoritmos de procesamiento de imágenes por satélite

Con esta tarea se pretende concretar sobre los estudios teóricos realizados en el marco de la tarea T2.2 de forma aplicada a SLOW para seleccionar las alternativas más adecuadas de fuentes de imágenes por satélite y diseñar los procesos de lectura y tratamiento de esos datos. Así, se pretenden definir las técnicas que se aplicarán sobre las imágenes satelitales para obtención de información relevante en cuanto a la estimación de GEI en un territorio, resultando finalmente en los algoritmos correspondientes a integrar en la plataforma central (PT3) para su despliegue.

Este proceso de diseño se realimenta con la propia experimentación sobre los datos y las fuentes estudiadas. Así, siguiendo las conclusiones de la investigación teórica (T2.2) durante la anualidad previa, **se abordó el uso de la información de observación de GEI ofrecida por CAMS**. Para ello, se extrajeron diferentes *datasets* con diferentes formatos, pues no existe un *reader* documentado de archivos *Native* (.nat) y hubo que recurrir a formatos *NetCDF* (.nc) para poder cargarlos en Python. En este entorno se

aplicó el **preprocesamiento** necesario para detectar y eliminar valores nulos o incorrectos del dataset (aquellos que registran valores incoherentes “0xFFFF”), y posteriormente se calculó su correcta **proyección** en base a su registro de latitud y longitud para representar visualmente la ubicación de las observaciones sobre un mapa, recogiendo las variables de vapor de agua, ozono, N2O, CO, CH4 y CO2.

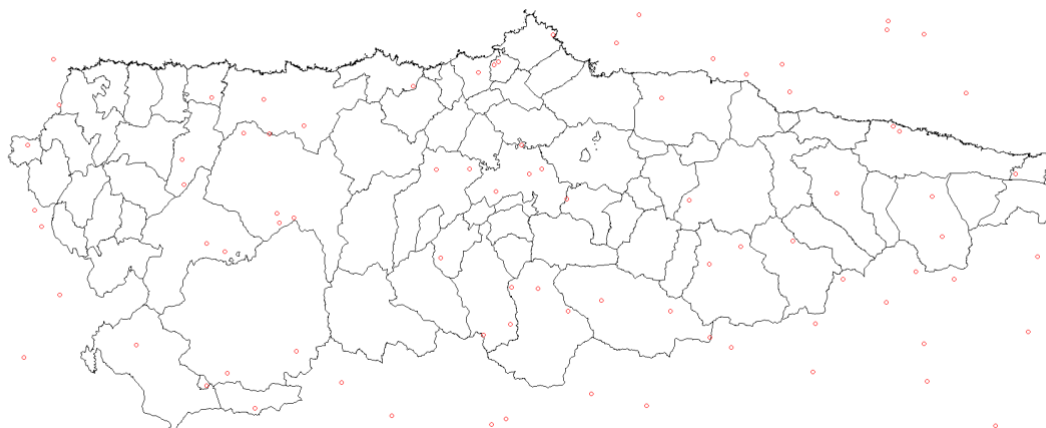


Figura 12. Proyección de las observaciones de GEDI para Asturias ofrecidas por CAMS (previo filtrado de datos nulos).

Tal como se documentó previamente en este mismo informe al indicar la necesidad de reconsiderar la metodología inicialmente planteada (tarea T1.3 del PT1), se pudo comprobar que las observaciones de los gases objetivo son altamente dispersas, con un máximo de 11 observaciones en toda la región, y se considera que **su uso no es viable para realizar estudios a escala local**, a nivel de explotación ganadera. Esta conclusión tuvo reflejo a su vez en la tarea T2.2, repercutiendo en el nuevo enfoque de la investigación basado en el uso de **imagen óptica y LiDAR para estimación de la biomasa**, con el fin de localizar sumideros; y por tanto supuso una **nueva iteración para la metodología** planteada. Tras el estudio de fuentes de información inicialmente no consideradas, en el marco de esta tarea T2.4 fue posible establecer una **selección de las fuentes de imágenes por satélite** finales que se emplearán de acuerdo a este nuevo enfoque planteado, así como de una **definición y diseño preliminar** de cómo se manejarán estos datos para extraer la información relevante para SLOW:

- **Datos LiDAR de la misión GEDI** complementados con series temporales para obtener mapas de la altura del dosel forestal (modelo de GEDI de altura de copas) y la estructura vertical, con resolución de 30m.
- **Cálculos de biomasa estimada por la misión GEDI**, con resolución de 1km. Esta biomasa servirá como “verdad-terreno”.
- **Imágenes ópticas y multiespectrales ofrecidas por la misión Sentinel-2** para estimar la FCC necesaria para aplicación de métodos indirectos de cálculo de biomasa forestal, con resolución de 10m. También servirán para extraer índices de interés complementarios sobre el estado de la vegetación, como el NDVI.
- **Datos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)**, con resolución por debajo de 0.5m, próximos en fecha a las mediciones GEDI para aumentar la resolución del modelo generado.

Este diseño preliminar del tratamiento de las múltiples fuentes de información seleccionadas será susceptible de evolucionar a lo largo de la investigación restante sobre esta tarea en la anualidad sucesiva.

PT3: Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos

El paquete de trabajo PT3 está dedicado al diseño y creación de una **plataforma central** que aborde las tareas de almacenamiento, procesamiento y análisis de los datos heterogéneos de las fuentes seleccionadas. Así, las capas que debe presentar esta plataforma pueden categorizarse, a alto nivel, en tres grupos:

1. Por un lado, los trabajos de diseño orientados a la capa de **almacenamiento**, es decir, el conjunto de componentes encargado de proporcionar servicios de persistencia y consulta de datos heterogéneos, de acuerdo a las necesidades del proyecto.
2. Por otro lado, una capa de **procesamiento** capaz de ser escalada de forma horizontal para soportar los flujos de datos identificados en el proceso de elaboración de la metodología SLOW.
3. Por último, una capa dedicada a las interfaces de comunicación y la **interoperabilidad** que permita interconectar los datos almacenados con otros servicios de análisis y/o visualización.

T3.1: Diseño de la capa de almacenamiento

Esta tarea está destinada al diseño de la **primera capa** correspondiente al almacenamiento. Durante la anterior anualidad ya se había realizado un análisis de tecnologías disponibles, estableciendo una selección preliminar de las mismas y un borrador del diseño de la arquitectura de esta capa.

1. Diseño final de la capa de almacenamiento

Gracias a la investigación realizada en el marco de otras tareas se han podido definir nuevas fuentes de información y concretar la naturaleza de los datos a tratar. Así, a las consideraciones de necesidad de almacenamiento de información realizadas hasta la fecha hay que incorporar las nuevas, derivadas de la experimentación con información satelital y la selección de las misiones Sentinel y GEDI como fuentes fundamentales de información para calcular absorciones de carbono. Por otro lado, una fuente de información que previamente se había pasado por alto se corresponde con las potenciales capas de datos GIS e información catastral, que se empleará para identificar las parcelas de territorio correspondientes a una explotación. Así, es necesario considerar nuevos formatos que recojan métricas georreferenciadas, como el GeoJSON.

En cuanto al **catálogo de tecnologías** de almacenamiento realizado en 2021, sigue vigente en la actualidad, si bien se ha **actualizado**, viéndose ampliado con una nueva entrada correspondiente a la tecnología **Redis**. Se trata de una base de datos NoSQL que almacena los datos en memoria RAM, por lo que su principal ventaja es su velocidad y su alta disponibilidad, además de permitir el almacenamiento de datos en diferentes formatos. No obstante, se trata de una alternativa poco adecuada para la persistencia de información crítica o para grandes volúmenes de datos, por lo que se descarta su uso para SLOW. Con la adición de este análisis, la evaluación de alternativas como tecnología de almacenamiento se completa, habiendo comparado MinIO, PostgreSQL, MongoDB, Redis, TimeScale e InfluxDB.

Las conclusiones acerca de las tecnologías idóneas para su aplicabilidad se mantienen, si bien se ha **actualizado el diseño de la arquitectura para la capa de almacenamiento** para reflejar el conocimiento más preciso sobre las fuentes de información a integrar.

El uso de **MinIO** encaja a la perfección con los requisitos de almacenar datos no estructurados, pues esta alternativa está especialmente diseñada para almacenar objetos en nube. En el caso de SLOW, los datos a almacenar con MinIO serán, principalmente, las **imágenes satelitales** (ej. las obtenidas desde el servicio Sentinel Hub) y los **datos catastrales**, que se obtienen en formato GeoJSON a través de servicios como los

proporcionados por SIGPAC. Se plantea también el uso de **MongoDB** para el almacenamiento de **datos de propósito general**, como referencias a los objetos o imágenes almacenados en MinIO, así como los datos validados o las ubicaciones de los dispositivos o sensores fijos sin funcionalidad GPS. La poca relación natural entre los datos a almacenar hace que el uso de una base de datos NoSQL sea óptima, y entre las alternativas disponibles, la seguridad y fiabilidad que ofrece MongoDB hace que sea la seleccionada para este propósito. Por último, se propone **InfluxDB** para el almacenamiento de datos de **series temporales**, que en este caso se corresponden con los datos capturados por sensorica. En el esquema aparece, además, ChirpStack para la comunicación con la red de sensores, cuestión sobre la cual se documentará en la tarea T3.3 correspondiente al diseño de la capa de interoperabilidad.

2. Implementación funcional de la capa de almacenamiento

En cuanto a la implementación funcional de esta arquitectura, para toda la plataforma se plantea un **enfoque basado en microservicios**. Es decir, que cada una de las funcionalidades de la plataforma se divide en pequeños servicios independientes que se ejecutan en contenedores de Docker. Docker es una herramienta de virtualización de contenedores que permite la creación de ambientes de ejecución aislados y portables para aplicaciones y servicios. De esta forma, los contenedores de Docker incluyen todo lo necesario para que las aplicaciones se ejecuten correctamente, incluyendo el código, las dependencias y las configuraciones; con lo que se obtiene solidez, flexibilidad, portabilidad y facilidad de mantenimiento. Cada uno de estos servicios es responsable de una tarea específica, lo que convenientemente permite una mayor eficiencia y escalabilidad en la gestión de grandes cantidades de información.

En este contexto, se ha obtenido una **implementación funcional de la capa de almacenamiento** que traduce directamente de la arquitectura propuesta, a través de tres servicios independientes entre sí. Este planteamiento se replica de forma análoga para el resto de capas, documentadas en las siguientes tareas de este paquete de trabajo.

La base de datos de series temporales **InfluxDB**, que habitualmente escucha en el puerto 8086, almacena los datos provenientes de los módulos sensores desplegados como prueba de concepto. La información es enviada directamente desde el servidor ChirpStack (plataforma LoRaWAN, en la capa de interoperabilidad).

La base de datos NoSQL **MongoDB**, que habitualmente escucha en el puerto 27017, almacena:

- Datos validados provenientes de **SIGPAC**. Estos objetos contienen la referencia catastral de las parcelas y los puntos geográficos (latitud y longitud) que identifican su geometría.
- Datos de **NDVI** provenientes de las imágenes obtenidas desde Sentinel Hub, una vez que estas son procesadas.
- **Ubicaciones geográficas** de los dispositivos desplegados que no disponen de funcionalidad GPS. Estos datos se concatenan a los resultados que se consultan desde InfluxDB.

La base de datos de objetos MinIO, compatible con S3 y que escucha habitualmente en el puerto 9000, almacena:

- Ficheros crudos descargados desde SIGPAC, que también pueden ser insertados manualmente por los usuarios.
- Imágenes descargadas desde el servicio de Sentinel Hub para procesarlas y, además, guardar un histórico de la información.

Adicionalmente, se ha integrado un servicio de **Grafana**, que habitualmente escucha en el puerto 3000. Grafana es un servicio que permite conectarse a diversas fuentes de datos y construir cuadros de mando con gráficas que los presentan de forma visual. Con este servicio se verifica la comunicación de los datos, obtenidos de los sensores y almacenados en InfluxDB.

Esta implementación funcional se entregará integrada en la plataforma completa, con el resto de capas, en 2023 según la planificación.

T3.2: Diseño de la capa de procesamiento escalable

Esta tarea está destinada al diseño de la **segunda capa** correspondiente al procesamiento automático de los datos previamente almacenados. Durante la anterior anualidad ya se había realizado un análisis y selección preliminar de tecnologías aplicables para conformar esta capa de procesamiento de datos que faciliten la rápida iteración y la escalabilidad para, potencialmente, manejar grandes conjuntos de información; incluyendo además una versión preliminar del diseño de la arquitectura.

1. Diseño final de la capa de procesamiento escalable

Se ha realizado una revisión del catálogo tecnológico previamente considerado para la capa de procesamiento escalable, verificando que mantiene su vigencia en la actualidad. En este, se habían analizado y comparado tecnologías dedicadas a la orquestación de procesos para gestionar y organizar series de tareas, como Apache Airflow y Dagster; además de estudiar diferentes librerías de procesamiento de datos con paralelización para favorecer la escalabilidad horizontal, como Celery y Dask. Todas ellas serían susceptibles de emplearse para configurar la infraestructura buscada, si bien en la presente anualidad se ha establecido una selección final que define el **diseño definitivo de esta capa**, que se refleja en el siguiente esquema.

Se propone una capa de procesamiento basada en **Apache Airflow**, que se erige como la alternativa seleccionada fundamentalmente por su mayor soporte, así como su fácil integración con fuentes de datos, además de contar con experiencia previa con buenos resultados empleando esta tecnología. Se propone **Celery** para gestionar un conjunto de *workers* o procesos encargados de llevar a cabo los trabajos de procesamiento de manera mantenible y escalable. El motivo de utilizar esta alternativa radica en que se integra a la perfección y por defecto con Airflow, por lo que esto disminuye la complejidad al despliegue. Tras un análisis preliminar con las diferentes pruebas de concepto y experimentación en los diferentes componentes tecnológicos de SLOW, no se anticipa la necesidad de procesar grandes volúmenes de datos que pudieran requerir de más de un *worker*, por lo que la extensión alternativa, Dask, se descarta en primera instancia.

2. Avances en la implementación funcional preliminar de la capa de procesamiento escalable

Continuando el enfoque basado en microservicios, se ha generado una **implementación funcional preliminar de la capa de procesamiento** que traduce directamente de la arquitectura propuesta en la fase de diseño, con dos servicios principales.

El servicio de **Apache Airflow** ofrece una base de orquestación para el resto de la capa. Este se puede integrar fácilmente con múltiples fuentes de datos y permite programar el conjunto de *workers* encargados de realizar tareas de procesamiento, los cuales se ejecutan haciendo uso de **Celery** gracias a su integración por defecto con Airflow.

Adicionalmente, se ha desarrollado un **servicio de procesamiento de imágenes** en Python que permite, a partir de una imagen satelital (obtenida de Sentinel Hub), recuperar el valor de unos índices determinados (i.e. NDVI) para cada uno de sus píxeles empleando un filtro específico proporcionado por Sentinel. Este se ejecuta a través de los *workers* de Airflow previamente mencionados. Esta tarea de procesamiento tiene relación con las fuentes de datos documentadas a lo largo de la tarea T2.4 y con los avances en el paquete de trabajo PT4 relativos a las tareas T4.1 y T4.2, que se detallan más adelante. En cuanto a la descarga de

imágenes, su validación y preprocesamiento, se han configurado un conjunto de **workers que automatizan estas tareas**.

Para **validación de datos catastrales** GeoJSON introducidos manualmente por el usuario, se han creado unos *workers* periódicos que también se ejecutan con cada nuevo fichero introducido en MinIO (capa de almacenamiento) para validar los datos catastrales. Se comprueba que el formato de referencia catastral es correcto y que los datos del fichero se corresponden con los que especifica tal referencia, para lo cual se accede a la base de datos del catastro. Así, se descartan aquellos archivos con errores, y se guarda la información relevante en MongoDB.

Para la **obtención de imágenes satelitales**, un *worker* de Airflow permite la paralelización de la descarga de imágenes de Sentinel Hub empleando datos del SIGPAC y del catastro. Se obtienen las referencias catastrales de las imágenes almacenadas en MinIO, y en paralelo las de los datos SIGPAC almacenados en MongoDB. Se unifican estos resultados, realizando un filtrado para comprobar las imágenes ausentes en MinIO, las cuales son descargadas de Sentinel Hub empleando su cliente dedicado (gracias a los avances realizados en la capa de interoperabilidad).

En cuanto al **procesamiento de estas imágenes satelitales**, se ha desplegado de forma preliminar un microservicio independiente como parte de esta capa, que realiza la ejecución de forma paralelizada para extraer las variables de interés, como es la capa de visualización del vigor fotosintético (indicador de salud) de la cobertura vegetal del territorio analizado, a través del índice NDVI. Este tratamiento se documenta con mayor detalle en la sección correspondiente al paquete de trabajo PT4.

Con estos avances, el **diseño de esta capa se da por concluido**, si bien el resultado final correspondiente a la implementación funcional de todos los microservicios necesarios se entregará en 2023 al completar la tarea, según la planificación.

T3.3: Diseño de interfaces y capa de interoperabilidad

Esta tarea está destinada al diseño de la **tercera capa** de la plataforma, correspondiente a la interoperabilidad para la información contenida y a la integración de interfaces para proporcionar acceso y comunicación con la misma. Iniciándose en 2022, se abordan aproximadamente $\frac{2}{3}$ de esta tarea, **finalizando el diseño de la arquitectura completa** (tras los correspondientes estudios comparativos de tecnologías aplicables) y realizando unos **avances preliminares en cuanto a la implementación** funcional, que concluirá en 2023 según la planificación.

1. Análisis de plataformas para comunicación con la red sensórica

Tal como se ha detallado en la documentación de las tareas T2.1 y T2.3, la tecnología de comunicación seleccionada para el envío de información por parte de la red de sensores es LoRa, en su modo de funcionamiento LoRaWAN. Así, un componente fundamental de la capa de interoperabilidad, encargado de la **comunicación** con los dispositivos sensores, se materializará en forma de una **plataforma LoRaWAN** encargada de gestionar tanto la información (recepción, descryptación), como todos los dispositivos, los sensores y sus configuraciones. Para abordar el diseño de este componente se realizó un análisis de las plataformas disponibles en el mercado, para generar una **comparativa de las alternativas aplicables**.

Se estudiaron en detalle las tecnologías The Things Stack, ChirpStack, Lorient y Acility, concluyendo que **ChirpStack es la más adecuada** por su carácter *open source*, por permitir despliegues locales y por el alto nivel de configuración que ofrece.

2. Análisis de tecnologías de acceso y transferencia de información

Una plataforma que maneja y almacena datos requiere de un **punto de acceso** que permita a usuarios o sistemas externos consultar la información contenida, para la posterior toma de decisiones. Por ello, se abordó un nuevo **análisis comparativo entre alternativas** para implementar un acceso ordenado y seguro a los datos a manejar.

En cuanto a la posibilidad de implementar interfaces tipo **API REST**, basadas en peticiones web siguiendo el protocolo HTTP, se concluye que presentan **muchas ventajas** en cuanto a flexibilidad y escalabilidad, además de su compatibilidad con diferentes formatos de datos, ofreciendo también mucha facilidad para mantenimiento e integración. Se ha estudiado, también, la relativa sencillez de su implementación, identificando una amplia variedad de herramientas y librerías que permiten abordar este proceso en diferentes entornos y lenguajes de programación, como Flask, Django y FastAPI, para Python, además de Express.js, Spring Boot, Ruby on Rails y ASP.NET Core para otros lenguajes.

GraphQL se ha identificado como una alternativa que ofrece un lenguaje de consulta de datos en el que se accede a un único *endpoint* al que **se solicitan datos específicos** y estructurados, en lugar de encadenar múltiples consultas secuenciales. De esta forma, reduce el tráfico de la red y evita situaciones de *under* y *overfetching*, si bien se anticipa que estas no vayan a suponer problemas críticos en la arquitectura propuesta. No obstante, presenta más dificultades en su implementación y uso, por lo que puede no resultar conveniente en según qué casos. Cabe destacar que el uso de GraphQL no implica el descarte de una API REST, y viceversa. Ambas alternativas pueden convivir en el mismo producto sin ningún tipo de conflicto, proporcionando al cliente diferentes formas de acceder a los datos o realizar peticiones. Asimismo, se han identificado las librerías más populares para su implementación empleando distintos lenguajes, como Apollo, Absinthe, Graphene, Strawberry, Sangria y Hot Chocolate.

Por último, **MQTT** es un **protocolo de mensajería específico de IoT** que se utiliza para intercambiar mensajes entre dispositivos conectados a la red utilizando un modelo de publicación/suscripción. Es eficiente en términos de ancho de banda y energía, lo que permite a los dispositivos IoT enviar y recibir mensajes con una latencia y consumo mínimos. Requiere del despliegue de un *broker*.

Como conclusión a este estudio y comparativa (en detalle en el E3.1), se define un diseño basado en **API REST** para el despliegue de la capa de **interoperabilidad**, si bien se contempla la posibilidad de complementarla con un punto de acceso basado en GraphQL en caso de que la plataforma escale más de lo inicialmente anticipado, además de la implementación de un **broker MQTT** para las comunicaciones entre dispositivos con la **plataforma LoRaWAN**.

3. Diseño de la arquitectura de la capa de interoperabilidad

Siguiendo las conclusiones anteriores, se plantea el **diseño general** de la arquitectura para la capa de interoperabilidad de la plataforma.

La implementación de una **API REST con múltiples endpoints** permite el despliegue y mantenimiento modular de distintos servicios que aporten las diversas funcionalidades necesarias en la plataforma central, en cuanto a la consulta de datos (capa de almacenamiento) y la ejecución de diferentes procesos (capa de procesamiento). Para su construcción se propone el uso de **FastAPI**, que ofrece todas las ventajas del desarrollo con el lenguaje de programación Python (alto nivel de abstracción, corta curva de aprendizaje), y permite generar una API REST segura y robusta de forma sencilla e intuitiva, además de permitir múltiples opciones de personalización. Por otro lado, para la integración de una **plataforma LoRaWAN** que proporcione la comunicación con sensores, se propone el uso de **ChirpStak**, aprovechando su carácter

abierto y gratuito, y el respaldo de la comunidad de desarrollo. Además de ser una solución altamente robusta con buen soporte e integración con numerosas tecnologías, permite la gestión absoluta en su configuración.

