



OVIHUEC.DAT

Caracterización de la gestión forestal e impulso socioeconómico en zonas de montaña mediante un rebaño comunal en un entorno digital

2.2.1.3

Cómo realizar un gemelo digital de una zona de pastoreo

Convocatoria de ayudas de la Fundación Biodiversidad, en régimen de concurrencia competitiva, para apoyo a proyectos transformadores para la promoción de la bioeconomía ligada al ámbito forestal y la contribución a la transición ecológica (regulada por la Orden TED/1014/2021, de 20 de septiembre, y por la Orden TED/408/2023, de 24 de abril, que modifica la anterior) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia - Financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU para el ejercicio del 2023



Información del documento

Número de informe	2.2.1.3
Nombre del informe	Cómo realizar un gemelo digital de una zona de pastoreo
Descripción del informe	Este es un informe de capacitación de cómo realizar gemelos digitales como los implementados en Somiedo y Vilamòs para futuros usuarios.
Objetivo	Objetivo 2 - Tecnológico
Actividad	Actividad 2.2 - Testeo de un modelo 3D para diferentes agentes implicados
Entidad coordinadora de la actividad	Fundación CTIC
Entidades participantes de la actividad	IRTA, Consell Generau d'Aran
Palabras clave	Ganadería, gemelo digital, gestión, comunicación
Autores	Irene Bouzón
Colaboradores	Juan Cañada, Emilio Tereñes
Aprobado por	Antoni Dalmau Bueno

Advertencia:

Este documento es propiedad de los miembros que conforman el proyecto OVIHUEC.DAT. No está permitida su copia o distribución en ningún caso sin el consentimiento previo de los propietarios de este, quienes tienen los derechos de autor del presente escrito.

Parte de la convocatoria de la Fundación Biodiversidad y financiado por la Unión Europea - NextGenerationEU. Sin embargo, las opiniones y visiones expresadas son de los autores del documento y no representan necesariamente las de los entes convocantes y financieros. Por lo tanto, ni la Unión Europea ni la entidad convocante pueden ser responsabilizadas por estas.



Índice

1. Introducción	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivo	4
1.3. Estructura del informe	4
2. Metodología general para la creación de gemelos digitales de zonas de pastoreo	6
3. Detalles de creación de nuevos gemelos	7
3.1. Preparación de datos geoespaciales y generación del modelo 3D del territorio	7
3.2. Postprocesado y optimización del modelo 3D	9
3.3. Configuración de la base de datos y herramienta de gestión de datos de collares	11
3.4. Generación de capas de análisis del terreno	14
3.5. Integración de datos en el gemelo digital	16
3.6. Plataforma de visualización WebXR	17
4. Ejemplo de creación de gemelo 3D	20
4.1. Obtención de datos	20
4.2. Obtención del modelo 3D con QGIS-2-threejs	25
4.3. Postprocesado en Blender	27
5. Conclusiones	31
6. Referencias bibliográficas	32



1. Introducción

1.1. Antecedentes

El proyecto OVIHUEC.DAT se enmarca en una estrategia de fomento de la ganadería extensiva sostenible basada en pequeños rumiantes, con el objetivo de contribuir simultáneamente a la gestión activa del territorio, la reducción del riesgo de incendios, el mantenimiento de la biodiversidad y el impulso socioeconómico de zonas rurales de montaña. En este contexto, se han desarrollado y validado gemelos digitales del territorio en dos zonas piloto de referencia, Somiedo (Asturias) y Vilamòs (Val d'Aran), integrando tecnologías de monitorización animal y análisis ambiental en entornos de montaña con fuerte tradición pastoril.

Desde 2022, en Somiedo se trabaja con rebaños concejiles apoyados por collares geolocalizados y vallado virtual, mientras que en Vilamòs se ha extendido este conocimiento a un nuevo rebaño municipal a partir de 2024, incorporando distintas soluciones de collares inteligentes. Ambos pilotos han permitido consolidar una arquitectura técnica que combina sistemas de información geográfica, bases de datos en tiempo real, procesamiento de datos satelitales y tecnologías de visualización inmersiva para representar de forma tridimensional la interacción entre el ganado y el territorio.

Los modelos 3D desarrollados hasta la fecha se basan en fuentes geoespaciales abiertas (PNOA, MDS02, límites administrativos) integradas en QGIS, exportadas a formatos 3D estándar y optimizadas para su uso en una plataforma WebXR accesible desde escritorio, dispositivos móviles y entornos de Realidad Virtual. Sobre estos modelos se proyectan datos dinámicos procedentes de collares inteligentes y capas de análisis del terreno derivadas de imágenes Sentinel-2 y modelos de clasificación de usos del suelo, lo que permite visualizar y explorar de forma integrada la actividad silvopastoral y sus efectos sobre la vegetación y el medio físico.