Además, la capa de interoperabilidad tiene como segundo objetivo permitir la **integración con servicios externos** para nutrir de información a la plataforma. En este sentido, se hace necesario justificar la importancia de acceder a servicios de terceros como son las declaraciones SIGPAC, el catastro territorial y Sentinel Hub, y de esta forma extraer información acerca de las parcelas agrícolas o explotaciones agroganaderas.

En primer lugar, **SIGPAC** es un sistema de identificación geográfica de parcelas declaradas por agricultores y ganaderos, dependiente del Gobierno de España. Proporciona información acerca de las coordenadas geométricas que delimitan los territorios de una explotación. Esta información es esencial para poder geolocalizar y delimitar los territorios a estudiar dentro de la plataforma, lo que permite una gestión más precisa y, posteriormente, la obtención de imágenes satelitales. Asimismo, la información proporcionada por SIGPAC puede ser utilizada para generar mapas de parcelas.

En segundo lugar, el **catastro** es otra herramienta que resulta imprescindible para validar la información introducida por el usuario y obtener información acerca de las parcelas. A través de sus servicios vinculados, proporciona información detallada acerca de la titularidad, superficie y características de las parcelas, lo que resulta fundamental para garantizar la veracidad y la exactitud de la información introducida en la plataforma. Además, la información catastral también puede proporcionar detalles acerca de las características del suelo, lo que puede resultar útil para la toma de decisiones relativas a la absorción de gases de efecto invernadero.

En tercer lugar, **Sentinel Hub** es un servicio que permite obtener imágenes satelitales de misiones como el Sentinel-2, para procesarlas y obtener información relevante respecto a un determinado territorio. Por ejemplo, el índice NDVI es un indicador de la salud de la vegetación y puede resultar útil para tomar decisiones relativas a la gestión de las parcelas de una explotación: puede utilizarse, entre otras aplicaciones, para identificar zonas con déficit hídrico o para determinar la necesidad de aplicar fertilizantes.

4. Estudio de modelos de interoperabilidad para la información SLOW

La interoperabilidad de datos consiste en la capacidad de **comunicación entre distintos sistemas que manejan diferentes formatos de información**. Esto permite realizar comunicaciones entre cualquier sistema independientemente del “lenguaje” o idioma que hable cada uno de ellos. Esto es fundamental para que una plataforma como la propuesta permita un acceso total a toda la información en cualquier momento y de una manera unificada, además de aportar el enfoque relacionado con los estándares de comunicación establecidos por organismos como el W3C. Con el fin de identificar, de forma preliminar, los **vocabularios potenciales para la gestión de la información SLOW**, se ha realizado un **estudio de las tecnologías semánticas** y de los métodos y formatos estándar para interoperabilidad.

Así, se analizó el **Linked Open Data (LOD)** como método de publicación de información estructurada en un formato destinado a su lectura en máquinas, que busca perseguir el objetivo de poder trabajar con varios conjuntos de datos diferentes al mismo tiempo. De la misma forma, se estudió la organización del conocimiento de estos sistemas en **ontologías**, y concretamente utilizando el estándar definido por el W3C

llamado **Resource Description Framework** (RDF). Este *framework* permite expresar información sobre recursos de cualquier tipo, para situaciones en las que la información necesita ser procesada por aplicaciones, en lugar de ser únicamente mostrada a personas. RDF propone un estándar común para mostrar la información de modo que puede ser intercambiada por múltiples aplicaciones sin que su significado se vea comprometido, y su posterior análisis y procesamiento se pueda realizar con herramientas comunes.

Se identifica, además, que una de las prácticas más importantes de Linked Data no es otra que **reutilizar vocabularios y ontologías ya existentes** con el fin de no crear unas nuevas y desconectadas. Eso maximiza la integración con otros proyectos o metodologías que puedan construirse en el futuro, lo que es prioritario para mantener un proceso escalable y ordenado de integración con tecnologías semánticas. En este contexto surgen los **Smart Data Models** de FIWARE, que ofrecen un amplio catálogo de vocabularios que integran los objetivos de interoperabilidad en múltiples ámbitos a través de modelos abiertos, interoperables y replicables, que permiten el intercambio real de datos entre diferentes organizaciones de forma estandarizada. Se estructuran en dominios (equivalentes a sectores), subdominios dentro de estos, y a su vez distintos *Data Models* en cada subdominio. Estos se publican en repositorios de GitHub, y posibilitan a la comunidad su modificación o la creación de modelos nuevos.

En este contexto, es posible **identificar un conjunto de vocabularios o formatos** que, potencialmente, encajan para la transferencia y almacenamiento de información dentro de la **metodología SLOW**. Esto implica contener tanto datos de sensores, como datos ambientales, geográficos o de carácter general, y con un formato no estructurado. Tras un estudio de los diferentes dominios actualmente disponibles en el ecosistema, resulta directo concluir que el dominio más relevante para el caso de la metodología SLOW es, en primera instancia, **Smart Environment** debido a sus modelos para representar valores de calidad de aire, donde se pueden encontrar valores de diferentes gases que serán medidos. Sin embargo, otros modelos también son susceptibles de encajar convenientemente en la metodología, como **Smart Sensoring**, útil para representar la información que manejan los dispositivos IoT o sensores, y **Smart Agrifood**, útil para representar datos agroalimentarios, como datos de los animales o de granjas genéricas (parcelas). En el informe correspondiente, se recoge una tabla donde se enumeran los Smart Data Models que se identifican como relevantes para la interoperabilidad de SLOW de cara a futuro.

Para un proyecto de medición de gases de efecto invernadero en explotaciones agroganaderas, es fundamental seleccionar los modelos más apropiados para lograr una medición precisa y completa de las emisiones producidas. En este sentido, los modelos más interesantes son aquellos relacionados con la calidad del aire, los dispositivos y sus mediciones, y aquellos directamente relacionados con el sector agroalimentario.

Uno de los modelos más útiles para este proyecto es el modelo de parcela, ya que permite indicar de forma completa el lugar donde se encuentra la explotación, el propietario y los sensores desplegados en la misma. Además, este modelo también permite indicar el estado y tipo de cultivo presente en la parcela, lo que es fundamental para las estimaciones a realizar, asociadas a la producción agroganadera.

Otro modelo interesante es el modelo de animal, el cual permite indicar el número y tipo de animales que se encuentran en una parcela determinada. Esto permite estimar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción ganadera.

Además, se han encontrado modelos que permiten estimar la huella de carbono de la explotación, como el modelo que permite rastrear el origen del pienso utilizado en la explotación. De esta manera, es posible estimar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la producción de alimentos utilizados en la explotación.

Sin embargo, se pudo identificar la ausencia de modelos que permitan indicar de forma precisa el nivel de CH₄ (metano) en las explotaciones agroganaderas, por lo que se anticipa la potencial necesidad de realizar modificaciones en los modelos existentes para estimar las emisiones de este gas. No obstante, la implementación final de los modelos de datos quedará sujeta a los avances en la investigación por otras vías a lo largo del tiempo restante del proyecto, realimentándose de los resultados obtenidos en el marco de otros paquetes de trabajo.

En cuanto a **tipos de archivo que permitan definir y almacenar información GIS**, destaca el **GeoTIFF**. Es un formato de archivo de **imágenes (raster)** georreferenciadas que incorpora información de coordenadas geográficas, como la ubicación y el tamaño de los píxeles en la imagen. El formato GeoTIFF se utiliza en aplicaciones que requieren el manejo de datos geográficos y geoespaciales, ya que permite la integración de información cartográfica y georreferenciada en un solo archivo. En la metodología SLOW, el uso del formato GeoTIFF podría ser muy útil para dotar de interoperabilidad a los datos relacionados con coordenadas geográficas. Otra ventaja del formato GeoTIFF es que es compatible con una amplia variedad de software GIS, lo que facilita la interoperabilidad entre diferentes herramientas de análisis y procesamiento de datos geográficos. Además, al ser un formato abierto y estándar, se pueden utilizar herramientas y bibliotecas de software de terceros para trabajar con los datos en diferentes entornos y lenguajes de programación.

Por último, para información geoespacial relacionada con **estructuras geográficas** destaca el uso del formato **GeoJSON**. Se trata de un formato estándar abierto, diseñado para representar elementos geográficos sencillos, junto con sus atributos no espaciales, basado en JavaScript Object Notation. Típicamente, se emplea para la definición de polígonos, y al estar basado en texto es muy sencillo de utilizar, por lo que es muy conveniente para la definición de parcelas de terreno en el marco de SLOW.

5. Avances preliminares en la implementación funcional de la capa de interoperabilidad

Con el fin de ofrecer un entorno de pruebas que permitiera validar la funcionalidad de otros componentes y verificar las comunicaciones propias de la infraestructura, a lo largo de 2022 se desplegaron versiones preliminares de algunos servicios integrados en esta capa.

Esta implementación se completará y se aportará mayor detalle sobre la misma, según planificación, en la siguiente anualidad.

Con estos avances, el **diseño de esta capa se da por concluido**, si bien el resultado final correspondiente a la implementación funcional de todos los microservicios necesarios se entregará en 2023 al completar la tarea, según la planificación.

PT4: Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones

T4.1: Homogeneización y preprocesado de los datos

En 2022 se inicia, con esta tarea, la investigación en el PT4, que tiene como objetivo construir el módulo que finalmente analizará los conjuntos de datos definidos y recogidos en paquetes de trabajo anteriores.

El procesamiento mediante técnicas de Inteligencia Artificial permitirá generar las estimaciones finales, el balance completo para una explotación, y en base a ello, unas recomendaciones para guiado en la toma de decisiones a los responsables de la misma. Esta tarea T4.1 se ha abordado y completado durante la presente anualidad, generando un **tratamiento inicial para los datos identificados** y disponibles hasta la fecha a través de la plataforma de interoperabilidad (imágenes satelitales y mediciones de la red sensorica), aplicando técnicas de homogeneización, filtrado y validación sobre los mismos. Las transformaciones y algoritmos detallados a continuación se implementan como servicios integrados en la capa de procesamiento de la propia plataforma (PT3).

1. Preprocesado y homogeneización de imágenes satélite

Las fuentes de información principales recogidas en la plataforma de interoperabilidad basadas en imagen son, principalmente, el **SIGPAC** para georreferenciar las parcelas declaradas por los agricultores y ganaderos, y los servicios de la misión **Sentinel-2** del programa Copernicus, para la obtención de imagen óptica en diferentes bandas. La integración de estas fuentes de información y obtención de sus datos ya se ha documentado en el apartado correspondiente de la plataforma de interoperabilidad. De la misma forma, en los avances recogidos en la tarea T3.2 relativos a avances en la implementación funcional preliminar de la capa de procesamiento escalable se detalla la configuración de *workers* en la plataforma dedicados a la **validación de los datos** de forma automática (comprobación de referencias catastrales y descarga de las imágenes satélite necesarias de Sentinel Hub, unificando estas fuentes). Este preprocesamiento incluye también un filtrado de los datos a descargar de Sentinel-2 haciendo uso de la librería proporcionada por la propia herramienta, empleando un **evalscript propio** (un tipo de *script* propio de Sentinel Hub) para definir el proceso de la petición y seleccionar las variables de interés a extraer, solicitando de esta forma una imagen que refleja los **valores del índice NDVI** para la región indicada.

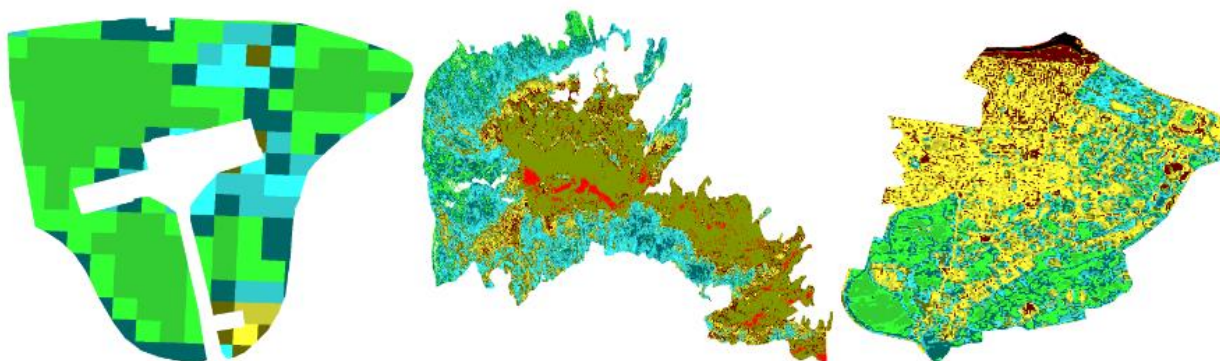


Figura 22. Ejemplos de valores de NDVI para diferentes parcelas.

Estos resultados se corresponden con imágenes rasterizadas; mapas de color que indican el nivel de vigor fotosintético registrado en cada pixel mediante su código RGB, definido por 3 canales en el intervalo [0, 255]. Para poder utilizar esta información de forma agregada con otras fuentes, es necesario aplicarle un proceso de transformación que la aporte **homogeneización** necesaria, tal que se disponga de un **formato estructurado** con los valores numéricos de este índice en su **rango normalizado**: el intervalo [-1, 1] (siendo -1 el valor del agua). Este proceso de homogeneización se integra como otro microservicio en la capa de procesamiento, que recoge la imagen de la capa de almacenamiento, y trabaja sobre ella a través de un *script* de Python usando la biblioteca NumPy para serializarla. Tratando pixel a pixel, se transforma el valor RGB a dato de NDVI gracias a un diccionario de mapeo aportado por Sentinel Hub.

NDVI	R	G	B	Color
<-0,2	0	0	0	
<-0,1	255	0	0	
<0	127.5	153	0	
<0,1	102	0	0	
<0,2	255	255	51	
<0,3	204	204	51	
<0,4	102	102	0	
<0,5	51	255	255	
<0,6	51	204	204	
<0,7	0	102	102	
<0,8	51	255	51	
<0,9	51	204	51	
<1	255	255	255	

Figura. Conversión de mapeo de color RGB a valores NDVI de Sentinel Hub.

Esta información, compuesta de la coordenada del pixel, codificación de color y valor NDVI normalizado, se traslada de forma estructurada en formato CSV, que queda almacenado en la plataforma.

2. Preprocesado y homogeneización de datos de sensórica

La naturaleza de la otra gran fuente de datos recogida en la plataforma se corresponde con los datos de concentración de distintos gases medidos a través de la red sensórica y comunicados gracias a la plataforma LoRa. En la prueba de concepto desplegada hasta la fecha para validar su funcionamiento, la variable más relevante medida por los sensores se corresponde con la cantidad de CO₂ en el aire, por lo que pueden plantearse los procesos de tratamiento y homogeneización sobre esta variable, a fin de hacerlos extensibles a otros gases medidos y recogidos siguiendo la misma metodología. Consultando los datos recogidos por la capa de almacenamiento se puede obtener un *dataframe* que incorpora diferentes variables registradas por el módulo sensor, siendo algunas relevantes para las estimaciones y cálculos sobre GEI, y otras puramente funcionales para la infraestructura. Así, el **preprocesamiento** de estos datos incluye el **filtrado de variables** para generar un *dataset* que incorpore únicamente las de interés (las marcas de tiempo y la medición de concentración de gas o “*payload*”), optimizando así el conjunto. Con el fin de **homogeneizar** el formato de persistencia de los datos, el *dataframe* se transforma empleando la librería Pandas a un archivo CSV, que queda almacenado en la plataforma.

La documentación en detalle de esta tarea se recoge en el informe *E4.1 Diseño del sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones*, que se entregará en 2023 al completar la tarea restante de este paquete de trabajo, según la planificación.

T4.2: Generación de variables relevantes para la estimación de las emisiones de GEI

Con la información de entrada previamente tratada, esta tarea abordada al completo en 2022 pretende **generar variables de interés** que aporten información sobre la estimación de GEI o la capacidad de absorción de los mismos por parte de las cubiertas vegetales.

1. Variables relevantes derivadas de sensórica

En este contexto y en relación con la **sensórica**, es directo asociar la medición de gas realizada a través de los módulos diseñados con la variable correspondiente a **concentración de CO₂** en el aire, aportando información sobre la presencia de este GEI. Esta se obtiene de un sensor desplegado en un entorno de pruebas que se corresponde con un formato semejante a un invernadero; un recinto cerrado y aislado, donde se ubican distintas especies vegetales de cultivo en bancales para su monitorización. Analizando los resultados de esta variable, es posible **identificar el ciclo fotosintético y la respiración celular** de la vegetación, al comprobar las diferencias en la concentración de CO₂ a lo largo del día. Se puede **validar**, así, la adecuada sensibilidad de este sensor y de su variable asociada, posibilitando su uso para la **generación de registros de emisiones de GEI** a complementar (o bien contrastar) con estimaciones realizadas por otros medios para la metodología propuesta.

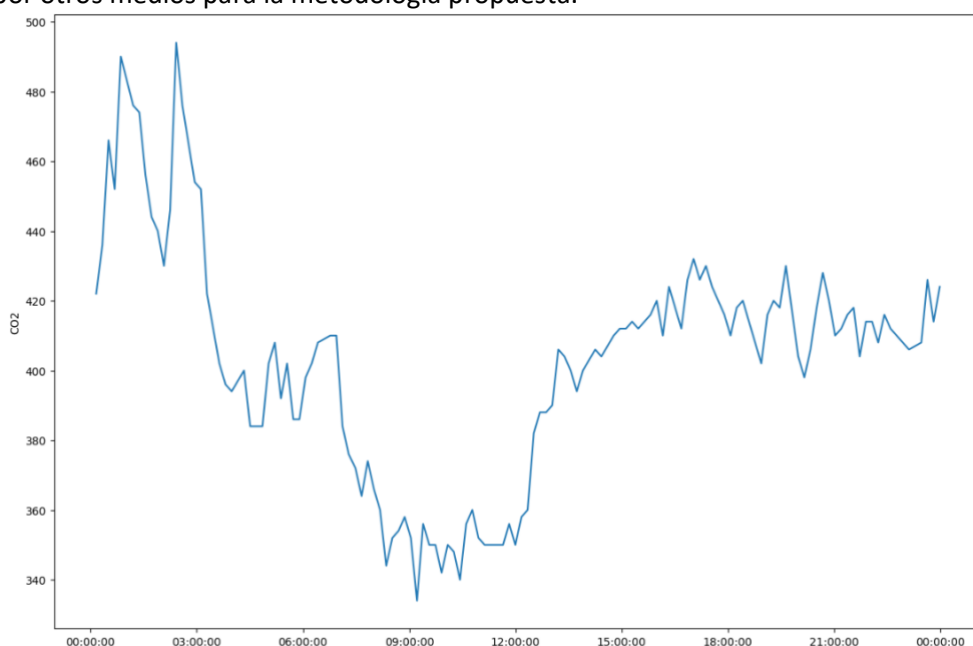


Figura 23. Evolución de la concentración de CO₂ en un bancal de cultivo a lo largo de un día. Refleja el ciclo fotosintético de los vegetales.

2. Variables relevantes derivadas de imagen satelital

Respecto a las **imágenes satelitales**, la variable principal que se puede derivar de las mismas se corresponde con el **índice de vigor fotosintético NDVI**. Esto aporta, por un lado, información útil para la toma de decisiones en la **gestión agrícola** y, por otro lado, ilustra la **evolución de la biomasa** en el terreno; lo cual es a su vez un indicador de la actividad de la vegetación como **sumidero** de carbono.

La generación de variables asociadas a la actividad fotosintética a través de imágenes satelitales permite particularizar el análisis, las conclusiones y las medidas correctoras a aplicar en áreas de terreno a escala local, alineándose con los requerimientos de la metodología SLOW. Cada zona de la explotación agrícola está asociada a una serie temporal que recoge la evolución en esa zona del índice de vigor fotosintético. Esto posibilitará comparar las series anuales registradas en una zona a lo largo de distintos años, o bien las registradas en distintas zonas ocupadas con el mismo cultivo para detectar valores anómalos o diferencias de rendimiento que pueden indicar la presencia de plagas, necesidades locales de riego o de abonado, proliferación de maleza, etc. Para la interpretación correcta de la información ofrecida por estas colecciones de índices se precisa de información complementaria sobre las actividades agrícolas realizadas

en el terreno, como son los periodos de siembra, siega, cosecha, tala de ejemplares forestales, etc. Esta información adicional solo puede ser facilitada por los responsables de la gestión agrícola.

La presentación de esta información **filtrada por parcelas y recintos SIGPAC** ocupados por monocultivos **facilita su interpretación** y la obtención de conclusiones útiles por parte de los responsables de la gestión agrícola. En particular, permite identificar las zonas de terreno que presentan menor vigor fotosintético para diseñar estrategias de precisión en el riego y el uso de fertilizantes (o insecticidas, herbicidas, etc.), que pueden aportarse en cantidades idóneas para cada zona según las necesidades detectadas. El ahorro en el uso de estos recursos repercute en un ahorro de emisiones asociadas a su producción y transporte. Esto es especialmente conveniente en el caso de los fertilizantes, cuya producción es muy intensiva en el uso de energía —a menudo procedente de combustibles fósiles— y cuyo empleo provoca la liberación de óxido nitroso a la atmósfera y aumenta el riesgo eutrofización asociado a los nitratos que se filtran a las aguas. La individualización de los resultados por regiones SIGPAC permite, además, detectar señales tempranas de agotamiento de la tierra cultivada que permitan perfeccionar la estrategia de **rotación de cultivos** o la reconsideración de los usos agrícolas del terreno. Asimismo, facilita la **monitorización a distancia** de la evolución de la cobertura vegetal en cada zona y la comparación de zonas y de cultivos, reduciendo las necesidades de transporte para actividades de inspección y, en consecuencia, de consumo de combustibles fósiles para la automoción. De nuevo, la estimación del ahorro de emisiones precisa de información complementaria sobre el combustible empleado en la explotación, que debe recabarse de los gestores de la parcela.

La documentación en detalle de esta tarea se recoge en el informe *E4.1 Diseño del sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones*, que se entregará en 2023 al completar la tarea restante de este paquete de trabajo, según la planificación.