La experiencia acumulada en Somiedo y Vilamòs ha demostrado el potencial de los gemelos digitales de territorios de pastoreo como herramientas para la gestión operativa de rebaños comunales, la evaluación de impactos ambientales y la comunicación y educación en torno a la bioeconomía forestal en áreas de montaña. A partir de estos resultados, surge la necesidad de sistematizar el procedimiento de



creación de nuevos gemelos digitales, de forma que la solución pueda replicarse en otros territorios con condiciones y problemáticas similares.

1.2. Objetivo

El presente informe tiene por objeto describir el procedimiento para crear un gemelo digital de una zona de pastoreo extensivo siguiendo la arquitectura y los flujos de trabajo ya validados en los pilotos de Somiedo y Vilamòs. Se documentan los pasos necesarios para generar el modelo 3D del territorio, integrar datos de seguimiento ganadero y capas de análisis del terreno, y desplegar una plataforma de visualización multidispositivo que facilite su explotación por distintos perfiles de usuarios.

El informe está orientado a equipos técnicos responsables de desarrollar y mantener gemelos digitales de nuevas zonas de pastoreo, incluyendo perfiles especializados en sistemas de información geográfica, tratamiento de datos satelitales, desarrollo web 3D y gestión de bases de datos. El documento pretende servir como guía de capacitación, proporcionando una visión sistemática y replicable del proceso, de manera que pueda aplicarse en otros territorios de montaña con rebaños extensivos y necesidades de gestión silvopastoral comparables.

Con ello, este resultado contribuye al objetivo tecnológico del proyecto, al consolidar una metodología transferible para la creación de gemelos digitales de territorios ganaderos, y refuerza el carácter exportable de los desarrollos realizados en OVIHUEC.DAT hacia otros contextos de bioeconomía forestal y gestión adaptativa del paisaje.

1.3. Estructura del informe

El informe se estructura en varios apartados que recorren de forma ordenada el ciclo completo de creación de un gemelo digital de una zona de pastoreo, desde la definición inicial de su ámbito territorial hasta la puesta en servicio de la plataforma de visualización. Tras esta introducción, en la que se presentan los antecedentes y el objetivo del documento, se describe el flujo general de trabajo (alto nivel) que sirve de marco metodológico para las fases posteriores.



A continuación, se detalla el procedimiento para la preparación de datos geoespaciales en QGIS y la generación del modelo 3D del territorio, incluyendo la obtención de ortofotos y modelos digitales de superficie, la delimitación del área de estudio y la exportación a formatos 3D utilizables en aplicaciones web. Sobre esta base se presenta el postprocesado del modelo en herramientas de modelado 3D, la configuración de la base de datos y la integración de datos de collares ganaderos mediante una herramienta de gestión específica.

En los apartados siguientes se aborda la generación de capas de análisis del terreno a partir de imágenes satelitales y modelos de clasificación de usos del suelo, así como la integración de todas las fuentes de información en el gemelo digital y el despliegue de la plataforma WebXR asociada. Finalmente, se incorpora un apartado de ejemplo práctico de creación de un gemelo 3D aplicado a Villaviciosa (Asturias), en el que se detalla paso a paso la operativa en QGIS y herramientas asociadas, ilustrando de forma concreta la aplicación de la metodología descrita.



2. Metodología general para la creación de gemelos digitales de zonas de pastoreo

Este apartado presenta una visión de alto nivel del flujo de trabajo seguido para crear gemelos digitales de zonas de pastoreo extensivo, basado en la experiencia acumulada en los pilotos de Somiedo y Vilamòs. El objetivo es establecer una secuencia de fases claramente identificables que sirva como guía para su replicación en nuevos territorios.

En términos generales, el proceso se articula en torno a las siguientes etapas principales:

1. Delimitación del ámbito territorial de estudio y recopilación de requisitos de los agentes locales implicados en la gestión del rebaño y del territorio.
2. Preparación de datos geoespaciales de base en un sistema de información geográfica, generando el modelo 3D del terreno a partir de fuentes abiertas de cartografía y altimetría.
3. Postprocesado y optimización del modelo 3D en herramientas específicas de modelado para garantizar su rendimiento en entornos web interactivos.
4. Diseño y configuración de una base de datos relacional para el almacenamiento estructurado de los datos de seguimiento ganadero y de las capas derivadas del análisis del terreno.
5. Integración de datos procedentes de collares inteligentes mediante procesos de carga manual o semiautomatizada, según las capacidades de exportación de cada proveedor.
6. Generación de capas de análisis del terreno a partir de imágenes satelitales multiespectrales y modelos de clasificación de usos del suelo adaptados al contexto silvopastorral.
7. Integración de todas las fuentes de información en el gemelo digital mediante georreferenciación homogénea de elementos 3D, datos dinámicos y capas de contexto ambiental.
8. Despliegue de una plataforma de visualización WebXR multidispositivo que permita la exploración del gemelo por parte de usuarios técnicos y no técnicos.
9. Verificación funcional y validación con agentes locales, incluyendo demostraciones y recogida de retroalimentación para la mejora continua de la herramienta.

Las secciones siguientes desarrollan cada una de estas fases de forma detallada, proporcionando instrucciones prácticas y decisiones de diseño clave para la generación de nuevos gemelos digitales de zonas de pastoreo extensivo.



3. Detalles de creación de nuevos gemelos

A continuación se describe en detalle la metodología general planteada en el apartado anterior.

3.1. Preparación de datos geoespaciales y generación del modelo 3D del territorio

Esta sección describe el procedimiento para construir el modelo 3D base del territorio a partir de datos geoespaciales abiertos, paso imprescindible para dar soporte visual a un gemelo digital de un terreno. El flujo seguido reproduce la metodología aplicada en los pilotos de Somiedo y Vilamòs, basada en el uso de QGIS como herramienta principal de integración y procesamiento de información geográfica.

Selección del ámbito territorial y fuentes de datos

El primer paso consiste en definir con precisión el **ámbito territorial que abarcará el gemelo digital**, de acuerdo con la superficie efectivamente pastoreable y con los límites administrativos relevantes para la gestión del rebaño. En los casos de Somiedo y Vilamòs, esta delimitación se ha realizado a partir de las zonas de aprovechamiento ganadero vinculadas a rebaños concejiles o municipales, considerando tanto criterios ecológicos como de uso tradicional del territorio.

Una vez definido el ámbito, se deben identificar las **fuentes de datos geoespaciales abiertas** necesarias para la construcción del modelo 3D, que típicamente incluyen:

- Ortofotografías de alta resolución del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), con resolución en torno a 0.25 m, utilizadas como textura base del modelo.
- Modelos Digitales de Superficies (MDS02) con resolución de 25 m, empleados para representar la altimetría del terreno.
- Capas vectoriales de límites administrativos (municipales, provinciales, autonómicos) en ETRS89, utilizadas para recortar y referenciar el área de estudio.

Estas fuentes han demostrado ser suficientes para generar modelos tridimensionales detallados en contextos de montaña como el Parque Natural de Somiedo o el Val d'Aran, y se consideran referencia para su aplicación en nuevas zonas de pastoreo extensivo. Así, todos los datos mínimos necesarios para conformar el gemelo de un territorio (dentro del estado Español), se pueden encontrar en el Centro de Descargas del CNIG:

→ <https://centrodedescargas.cnig.es/>



Integración de capas en QGIS y delimitación del área de estudio

Con las fuentes identificadas y descargadas, se procede a su integración en un proyecto QGIS. Las ortofotos PNOA y los modelos MDS02 se cargan como capas raster, mientras que los límites administrativos se incorporan como capas vectoriales (shapefile ETRS89), agrupando cada tipo de dato en conjuntos diferenciados para facilitar su gestión.

Sobre la base de los límites administrativos, se seleccionan los recintos correspondientes al ámbito de interés (por ejemplo, el municipio o sector de montaña donde se localiza el rebaño) y se exportan como una nueva capa vectorial específica que actúa como máscara del modelo. Esta capa de delimitación se utilizará posteriormente para recortar tanto los datos de altimetría como las texturas, asegurando que el gemelo digital se circumscribe a la zona relevante desde el punto de vista ganadero.

En paralelo, se pueden ajustar los estilos de representación de las capas de límites para mejorar la legibilidad durante el proceso (por ejemplo, modificando el color y grosor de las líneas de contorno), aunque estos ajustes son únicamente operativos y no condicionan el resultado final del modelo 3D.

Fusión y preparación de rasters para el modelo 3D

Una vez establecida la delimitación, se prepara la información raster necesaria para el modelo 3D. En Somiedo y Vilamòs, este proceso ha consistido en combinar los mosaicos de MDS02 y ortofoto de forma que se obtenga una superficie continua de alturas y una textura homogénea sobre el conjunto del ámbito de estudio.

Las operaciones típicas incluyen:

- Fusión de los distintos mosaicos de altimetría mediante las herramientas de combinación de rasters de QGIS, generando una única capa de alturas que cubra la totalidad de la zona.
- Recorte de la capa de alturas y de la ortofoto con la capa de delimitación del ámbito, reduciendo la extensión de los datos al área estrictamente necesaria para el gemelo digital.

El resultado de este proceso es un conjunto de capas raster optimizado para la exportación 3D: una ortofoto recortada que actuará como textura del modelo y un modelo digital de superficies que definirá la morfología del terreno. Se recomienda guardar estas capas combinadas como ficheros definitivos, evitando depender de capas temporales que puedan perderse al cerrar el proyecto de GIS.

Generación del modelo 3D exportando a glTF

Con los datos raster preparados, se utiliza la funcionalidad 3D basada en QGIS y en extensiones específicas (*Qgis2threejs*) para generar el modelo tridimensional del territorio. En los pilotos de OVIHUEC.DAT se ha empleado un flujo de trabajo en el que el modelo de alturas actúa como base geométrica y la ortofoto recortada como textura proyectada sobre dicha superficie.



El procedimiento habitual consiste en:

1. Configurar el modelo 3D en QGIS, asociando la capa de MDS02 combinada como fuente de elevación y la ortofoto correspondiente como textura.
2. Limitar el modelo a la capa de delimitación del ámbito, de forma que la malla 3D se recorte exactamente al contorno de la zona de pastoreo definida.
3. Ajustar la resolución del modelo según las necesidades de detalle y las restricciones de rendimiento, considerando que una mayor resolución incrementa el número de polígonos y el tamaño de los ficheros resultantes.