PT5: Herramientas de visualización avanzada

T5.1: Diseño de sistemas de visualización de datos y resultados

En 2022 se inicia, con esta tarea, la investigación en el PT5, que tiene como objetivo la generación de **interfaces de visualización avanzada** para integrar los datos y resultados generados en otros paquetes de trabajo. Como resultado, se ofrecerá un punto de entrada para la interacción de los usuarios finales con el sistema, presentando los datos recolectados y las conclusiones del sistema de apoyo a la toma de decisiones, en formato de cuadros de mando visuales e inmersivos. Con esta primera tarea, **acometida al completo** en la anualidad 2022, se ha **definido el conjunto de representaciones** con los que visualizar tanto los datos de entrada como los resultados obtenidos, para cada tipo de formato de información a manejar. Siguiendo la investigación abordada hasta el momento, es posible clasificar los datos manejados en tres grupos principales, basados en el tipo de dato y su fuente de obtención:

1. Los datos obtenidos a través de sensórica se corresponden con series temporales de valores numéricos que representan los datos monitorizados de calidad del aire y condiciones medioambientales, como presencia de GEI. Es importante relacionar estos datos con su ubicación geográfica dentro del área de estudio para conocer su impacto.
2. Los resultados obtenidos a través del análisis de imágenes satelitales permiten generar varias capas de información que pueden ser aplicadas a mapas de densidades para el área de estudio en cuestión. Estas capas de información permiten obtener una visión más detallada y precisa de la distribución de fenómenos o características propicias para el estudio.
3. El balance de carbono es el resultado a obtener de los análisis automatizados que combinan las distintas fuentes de información definidas. Estos datos pueden definirse tanto en términos

globales para el área de estudio, como en forma de mapa de densidades, lo que permite una mayor separación entre zonas y un análisis más exhaustivo de las observaciones individuales.

1. Selección de tecnología de visualización

Para alcanzar una implementación funcional de las diferentes técnicas y formatos de representación de información es necesario definir, en primer lugar, la **tecnología a emplear para su despliegue**. Teniendo en cuenta el objetivo de creación de un entorno inmersivo, y el enfoque en estándares W3C propuesto para toda la metodología, se define una **solución basada en la web** que haga uso de las capacidades del estándar inmersivo **WebXR**, para la generación de contenidos accesibles a una gran variedad de dispositivos desde el propio navegador. En este contexto, se ha analizado el propio estándar, que permite presentaciones de realidad virtual y aumentada sobre escenas basadas en **WebGL**, una API para el renderizado de gráficos 3D. Se identifica, con este estudio, **Three.js** (librería JavaScript basada en WebGL) como **tecnología idónea** para esta investigación, al contar además con compatibilidad para WebXR.

2. Definición de formatos de representación de datos

Una vez identificados los tipos de datos listos para el análisis, es posible evaluar qué **formatos de representación son los más apropiados** para maximizar la capacidad de observación y descubrimiento. Para lograr esto, se utilizarán diversos métodos de presentación de la información, teniendo en cuenta la naturaleza variable de los datos y las funcionalidades inmersivas de la solución. Todos ellos han sido implementados como interfaces de visualización empleando la tecnología seleccionada, Three.js, y posteriormente integrados en los entornos generados en el marco de la tarea T5.2.

Uno de los aspectos fundamentales durante el análisis de datos de aspecto **medioambiental** es la identificación de la ubicación espacial y las características del entorno. Por esta razón, la representación de **contenido geolocalizado** debe ser un componente **transversal** al resto de sistemas de representación planteados. Al hacerlo, se proporciona un contexto significativo para los datos obtenidos, aumentando de esta forma su valor y dando herramientas para una toma de decisiones más informada y eficiente.

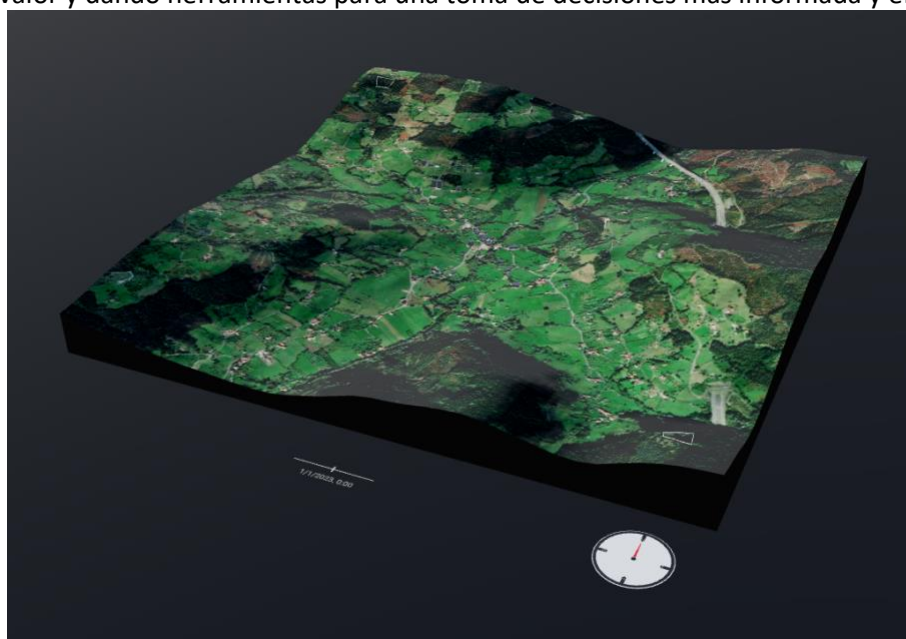


Figura 24. Representación de contenido geolocalizado: mapa 3D de elevación del valle de Peón (Villaviciosa).

En cualquier proceso de análisis, la presentación de **gráficas de datos** supone un elemento esencial para la representación de información. La utilización de técnicas clásicas de visualización de datos ayuda a identificar patrones, tendencias, relaciones y estructuras en los datos de forma natural. Además, la representación de gráficos en un entorno inmersivo amplía las posibilidades de representación, permitiendo la inclusión de gráficas **tridimensionales** como formato complementario. Este tipo de gráficas de datos cobran gran sentido durante la representación de datos con información plenamente numérica. En el caso de uso particular de SLOW, las observaciones procedentes de la **sensorización** del terreno se ven altamente reforzadas por una representación de este tipo.

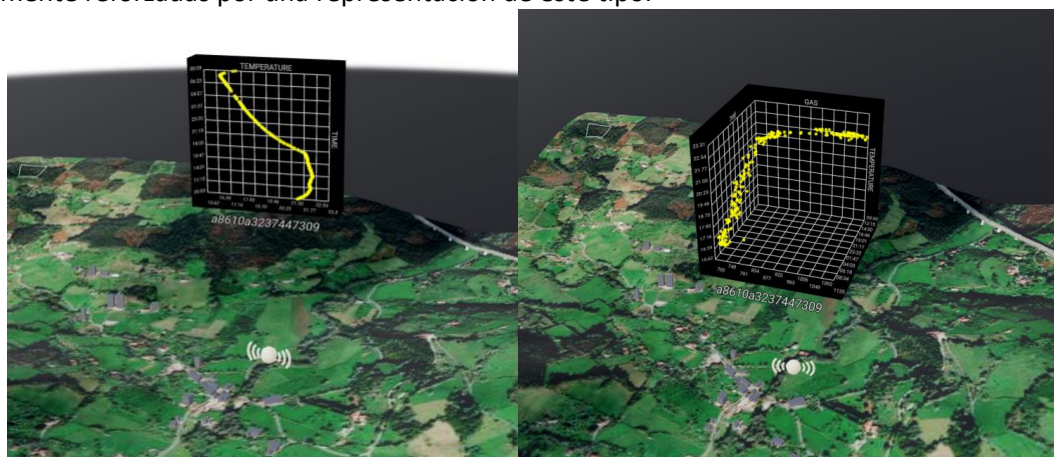


Figura 25. Representación espacial de datos en gráficas de dispersión bidimensionales (izq.) y tridimensionales (dcha.).

Otra de las herramientas con gran utilidad en el ámbito de la representación de datos geográficos son los **mapas de calor**, que permiten representar la densidad y distribución de datos en una zona determinada de forma visual y sencilla, facilitando así la identificación de zonas críticas y la toma de decisiones en tiempo real. Este tipo de representaciones resultan de especial utilidad para la representación de datos provenientes de **imágenes satelitales**, pudiendo ofrecer una imagen global del área de estudio y de sus variaciones en las diversas zonas de las que se compone.

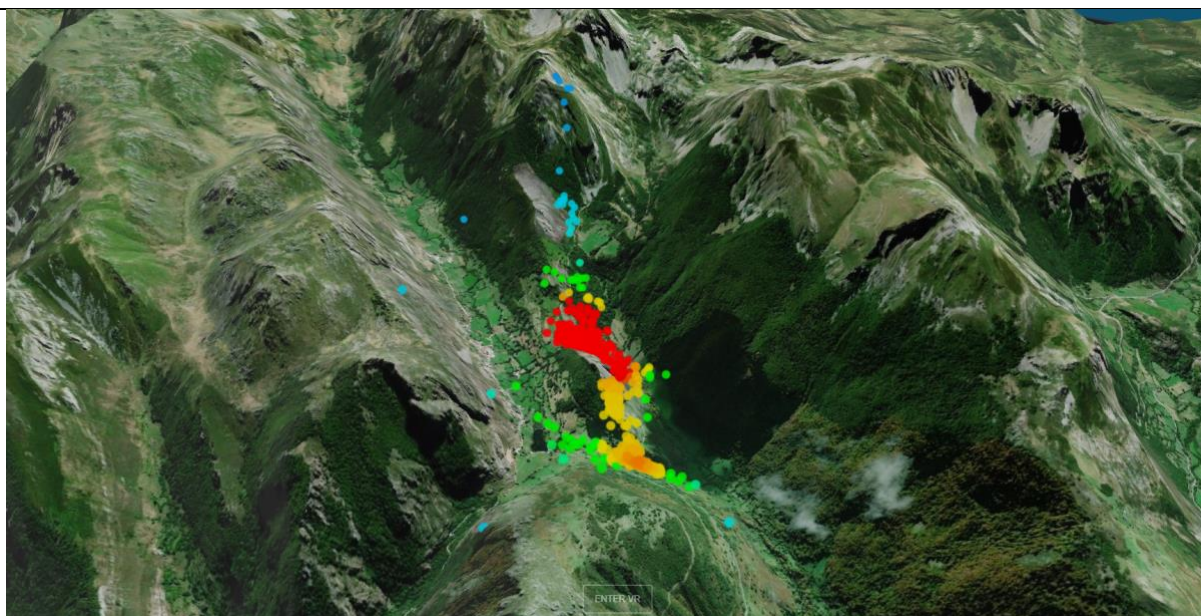


Figura 26. Representación espacial de mapas de calor (Parque Natural de Somiedo, Asturias).

El uso de **líneas temporales** como herramienta de exploración, puede ser estudiada en combinación con otras capas de información para brindar una comprensión completa de los resultados en un contexto temporal y permitir la observación del progreso en diferentes ámbitos de estudio.



Figura 27. Prototipo de interfaz de control de línea temporal.

T5.2: Entornos virtuales inmersivos interactivos

Esta segunda tarea, abordada de forma **completa en 2022**, tiene como fin **diseñar la experiencia inmersiva** de visualización en realidad virtual para presentar los correspondientes cuadros de mando empleando las interfaces generadas durante la anterior tarea. Así, se estableció el **flujo de trabajo** a experimentar por parte del usuario, y se integraron los anteriores sistemas en una **aplicación** que presenta el correspondiente **entorno de realidad virtual**, junto con los **sistemas de interacción** necesarios para su manejo.

1. Diseño de la experiencia

Se propone una interfaz compuesta de dos elementos fundamentales: un **cuadro de mando** para la gestión de explotaciones, donde se recoge la información de forma resumida en formato tradicional, y un sistema de **visualización inmersiva** para el consumo de datos visuales espaciales, en realidad virtual.

La visualización inmersiva (el núcleo principal de la presentación) se accede a través de la plataforma de gestión de explotaciones, y tiene como objetivo ofrecer una herramienta de representación y análisis innovadora mediante el desarrollo de sistemas de interacción destinados a su uso tanto en realidad virtual, como en pantallas de escritorio o móviles, para **maximizar la accesibilidad**.

El uso de herramientas de visualización inmersivas permite maximizar el valor de los datos. Al acercar al usuario una representación visual adaptada a las necesidades específicas de cada observación, se ofrece una comprensión más profunda y rápida de patrones y tendencias. Esto, a su vez, sirve de refuerzo para llegar a una toma de decisiones más informada y eficiente. Otro de los valores añadidos que aporta una visualización inmersiva es la capacidad de realizar una exploración interactiva de los datos, lo que proporciona al usuario la oportunidad de experimentar y descubrir nuevas perspectivas durante la fase de análisis. Además, la combinación de gráficos, imágenes y elementos tridimensionales, simplifica y hace más atractivo y comprensible el intercambio de información.

2. Flujo de acceso a la visualización

El proceso inicial, requerido para dar acceso al sistema de representación inmersiva, es la **definición del área de estudio** para la posterior reconstrucción del entorno inmersivo generando un mapa tridimensional. Para ello, la aplicación web integra una herramienta de representación geográfica que permite a los usuarios visualizar, buscar y seleccionar una o varias áreas de interés determinadas por las **parcelas SIGPAC** de la región. Para este despliegue se ha hecho uso de librerías y servicios especializados en la representación de mapas web con varias capas de interacción, como Leaflet, Esri y Leaflet Control Search. Así, se ha generado un **mapa interactivo** que funciona de base y referencia para la selección de las zonas (explotaciones) propicias para el análisis.

3. Creación de los entornos inmersivos

La **representación procedural de contenido geolocalizado** es una de las técnicas utilizadas para la preparación de la información geográfica destinada a una visualización inmersiva en un entorno virtual. Para lograr una representación tridimensional y detallada de la zona de estudio, es necesario el procesamiento y análisis de datos geográficos procedentes de diversos servicios y herramientas **GIS**. Los que se han empleado para la generación de la representación tridimensional del contenido geográfico del mapa son los siguientes:

- **Arcgis World Imagery**, un servicio de imágenes satélite de alta resolución que proporciona imágenes actualizadas y precisas de la Tierra. Además, este servicio ofrece todas las herramientas necesarias para la integración de la capa de visualización y análisis de las características geográficas, arquitectónicas y naturales de la zona de estudio.
- **AWS Terrain Tiles**, un conjunto de datos geolocalizados que proporcionan información acerca de diferentes capas terrestres, haciendo un especial énfasis en la generación de mapas de altura e inclinación de las laderas.
- **OSM Buildings**, un servicio de obtención de datos geográficos que ofrece información sobre la forma, la elevación y el tipo de los edificios presentes en la plataforma Open Street Map.

Combinando la información de estos servicios se consiguen los datos necesarios para la generación de contenido tridimensional representativo de la zona geográfica procesada, pudiendo generar un mapa 3D

texturizado, con alturas y representaciones simples de las zonas edificadas, que puedan servir de referencia visual para la orientación dentro del mapeado.

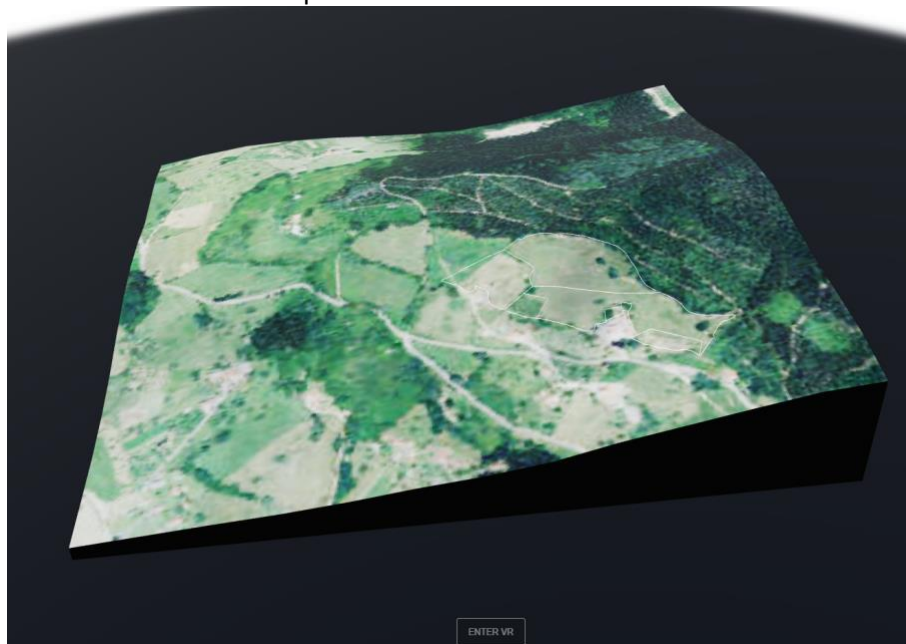


Figura 30. Representación tridimensional de la explotación seleccionada (ver imagen anterior).

En esta representación virtual del espacio se integran varias fuentes de información geolocalizada con el fin de proporcionar una perspectiva representativa de los datos, respetando su ubicación espacial y destacando las influencias medioambientales de la zona en cuestión. Este sistema de representación permite a los usuarios ver y comprender la información en su contexto, lo que es esencial para una toma de decisiones informada y eficiente, facilitando la identificación de patrones y tendencias de una zona y las comparaciones entre diferentes áreas de impacto.

4. Definición de sistemas de interacción

Una vez establecido el diseño de los diferentes elementos que componen las interfaces de visualización y exploración de datos, y considerando las diferentes plataformas a las que está destinada la solución, es importante definir los distintos **modelos de interacción** para asegurar una correcta adaptación de los sistemas a cada una de las plataformas de consumo, y mantener un estilo uniforme haciendo énfasis en la usabilidad adaptada a cada dispositivo.

Para el acceso a través de **dispositivos de escritorio y móviles**, garantizando la operabilidad desde cualquier tipo de dispositivo y resolución de pantalla, se ha adoptado un **diseño de interfaces progresivo**, así como el diseño de sistemas de interacción que ofrecen un control completo de la aplicación mediante el uso de **teclado y ratón, pulsaciones y gestos móviles**. Dicho sistema de interacción simplifica la barrera de entrada para uso de esta interfaz, aprovechando elementos interactivos reconocibles y adaptándolos a las necesidades de la propia aplicación.

En cuanto a **dispositivos de realidad virtual**, se propone un diseño de interfaces 3D accesibles a través de sistemas de interacción diseñados específicamente para el uso de **controladores** con capacidad de posicionamiento espacial. La capacidad inmersiva de las interfaces requiere además de opciones de visualización con seis grados de libertad, brindando al usuario una vista completa de su entorno. Dicha

vista se complementará con sistemas de **movimiento virtual** en el espacio (i.e. “teletransporte” hasta el punto objetivo).

Considerando las diferentes plataformas a las que está destinada la herramienta, resulta fundamental el desarrollo de un **sistema de interacción único**, flexible y capaz de adaptarse a las necesidades específicas de cada dispositivo. Este sistema se compone de las bases necesarias para garantizar cualquier tipo de interacción, permitiendo que cada interfaz se ajuste a sus propios requisitos, determinando el sistema de presentación/interacción óptimo gracias a la API de WebXR. De cara a ofrecer al usuario todas las herramientas necesarias para el correcto desarrollo de su actividad, los sistemas de interacción deben ir acompañados de un trabajo importante en términos de optimización, tanto a nivel de usuario, en términos de usabilidad e intuitividad, como a nivel tecnológico. En términos técnicos, es esencial contar con **sistemas de optimización** adecuados a la plataforma de destino, para lograr la máxima calidad visual con una tasa estable de **fotogramas por segundo** y una fluidez en los controles. Además, es importante considerar las **limitaciones en el espacio de almacenamiento** propias de los navegadores web para evitar interrupciones, problemas de carga y largos tiempos de espera entre procesos.

T5.3: Interoperabilidad con Plataforma e integración de resultados

Esta tarea está destinada a diseñar e implementar los sistemas de **comunicación de la aplicación web** de visualización con los datos procesados y resultados ofrecidos por la **plataforma central**, resultado del trabajo realizado en el PT3. Estas actividades se relacionan íntimamente con los avances en el despliegue de la capa de interoperabilidad de esta plataforma; y con el desarrollo de aproximadamente ¼ de esta tarea en 2022, se ha podido generar **una primera prueba para verificar que es posible recibir datos** de la plataforma. En esta primera versión de las comunicaciones con los servicios de interoperabilidad se valida la recuperación de datos de **sensores**, conformando una primera aproximación necesaria para garantizar el correcto funcionamiento de estas y las futuras comunicaciones entre sistemas. Como prueba de concepto se ha integrado únicamente la recuperación de los sensores operativos (con información de su ubicación y estado) y sus datos de temperatura y CO2 en un rango de tiempo limitado, validando la eficacia del acceso mediante la interfaz que se está construyendo para ello.

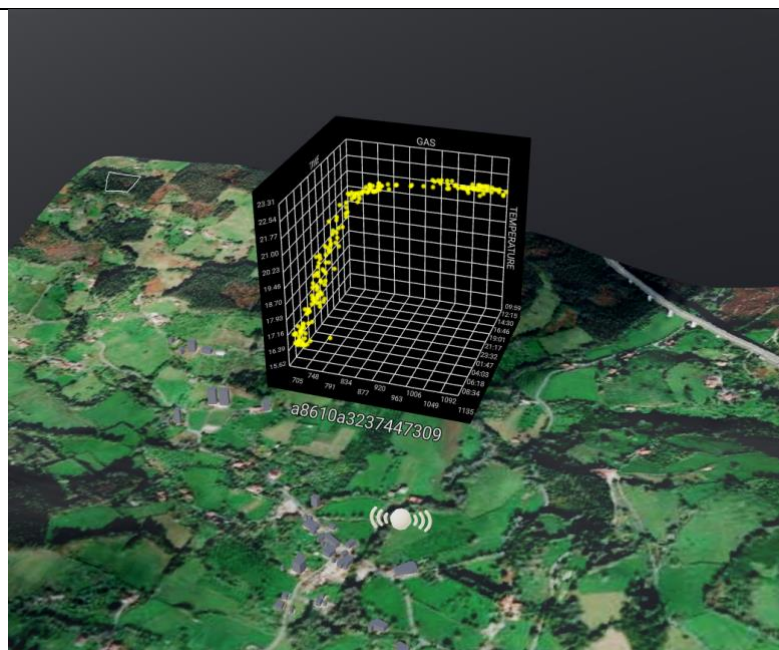


Figura 31. Representación de información de sensórica obtenida de la plataforma.