Una vez satisfechos los criterios de calidad geométrica y visual, el modelo se exporta a formato glTF, preservando la georreferenciación necesaria para su posterior integración con otros elementos del gemelo digital. Este archivo de escena constituye la base a partir de la cual se realizará el postprocesado en herramientas de modelado 3D, previo a su incorporación a la plataforma de visualización WebXR.

3.2. Postprocesado y optimización del modelo 3D

Esta sección describe las tareas de postprocesado que se aplican al modelo 3D (glTF) exportado desde el entorno GIS, con el fin de garantizar un equilibrio adecuado entre calidad visual y rendimiento en la plataforma de visualización WebXR. El flujo seguido replica el utilizado en los gemelos digitales de Somiedo y Vilamòs, donde el modelo generado en QGIS se optimiza antes de su despliegue web.

Importación del modelo y limpieza de la malla

El primer paso consiste en importar el archivo glTF generado en la fase anterior en una herramienta de modelado 3D (e. Blender) que permita trabajar de forma detallada sobre la malla y sus texturas. El objetivo en esta fase es corregir irregularidades derivadas del proceso de generación desde datos geoespaciales y preparar la geometría para su uso eficiente en tiempo real.

Las operaciones habituales de limpieza incluyen:

- Eliminación de vértices duplicados y geometrías redundantes que puedan haberse generado en los bordes del modelo o en zonas de solape de mosaicos.
- Suavizado de transiciones y corrección de pequeños artefactos en la superficie, evitando discontinuidades que resulten perceptibles en la visualización inmersiva.

Estas acciones permiten obtener una malla más coherente y facilitan las etapas posteriores de simplificación, reduciendo el peso del modelo sin comprometer la representación fiel de la orografía.

Reducción de complejidad geométrica

Una vez depurada la malla, se procede a reducir su complejidad geométrica mediante técnicas de simplificación que mantienen la forma general del terreno con



un número menor de polígonos. En los pilotos de Somiedo y Vilamòs se ha aplicado un proceso de decimación controlada, manteniendo un porcentaje reducido de los vértices originales para mejorar el rendimiento en la ejecución web.

De forma orientativa, se ha trabajado con factores de reducción que permiten conservar en torno al 10-20% de los vértices iniciales, ajustando este valor en función de la extensión del ámbito y del nivel de detalle requerido para la visualización. La selección del grado de decimación debe equilibrar la necesidad de mantener rasgos topográficos relevantes (valles, cumbres, cortados) con las limitaciones de carga y renderizado en dispositivos de capacidad heterogénea.

El resultado de esta etapa es una malla sustancialmente más ligera, pero todavía asociada a la misma textura de ortofoto y conservando la georreferenciación necesaria para su integración en el gemelo digital.

Gestión y mejora de texturas

En paralelo a la optimización geométrica, puede ser necesario revisar la configuración de texturas para garantizar una calidad visual adecuada con un tamaño de archivo asumible. En el caso de los pilotos, se ha utilizado la ortofoto recortada como textura principal del terreno, explorando la posibilidad de incrementar su resolución cuando el detalle original de PNOA lo permite.

El procedimiento seguido incluye:

1. Exportación desde el GIS de la ortofoto recortada a imagen raster (por ejemplo, en formato PNG), ajustando la resolución al nivel deseado de detalle.
2. Optimización del archivo de textura mediante herramientas de compresión de imágenes, con el fin de reducir su peso manteniendo la legibilidad de elementos relevantes del paisaje.
3. Reasignación de la textura optimizada al modelo 3D y ajuste de las coordenadas UV cuando sea necesario para asegurar la correcta correspondencia espacial entre textura y geometría.

Estas actuaciones permiten disponer de un modelo con una textura suficientemente nítida para la exploración visual y, al mismo tiempo, con un tamaño de recursos compatible con el uso en navegadores web y dispositivos móviles.

Generación de recursos auxiliares para la plataforma WebXR

Además del modelo 3D y sus texturas, la experiencia en Somiedo y Vilamòs ha evidenciado la necesidad de generar recursos auxiliares específicos que faciliten la integración de elementos dinámicos en el entorno de visualización. Entre estos recursos destaca la creación de mapas de alturas derivados del modelo, que permiten recuperar la altitud del terreno de forma eficiente durante la ejecución (por ejemplo, para ubicar elementos 3D sobre la superficie).

En lugar de recurrir a cálculos de intersección de rayos sobre la malla en tiempo real, que resultan costosos computacionalmente, se ha optado por precomputar una textura de alturas (*heightmap*) que la plataforma WebXR puede muestrear para



determinar la cota del terreno en cualquier punto de interés. Este enfoque se ha aplicado en los pilotos para situar correctamente sobre el terreno las entidades dinámicas que representan al ganado, garantizando que “apoyan las patas” en la superficie del modelo sin penalizar el rendimiento.