El resultado final de esta tarea se entregará, según planificación, cuando se concluya la misma (así como las interfaces finales ofrecidas por la plataforma de interoperabilidad) en 2023, documentada en el informe que acompaña a la entrega software *E5.2 Herramienta inmersiva de visualización avanzada de resultados*.

JUSTIFICACIÓN 2023

Bloque 1: Metodología

Este bloque se corresponde con el primer paquete de trabajo (PT1), enfocado al *Diseño, desarrollo y validación de la metodología*, relacionado directamente con el objetivo específico OE1 de SLOW, de “definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de gases de efecto invernadero”. Se pretende, pues, investigar y diseñar una nueva metodología de estimación de GEI estandarizada y uniforme, que complementa información procedente de múltiples fuentes de datos. Para ello, en la primera anualidad se abordó un estudio del estado del arte en materia de monitorización de los GEI y la medición o estimación de emisiones y absorciones, localizando los datos que sirven como indicadores relevantes y las fuentes de datos disponibles para obtenerlos; lo cual permitió alcanzar una definición preliminar de propuesta metodológica sobre la que iterar a medida que continuaba la investigación sobre SLOW, identificando nuevas necesidades y mejoras que incorporar.

En este sentido, cabe destacar el enfoque de retroalimentación basado en la experimentación y en el desarrollo de unas herramientas tecnológicas que acompañan a la metodología, pues la puesta en práctica de las conclusiones alcanzadas de forma teórica durante la investigación previa, en muchos casos no ha permitido alcanzar los resultados deseados. Fue necesario, por tanto, realizar adaptaciones constantes para mitigar a lo largo de las siguientes dos anualidades limitaciones que no se podían haber anticipado, al

no corresponderse con lo dictado por la literatura consultada durante los estudios previos, estableciéndose un importante cambio de enfoque en 2022 que se ha mantenido hasta la conclusión del proyecto.

Este bloque se organiza en tres tareas, de las cuales las dos primeras ya habían sido finalizadas durante 2021, mientras que la tercera permaneció en ejecución hasta el final del proyecto, pues el diseño de la metodología se ha visto retroalimentado a partir de la investigación y los resultados obtenidos a lo largo de su ejecución.

PT1: Diseño, desarrollo y validación de la metodología

T1.1: Análisis del estado de la técnica en inventariado de GEI (2021)

T1.2: Estudio de disponibilidad de datos indicadores en emisión/absorción de GEI (2021)

T1.3: Diseño de metodología de estimación de GEI

Por ofrecer contexto, con la investigación realizada durante las anualidades anteriores sobre el cambio climático y los GEI, así como el estudio generado acerca de metodologías y herramientas para su medición, se pudo determinar que las variables más relevantes para el objetivo perseguido se corresponden con los niveles de **dióxido de carbono** (CO₂) y **metano** (CH₄), quedando en tercer lugar de importancia el **óxido nítrico** (N₂O). Además, se concluyó que la manera de cruzar los datos de emisiones y absorciones para calcular la eficacia de métodos de absorción supone una simple diferencia entre emisiones y absorciones, medidas en toneladas de CO₂eq (equivalencia de CO₂). Por otro lado, se estudió la disponibilidad de fuentes de información abiertas sobre datos climáticos, socioeconómicos y ambientales; y se analizaron bancos abiertos de imágenes satélite para calcular absorciones de GEI, de entre los que se pueden destacar los servicios **Copernicus** y el Plan Nacional de Observación del Territorio (**PNOT**); que posteriormente serían complementados con información de la misión **GEDI** en base a avances en la investigación del PT2, sobre la que pivota el nuevo enfoque basado en la **estimación de biomasa** fundamentado en 2022.

A continuación, se describen las acciones desarrolladas en el marco de la tarea T1.3 abordada en la presente anualidad, así como los principales resultados alcanzados.

PT1: Diseño, desarrollo y validación de la metodología

T1.3: Diseño de metodología de estimación de GEI

Esta tarea ha supuesto un proceso iterativo de definición y optimización de la metodología SLOW a proponer, evolucionando con la nueva información extraída a medida que se han conseguido avances en el proyecto.

1. Definición final de la metodología SLOW

Una vez definidas las principales necesidades y mejoras en cuanto a la estimación de GEI, abordadas en anualidades previas, se deben sentar las bases de la presente metodología para el balance de las emisiones y absorciones del sector ganadero, recordando que:

- La emisión de GEI se debe a la producción de gases dióxido de carbono, metano y óxido nítrico a la atmósfera como parte de una actividad natural y antropogénica.
- La absorción de GEI es la actividad que permite la toma de estos gases de efecto invernadero y su almacenamiento, o también la transformación en otros que no causan este efecto dañino. La absorción principalmente es natural por la existencia de sumideros de carbono (suelos, masa forestal, pastos y pastizales); si bien también puede ser fruto de la actividad humana por medio de

la gestión de los suelos, los espacios verdes y la silvicultura que son parte de los procesos de alteración del intercambio de GEI.

Por eso, esta metodología deberá ser capaz de estimar la cantidad tanto de gases emitidos como absorbidos. Asimismo, se debe establecer un método analítico para cruzar esta información y ofrecer un resultado representativo del balance o la “huella de carbono” final calculada para la explotación objeto de estudio; al cual acompañará un conjunto de recomendaciones para la ayuda a la toma de decisiones.

1.1 Metodología de estimación de emisiones

Para establecer los límites de la metodología, se definen 3 alcances en cuanto a la consideración de emisiones:

- Alcance 1 (directo): todas las emisiones directas procedentes de las actividades del emisor (fermentación entérica, gestión y deposición de purines y estiércol, consumo de combustibles en instalaciones fijas y en vehículos y maquinaria, producción de cultivos/piensos).
- Alcance 2 (indirecto): emisiones indirectas por energía comprada.
- Alcance 3 (indirecto): emisiones indirectas realizadas por terceros en actividades que no son propiedad del emisor ni tampoco están controladas por él (producción piensos/cultivos).

Cabe destacar que las emisiones del alcance 3 corresponden a las emisiones de alcance 1, 2 y 3 de otras empresas o agentes; que a su vez deben declarar sus emisiones. Por tanto, el alcance 3, no se tiene en cuenta en la metodología SLOW, entrando en los **límites finales de la metodología los alcances 1 y 2** en cuanto a las emisiones.

Fuentes de información para el cálculo de emisiones

La recopilación de información debe pasar por la generación, recolección y posible transformación de datos procedentes de fuentes heterogéneas para su integración en la metodología propuesta. Por este motivo, los datos deben ser diversos, fiables y adecuarse a los límites del inventario ya definido. Con lo mencionado anteriormente y, conocidos los diferentes tipos de alcances en los que se ha categorizado las emisiones del sector agroganadero, se pueden definir las fuentes de información de las que se obtendrán los datos de la metodología en el campo de las emisiones y que se describen a continuación de manera detallada:

1. **Inventario de información proporcionada por los agentes involucrados en la explotación y la cadena de suministro.**
 - A partir de un formulario sobre datos procedentes del operador económico; la mayoría de datos hacen referencia a la unidad de producción y proceden de la información aportada por el gestor de la explotación (alcance 1 y alcance 2). Parte de esos datos se pueden recoger en la declaración que el operador haga de la PAC.
 - Se recogen las características de la explotación, parcelas, edificaciones, datos de producción animal, producciones derivadas, gestión de purines y estiércol y consumos.
2. **Red de sensores de GEI in situ.**
 - Todos los datos obtenidos de las fuentes anteriores pueden complementarse con lecturas más concretas tomadas in situ. Estas lecturas pueden obtenerse con el despliegue de una red sensorizada que permita la recolección de una cantidad extensa de datos en periodos de tiempo más cortos que los que ofrecen las bases de datos y las imágenes vía satélite. Los datos recogidos con la red de sensores se enfocan en el CO₂, el CH₄ y el N₂O. Esto permite obtener información analítica sobre:
 - Fermentación entérica. A partir del sensor de CH₄ se recogen los datos relativos a la fermentación entérica de los animales.

- Gestión de purines y estiércol. Los datos relativos a las emisiones de purines y estiércol se pueden derivar de las mediciones de N₂O y CH₄.
- Calidad del aire. El sensor de CO₂ se puede emplear, además de para calibrar el flujo de gases, como indicador de la calidad del aire de las instalaciones o para control de la ventilación.

3. Otras bases de datos y fuentes contrastadas.

- En cuanto al marco teórico, además de la información procedente del responsable de la explotación y resto de intermediarios de la cadena, también se necesita recopilar datos de otras fuentes de información para poder calcular las emisiones.
- Entre las 12 fuentes contrastadas seleccionadas se pueden destacar las bases de datos del IPCC, FAOSTAT, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) o el modelo de referencia GLEAM.

Cálculo de las emisiones de GEI en la metodología SLOW

Como se puede comprobar en base a las fuentes de información identificadas, la evaluación del impacto medioambiental propuesta en SLOW se realiza a partir de fuentes de datos muy heterogéneas: datos procedentes de redes de sensores que transmiten mediciones en tiempo real, datos procedentes del propio operador de la explotación y, por último, información obtenida de bases de datos públicas o paneles de expertos. Por tanto, la primera fase para calcular las emisiones es establecer una serie de ecuaciones o cálculos matemáticos para transformar los datos procedentes de los gestores de las explotaciones, de los sensores y de las bases de datos diversas en **valores cuantificables del GEI correspondiente** (CO₂, CH₄ y N₂O). Así, el proceso del cálculo de las emisiones de GEI, debe pasar por una primera fase de homogeneización de los datos, con el objetivo de cumplir con los estándares establecidos durante la definición de la metodología SLOW.

Tras este primer proceso de estandarización, se enfocarán los esfuerzos en el desarrollo de un plan de cálculo de emisiones de GEI apoyado en el uso de técnicas estadísticas de análisis inteligente de datos y la Inteligencia Artificial como una importante fuente de generación de conocimiento. Este proceso dará como resultado la agrupación de las diferentes emisiones de los GEI considerados, y sus pertinentes transformaciones para la **conversión en CO₂eq** utilizando la cantidad emitida de cada gas en concreto y su GWP (*Global Warming Potential*) en un horizonte de 100 años.

Se definen **métodos separados** para el cálculo de emisiones a partir de la información **declarativa** y para la estimación a partir de las mediciones de la **red de sensores** desplegada in situ.

Cálculo de emisiones a partir de información declarativa

De forma resumida, el cálculo de emisiones a partir de la información proporcionada por los gestores de las explotaciones se basa en aplicar una serie de **factores de emisión** para calcular esta en función de la fuente, bien por tipología de gas o por actividad en la anualidad correspondiente:

$$\text{Huella de carbono} = \text{Dato Actividad} \times \text{Factor Emisión}$$

Usando como referencia para la actividad ganadera la *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, pues ofrece una guía muy completa para calcular GEI provenientes de diferentes fuentes y sectores, incluyendo una lista detallada de factores de emisión.

Se calculan, utilizando esta referencia, los modelos del IPCC y otras fuentes contrastadas, las emisiones derivadas de la producción animal (nitrógeno retenido, excretado y producción de metano), las derivadas

de la gestión de purines y estiércol, las derivadas de los consumos de la explotación, y las derivadas de la explotación (uso de fertilizantes).

Cálculo de emisiones a partir de la red de sensores de GEI in situ

El objetivo de este análisis es identificar las emisiones de GEI por parte del ganado mediante el **registro directo de la concentración interior y exterior de los gases de interés** y la estimación de la tasa de ventilación en el recinto estabulado. Para su desarrollo se empleó el método de balance de CO₂, que se basa en la medición de la concentración de CO₂ en el interior y exterior del recinto, así como la tasa de emisión de CO₂ por parte del ganado. Para la obtención de los registros directos empleados para este análisis, el procedimiento se basa en la instalación de una red de sensores internos y externos en el recinto de interés que recabarán los datos relevantes a intervalos de tiempo regulares durante varias semanas.

El **método de balance de CO₂** en condiciones de estado estacionario permite relacionar las magnitudes relevantes de acuerdo con la siguiente ecuación, siendo “VR” la tasa de ventilación:

$$VR * (Concentración CO_2 interior - Concentración CO_2 exterior) = Tasa emisión CO_2$$

Esta expresión caracteriza el estado estacionario del sistema. De esta relación se infiere una tasa constante de ventilación que permite corregir el efecto de la ventilación en las tasas de emisión del resto de gases — metano y óxido nitroso— registradas, obteniendo tasas de emisión ajustadas, más próximas a las reales. No obstante, el análisis de los datos disponibles puso de manifiesto que la hipótesis de estacionariedad del sistema no es adecuada en el contexto de una explotación estabulada con ventilación natural. En efecto, las tasas de emisión y ventilación calculadas no son constantes, lo que invalida el método estándar empleado. En su lugar, fue necesario reformular la ecuación fundamental del método de balance para incorporar la variabilidad de todas las magnitudes relevantes, deduciendo las tasas de ventilación correspondientes a cada momento de tiempo t.

$$Tasa emisión CO_2(t) - VR(t) * [Concentración CO_2 interior(t) - Concentración CO_2 exterior(t)] \\ = [Concentración CO_2 interior(t) - Concentración interior(t-1)] * Volumen establo$$

Estas componen una serie temporal cuya frecuencia es la misma que la del resto de registros de campo. Con ella se corrigen los efectos de la ventilación sobre las tasas de emisión registradas para el resto de los gases.

1.2 Metodología de estimación de absorciones

De manera análoga a las emisiones, es necesario establecer los límites de la metodología en la consideración de absorciones. Es posible definir diferentes grupos de alcance en relación con el área de efecto y la relación directa o indirecta con las actividades agroganaderas.

- Alcance 1 (directo): todas las fuentes de absorción como consecuencia directa de la actividad principal del emisor.
- Alcance 2 (directo): medidas de absorción directas específicamente desarrolladas para lograr un impacto medioambiental positivo.
- Alcance 3 (indirecto): absorciones indirectas realizadas por terceros en actividades que no son propiedad del emisor ni tampoco están controladas por él.

Siguiendo la categorización anterior y con el foco en el sector ganadero, en la siguiente figura se muestra la distribución de las fuentes de absorción por nivel de alcance; destacando que los límites establecidos

para el **inventario de absorciones de GEI en SLOW son aquellos adscritos al alcance 1**. Como se verá a continuación, dentro de este alcance, las únicas fuentes de absorción que se contemplan en esta metodología como consecuencia directa de la actividad principal del emisor son aquellas que proceden de **parcelas de uso forestal** (según la clasificación de los usos de suelo SIGPAC).

De forma resumida, los esfuerzos para estimar la eficacia del sector agrícola como sumidero de CO₂ deben centrarse en cuantificar la **capacidad de absorción de los terrenos ocupados por prados y vegetación leñosa**, en los que la fijación de carbono puede considerarse permanente o, al menos, duradera. Por el contrario, los cultivos herbáceos anuales se consideran neutros en emisiones de origen natural, ya que el carbono absorbido durante el crecimiento de la materia vegetal se libera de nuevo a la atmósfera a través de la digestión de los alimentos producidos y la quema o la pudrición. Si bien es cierto que las prácticas de gestión agrícola y de aprovechamiento de los residuos vegetales -como abono orgánico, para la producción de biomasa, etc.- o su quema improductiva tienen efecto sobre el saldo neto de emisiones de la explotación agrícola y forestal, estos deben considerarse emisiones o ahorro de emisiones de origen antropogénico cuya estimación cuantitativa se aborda con métodos basados en las declaraciones de actividad y de las prácticas de gestión de las explotaciones agroganaderas y forestales.

Siguiendo las recomendaciones de la Guía para la estimación de absorciones de dióxido de carbono elaborada por el Ministerio para la Transición Ecológica de España (MITECO) y la Oficina Española del Cambio Climático (OECC), *"como punto de partida para el cálculo de las absorciones de dióxido de carbono (...) se tendrá en cuenta únicamente la variación de las **reservas de carbono en la biomasa viva**, incluyendo biomasa sobre el suelo y bajo el suelo"*. Para este cálculo *"se considerará únicamente la biomasa viva (tanto aérea como subterránea) excluyendo de la contabilización la materia orgánica muerta y el carbono orgánico del suelo"*. La **cantidad de carbono fijado en la biomasa** se calcula aplicando el factor asociado a la fracción de carbono de la materia seca, que el IPCC toma por defecto como 0.5. La relación de pesos atómico y molecular del carbono y el CO₂ respectivamente permite estimar la **fijación de CO₂ asociada al carbono fijado** a lo largo de la vida de un ejemplar o una formación forestal.

La biomasa relevante está compuesta de la porción aérea (AGB o *Above Ground Biomass*), correspondiente al fuste, ramas, hojas y frutos, y la subterránea (BGB o *Below Ground Biomass*) correspondiente a las raíces. La porción subterránea de biomasa no es observable salvo por medios destructivos, por lo que suele estimarse como una proporción constante de la porción aérea. Adicionalmente, la capacidad de las **praderas** para fijar carbono reside principalmente en la complejidad y profundidad de su sistema radicular, que **no es observable superficialmente**. Esto dificulta su estimación mediante métodos indirectos; por lo que se **desestima** su cálculo dentro del alcance de la metodología SLOW.

Fuentes de información para el cálculo de absorciones

Con todo lo anterior y conociendo el alcance de SLOW en materia de estimación de absorciones del sector agroganadero, se definen las siguientes fuentes de información como origen de los datos que permitirán realizar un análisis y extracción de resultados.

1. Imágenes vía satélite.

- Información del **Programa Copernicus** (Comisión Europea). Ofrece una gran cantidad de datos enfocados a cubrir las diferentes áreas de análisis de la superficie terrestre mediante una gran flota de satélites propios y comerciales.
 - Se emplean imágenes ópticas y multiespectrales ofrecidas por los satélites Sentinel-1 y Sentinel-2 con resolución de 10 m, para obtener los regresores — ópticos y radar— necesarios para la aplicación de métodos indirectos de estimación de la biomasa forestal.

- El **Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI)**. Una misión de la NASA y la Universidad de Maryland diseñada para proporcionar mediciones precisas de la estructura tridimensional de los bosques terrestres y la biomasa de las formaciones forestales, a bordo de la Estación Espacial Internacional.
 - Los datos de sensores LIDAR recogidos por la misión GEDI, en combinación con las series temporales que ofrece Landsat, permiten construir mapas tridimensionales detallados de la altura del dosel forestal (mediante el modelo GEDI de altura de copas) y su estructura vertical con resolución de 30 m.
 - Cálculos de biomasa estimada por la misión GEDI con resolución de 1 km.
- 2. El **Mapa Forestal de España (MFE50)**, empleado como fuente de regresores para identificar las distintas especies forestales a considerar.
- 3. El **modelo digital de terreno de Google Earth Engine**, plataforma de análisis geoespacial en la nube que permite el análisis y visualización de grandes conjuntos de datos de imágenes satelitales y geoespaciales.
- 4. El **Catastro**, para identificar las fincas relevantes asociadas a cada explotación a estudiar mediante su referencia correspondiente.
- 5. **Información declarativa aportada por el responsable de la actividad**, complementando los anteriores puntos con información contextual como la localización exacta mediante referencia catastral y extensión de la explotación, y la edad de las formaciones forestales en las parcelas de aplicación.

Cálculo de las absorciones de GEI en la metodología SLOW

Se propone un método de estimación de la biomasa mediante **modelos de aprendizaje automático** que tome como **verdad-terreno** las estimaciones de biomasa elaboradas para Asturias por la misión **GEDI**. La resolución de estos datos etiquetados GEDI es de 1 km. Los **regresores** del modelo serán las medidas de **fracción de cabida cubierta (FCC), altura de copas y otros registros** de sensores remotos que resulten significativos para estimar la biomasa adoptada como verdad-terreno. El propósito del modelo es que pueda ser utilizado para calcular estimaciones posteriores, actualizadas en tiempo real y con un grano tan fino como permitan las fuentes de datos crudos, previsiblemente los 30 m de resolución de los datos crudos ofrecidos por la misión GEDI.

Asimismo, se empleará el modelo de **altura de copas** que ofrece la misión GEDI para establecer un umbral que permita **distinguir las zonas forestales de las praderas**, pues el cálculo de la biomasa presente en estas se desestima (como ya se ha indicado, la capacidad de las praderas para fijar carbono reside principalmente en la complejidad y profundidad de su sistema radicular, que no es observable superficialmente).

El modelo definido anteriormente estima la **densidad de biomasa por encima del suelo (AGB)** en el territorio de interés. Para obtener la densidad de **biomasa total** del territorio se tiene que incluir también la densidad de biomasa por debajo del suelo, es decir, toda aquella que forma parte de la masa forestal por debajo del suelo y que por lo general compone el 29% de la biomasa por encima del suelo. Por lo tanto la densidad de biomasa total del territorio de interés será:

$$\text{Densidad biomasa total} = \text{AGB} * 1.29$$

Una vez se ha obtenido la densidad de biomasa total, se ha de calcular también la cantidad de dióxido de carbono fijado en dicha biomasa. Para ello hay que determinar en primer lugar la cantidad de biomasa corresponde al carbono el cual en porcentaje supone aproximadamente el 49% del total:

$$\text{Carbono presente en la biomasa} = \text{Densidad biomasa total} * 0.49$$

Finalmente se calcula la cantidad de dióxido de carbono fijado en la biomasa del territorio en base al peso molecular en unidades de masa atómica (uma) del carbono (12 uma) y del dióxido de carbono (44 uma).

$$\text{Dióxido de carbono fijado} = \text{Carbono presente en la biomasa} * \\ (\text{Peso molecular Dióxido de Carbono} / \text{Peso atómico Carbono})$$

1.3 Metodología de cruce de datos y cálculo del balance

Como ya se ha definido durante la fase de análisis del estado de la técnica, los sistemas de cruce de datos y cálculo de resultados basan sus estimaciones en la cuantificación de los diferentes tipos de gases producidos durante las emisiones o transformados durante los procesos de absorción. Siendo el análisis de la diversidad de gases de forma independiente de interés en sí mismo, queda fuera del alcance propuesto; por lo que se hace uso de los índices GWP y ODP, calcular sus **equivalencias en toneladas de CO₂ (CO₂eq)** con el objetivo de lograr una visualización global del efecto invernadero de los diferentes gases. De cara a realizar el cálculo del GWP en un gas específico, se hace uso de la ecuación:

$$\text{CO}_2\text{eq} = \text{MasaGas} * \text{GWP}$$

Teniendo en cuenta que los valores de GWP vienen establecidos por la relación entre el forzamiento radiativo de un kilogramo del gas a analizar en comparación con un kilogramo de CO₂ durante el mismo periodo de tiempo (25, 100 o 500 años).

Haciendo uso de estos principios y sus tablas de equivalencias asociadas, las recomendaciones para el cruce de datos de emisiones y absorciones para calcular la eficacia de los métodos de absorción, se reflejan en la ecuación:

$$\text{GEI_Totales (CO}_2\text{eq)} = \text{Emisiones_GEI (CO}_2\text{eq)} - \text{Absorciones_GEI (CO}_2\text{eq)}$$

El cruce de datos entre emisiones y absorciones de GEI de esta forma ofrece una valiosa información en cuanto al **análisis del alcance de la acción compensatoria sobre la huella ecológica** generada con la propia actividad, que repercutirá en el establecimiento de medidas enfocadas al refuerzo en las áreas de mayor impacto. Por ello, este cálculo supone un proceso fundamental en la definición de la metodología SLOW de cara al cumplimiento de los objetivos de cero emisiones netas establecidos en el Pacto Verde para la anualidad 2050.

2. Catálogo de recomendaciones para la toma de decisiones

Completando el resultado anterior, SLOW propone un sistema de recomendaciones tras recabar toda la información relevante sobre la explotación agroganadera de interés, calcular una estimación de las emisiones de GEI asociadas a su actividad y las absorciones forestales de CO₂ y recopilar las principales magnitudes en una tabla de datos que resume las conclusiones relevantes para el usuario. El análisis automatizado de los componentes desagregados de las fuentes de emisión y el balance de emisiones y absorciones orienta la elaboración de un conjunto de **recomendaciones específicas para el usuario** con el propósito de mejorar el balance de gases asociados a la actividad agroganadera de acuerdo con las peculiaridades de la explotación.

2.1 Recomendaciones para disminuir las emisiones

Las recomendaciones en cuanto a las emisiones que aquí se plantean se hacen mayoritariamente teniendo en cuenta las Mejores Técnicas Disponibles o **MTDs descritas en el Real Decreto 1053/2022**, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las explotaciones bovinas (aunque también se incluye alguna recomendación no MTD que no figuran en el Real Decreto 1053/2022). Estas recomendaciones tienen que ver con la gestión nutricional, el alojamiento y manejo de los animales, el almacenamiento y tratamiento de purines y estiércol, y su posterior aplicación al campo, así como otras prácticas relacionadas con la gestión medioambiental de la granja (consumo de combustible, electricidad, etc).

A continuación se describe, a modo de ejemplo, una MTD relacionada con la alimentación animal:

“MTD1. Para reducir el nitrógeno total excretado (aplicar si el porcentaje de N₂O excretado en heces supera el 5%):

- *Reducir el contenido en proteína bruta mediante una dieta equilibrada en nitrógeno y energía, teniendo en cuenta las necesidades energéticas y productivas de los animales.*
- *Alimentación multifase con una formulación del pienso adaptada a las necesidades específicas del período productivo.”*

2.2 Recomendaciones para aumentar las absorciones

A continuación se describen las recomendaciones para aumentar las absorciones por parte de las explotaciones:

- Uso de materia vegetal sobrante de siegas, desbroces y podas para cama del ganado y posterior abono de superficies descubiertas, reduciendo así costes por la compra de paja para cama a la vez que aumentando las superficies de pasto por revegetación y el stock de carbono en el suelo (mejorar absorciones).
- Manejo eficiente de prados y pastizales mediante sistemas combinados de pastoreo y siega que permitan la recolección de forrajes de calidad y el aprovechamiento óptimo del pasto, así como favorecer el incremento de la absorción del CO₂ en función de un mayor crecimiento de la vegetación.
- Promoción del pastoreo rotacional regenerativo bajo el método PRV (Pastoreo Racional Voisin).
- Implementación de sistemas de pastoreo inteligente que permitan vincular las cargas ganaderas a disponibilidades de pasto en estado aprovechamiento óptimo, así como las emisiones derivadas del transporte en el caso de vigilancia en el marco de sistemas extensivos.
- Favorecer la implantación de sistemas agroforestales donde la combinación de arbolado y pasto ayude a la compensación de las emisiones de la explotación en caso de ser excedentarias, a la vez que se incrementen las superficies forrajeras de las mismas. Cabe recordar aquí las amplias posibilidades con que cuenta Asturias en los denominados “montes comunales” en sentido amplio, que se estima que suponen alrededor de 500.000 ha (Arango, 2009), y que más del 30% de los mismos se encuentran recubiertos de matorrales improductivos de alta exposición a incendios forestales.

2.3 Otras recomendaciones generales

- Aumento de la autonomía alimentaria y reducción de costes de la explotación encaminada a una menor dependencia externa de piensos y forrajes y la consiguiente reducción de emisiones por transporte.
- Cómputo estricto de la totalidad de los servicios ecosistémicos que ofrece la explotación (servicios de regulación, aprovisionamiento y culturales) y su posterior valoración de cara a la compensación

de posibles impactos medioambientales, si es que se dieran, en el desarrollo de la actividad (ej. conservación de agrobiodiversidad de los pastos permanentes, mantenimiento de mosaicos paisajísticos tradicionales...).

- Considerar la circularidad en todas las escalas y partes del ciclo de vida del producto.
- Fomentar los sistemas agroalimentarios circulares inteligentes basados en la producción, venta y consumo de alimentos de proximidad para reducir las emisiones derivadas del transporte.
- Creación de marcos reglamentarios específicos para el sector agroganadero en los que se diferencie claramente los sistemas de producción (intensivos, mixtos y extensivos) y los requisitos exigidos a cada uno de ellos.
- Creación de un “etiquetado de carbono” que premie las explotaciones y productos bajos en emisiones o con balance positivo de cara a generar una conciencia ambiental en el consumidor que se traduzca en una mayor demanda de “productos bajos en carbono, neutros y o capturadores”.
- Orientación de las ayudas de la PAC en general, y de sus medidas agroambientales en particular, hacia la compensación de las explotaciones más eficientes y sostenibles en cuanto a menor huella ecológica.

Bloque 2: Herramientas tecnológicas

Este bloque genera el marco para los desarrollos tecnológicos que han derivado en las herramientas de soporte para la metodología definida, suponiendo un punto de entrada para usuarios que quieran consultar la información y los resultados obtenidos con ella de una forma amigable y accesible, a través de interfaces de visualización avanzada. Así, este bloque se corresponde con los paquetes de trabajo PT2, PT3, PT4 y PT5; los cuales han concluido en la presente anualidad 2023. Así, se ha finalizado la *Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos* (PT2) en pos de alcanzar los objetivos específicos OE2 “detección y evaluación de fuentes de datos disponibles” y OE3 “diseño de protocolo para la captación de datos heterogéneos”. Estos datos alimentan la *Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos* que se ha diseñado (PT3), relacionada directamente también con el OE3, así como con el OE4 de “exploración de técnicas para la integración y el procesamiento avanzado de datos”. Esta plataforma supone, además, el punto central para comunicar dos componentes: el *Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones* (PT4), que responde también a ese OE4, y las *Herramientas de visualización avanzada* (PT5), propuestas para alcanzar el OE5 de “diseño e implementación de un entorno virtual inmersivo para la visualización avanzada de información”.

De esta forma, los trabajos de 2023 para este bloque se organizan en torno a siete tareas correspondientes a cuatro PTs, de las cuales cinco continúan desde la anualidad anterior; finalizando todas ellas (y, con ellas, los cuatro paquetes de trabajo) según la planificación inicial.

PT2: Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos

- T2.1: Análisis de sensores en el dominio de GEI (2022)
- T2.2: Análisis de fuentes públicas de imágenes por satélite (2022)
- T2.3: Diseño y despliegue de prototipos de sensores de GEI
- T2.4: Diseño de algoritmos de procesamiento de imágenes por satélite

PT3: Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos

- T3.1: Diseño de la capa de almacenamiento (2022)

T3.2: Diseño de la capa de procesamiento escalable
T3.3: Diseño de interfaces y capa de interoperabilidad

PT4: Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones

T4.1: Homogeneización y preprocesado de los datos (2022)
T4.2: Generación de variables relevantes para la estimación de las emisiones de GEI (2022)
T4.3: Diseño y desarrollo del sistema de toma de decisiones

PT5: Herramientas de visualización avanzada

T5.1: Diseño de sistemas de visualización de datos y resultados (2022)
T5.2: Entornos virtuales inmersivos interactivos (2022)
T5.3: Interoperabilidad con Plataforma e integración de resultados
T5.4: Integración bajo estándares W3C

PT2: Identificación, evaluación y diseño de fuentes de datos

T2.3: Diseño y despliegue de prototipos de sensores de GEI

Con esta tarea se pretende llevar a la práctica el estudio realizado en la tarea T2.1, seleccionando un conjunto de sensores que llevar a la experimentación diseñando los componentes de integración necesarios y construyendo prototipos para validar su funcionamiento, derivando en la tecnología final (hardware y software) usada para el despliegue de un caso de uso piloto de implementación de SLOW.

Para ello, en la anualidad anterior se inició una experimentación mediante prototipos que permitieron comprobar la funcionalidad de interconexión y comunicación de información relativa a GEI a través de la tecnología inalámbrica seleccionada, LoRa, usando dispositivos ad-hoc de bajo coste consistentes a sensores conectados a placas programables. La conclusión alcanzada de forma general se fundamenta en que, en cuanto a la situación del mercado actual, en este campo se observa una falta de precisión en las mediciones al aire libre, a no ser que se recurra a alternativas de muy alto coste. La experimentación inicial permitió comprobar, no obstante, la prometedora **potencialidad del uso de placas MKRWAN1300 o 1310 junto con sensores Dynamant** para la implantación de la metodología, si bien conociendo las limitaciones en cuanto a las mediciones en entornos abiertos.

1. Despliegue preliminar de dispositivos para evaluación de prototipos

En la anualidad 2023 se ha completado la experimentación previamente iniciada. Con el fin de iniciar la toma de datos y **verificar el correcto funcionamiento de los prototipos** seleccionados durante periodos de tiempo prolongados, se realizó un **despliegue preliminar en entornos controlados** correspondientes a las instalaciones de CTIC, tanto en la sede principal ubicada en el Parque Científico Tecnológico de Gijón como en la finca de CTIC RuralTech (valle de Peón, Villaviciosa), que ofrece un entorno relevante por la disposición de la infraestructura de simulador climático para estudio del comportamiento de plantaciones y cultivos, de modo que las mediciones relacionadas con la calidad del aire serán ciertamente representativas del entorno final. Se han dispuesto, para ello, dos *gateways* proporcionando **comunicación LoRa en ambas ubicaciones**; encargados de recibir los paquetes de los dispositivos de medición y redirigirlos a la plataforma central objeto del PT3.

De la misma forma, se han dispuesto **tres módulos** basados en la combinación de placa Arduino MKRWAN1310 conectada a un sensor de gas Dynamant (CO₂, CH₄ y N₂O, respectivamente), los cuales

fueron instalados en un **bancal de cultivos** de la infraestructura de simulador climático de CTIC RuralTech; un escenario idóneo para estas pruebas al ser un entorno controlado con condiciones ambientales semejantes a las que se espera medir, pudiendo así calibrar, monitorizar y analizar el comportamiento de los sensores en condiciones predecibles y estables.

De esta forma se ha procedido a realizar **mediciones de dióxido de carbono** en un bancal de cultivos, pudiendo **verificar el correcto desempeño** funcional de los prototipos y del sistema de comunicación propuesto, registrando niveles de CO₂ en tiempo real que permiten realizar un análisis de cómo varían a lo largo del día de forma cíclica (debido a la respiración de las plantas por su actividad fotosintética).

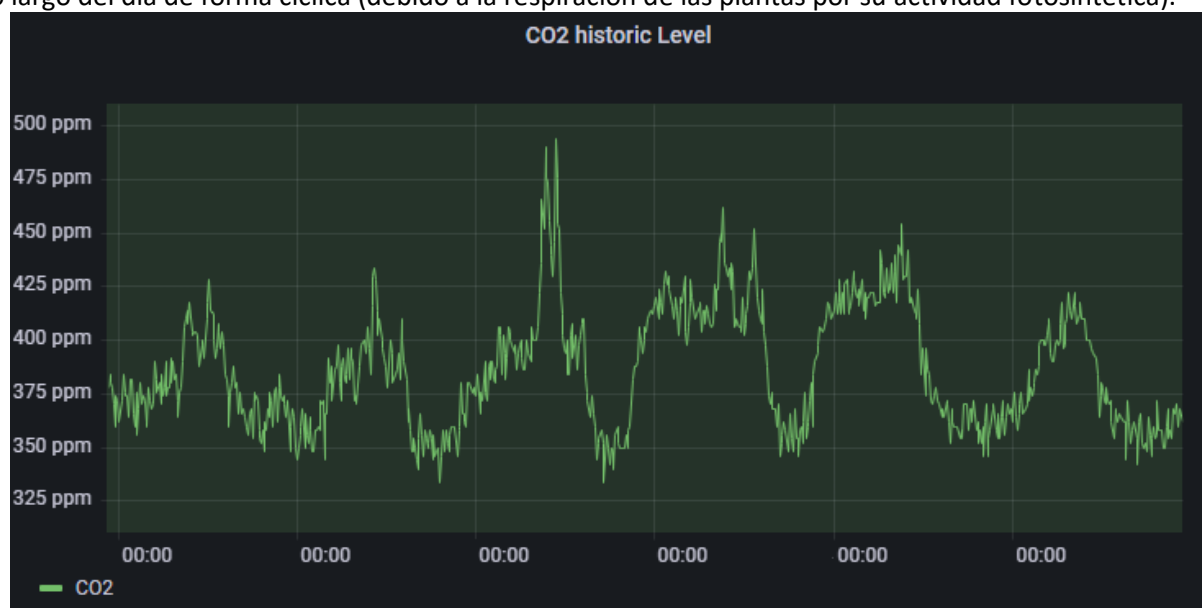


Figura. Fluctuaciones de CO₂ obtenidas con el prototipo preliminar (bancal de cultivos).

Los resultados obtenidos con el **sensor de metano**, no obstante, resultan menos esperanzadores, en línea con la limitación anticipada sobre el uso de sensores de este tipo en espacios abiertos; al obtener concentraciones extremadamente bajas de este gas que hacen concluir que se **puedan generar mediciones que no sean fiables**.

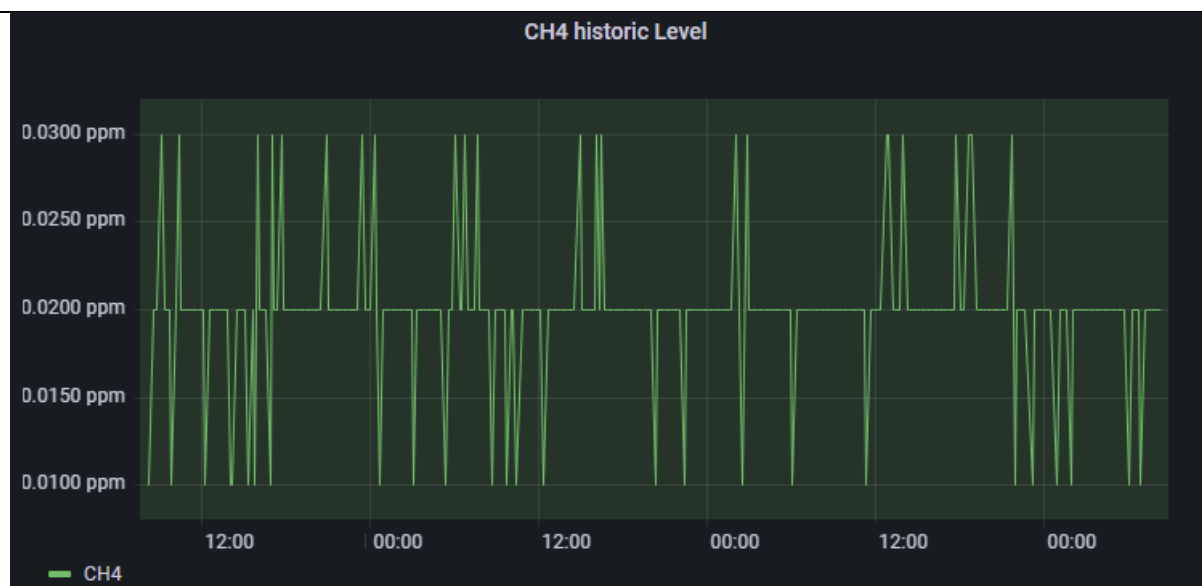


Figura. Fluctuaciones de CH4 obtenidas con el prototipo preliminar (bancal de cultivos).

De manera análoga, la experimentación con el **sensor de óxido nítrico** generó valores muy cercanos a cero, debido a la poca concentración de este gas en el aire. En conclusión, a pesar de las limitaciones de los sensores utilizados, se ha podido **validar su correcto funcionamiento** durante las pruebas realizadas. Los paquetes enviados con los datos recopilados han sido recibidos y almacenados. Es importante señalar que estos datos pueden proporcionar información sobre las concentraciones de gases en el área, aunque será necesario **tener en cuenta las limitaciones** de los sensores utilizados de cara a análisis posteriores. Una conclusión adicional a esta experimentación, si bien relevante, se fundamenta en **evitar el uso de baterías** para minimizar el mantenimiento, aumentando la eficacia y autonomía del sistema una vez desplegado, pues las placas con las que se ha experimentado requieren de volver a cargar en ellas el firmware de programación cada vez que se reinician.

2. Despliegue del caso de uso piloto y tecnología final

En base a las conclusiones obtenidas a través de la experimentación preliminar ha sido posible generar la tecnología final para el despliegue en el caso de uso piloto con toma de datos in-situ en una explotación ganadera. Se trata de un **despliegue en entorno real** que ha sido seleccionado teniendo en cuenta las limitaciones encontradas para realizar mediciones al aire libre. Por ello, uno de los criterios de selección para el caso de uso piloto radica en la estabulación del ganado, tratando de plantear un **escenario lo más cerrado posible** para maximizar las concentraciones de gas a detectar con los dispositivos propuestos.

El escenario finalmente seleccionado es la ganadería de producción de leche Pinón, en Villafrontera, Concejo de Tineo. Esta explotación dispone de una **nave cerrada** destinada al resguardo y alimentación del ganado bovino, que en cuanto a exposición al exterior supondría un entorno ideal para la medición de GEI procedentes de la agroganadería a través de los medios que se proponen. Cabe destacar que, en el progreso de desarrollo del proyecto entre la visita preliminar para evaluar la explotación y la instalación de la red sensorica, **estas condiciones variaron de forma notable** a causa de una remodelación no anticipada por parte del gestor de la ganadería buscando, precisamente, favorecer la ventilación para combatir el calor en periodos de alta intensidad. Es por ello que finalmente se realizó el despliegue en una nave que no presenta un cierre total, conociendo de antemano, gracias a la experimentación previa, que tal

circunstancia puede **comprometer la efectividad de los sensores** en cuanto a la medición precisa de gases. El enfoque respecto al hardware sigue lo planteado durante la fase de prototipado; es decir, se realiza la instalación de dispositivos ad-hoc con sensores para la toma de datos y la comunicación a través de un *gateway* para redirigir la información de LoRaWAN a la plataforma central.

Se ha llevado a cabo la construcción del hardware específico para este piloto en cuestión de toma de datos referentes a niveles de GEI en el aire; el **prototipo funcional del módulo encapsulado de sensores de GEI**. El diseño seguido para este despliegue se refleja en el siguiente esquema.

Este módulo sensor encapsulado consta de los siguientes elementos:

- Tres **placas Arduino MKRWAN1310** con soporte para LoRaWAN, cada una de ellas equipada con su propia antena para la transmisión de información.
- Tres **sensores Dynament**, designados para la medición de CO₂, CH₄ y N₂O respectivamente. Cada uno de estos sensores se conecta a una de las tres placas Arduino mencionadas anteriormente, con un sensor por placa.
 - o El sensor integrado en este sistema opera con una alimentación de 5V, que le otorga la placa Arduino. Además, este sensor se comunica con la placa a través de los puertos de transmisión (TX) y recepción (RX) que facilitan la transferencia bidireccional de datos entre el sensor y la placa Arduino.
- Un **transformador eléctrico** diseñado para suministrar energía a las tres placas Arduino. De esta manera se consigue alimentar los arduino MKRWAN1310 (que precisan de una alimentación de 5V) mediante un enchufe convencional (que suministra de 220V a 240V). Así se conseguirá evitar el uso de baterías minimizando el mantenimiento y aumentando la eficacia y autonomía del sistema.
- Con el fin de seguir alimentando el sistema (y evitar reinicios en el firmware) se añade una **batería** para cada una de las placas Arduino para prevenir en caso de pérdidas de electricidad.
- Una **carcasa estanca** que alberga todos los componentes mencionados, excluyendo los sensores que se encuentran encapsulados en su propio *housing* para brindarles una protección individualizada.

Este diseño se materializó en la **construcción física y configuración de dos prototipos funcionales** para su posterior instalación en el escenario del caso de uso piloto (uno en el interior y otro en el exterior del establo, según la metodología basada en el método de balance de CO₂).

Asimismo, se dispone de un **gateway adicional para otorgar cobertura LoRa** en el escenario del caso de uso; así como de una guía de configuración de los componentes para ejecutar el despliegue final.

T2.4: Diseño de algoritmos de procesamiento de imágenes por satélite

El objetivo de esta tarea es concretar sobre los estudios teóricos realizados en el marco de la tarea T2.2 de forma aplicada a SLOW para seleccionar las alternativas más adecuadas de fuentes de imágenes por satélite y diseñar los procesos de lectura y tratamiento de esos datos. Así, se definen las técnicas a aplicar sobre las imágenes satelitales para obtención de información relevante en cuanto a la estimación de GEI en un territorio, resultando finalmente en los algoritmos correspondientes a integrar en la plataforma central (PT3) para su despliegue.