El conjunto de salidas de esta fase (modelo 3D optimizado, textura de ortofoto ajustada y heightmap asociado) constituye el paquete de recursos que se integrará posteriormente en la plataforma de visualización WebXR y se enlazará con los datos almacenados en la base de datos del gemelo digital.

3.3. Configuración de la base de datos y herramienta de gestión de datos de collares

Esta sección describe la arquitectura de datos que sustenta el gemelo digital y el procedimiento para incorporar los registros procedentes de los collares ganaderos, elemento clave para dotar de dinámica al modelo 3D del territorio. La solución aplicada en Somiedo y Vilamòs se basa en una base de datos relacional en Supabase y en una herramienta web de administración que facilita la carga estructurada de información.

Arquitectura general de la base de datos

La base de datos del gemelo digital se ha diseñado para almacenar de forma estructurada los datos de seguimiento de los animales, así como otra información asociada necesaria para su visualización y análisis. Entre los principales tipos de datos gestionados se incluyen:

- Posiciones geográficas de los animales, registradas por los collares inteligentes en distintos instantes de tiempo.
- Parámetros fisiológicos y de actividad, como temperatura, humedad, presión o alertas, cuando el proveedor de collares los proporciona.
- Información sobre vallados virtuales y zonas de pasto, en aquellos casos en los que la tecnología lo permite (por ejemplo, Somiedo con vallado virtual).

El esquema de datos se ha unificado para dar cabida a distintos proveedores de collares (Nofence, Digitanimal, Ixorigue, Innogando), garantizando que la arquitectura sea común para las zonas piloto de Somiedo y Val d’Aran y pueda extenderse a nuevos territorios. La base de datos se ha dimensionado para gestionar del orden de medio millón de registros de seguimiento en los períodos de referencia, asegurando capacidad para analizar patrones de uso del territorio y comportamiento del ganado.

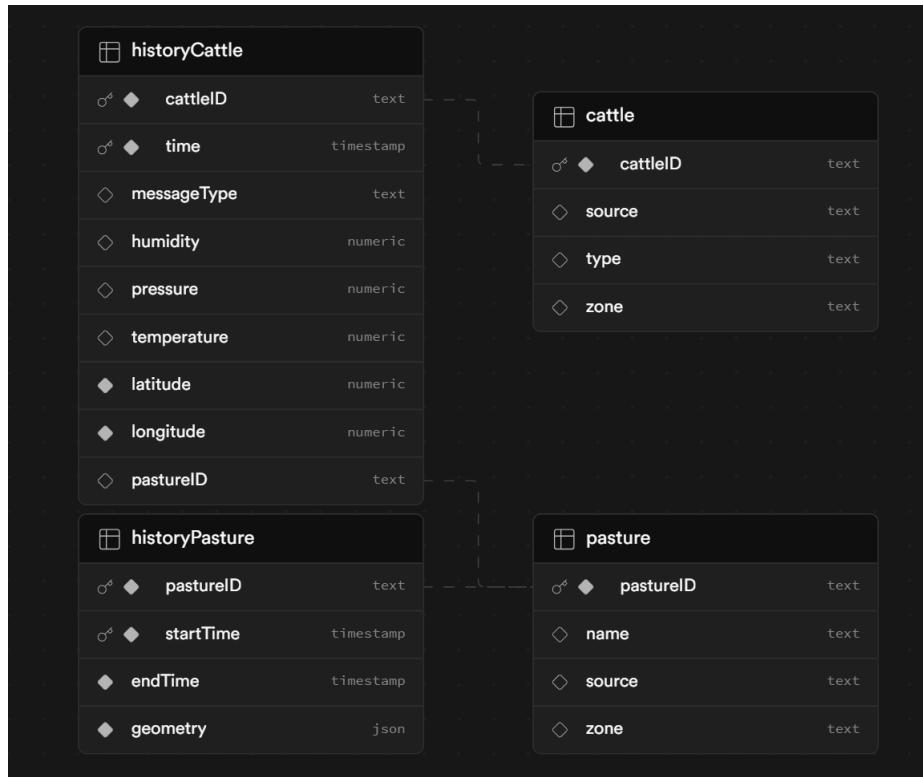


Figura 1 - Esquema de la base de datos (Supabase)

Herramienta web de administración y carga de datos

Para facilitar la incorporación periódica de nuevos datos, se ha desarrollado una herramienta web de administración que actúa como interfaz entre los ficheros proporcionados por los proveedores de collares y la base de datos del gemelo digital. Esta herramienta permite cargar ficheros en formato CSV, procesarlos y adaptarlos automáticamente a la estructura interna de la base de datos, reduciendo errores de entrada y homogeneizando los distintos formatos de origen.

En el caso de Vilamòs, por ejemplo, la herramienta dispone de secciones específicas para cada proveedor (Digitanimal, Ixorigue, Innogando), a las que se arrastran los ficheros descargados o recibidos por correo. La aplicación se encarga de interpretar las columnas relevantes, realizar las conversiones necesarias y registrar los nuevos datos en las tablas correspondientes, permitiendo repetir la operación de forma segura incluso cuando se sube un mismo fichero más de una vez.