1. Planteamiento metodológico

Desde el lanzamiento de los primeros satélites con este cometido a principios de los años 2000, las concentraciones en la atmósfera promediadas en columna de los principales gases de efecto invernadero, en concreto dióxido de carbono y metano, se han medido de forma remota desde el espacio. Estas mediciones sirven de gran ayuda para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero de los incendios, estimar la distribución espacial del consumo de energía y detectar patrones y tendencias a gran escala en la productividad de los ecosistemas. En este contexto, en anualidades previas se analizaron las tres fuentes principales de datos que permiten el acceso a las **imágenes de satélite con información de emisiones de GEI** que ofrecen sus servicios de forma gratuita (GOSAT, OCO-3 y CAMS). De este estudio preliminar **se concluyó que el grano de la información que ofrecen estos servicios es insuficiente para registrar variaciones asociadas a la actividad agrícola, forestal y ganadera** y no son útiles para el objetivo propuesto por SLOW.

En consecuencia, se hizo necesario explorar otras fuentes de información disponibles y un replanteamiento de la propuesta metodológica inicial. La revisión de la literatura científica especializada reveló la utilidad para el proyecto de los enfoques cuantitativos que permiten **relacionar la evolución de la biomasa vegetal con las emisiones y absorciones de CO₂ para detectar sumideros naturales del gas**. En concreto, el conocimiento científico sobre el ciclo del carbono permite asociar de forma rigurosa y exacta la magnitud de la biomasa de una población vegetal con el volumen neto de CO₂ absorbido a lo largo de su desarrollo. En cuanto al cálculo del volumen de la biomasa en un territorio, la alometría y la dasometría ofrecen instrumentos para estimar la biomasa de ejemplares vegetales individuales de distintas especies y la biomasa agregada de una formación vegetal en su conjunto para distintos tipos de ecosistemas y climas. Los avances más recientes en estas disciplinas combinan los modelos clásicos —que requieren de mediciones directas tomadas en el terreno— con observaciones satelitales para ofrecer estimaciones de la biomasa presente en una región. **La misión GEDI** es un ejemplo de estas tecnologías: gracias a un instrumento LiDAR instalado en la Estación Espacial Internacional, GEDI elabora modelos de altura del terreno y de la vegetación que sustituyen a las mediciones directas tradicionales obtenidas mediante trabajos de campo y permiten realizar estimaciones de biomasa con un grano suficientemente fino para el propósito de este proyecto. No obstante, la densidad y la frecuencia de las estimaciones GEDI son insuficientes para cubrir y actualizar la información necesaria sobre los recintos de interés —las explotaciones agrícolas y forestales— y monitorizar su evolución.

Por ello, el enfoque metodológico propuesto se completa con un **sistema de aprendizaje automático entrenado para replicar las estimaciones de biomasa que ofrece GEDI empleando las señales satelitales ópticas y de radar que ofrecen los satélites Sentinel 1 y 2**, en lugar de la señal LiDAR empleada por GEDI. La biomasa estimada de este modo para una superficie de terreno forestal permite calcular el CO₂ absorbido por este a lo largo de su desarrollo sin más que aplicar factores de conversión asociados a la proporción de carbono presente en la biomasa y a los pesos atómico y molecular del carbono y el CO₂ identificados por las ciencias botánica y química.

2. Selección de fuentes de datos satelitales para la metodología SLOW

De entre las fuentes de datos de imágenes satelitales estudiadas a partir de la nueva propuesta metodológica se ha hecho una selección de aquellas que se ajustan de manera óptima a los objetivos. En un primer momento se consideró utilizar el conjunto de datos de Landsat para obtener información del terreno. Sin embargo, después de analizar las características de este y del programa Sentinel, se decidió utilizar este último para extraer información de la vegetación del terreno. Esto es principalmente por dos motivos:

1. Frecuencia de muestreo: Los satélites Sentinel tienen una frecuencia de revisita más alta que los satélites Landsat. Por poner un ejemplo, Landsat puede visitar la misma ubicación cada 16 días con un solo satélite y 8 días cuando se combinan múltiples satélites mientras que Sentinel-2 puede hacerlo cada 5 días con una configuración de constelación de dos satélites lo que permite hacer comparaciones del estado de las fincas agrícolas en un número mayor de momentos en el tiempo que en el caso de Landsat.
2. Capacidad SAR (Radar de Apertura Sintética): Sentinel está equipado con SAR, lo que permite la observación de la Tierra de día o de noche y en condiciones climáticas adversas, como nubes o lluvia. Esto es especialmente útil en el contexto del territorio de Asturias donde es frecuente que haya bastante nubosidad la mayor parte del año.

De entre toda la **información ofrecida por el programa Sentinel-2, fundamentalmente son de interés dos indicadores:**

- El **NDVI** (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), que permite cuantificar la cantidad y calidad de la vegetación en un área.
- El **NDWI** (Normalized Difference Water Index o Índice de Agua de Diferencia Normalizada), que es un índice utilizado para identificar y monitorear cuerpos de agua, así como la humedad en suelos y vegetación.

A partir de los valores de ambos indicadores en cada píxel de la imagen, se calcula un valor medio de cada uno para tener un par de valores que resuman el **estado de la vegetación del área**.

Por otra parte se han empleado también los datos del **modelo digital de elevaciones (DEM)**. Dado que el tipo de vegetación y por tanto la biomasa de un área está condicionada en buena parte por el tipo de terreno en el que vive, se han extraído los valores medios de:

- **Altura del terreno:** Debido a la diversidad altitudinal del territorio asturiano existen especies de plantas que crecen en diferentes altitudes afectando por tanto a la biomasa final.
- **Pendiente del terreno:** La pendiente del terreno también afecta significativamente a la vegetación de un área concreta y por tanto también influye en la biomasa.
- **Aspecto del terreno:** Este valor indica la orientación de la pendiente lo que influye considerablemente en el tipo de vegetación de un área ya que recibirá más o menos luz solar a lo largo del día.

Finalmente se encuentran los **datos ofrecidos por la misión GEDI que proporcionan sus propias estimaciones de biomasa** para las zonas marcadas por las pasadas del satélite, es decir, las huellas de GEDI. Con esta información se utilizará exclusivamente como **verdad-terreno con la que entrenar y validar los modelos de aprendizaje automático** que posteriormente estimarán la biomasa del terreno y, por ende, el CO₂ fijado en la vegetación, usando los factores anteriormente indicados como regresores.

3. Diseño de algoritmos de procesamiento para extracción de información relevante en la metodología SLOW

Para extraer las variables antes mencionadas a partir de las imágenes satelitales se han desarrollado **dos módulos Python**: un módulo de extracción de características del terreno y otro módulo para obtener los valores de biomasa estimados por la misión GEDI. Se puede sintetizar muy brevemente la funcionalidad de cada uno:

- El **módulo de extracción de información del terreno** es el encargado de recopilar y extraer la información de las imágenes de Sentinel-2 (cálculo de los índices NDVI y NDWI usando las bandas espectrales) y el DEM, usando los servicios en la nube de la plataforma Google Earth Engine. Se

realizan los procesos de preprocesamiento, filtrado y síntesis de la información necesarios para establecer una región de interés a contemplar.

- El **módulo de extracción de biomasa estimada por GEDI** accede a la API de GEDI para obtener unos datos que, tras el filtrado correspondiente, suponen el conjunto de huellas GEDI de biomasa para la región de interés indicada.

PT3: Plataforma estandarizada de interoperabilidad y procesamiento avanzado de datos

El paquete de trabajo PT3 está dedicado al diseño y creación de una **plataforma central** que aborde las tareas de almacenamiento, procesamiento y análisis de los datos heterogéneos de las fuentes seleccionadas. Así, las capas que debe presentar esta plataforma pueden categorizarse, a alto nivel, en tres grupos:

1. Por un lado, los trabajos de diseño orientados a la capa de **almacenamiento**, es decir, el conjunto de componentes encargado de proporcionar servicios de persistencia y consulta de datos heterogéneos, de acuerdo a las necesidades del proyecto.
2. Por otro lado, una capa de **procesamiento** capaz de ser escalada de forma horizontal para soportar los flujos de datos identificados en el proceso de elaboración de la metodología SLOW.
3. Por último, una capa dedicada a las interfaces de comunicación y la **interoperabilidad** que permita interconectar los datos almacenados con otros servicios de análisis y/o visualización.

El trabajo llevado a cabo durante las anualidades previas permitió completar la capa de almacenamiento y generar versiones preliminares de las capas de procesamiento escalable y de interoperabilidad, que fueron concluidas en 2023 con las adiciones que se describen a continuación; dando lugar a la plataforma final. Cabe destacar, no obstante, que a la **capa de almacenamiento** se le aplicaron leves modificaciones derivadas de del uso del servicio Google Earth Engine para las tareas relacionadas con el procesamiento de imagen satelital (descritas en el PT2); por lo que ya no es necesaria la persistencia de estos datos en el contenedor Minio.

T3.2: Diseño de la capa de procesamiento escalable

Esta tarea está destinada al diseño y construcción de la **segunda capa** de la plataforma, correspondiente al procesamiento automático de los datos previamente almacenados. En 2023 se realizaron las modificaciones necesarias para **concluir la implementación funcional** de esta capa a partir de la versión preliminar obtenida en la anualidad previa, siguiendo el diseño definido durante la misma: un orquestador Apache Airflow y *workers* Celery.

1. Módulos de procesamiento para los cálculos del sistema de estimación SLOW

Los servicios finales implementados en esta capa tienen una estrecha relación con las fuentes de datos finalmente seleccionadas a lo largo de la tarea T2.4 y con los avances en el paquete de trabajo PT4 relativo al sistema inteligente de apoyo a la toma de decisiones (que se detalla más adelante). Si bien en la versión preliminar de la capa de procesamiento se incorporaban los servicios necesarios para la descarga y procesamiento de imágenes satelitales desde Sentinel Hub, en 2023 se pivotó a la creación de tareas para ejecución en la nube de Google Earth Engine, por lo que estos servicios fueron sustituidos. En su lugar, se han **generado los módulos** correspondientes para poder ejecutar todo el procesamiento diseñado en el marco del **sistema de cálculo del balance y apoyo a la toma de decisiones** del PT4.

1.1 Descarga de parcelas

Cuando un usuario indica los datos de su explotación y alguna de las parcelas incluidas no está entre los datos de la plataforma, un trabajo o *Dag* en esta capa de procesamiento se encarga de **descargar los datos shapefiles de SigPAC** a través de la capa de interoperabilidad con servicios externos.

1.2 Cálculo de absorciones

Cuando se registra una explotación en la base de datos y alguna de sus parcelas correspondientes no tenga todavía la **estimación de absorciones (cantidad de biomasa y CO2 fijado)** asociada, un *Dag* lanza la petición del cálculo hacia el módulo de absorciones que se documenta más adelante.

1.3 Módulo de sensórica

Este módulo es el encargado de **calcular la tasa de emisión de metano** por cabeza de ganado y por unidad de tiempo, a partir de las mediciones de los sensores documentados en el PT2, registrados como series temporales en la capa de almacenamiento (histórico de datos). Los cálculos detallados para obtener la tasa de emisión se documentan en los correspondientes al PT4.

1.4 Módulo de emisiones

Este módulo es el encargado de **estimar las emisiones de CO2eq totales de una explotación determinada a partir de la información declarativa** que el usuario ha introducido a través de los formularios presentes en la plataforma web de interfaz.

Se realizan las conversiones de todas las emisiones calculadas para transformarlas en emisiones de CO2eq; si bien se almacenan:

- Emisiones por categoría, divididas en tipo de gases (CO2, CH4, N2O).
- Emisiones por categoría, en CO2eq.
- Emisiones totales en CO2eq.

1.5 Módulo de absorciones

Este módulo se encarga de obtener las coordenadas de las parcelas de la explotación y de comunicarse con el servicio externo Google Earth Engine para realizar los cálculos de **estimación de tasa de absorción** de la misma.

A grandes rasgos, funciona según el siguiente flujo:

1. La interfaz, o bien otro agente de la arquitectura (como el *Dag* de cálculo de absorciones), lanza la petición de obtención del índice de absorción de una parcela concreta, con su referencia catastral indicada.
2. Se obtienen las coordenadas de la parcela en un *shapefile* a partir de la referencia catastral.
3. Se procesa el *shapefile* para envío a Google Earth Engine como geoJSON. En este servicio se lanza una tarea para:
 - a. Obtener la imagen satelital y escoger las capas de Copernicus para su proceso (Sentinel 1 y 2).
 - b. Obtener los índices de NDVI, NDWI, CI, VV y VH.
4. Los resultados se transforman en un dataset para envío al modelo resultante de la T2.4 para obtención de la biomasa de la parcela.
5. Se calcula el CO2 fijado en base a la biomasa y se almacena en la capa de persistencia.

1.6 Módulo de recomendaciones

Este módulo emplea los resultados del módulo de sensórica, el de emisiones y el de absorciones, con el fin de **ofrecer al usuario recomendaciones para mejorar los resultados** de sus explotaciones relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero. Los cálculos detallados a este respecto se documentan en el apartado correspondiente al PT4.

2. Servicios complementarios de validación de datos

Los servicios complementarios para validación de los datos introducidos manualmente se han visto ampliados para dar soporte a los nuevos módulos de proceso y **mantener la coherencia de los datos presentes en la plataforma**. Además de la validación de datos catastrales ya presente en la anualidad previa, mediante los *dags* de esta capa se **automatizan operaciones adicionales**, como la descarga de las coordenadas (SigPAC) de una parcela.

T3.3: Diseño de interfaces y capa de interoperabilidad

Esta tarea está destinada al diseño de la **tercera capa** de la plataforma, correspondiente a la interoperabilidad para la información contenida y a la integración de interfaces para proporcionar acceso y comunicación con la misma. En 2023 se realizaron las modificaciones necesarias para **concluir la implementación funcional** de esta capa a partir de los avances preliminares en cuanto a implementación en la anualidad previa, siguiendo el diseño definido durante la misma: plataforma LoRaWAN para la comunicación, y tecnologías ChirpStack y FastAPI.

En términos generales, sobre la prueba funcional realizada en 2022 se implementaron las interfaces y funcionalidades necesarias para **permitir la conectividad desde la plataforma web de interfaz de usuario (frontend)** desarrollada en el marco del PT5. Asimismo, esta capa también fue modificada para almacenar los datos relativos a emisiones calculados, de forma que se puedan consumir y visualizar. Por otro lado, los nuevos procesos y la generación de cálculos finales en la capa de procesamiento también implicó la necesidad de modificaciones en esta capa para permitir el **acceso a las nuevas bases de datos** que los almacenan (ChirpStack, InfluxDB, PostgreSQL).

Asimismo, se ha incorporado una **cobertura con el estándar W3C Web of Things** para facilitar el acceso a las bases de datos de series temporales, diseñando y desarrollando una “*Thing*” virtual que actúa a modo de “avatar” de la instancia de InfluxDB presente en esta arquitectura. La *Thing Influx* está desarrollada sobre de wot-py; la implementación de referencia de un runtime W3C WoT desarrollada y publicada por CTIC en Python. Este componente contribuirá a simplificar el desarrollo de futuras extensiones en la plataforma, especialmente para clientes web que permitan explorar y analizar los datos capturados en el contexto de SLOW. Además, las características de la W3C Web of Things reducen significativamente el coste de extensión para otras funcionalidades que puedan surgir en el futuro, fuera del alcance del proyecto.

Por último, se han finalizado los procesos de esta capa que permiten la **interoperabilidad con servicios externos**; fuentes de información externas pero necesarias para la implementación de la metodología. Estos son, de forma resumida:

- El **SigPAC**, con el que se realiza la integración a través de su utilidad de visor, para obtener las coordenadas geográficas que delimitan una parcela de territorio seleccionada mediante su referencia catastral.
- El servicio **Google Earth Engine**, para la adquisición y ejecución de tareas de procesamiento sobre imágenes satelitales aprovechando la infraestructura en la nube. Se generan así índices clave para el análisis de biomasa (usada en el módulo de absorciones), como el NDVI, NDWI, elevación y altura de la vegetación.
- La Sede Electrónica Dirección General del **Catastro**, que se emplea para validación de la información de las parcelas y la obtención de datos para relacionarlas correctamente con SigPAC. Esta integración se hace mediante *scripts* que emplean la biblioteca “pycatastro”.

PT4: Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones

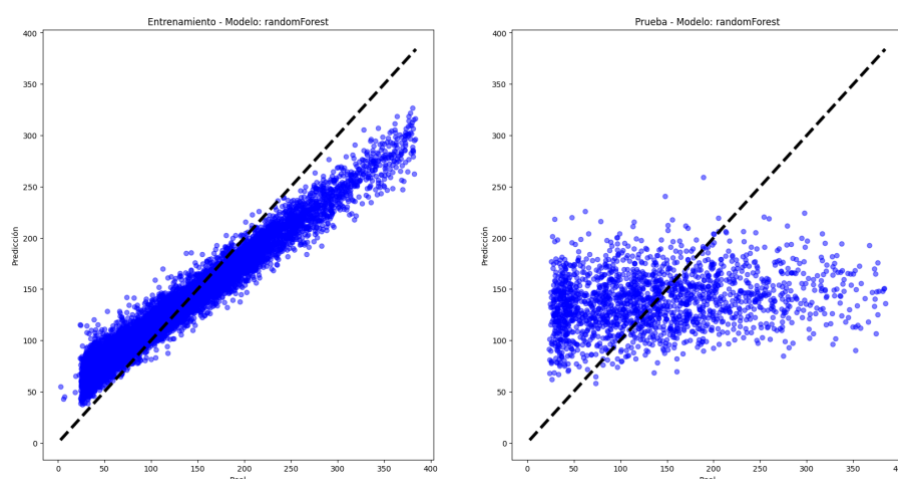
T4.3: Diseño y desarrollo del sistema de toma de decisiones

En 2023 se inicia esta tarea, que completa el PT4 junto con la homogeneización y preprocesado de los datos (T4.1) y la generación de variables relevantes para la estimación de las emisiones de GEI (T4.2) llevadas a cabo la anualidad previa. Estos procesos implican el tratamiento de los datos de las fuentes identificadas y previamente documentadas, según las metodologías propuestas para cada componente, como ya se ha recogido en anteriores apartados. Los resultados de cada uno de los componentes se deben combinar para conseguir una **estimación final de la “huella de carbono”** de la explotación; con el fin de generar unas **recomendaciones adecuadas de mejora**.

1. Modelo de estimación de biomasa

Usando las cinco variables generadas procedentes de las fuentes de datos satelitales (índices de vigor fotosintético, factores del terreno) más la estimación de biomasa GEDI, se plantea generar un **modelo de machine learning que permita inferir nuevos datos de biomasa** en zonas donde no exista huella GEDI o bien instantes de tiempo distintos; a partir de información que, por las fuentes de datos usadas, se mantiene actualizada periódicamente. Para ello se ha analizado una **selección de modelos de regresión**, como son *Linear Regression*, *Ridge Regression*, *Lasso Regression*, *ElasticNet Regression*, *Random Forest Regression* y *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)*.

Se ha empleado un conjunto de datos de prueba, dividido en subconjuntos de entrenamiento y de test en una proporción 80/20, para **entrenar estos modelos empleando la técnica de Grid Search** (diferentes combinaciones de hiperparámetros). Los resultados obtenidos generan distribuciones muy parecidas en todos los casos, exceptuando **Random Forest y XGBoost**, que generan resultados sensiblemente mejores.



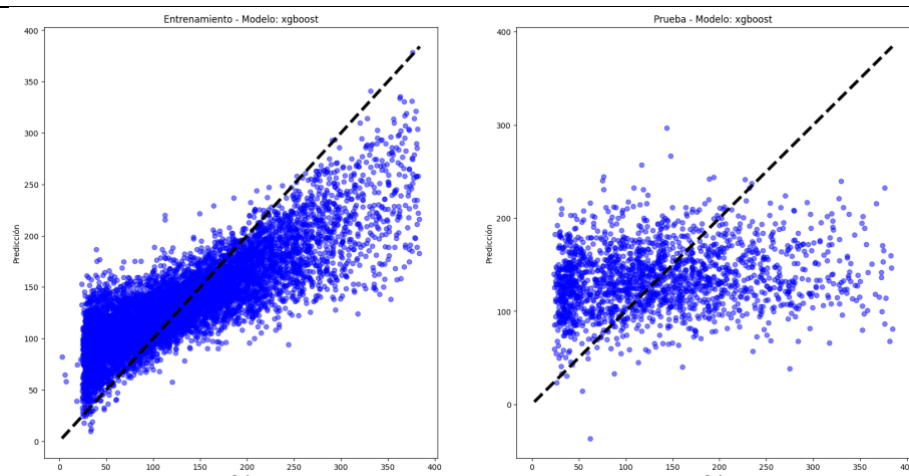


Figura. Resultados del modelo Random Forest (arriba) y XGBoost (abajo).

Analizando los resultados, se puede observar que ambos modelos generan rendimientos parecidos, si bien se detecta que *Random Forest* sobreajusta (o sobreentrena); es decir, que aprende características muy específicas de los datos de entrenamiento, lo cual es negativo para generar nuevas predicciones. Para llevar a cabo una **evaluación analítica se ha empleado la métrica R^2** o coeficiente de determinación, con la que se ha obtenido un valor aproximado de 0.3 en ambos casos (siendo los mejores en esta métrica respecto al resto de modelos analizados). Finalmente, **se opta por XGBoost como modelo de predicción de biomasa** por acusar el sobreajuste en menor medida que la alternativa *Random Forest*.

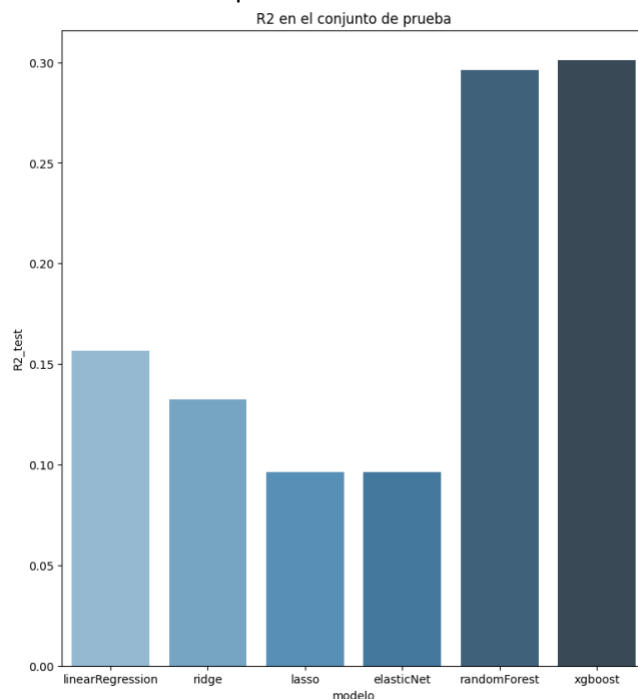


Figura. Valores de R^2 obtenidos para los diferentes modelos de regresión.