Este enfoque ha demostrado ser especialmente útil para gestionar flujos de información en los que parte de los datos llegan semanalmente por correo electrónico y otra parte se descarga manualmente desde plataformas web de los proveedores. La herramienta web de administración se integra con la base de datos en Supabase, asegurando que la información esté inmediatamente disponible para su uso tanto en la plataforma de visualización 3D como en herramientas externas de análisis.



Integración de datos de distintos proveedores de collares

La arquitectura del sistema contempla la coexistencia de múltiples proveedores de collares con capacidades y formatos heterogéneos, lo que ha requerido definir procedimientos específicos de integración. A continuación se describen los principales casos considerados en los pilotos, que sirven como referencia para la incorporación de nuevas tecnologías de seguimiento ganadero.

- Proveedores con exportación web y APIs (por ejemplo, Digitanimal):
 - Se accede a la plataforma del proveedor y se seleccionan los dispositivos y rangos temporales de interés, exportando las trayectorias a ficheros CSV.
 - Estos ficheros se descargan, se descomprimen cuando es necesario y se cargan mediante la herramienta de administración en la sección correspondiente, que se encarga de incorporarlos a la base de datos.
- Proveedores con envío periódico por correo (por ejemplo, Innogando):
 - Se reciben ficheros comprimidos (como archivos .tar) que contienen los registros de GPS de los animales.
 - Tras su descompresión, se seleccionan los ficheros que contienen las coordenadas y se arrastran a la sección específica de la herramienta de administración, que los procesa para su inserción en la base de datos.
- Proveedores con formatos de columnas cambiantes (por ejemplo, Ixorigue):
 - En este caso, puede ser necesario revisar manualmente la cabecera de los ficheros CSV y adaptar ciertos nombres de campos a los esperados por el sistema (por ejemplo, unificar denominaciones de columnas de fechas u otra información temporal).
 - Una vez adaptados, los ficheros siguen el mismo flujo de carga mediante la herramienta de administración.

En Somiedo, además, se integra información de vallado virtual y zonas de pasto procedente de Nofence, que requiere un tratamiento diferenciado de mensajes de posición y definición de pastos, si bien el principio general de carga mediante ficheros exportados y posterior procesamiento en la herramienta de gestión sigue siendo el mismo. En todos los casos, la base de datos mantiene un histórico de posiciones y eventos que permite reconstruir trayectorias, generar mapas de calor y analizar el uso del espacio por parte del rebaño a lo largo del tiempo.

Acceso a datos para análisis externos

Además de alimentar la plataforma de visualización 3D, la base de datos del gemelo digital está preparada para servir como fuente de información para análisis externos. A través de consultas SQL y de mecanismos de exportación a formatos geoespaciales



estándar, como GeoJSON, es posible extraer subconjuntos de datos para su tratamiento en herramientas como QGIS u otras aplicaciones de análisis de datos.

En el marco de los pilotos, esta capacidad se ha utilizado para generar mapas de calor de uso del territorio, estudiar patrones de movimiento del ganado y potencialmente alimentar otros modelos de análisis relacionados con el impacto silvopastoril. De este modo, la base de datos no sólo sustenta la visualización en tiempo real y la exploración interactiva del gemelo, sino que también actúa como repositorio centralizado para la evaluación cuantitativa de la gestión del territorio y del comportamiento de los rebaños extensivos.

3.4. Generación de capas de análisis del terreno

Esta sección describe el procedimiento seguido para obtener capas de información ambiental que complementan al modelo 3D y permiten contextualizar la actividad ganadera en el territorio, con especial énfasis en los usos del suelo y otros indicadores derivados de imágenes satelitales. Estas capas pueden ser de utilidad para analizar los efectos silvopastorales sobre la vegetación y el medio físico.

Fuentes de información geoespacial y satelital

La generación de capas de análisis del terreno parte de la integración de diferentes fuentes de información georreferenciada de acceso abierto, tanto en formato raster como vectorial. Entre las fuentes a utilizar se encuentran:

- Mosaicos de ortoimágenes Sentinel-2 del programa Copernicus, con resolución de 10 m, empleados como base para el cálculo de índices radiométricos y la clasificación de usos del suelo.
- Capas de límites administrativos y parcelario (SIGPAC), que permiten relacionar las dinámicas de uso del territorio con unidades de gestión agraria.
- Productos de ocupación del suelo de distintos repositorios, como Corine Land Cover, SIOSE AR, el Mapa Forestal de España y coberturas específicas del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, utilizados como referencia para la interpretación y etiquetado de usos.

Estos datos se integran y gestionan en QGIS, combinando información raster y vectorial para construir una base coherente sobre la que desarrollar los modelos de clasificación y análisis.

Clasificación de usos del suelo (LULUCF)

Con el fin de disponer de una caracterización adaptada a los objetivos del proyecto, se ha definido un modelo de clasificación de usos del suelo alineado con la metodología LULUCF (Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura), ajustado a los paisajes de montaña objeto de estudio. Este modelo contempla una serie de clases que agrupan las principales coberturas presentes en los ámbitos



piloto, incluyendo bosques mixtos, bosques perennifolios, bosques caducifolios, matorrales, prados, construcciones, roquedos y humedales.

El proceso de generación de la capa de usos del suelo comprende las siguientes etapas:

1. Diseño de un conjunto de entrenamiento a partir de puntos geoetiquetados sobre imágenes Sentinel-2, donde cada punto se asocia a una de las clases definidas, apoyándose en la cartografía de referencia y en la experiencia de fotointérpretes especializados.
 - a. Esto implica la creación de una capa de puntos (shapefile) con geoetiquetas de uso del suelo, garantizando diversidad espacial y de pendientes.
2. Cálculo de variables explicativas a partir de las bandas multiespectrales de Sentinel-2 y de índices derivados, como NDVI, para cada punto de entrenamiento.
3. Entrenamiento de un modelo de clasificación basado en Random Forest con el objetivo de inferir las clases de uso del suelo sobre las imágenes de mayor actualidad disponibles.

El resultado es una capa raster de usos del suelo que se integra posteriormente en el gemelo digital como *overlay* (superposición), permitiendo activar y desactivar su visualización y analizar la relación entre la distribución de los rebaños y las distintas coberturas del territorio.

Series temporales de índices radiométricos

Además de la clasificación categórica de usos del suelo, se generan series temporales de índices radiométricos que permiten estudiar la evolución de la vegetación y del estado del terreno a lo largo del tiempo. Entre estos índices destaca el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ampliamente utilizado para caracterizar la cobertura vegetal y la salud de la vegetación.

El flujo de trabajo incluye:

1. Descarga y preprocesado de imágenes Sentinel-2 mediante una herramienta software basada en la librería de Google Earth Engine, que automatiza la selección de escenas según límites geográficos, rangos de fechas, bandas espectrales y criterios de calidad (por ejemplo, cobertura de nubes).
2. Cálculo de índices radiométricos a partir de las bandas seleccionadas y generación de series temporales sobre el ámbito del gemelo digital, lo que posibilita comparar distintos períodos del año y diferentes campañas de pastoreo.

Estas series no sólo permiten enriquecer el análisis interno del proyecto, sino que también pueden servir de base para futuras funcionalidades del gemelo digital orientadas a la monitorización continuada de la respuesta del territorio a las prácticas silvopastorales.



Capas adicionales de biomasa y carbono (caso Somiedo)

En el piloto de Somiedo se ha explorado, además, la estimación de biomasa y carbono secuestrado en la vegetación mediante la integración de información procedente de la misión GEDI (LiDAR) con datos Sentinel-2. Esta aproximación combina observaciones directas del dosel vegetal con índices multiespectrales, lo que permite inferir la cantidad de biomasa presente en el terreno a partir de datos satelitales repetibles.

Aunque esta línea de trabajo se ha aplicado específicamente en el Valle del Lago, su metodología ofrece una orientación para futuros desarrollos en otras zonas donde se disponga de datos comparables. La capa resultante se incorpora al gemelo digital como una representación adicional que puede activarse desde la interfaz, ayudando a relacionar la presencia del ganado con la dinámica de biomasa y el secuestro de carbono en el paisaje.

3.5. Integración de datos en el gemelo digital

Esta sección describe cómo se integran en un único entorno tridimensional los distintos componentes del gemelo digital: modelo de terreno, elementos 3D estáticos, datos dinámicos de collares y capas de análisis del terreno. El objetivo es garantizar una georreferenciación coherente que permita superponer y analizar de forma conjunta información de naturaleza diversa.

Georreferenciación de elementos 3D

Sobre el modelo 3D del terreno generado y optimizado en las fases anteriores se implementa un sistema de posicionamiento basado en coordenadas geográficas que permite ubicar con precisión cada entidad virtual a partir de su localización real en el territorio. Este sistema se aplica tanto a elementos estáticos como a elementos dinámicos (rebaños, trayectorias, vallados virtuales donde existan).

Las coordenadas procedentes de capas GIS y de los dispositivos de seguimiento se transforman al sistema de referencia del modelo 3D, de modo que cada punto del gemelo digital corresponda únicamente a una posición física en el territorio. Esta georreferenciación homogénea facilita que las diferentes capas de información puedan representarse de forma simultánea, garantizando la coherencia espacial entre datos.

Incorporación de datos de collares

La integración de los rebaños en el gemelo digital se realiza a partir de los registros almacenados en la base de datos, que recogen las posiciones GPS y, cuando están disponibles, parámetros adicionales asociados a cada animal. En Somiedo se integran datos de Nofence (geolocalización y vallado virtual) y Digitanimal (geolocalización y parámetros del animal), mientras que en Vilamòs se incorporan datos de Digitanimal, Ixorigue e Innogando, centrados en la geolocalización y, en algunos casos, valores adicionales como la temperatura.