2. Diseño del sistema de estimación de la huella de carbono

El sistema planteado recopila la información relevante sobre emisiones y absorciones de GEI estimadas para una explotación agroganadera con el fin de elaborar un balance de emisiones que incluye la

estimación de su huella de carbono, así como el saldo neto de emisiones de metano y óxido nítrico. Por un lado, la información relativa a las emisiones asociadas a la actividad ganadera se recaba mediante **encuesta directa** al usuario (información declarativa). Los datos registrados permiten estimar las emisiones de los tres gases de interés producidas por distintas fuentes: el consumo de energía (combustible y electricidad), la gestión de los estiércoles y purines, el manejo y la alimentación animal y la producción de piensos, fertilizantes y residuos agrícolas.

Por otro lado, la información relativa a la **explotación forestal** —también recabada del formulario de encuesta— permite identificar la información catastral asociada a la finca relevante, así como la edad de la vegetación arbórea. Esta información alimenta el modelo de biomasa que **estima la biomasa por encima del suelo** empleando información satelital, a la que se agrega la porción correspondiente a las raíces según los coeficientes estándar en la literatura especializada y se convierte a unidades de CO₂ equivalente para obtener el total de absorciones forestales a lo largo de la vida del bosque. Por último, un **módulo logarítmico**, diseñado ad-hoc, de reparto de la biomasa a lo largo de la vida del bosque (a partir de la biomasa actual y su edad) permite **inferir el incremento de biomasa y de absorciones de CO₂ para cada año de vida** de la vegetación para obtener las **magnitudes anuales para el ejercicio en curso**, que se incorporan al cálculo del balance de emisiones netas anuales.

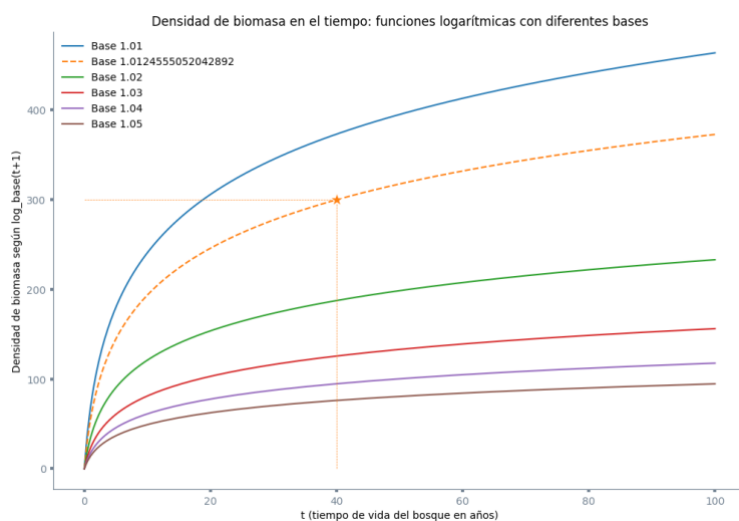


Figura. Evolución de la densidad de biomasa con distintos ritmos de crecimiento.

De esta forma se obtienen los resultados finales, recogiendo el **balance de emisiones y absorciones de GEI** detallando las distintas fuentes de emisión de CO₂, CH₄ y N₂O, así como las absorciones forestales de CO₂ estimadas para el año de interés.

	N2O	CH4	CO2
Fuente de emisión			
Consumo de energía: combustible y electricidad	NaN	NaN	1736.500000
Gestión de estiércol	0.000000	0.000238	NaN
Manejo/alimentación animal: fermentación entérica	NaN	30584.037731	NaN
Manejo/alimentación animal: nitrógeno excretado	2380.446926	NaN	NaN
Producción de piensos: fertilizantes y residuos agrícolas	0.026400	NaN	NaN
Total emisiones anuales	2380.473326	30584.037969	1736.500000
Absorciones forestales anuales	NaN	NaN	-92.066838
Balance anual de emisiones y absorciones	2380.473326	30584.037969	1644.433162

Figura. Ejemplo de resultados de balance de emisiones.

También se ofrece el resultado en forma de tabla resumen que recoge la **evolución temporal anual de la biomasa forestal** y sus absorciones de CO₂ asociadas a lo largo de un periodo que comprende los 10 años anteriores y los 10 posteriores al año de interés; habiendo estimado la velocidad de desarrollo de la biomasa de acuerdo con el modelo de crecimiento logarítmico previamente mencionado.

	Total_biomasa (t)	Incremento_anual_biomasa (t)	CO2_fijado_acumulado (t)	Incremento_anual_CO2_fijado (t)
Años de vida del bosque				
1	372.893626	372.893626	669.559846	669.559846
2	591.022414	218.128788	1061.227248	391.667402
3	745.787252	154.764838	1339.119693	277.892444
4	865.832186	120.044935	1554.669818	215.550126
5	963.916040	98.083853	1730.787095	176.117276
6	1046.844756	82.928716	1879.692130	148.905035
7	1118.680878	71.836122	2008.679539	128.987409
8	1182.044828	63.363950	2122.454497	113.774958
9	1238.725812	56.680985	2224.229665	101.775168
10	1290.000000	51.274188	2316.296503	92.066838
11	1336.809666	46.809666	2400.346941	84.050438
12	1379.870384	43.060718	2477.665849	77.318908
13	1419.738382	39.867998	2549.251976	71.586128
14	1456.854600	37.116218	2615.897067	66.645090
15	1491.574504	34.719903	2678.239385	62.342318
16	1524.188840	32.614336	2736.800992	58.561607
17	1554.938454	30.749614	2792.014343	55.213351
18	1584.025093	29.086640	2844.241693	52.227350
19	1611.619438	27.594345	2893.789511	49.547818
20	1637.867170	26.247732	2940.919379	47.129868

Figura. Ejemplo de resultado de evolución temporal de biomasa y absorciones forestales.

3. Diseño del sistema de recomendaciones

Se ha diseñado un sistema automatizado de recomendaciones que elabora un conjunto de **sugerencias personalizadas para el usuario** de acuerdo con las características concretas de su balance de emisiones y absorciones. Para ello calcula un conjunto de ratios de emisiones para cada gas y cada fuente de emisión que se comparan con los valores máximos recomendados en cada caso: cuando estos superan la cota superior establecida como aconsejable se emite un conjunto de recomendaciones específicas para reducir las emisiones que superan el umbral. Estas recomendaciones se acompañan de una explicación del motivo por el que se ofrecen y de otro conjunto de recomendaciones generales que se ofrecen a todos los usuarios.

El módulo de recomendaciones está formado por **dos componentes**, creados en formato de *script* de Python:

- Un **módulo auxiliar**, que contiene los **textos** literales de las recomendaciones destinadas a reducir las emisiones de distintos gases producidas por distintas fuentes cuando una o varias de estas emisiones supera los umbrales recomendados en cada caso. Estos textos se estructuran y ordenan en un diccionario que se importa desde el módulo de recomendaciones propiamente dicho, donde se elaboran las recomendaciones personalizadas para el usuario y se justifica su pertinencia.
- Un **módulo de recomendaciones** propiamente dicho, con las siguientes funciones:
 - Realiza los cálculos oportunos para obtener todos los **ratios de emisiones** a partir de los cuales se determina qué recomendaciones son pertinentes en cada caso. La información necesaria para estos cálculos se obtiene de los resultados de “balance de emisiones y absorciones de GEI” ya mencionado.
 - Registra los **umbrales** de ratios de emisiones —de cada gas y para cada fuente de emisión— por encima de los cuales deben ofrecerse una o varias recomendaciones para cada uno de los ratios calculados. El diseño de este elemento como diccionario permite asociar los ratios con sus correspondientes umbrales críticos y el conjunto de recomendaciones asociadas en cada caso.
 - Compara los ratios calculados para el usuario con los umbrales críticos, **identifica las recomendaciones pertinentes y las ordena** junto con una explicación genérica sobre el origen de las mismas y una justificación personalizada del motivo por el que han sido seleccionadas para el caso concreto, así como otros dos últimos grupos de recomendaciones que se ofrecen a todos los usuarios como referencia de buenas prácticas agroganaderas.

La documentación en detalle de esta tarea y la conclusión del PT4 se recogen en el informe **E4.1 Diseño del sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones**, y se materializa en la tecnología entregada como **E4.2 Sistema de estimación de emisiones y apoyo a la toma de decisiones**; ambos adjuntos al expediente de justificación.

PT5: Herramientas de visualización avanzada

T5.3: Interoperabilidad con Plataforma e integración de resultados

Se finaliza en 2023 esta tarea, activa desde la anualidad anterior, que plantea el diseño e implementación de los sistemas de **comunicación de la aplicación web de visualización** con los datos procesados y los resultados ofrecidos por la **plataforma central**, resultado del trabajo realizado en el PT3. En 2022 se había logrado generar una primera prueba de concepto para verificar que era posible recibir datos de la plataforma en la interfaz web de usuario, generando gráficos tridimensionales con los datos recogidos por la red sensórica en un despliegue preliminar. En la presente anualidad, los esfuerzos fundamentales se han volcado en la **integración total de interoperabilidad con la plataforma**, de manera que para el usuario final sea sencillo introducir datos y obtener e interpretar resultados a través de la interfaz propuesta.

1. Portal web de gestión de explotaciones

Se ha diseñado y desplegado una **plataforma web SLOW** dedicada a la gestión de explotaciones ganaderas en cuanto a la introducción de datos necesarios y la presentación de resultados obtenidos a través de la metodología; la cual incorpora la visualización de los entornos virtuales inmersivos interactivos desarrollada en anualidades anteriores. Esta herramienta proporciona una interfaz sencilla e intuitiva

destinada a los usuarios finales, donde estos podrán introducir toda la información requerida sobre sus explotaciones ganaderas para realizar los cálculos y estimaciones previamente mencionados.

Para mayor comodidad en la operativa, se ha generado un sistema de **gestión de usuarios**, de forma que cada uno pueda acceder a su panel personal de gestión y monitorización de explotaciones, pudiendo manejar cada una de ellas de forma independiente.

Al crear o seleccionar una de las explotaciones, se accede a una interfaz que permite administrar la **información declarativa aportada por el gestor** a través de distintos formularios autocontenidos. Estos formularios recogen datos sobre características de la explotación, las parcelas e infraestructuras asociadas a la misma, la producción animal, las producciones derivadas, la gestión sobre las producciones de estiércol y purines y los consumos generales. Es, precisamente, a partir de la cumplimentación de la información de las parcelas asociadas, cuando es posible **acceder a la visualización inmersiva del terreno** ya documentada en la anualidad 2022.

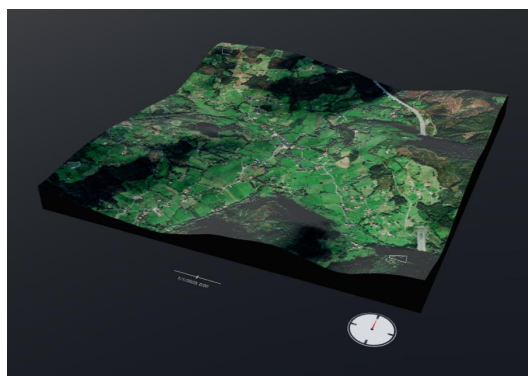


Figura. Visualización inmersiva del terreno a través de su elevación en 3D.

Asimismo, el portal ofrece la opción de “analizar”, permitiendo al usuario **lanzar todos los cálculos asociados a la metodología SLOW** a través de los componentes previamente documentados, gracias a la **integración centralizada en la plataforma de interoperabilidad** del PT3. Una vez finalizado el análisis, en la misma página se presentarán los **resultados finales**, mostrando el **balance** de emisiones de GEI calculado y las **recomendaciones** sugeridas.

2. Mejoras sobre la visualización inmersiva del terreno

Cabe destacar que a la visualización inmersiva previamente mencionada durante 2023 se le han incorporado **mejoras y ajustes destinados a favorecer la usabilidad**, abordando desde aspectos estéticos hasta funcionales, como la integración de los resultados del balance en esta vista, el selector que permite iterar sobre los datos a mostrar en las gráficas, o la línea de tiempo con la que se maneja tal parámetro para observar la evolución temporal en las mismas.

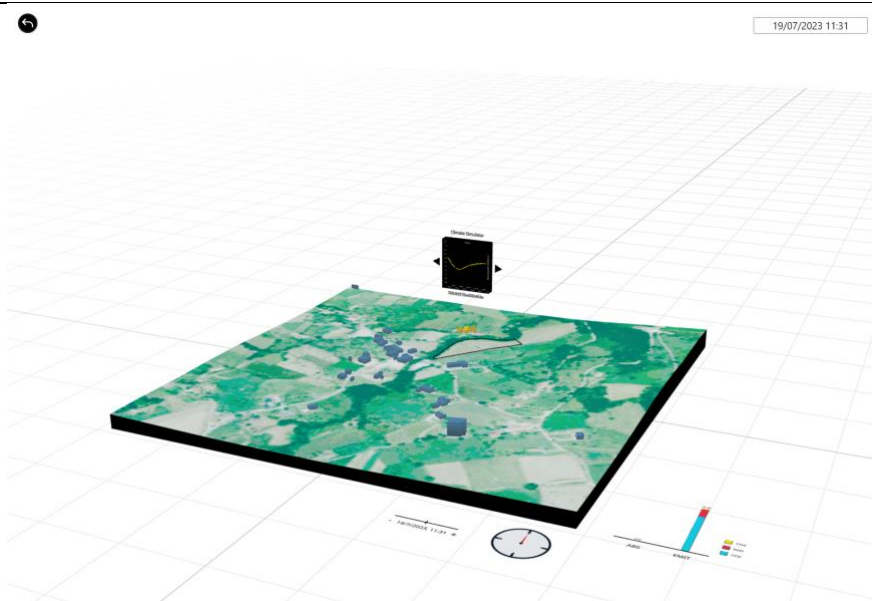


Figura. Visualización inmersiva del terreno tras las mejoras incorporadas.

T5.4: Integración bajo estándares W3C

En 2023 se aborda esta tarea al completo, orientada a la incorporación de **compatibilidad con el estándar WebXR para el entorno inmersivo**, concluyendo así el PT5. El resultado final del mismo, correspondiente a la plataforma web SLOW integral (interfaz tradicional para gestión de datos más entorno inmersivo para visualización del terreno).

Para ello se han incorporado los sistemas de manejo y visualización específicos para el **consumo de la experiencia en realidad virtual**. Además, se han adaptado los sistemas existentes para asegurar un acceso eficiente a los datos en este modo de presentación, ofreciendo una experiencia fluida, directa y con las mismas funcionalidades que ofrece la navegación en dispositivos de escritorio convencionales. El uso de este estándar del W3C **garantiza la funcionalidad consistente de la aplicación en una variedad de navegadores**, incluidos Google Chrome, Edge, Opera, Safari y Firefox. Esta conformidad es esencial para facilitar el acceso de los usuarios desde **diversos dispositivos y navegadores**, fortaleciendo así la aceptación del sistema. En lo que respecta a la presentación en realidad virtual, 3 de esos 5 navegadores actualmente ofrecen soporte (Google Chrome, Edge y Firefox), los cuales aglutinan un muy alto porcentaje de la cuota de usuarios de navegadores web. Además, la integración de WebXR en esta visualización permite detectar las capacidades de presentación inmersiva en función del dispositivo con el que acceda cada usuario, garantizando **compatibilidad transparente con la mayoría de equipos de realidad virtual** del mercado; habiéndose comprobado su funcionamiento con los modelos **HTC Vive Pro y Meta Quest 2**.

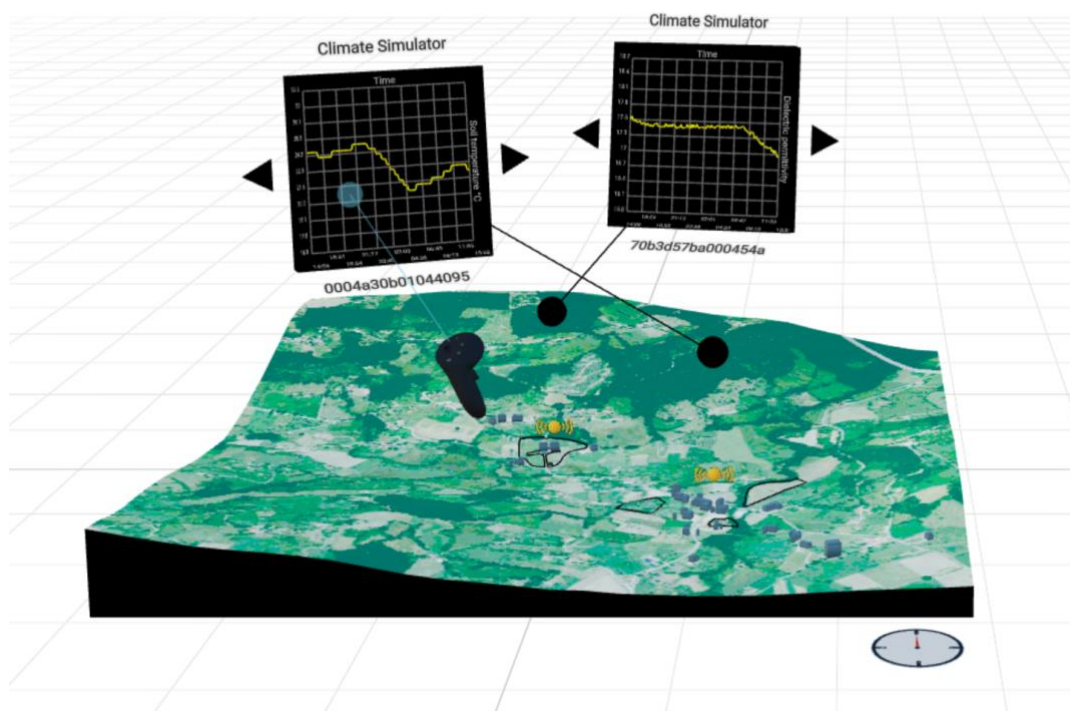


Figura. Visualización e interacción avanzada en formato de realidad virtual gracias a WebXR.

Bloque 3: Validación y transferencia

Este bloque se corresponde con el sexto y último paquete de trabajo (PT6), enfocado a la *Demostración y transferencia de resultados*, relacionado parcialmente con el objetivo específico OE1 de SLOW, de “definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de gases de efecto invernadero”, así como directamente con el OE6 de “demostración y evidencia de la metodología diseñada”. Se pretende, pues, abordar las actividades dedicadas a la presentación de los resultados obtenidos como un despliegue piloto con integración de las herramientas tecnológicas desarrolladas en el Bloque 2. Se busca implantar la metodología SLOW en un caso de uso concreto y verificar su aceptación con usuarios finales; con los cuales se plantearán acciones de formación y transferencia con el fin de adecuar la usabilidad de la solución integral.

Este bloque, abordado íntegramente a lo largo de la presente anualidad, se organiza en cuatro tareas que engloban de forma completa el proceso de identificación de un escenario óptimo para desplegar un piloto que permita realizar esta transferencia y validación con usuarios finales, pudiendo así comprobar el valor aportado por la metodología y las herramientas tecnológicas propuestas en SLOW.

PT6: Demostración y transferencia de resultados

- T6.1: Definición de casos de uso piloto
- T6.2: Despliegue del sistema piloto
- T6.3: Validación con usuarios finales
- T6.4: Actividades de formación y transferencia

A continuación, se sintetizan las acciones desarrolladas en el marco de estas tareas, que se materializan en tres informes que documentan en detalle la definición de los casos de uso piloto (E6.1), el planteamiento del plan de formación y transferencia de los resultados (E6.2), y la validación con usuarios finales (E6.3).

PT6: Demostración y transferencia de resultados

T6.1: Definición de casos de uso piloto

Con esta tarea se pretende seleccionar un caso de uso de aplicación de la metodología SLOW en el que implicar a usuarios finales para abordar su validación y evaluar la probabilidad de aceptación y uso a futuro.

Respondiendo a los requisitos técnicos derivados de las herramientas tecnológicas, se concentró el **área de análisis en el concejo de Tineo** por ser un área de interés en cuanto al impacto sociodemográfico potencial, la presencia de zonas forestales que generarán compensaciones por absorción, y por la abundancia de explotaciones ganaderas de producción de leche en ese territorio.

1. Análisis de escenarios potenciales para el caso de uso piloto

En cuanto a la evaluación de alternativas en la región definida, se pueden establecer unos **criterios considerando tanto los aspectos técnicos como los relacionados con el factor humano** para seleccionar el escenario más adecuado.

En cuanto a los **requisitos técnicos**, se busca una explotación intensiva de leche que cuente con terrenos o fincas asociadas a la misma, los cuales presenten una tipología favorable a la actuación como sumidero de CO₂ (preferiblemente, masas arbóreas caducifolias o especies perennifolias como pinos y eucaliptos). De cara a la información declarativa a recabar, el gestor de la explotación debe llevar un cierto control y monitorización de su actividad y producción. Y en relación con el cálculo a partir de los sensores, se dará preferencia a explotaciones estabuladas en naves completa o parcialmente cerradas, en las que exista disponibilidad de conexión a la red eléctrica para alimentar los dispositivos y cobertura móvil para poder efectuar la comunicación con la plataforma central. Asimismo, será absolutamente necesaria la predisposición por parte del gestor de la explotación para su conformidad con la instalación de los sensores en su propiedad.

A nivel de **perfil sociodemográfico**, en cuanto a requisitos deseables en el plano social y laboral, se busca que los gestores de la explotación a seleccionar tengan buena predisposición a colaborar, una actitud positiva tanto hacia las nuevas tecnologías como hacia el progreso de la ganadería mediante la digitalización, y un buen manejo de las plataformas digitales.

Bajo estas condiciones, el personal de CTIC involucrado en el proyecto ha **visitado presencialmente 3 explotaciones candidatas**, aptas según los criterios definidos, cuyos gestores han manifestado un grado de conformidad de participación a priori. Esta visita inicial se plantea con un doble objetivo: en primer lugar, **evaluar la idoneidad de cada explotación** para la implementación del piloto, y en segundo lugar, realizar un **acercamiento inicial hacia los usuarios finales de la metodología**, dando difusión al proyecto y sus objetivos, recogiendo el *feedback* generado al respecto, y confirmando la disposición a la participación en el mismo de manera informada.

2. Caracterización de la explotación seleccionada

De entre las explotaciones analizadas, la explotación familiar de Jorge García en Cueva, Casa Eladio y **Ganadería Pinón**, se selecciona esta última situada en Villafronte por ser la que cuenta con una **base territorial** asociada extensa, que además incorpora parcelas con usos de suelo variados según la declaración SigPAC (forestal, tierra arable, pasto con arbolado, etc.).

Además, el sistema de manejo que implementan se basa en la producción intensiva de leche con todos los **animales estabulados** en una nave totalmente cerrada (si bien posteriormente realizarían reformas para aumentar su ventilación), lo cual facilita la medición de presencia de GEI empleando los módulos sensores propuestos. Si bien el sistema de gestión de purines y estiércol es el mismo en las tres explotaciones estudiadas, la seleccionada reaprovecha los residuos producidos en diferentes subactividades, lo que ofrece más posibilidades a la hora de programar medidas o recomendaciones. Por último, los gestores de la explotación presentan una formación bastante elevada del sector en el que trabajan, dada su participación en empresas de asesoramiento técnico relacionadas con el mismo; por lo que presentarán una **mayor capacidad para aportar la información declarativa** necesaria para estimar las emisiones de su actividad económica.

T6.2: Despliegue del sistema piloto

El objetivo de esta tarea es desplegar todos los componentes técnicos en la explotación seleccionada para el despliegue piloto y configurar las herramientas tecnológicas de forma que se pueda implementar en ella la metodología SLOW. El fin último es poder realizar el cálculo del balance según el sistema propuesto para tal escenario en concreto, procediendo posteriormente a su validación con los usuarios finales involucrados.

Se ha realizado, en este contexto, una **segunda visita presencial** ya disponiendo de los módulos encapsulados con sensórica de medición de GEI resultado del PT2, así como de una versión preliminar tanto de la plataforma como del portal web de interfaz de usuario. En esta visita la aproximación también fue múltiple; pues por un lado se procedió al **despliegue de la red sensórica** en la nave que acoge al ganado, mientras que una **entrevista con el gestor** de la explotación permitió comenzar la definición de su perfil de usuario para la validación; así como el inicio de la formación y la transferencia a través de una **sesión demostradora** de las herramientas SLOW, sobre la que se pudo obtener un valioso *feedback* que realimentó la comprensibilidad y usabilidad para una versión final.

Una vez desplegada la red sensórica mediante instalación de los dos módulos de medición (interior y exterior de la nave) y el *gateway* de comunicación LoRa, se comprobó el correcto funcionamiento, **verificando que la información se recibía correctamente en tiempo real en la plataforma LoRaWAN** en las instalaciones de CTIC.

Se destaca que en esta segunda visita se detectan las **reformas efectuadas sobre la nave**, modificando las condiciones óptimas para generar un entorno controlado que inicialmente se habían establecido como criterio clave para la selección del caso de uso piloto. Se pasó de tener un sistema de cerramiento lateral con paredes hasta la cubierta con pequeñas ventanas a un sistema con paredes laterales a media altura para **favorecer la ventilación** frente a las olas de calor sufridas en ese periodo. Esto **dificulta el análisis de datos a generar a partir de la sensórica instalada**, ya que el ratio de ventilación es mucho más elevado y las concentraciones de gases serían menores, incurriendo en una limitación ya anticipada que se pretendía mitigar con un escenario de interior (o bien lo más cerrado posible).

T6.3: Validación con usuarios finales

Con esta tarea se pretende ejecutar y evaluar los resultados de sesiones demostradoras con usuarios finales empleando las herramientas tecnológicas generadas para el caso piloto; recogiendo *feedback* en base a unos tests de aceptación para el reajuste de la metodología y herramientas SLOW, de forma que se adapte a las necesidades y posibilidades reales.

1. Definición del usuario piloto

En este caso, el usuario final que formará parte de la experimentación se corresponde con el **gestor de la explotación**. En primer lugar, se llevó a cabo una **caracterización del usuario** objetivo empleando un método sistemático denominado “*user personas*”. Se trata de un perfil de usuario prototípico en el que se recogen sus necesidades, objetivos, preferencias, preocupaciones y habilidades de un modo holístico, pero focalizado en aquellas relevantes para empatizar con el usuario final, diseñar y adaptar el producto en cuestión. Es una herramienta que se utiliza antes de que el usuario utilice el producto, por lo que se recogió la información necesaria en formato de **entrevista semiestructurada** en la segunda visita, previa a la demostración del estado de las herramientas tecnológicas.

2. Definición de instrumentos para la evaluación de la experiencia de usuario

Se plantea realizar un “**customer journey map**” o mapa del recorrido del cliente; una herramienta visual que ilustra la experiencia de un usuario desde su primera interacción con una marca o producto hasta la culminación de su objetivo. Utilizado ampliamente en márketing, este mapa proporciona una visión detallada de cada punto de contacto del cliente o usuario, ayudando a las organizaciones a entender y mejorar su experiencia, y a identificar oportunidades para optimizar los procesos de negocio, si bien es una herramienta altamente flexible a los objetivos y tipología del producto en cuestión.

En el caso de SLOW, permite **evaluar la experiencia de la interacción con las herramientas tecnológicas propuestas**, que son el punto de contacto con la metodología. Se utiliza antes, durante y después de la interacción con estas, ayudando a identificar problemas potenciales, mejorar la satisfacción del usuario y maximizar la adopción de la tecnología, asegurando que los productos satisfagan las necesidades y expectativas reales de los usuarios y maximizando su probabilidad de uso posterior.

Se considera una herramienta idónea para evaluar las emociones y experiencias del usuario con la solución en cada una de las interacciones que hace con esta. La visualización típica es una página donde en el eje horizontal se colocan de 4 a 7 fases de interacción (antes, durante y después de la interacción). En el eje vertical se identifica lo que le ocurre al usuario en cada fase a nivel de emociones despertadas, acciones y problemas que pueden surgir o surgen en cada una de las fases y que pueden generar una experiencia negativa en la persona (denominados “puntos de dolor”). Además, en este eje también se identifican los procesos internos que ejecuta o planifica el equipo para prevenir o solucionar esos puntos de dolor, optimizando así la interacción del usuario con el producto en cada fase.

Se diseñó un customer journey map preventivo: una aplicación de estos mapas radica en realizarlos con miembros representativos del equipo que trabaja en cada una de las fases de interacción del usuario con las herramientas, realizando una lluvia de ideas de los puntos de dolor posibles a ocurrir, y establecer medidas preventivas de los mismos. Dicho mapa se ha compuesto de una tabla con 6 columnas, que representan las fases de interacción del usuario seleccionado, y 5 filas, que representan las acciones, puntos de dolor, y soluciones previstas a los mismos. Como ejemplo, se pueden anticipar puntos de dolor en la fase de “visita de instalación de sensores de GEI en la explotación”, como la generación de daños imprevistos en la infraestructura o la generación de un consumo adicional de electricidad. Sobre ellos se

proponen soluciones preventivas, como un plan de mitigación de posibles daños a la construcción, la previsión de hacer la instalación en materiales resistentes (ej. evitando azulejos) o lugares que no requieran taladrar, así como seleccionar componentes que generen un mínimo consumo eléctrico.

Adicionalmente, se plantea formular un **test de aceptación de nuevas tecnologías** para evaluar la utilidad percibida, usabilidad, aceptabilidad, e intención de uso desde la perspectiva del usuario final. Estos se aplican después de que el usuario haya tenido la experiencia piloto con la tecnología.

3. Análisis de resultados

Se han llevado a cabo **dos entrevistas**, efectuadas de forma complementaria a las **dos sesiones demostradoras** y de transferencia con el usuario piloto. Estas se corresponden con el hito de la segunda visita, durante la instalación de los dispositivos de medición; y la tercera visita, en la que se efectuó su retirada. Gracias al trabajo con el agente involucrado y su cooperación a través de los instrumentos propuestos, fue posible extraer conclusiones valiosas respecto a los resultados obtenidos en SLOW.

El **resumen del perfil** se sintetiza en un usuario especialmente positivo hacia la metodología presentado y las nuevas tecnologías, por los siguientes motivos:

- Perfil de ganadero joven, tomando el relevo generacional de la familia.
- Abierto al uso de tecnologías, pues su explotación es moderna y ya cuenta con la integración de programas informáticos para su gestión.
- Parcela de tamaño medio y de base territorial, con arboleda, lo que asegura la posibilidad de estar realizando absorciones de gases de efecto invernadero.
- Perfil educativo alto y con presencia de buen apoyo familiar para la gestión de la explotación.
- Involucrado en las cooperativas de ganaderos. Es miembro del consejo de administración de Aseagro, la consultoría ganadera principal asturiana.

En cuanto a **necesidades** que puede cubrir el método SLOW, manifiesta que los ganaderos se sienten en general demasiado controlados por las normativas legales actuales y demasiado **señalados como agentes contaminantes**, especialmente los del sector vacuno. Opina que este método puede ayudarles si permite **confirmar objetivamente su compensación** de GEI, que puede ser muy diferente tanto por el tipo de animal, como por el tipo de terreno, como por el tipo de explotación (intensiva o extensiva). Por otro lado, las **preocupaciones** detectadas se orientan hacia el temor de que los registros objetivos de emisiones y compensaciones por absorción puedan **suponer una forma de control**, en un momento profesional en el que el sector se siente especialmente minusvalorado por la opinión pública y expuestos como responsables de una parte del cambio climático.

Por último, realizar el **customer journey map preventivo** permitió mitigar los **puntos de dolor fundamentales** antes de realizar la validación final con el usuario. Gracias a esto, la experiencia general del usuario con la plataforma web fue referida por el mismo como muy positiva, viendo la interfaz como clara y completa en la sesión demostradora final. En este sentido, sólo hizo comentarios de mejoras menores de la interfaz (como la posibilidad de simplificar la selección de parcelas o la reformulación de algún campo de la información declarativa a recabar). Asimismo, tras la cumplimentación del **test de aceptación de nuevas tecnologías**, en general, se puede extraer que el usuario piloto tiene una **visión muy positiva** de la herramienta en los tres constructos medidos: utilidad, facilidad de uso e intención de uso. Las herramientas demostradas se perciben como eficientes, útiles, y que ayudan a aumentar su conocimiento sobre su huella de carbono, emisiones y compensaciones de la explotación.

En conclusión, el método SLOW presenta un **potencial significativo para ayudar a los ganaderos a gestionar y validar sus emisiones de gases de efecto invernadero**, pero su éxito dependerá de una implementación que considere las preocupaciones y necesidades específicas de los usuarios finales.

T6.4: Actividades de formación y transferencia

Esta tarea es paralela a la anterior, y se enfoca en las acciones de preparación de recursos, planificación y ejecución de las actividades demostradoras, formativas y de transferencia de los resultados SLOW previamente mencionadas.

Se ha elaborado un **plan formativo** que recoge las instrucciones necesarias para abordar la metodología propuesta paso a paso (incluyendo tanto contenido teórico relativo al contexto de la necesidad y el marco normativo como contenido práctico de uso de la plataforma); así como **las guías de uso de las herramientas tecnológicas** proporcionadas a los usuarios finales. Estos han sido validados con el usuario piloto en la sesión de formación y demostración final (tercera visita), en la que este gestor ha accedido a los resultados finales del proyecto a través de la plataforma web creada para tal fin; si bien posteriormente se incorporaría a la misma el *feedback* recibido.

Los materiales generados para la transferencia al usuario final suponen valiosos recursos explotables a posteriori para plantear acciones de difusión y visibilización de los resultados del proyecto. Con este mismo fin también se ha elaborado un **tríptico** sobre SLOW que resume la metodología propuesta y las tecnologías desarrolladas.

2. RESULTADOS CONSEGUIDOS

JUSTIFICACIÓN 2021

Durante el periodo de la primera anualidad de ejecución cubierto por este informe se han conseguido todos los resultados planificados, tal como se habían planteado en la memoria inicial sin incurrir en desviaciones. Dichos resultados se relacionan con avances para alcanzar los cuatro primeros objetivos específicos, como se muestra a continuación.

OE1 – Definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de gases de efecto invernadero.

Como ya se ha indicado anteriormente, se han realizado avances hacia la consecución de este objetivo al establecer una primera iteración de las bases generales de la metodología de estimación de GEI, incluyendo la definición de factores relevantes, sistemas y métodos de medición, y el cálculo del resultado final.

OE2 – Detección y evaluación de fuentes de datos disponibles.

Se han realizado avances hacia la consecución de este objetivo basado en la investigación de fuentes de datos, al haber analizado múltiples sensores y placas de desarrollo para medición de indicadores de GEI en el terreno, así como 3 servicios distintos de fuentes de datos basadas en imágenes por satélite para los cuales, además, se han estudiado los algoritmos de procesamiento que se necesitan aplicar para extracción de datos de utilidad en el dominio de los GEI.

OE4 – Exploración de técnicas para la integración y el procesamiento avanzado de datos.

Se han realizado avances hacia la consecución de este objetivo al presentar progresos en el diseño de la plataforma que permitirá procesar y unificar las múltiples fuentes de datos analizadas y recogidas relevantes para el estudio de los GEI, que posteriormente integrará un sistema inteligente de toma de decisiones basado en la metodología propuesta. Para esta plataforma se ha planteado, como ya se ha indicado, la arquitectura de las capas de almacenamiento y procesamiento escalable.

JUSTIFICACIÓN 2022

Durante el periodo de la segunda anualidad de ejecución cubierto por este informe se han conseguido todos los resultados planificados, tal como se habían planteado en la memoria inicial sin incurrir en desviaciones. Dichos resultados se relacionan con **avances para alcanzar los cinco primeros objetivos específicos**, entre los que destaca el cumplimiento del OE2 dedicado al estudio de fuentes de datos disponibles para la recolección de métricas de interés sobre GEI, así como la consecución preliminar del OE3 para el diseño de un protocolo de captación de datos heterogéneos; como se muestra a continuación.

OE1 – Definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de gases de efecto invernadero.

Como ya se ha indicado anteriormente, se han realizado avances hacia la consecución de este objetivo al establecer una segunda iteración de las bases generales de la metodología de estimación de GEI, incluyendo la definición de factores relevantes, sistemas y métodos de medición, y el cálculo del resultado final. Durante esta anualidad, la experimentación con fuentes de información inicialmente consideradas ha derivado en replanteamientos metodológicos para garantizar la viabilidad de la propuesta.

OE2 – Detección y evaluación de fuentes de datos disponibles.

Durante esta anualidad se ha completado la investigación en fuentes de datos, enfocada tanto en el análisis del hardware para sensorica como en el estudio de bancos de imágenes satelitales públicas. Partiendo de esta información y de las conclusiones extraídas de una experimentación preliminar, se generaron las especificaciones concretas de módulos sensores para medición de concentración de GEI, y se pudieron identificar las fuentes de imágenes satelitales y cómo se emplearán finalmente para articular las reconsideraciones metodológicas planteadas (fundamentadas en el cálculo de la biomasa vegetal como indicador de la absorción de carbono).

OE3 – Diseño de protocolo para la captación de datos heterogéneos.

La conclusión de las tareas de diseño de todas las capas de la plataforma central de información y los avances relacionados con las fuentes heterogéneas de datos (el despliegue de prototipos funcionales de sensores de GEI y el procesamiento de imágenes satélite para extracción de variables de interés), junto con el planteamiento de las bases de interoperabilidad propuestas para estos.

OE4 – Exploración de técnicas para la integración y el procesamiento avanzado de datos.

Se han realizado avances hacia la consecución de este objetivo al presentar progresos en el diseño y despliegue de la plataforma que permitirá procesar y unificar las múltiples fuentes de datos analizadas y recogidas relevantes para el estudio de los GEI, que posteriormente integrará un sistema inteligente de toma de decisiones basado en la metodología propuesta. Completado el diseño de esta plataforma, se ha generado la capa funcional de procesamiento escalable en la que se han integrado distintos servicios de preprocesamiento y homogeneización de los datos.

OE5 – Diseño e implementación de un entorno virtual inmersivo para la visualización avanzada de información

Se han realizado avances hacia la consecución de este objetivo al haber diseñado y creado las interfaces interactivas de visualización y los métodos de presentación de datos a través de un entorno inmersivo. Asimismo, se ha podido validar mediante una prueba de concepto la comunicación con la plataforma de interoperabilidad para recibir y representar los datos alojados en ella, si bien las tareas asociadas a estas actividades permanecen en progreso y se deberá realizar una nueva iteración cuando se concluya la implementación funcional de las interfaces.

Así, **se cumple la planificación planteada hasta el momento para alcanzar cada uno de estos objetivos**, habiendo completado el segundo de ellos y satisfaciendo los restantes de forma parcial hasta el momento, alcanzando las metas de avance establecidas hacia su completa consecución. Cabe destacar que los resultados que ya se están obteniendo con SLOW y la investigación asociada están contribuyendo a incrementar de forma significativa el expertise interno en torno a la cuestión medioambiental y el dominio de la agroganadería, especialmente en el contexto regional, complementando otros proyectos de investigación recientes en los que CTIC ha tomado parte activa, materializados mediante la Misión Reducción de emisiones y gases de efecto invernadero del Programa Misiones Científicas del Principado de Asturias: Proyecto Agroalimentación 0 Emisiones, confirmando el compromiso de CTIC con el reto global de la reducción de emisiones y el combate contra el cambio climático.

A nivel interno, SLOW está alineado totalmente con la Estrategia del Centro, tanto a nivel tecnológico como a nivel de contribución a su Misión y Visión en cuanto a localización, generación de valor en empresas y sociedad, y desarrollo de actividad en el estado de la técnica; particularmente enfatizando la vocación de CTIC al servicio del territorio y su foco sobre los territorios inteligentes, con especial presencia del medio rural.

Con todo ello, SLOW es uno de los proyectos estratégicos que CTIC Centro Tecnológico ha lanzado en el año 2021, con extensión hasta 2023, para vertebrar el I+D asociado al despliegue de su *roadmap* tecnológico.

JUSTIFICACIÓN 2023

Durante el periodo de la tercera anualidad de ejecución cubierto por este informe se han conseguido todos los resultados planificados, tal como se habían planteado en la memoria inicial sin incurrir en desviaciones. Dichos resultados se relacionan con **la consecución de los seis objetivos específicos** planteados, entre los que destaca la **finalización del OE1** dedicado a la definición de la metodología SLOW a lo largo de todo el proyecto, así como la **acometida integral del OE6** dedicado a la demostración y validación de la metodología diseñada. Asimismo, los objetivos relacionados con la integración y procesamiento avanzado de los datos (**OE4**), y el diseño de un entorno de visualización de resultados que

explote las potencialidades de las tecnologías inmersivas (**OE5**) también se han **completado satisfactoriamente**; como se muestra a continuación. El OE2 dedicado al estudio de fuentes de datos disponibles para la recolección de métricas de interés sobre GEI; así como el OE3 para el diseño de un protocolo de captación de datos heterogéneos, se consideraban concluidos en la anualidad previa, 2022.

OE1 – Definición y validación de una metodología estandarizada para la estimación (emisión y absorción) de gases de efecto invernadero.

Como ya se ha indicado, se han concluido los avances hacia la consecución de este objetivo al establecer una tercera iteración que supone las bases finales de la metodología SLOW de estimación de GEI, incluyendo la definición de factores relevantes, sistemas y métodos de medición, y el cálculo del resultado final. Durante esta anualidad el trabajo más reseñable se ha enfocado en la definición del conjunto de recomendaciones para la toma de decisiones en base a los resultados obtenidos del balance de emisiones y absorciones de GEI, así como la validación final de los resultados con el usuario piloto.

OE4 – Exploración de técnicas para la integración y el procesamiento avanzado de datos.

Concluyendo los avances iniciados en la anualidad previa, en 2023 se ha completado la versión final de la plataforma que permite procesar y unificar las múltiples fuentes de datos consideradas en la metodología para el estudio del balance de GEI. Se ha desarrollado el sistema que genera la estimación del balance, cruzando la información calculada de emisiones y absorciones, y se ha integrado en la plataforma; generando la implementación funcional final de la capa de procesamiento, en la que se integra también el algoritmo de apoyo a la toma de decisiones mediante recomendaciones particularizadas.

OE5 – Diseño e implementación de un entorno virtual inmersivo para la visualización avanzada de información

Los avances generados en la anualidad previa, consistentes en el diseño y creación de las interfaces interactivas de visualización y los métodos de presentación de datos a través de un entorno inmersivo, se ven completados en 2023 al finalizar los trabajos relacionados con la integración de resultados de la plataforma central y la implementación de compatibilidad con el estándar W3C WebXR. La incorporación de un nuevo formato de presentación de la visualización 3D interactiva en web a través de realidad virtual se vuelve compatible con múltiples navegadores y distintos dispositivos hardware, gracias a la especificación de la Web Inmersiva integrada.

OE6 – Demostración y evidencia de la metodología diseñada.

Este objetivo se ha abordado de forma íntegra en 2023, de forma acorde con el plan de trabajo planteado. Se ha seleccionado, en base a unos criterios establecidos, una explotación familiar ganadera en Tineo como caso de uso piloto para validación de los resultados obtenidos con SLOW, para el cual se ha realizado un despliegue completamente funcional de las herramientas tecnológicas diseñadas. La interacción con el gestor de la ganadería como usuario piloto, el establecimiento de un plan formativo y la definición de herramientas de evaluación sobre la aceptación de las herramientas propuestas, han permitido no solo transmitir y demostrar los resultados generados al usuario final, sino también obtener un valioso *feedback* para el ajuste preciso de la metodología y herramientas SLOW a las necesidades y posibilidades reales. Por último, el análisis de los resultados de los test de aceptación revela una validación positiva del planteamiento realizado.