Cada registro de la base de datos se representa en el entorno 3D como parte de la trayectoria de un individuo, permitiendo visualizar el desplazamiento del rebaño a lo largo del tiempo. La plataforma de visualización implementa una línea de tiempo interactiva que facilita recorrer el histórico de posiciones y observar qué zonas del territorio se utilizan con mayor intensidad, cómo se distribuyen los animales en diferentes períodos y qué patrones de movimiento se derivan de la gestión del pastoreo.

Superposición de capas de análisis del terreno

Además de los datos de collares, el gemelo digital integra capas derivadas del análisis del terreno que permiten contextualizar el uso del espacio y los efectos silvopastorales sobre la vegetación y el suelo. Entre estas capas se encuentran la clasificación de usos del suelo siguiendo la metodología LULUCF, mapas de tipo de terreno, series derivadas de índices radiométricos y, en el caso de Somiedo, estimaciones de biomasa y carbono secuestrado.

Estas capas se incorporan como overlays que pueden activarse y desactivarse desde la interfaz, permitiendo al usuario seleccionar en cada momento la combinación de información más relevante para su análisis. De este modo, es posible visualizar simultáneamente la trayectoria del ganado y la estructura de la vegetación, identificar áreas de prados, matorrales o bosques, y relacionar la presencia de los animales con la dinámica de la biomasa y el potencial riesgo de incendios. De forma técnica, esto se implementa como un simple cambio de textura del modelo 3D.

Recursos de soporte para la integración en tiempo real

Para que la integración de datos se realice de forma eficiente en tiempo real, el sistema hace uso de recursos auxiliares generados en la fase de postprocesado, como los mapas de alturas derivados del modelo 3D. En lugar de calcular intersecciones geométricas complejas durante la ejecución, la plataforma consulta estas texturas de alturas (*heightmaps*) para situar correctamente los elementos dinámicos (por ejemplo, los animales) sobre la superficie del terreno.

Este enfoque permite mantener un rendimiento adecuado incluso cuando se representan grandes volúmenes de datos de seguimiento, garantizando al mismo tiempo una correspondencia precisa entre la posición de los puntos y la topografía del modelo.

3.6. Plataforma de visualización WebXR

La plataforma de visualización del gemelo digital está desplegada en servidores de CTIC utilizando una arquitectura basada en contenedores orquestados mediante Docker Compose, con servicios separados para el *frontend*, la base de datos y otros componentes de apoyo. Esta separación facilita la gestión de entornos de desarrollo y producción, así como la persistencia de datos mediante volúmenes dedicados.



El *frontend* se construye sobre el estándar W3C WebXR y la librería Three.js para el renderizado 3D, lo que permite ejecutar el gemelo digital en navegadores web sin necesidad de plugins específicos ni hardware propietario. La aplicación comparte infraestructura entre los distintos pilotos, de modo que Somiedo y Val d'Aran utilizan la misma base tecnológica y se diferencian mediante la configuración de modelos glTF, capas de análisis y filtros de datos. Así, un nuevo gemelo digital de pastoreo podría reutilizar la misma arquitectura pero adaptándola al nuevo territorio, diferenciado por sus modelos glTF y sus capas geoespaciales.

Preparar los recursos 3D y la configuración del nuevo territorio

Para incorporar un nuevo gemelo, en primer lugar deben estar disponibles los recursos 3D y capas asociadas generados en las fases previas. Será necesario:

- Disponer del modelo 3D optimizado del terreno en formato glTF, junto con su textura de ortofoto y el *heightmap* de alturas asociado.
- Contar con las capas de análisis del terreno que se quieran integrar (por ejemplo, usos del suelo LULUCF, tipo de terreno, mapas derivados de índices radiométricos).
- Asegurar que la base de datos contiene los registros de collares correspondientes al nuevo territorio, identificables de forma diferenciada respecto a otros pilotos.

A partir de ahí, se crea una nueva configuración en la aplicación WebXR que refuerce estos recursos: se define el modelo glTF a cargar, las rutas o identificadores de las capas ambientales y los filtros de datos que limitan las consultas a los animales y períodos del nuevo ámbito.

Adaptar la arquitectura de despliegue

El despliegue del nuevo gemelo se realiza reutilizando la arquitectura de contenedores existente, ajustando únicamente la configuración para incluir el nuevo territorio. Para ello, es necesario:

- Incorporar los nuevos recursos (modelo glTF, texturas, *heightmaps*, capas) al almacenamiento accesible por el servicio frontend.
- Actualizar los ficheros de configuración del frontend para que el nuevo territorio aparezca como opción seleccionable en la aplicación (por ejemplo, añadiendo una nueva “escena” o “zona” en la lógica de carga).
- Revisar las variables de entorno relacionadas con la conexión a la base de datos, asegurando que el frontend puede consultar las tablas donde se almacenan los datos del nuevo gemelo.

En la práctica, el mismo despliegue Docker Compose que aloja Somiedo y Vilamòs puede servir para el nuevo territorio, siempre que se añadan las rutas y configuraciones necesarias sin modificar la arquitectura básica de servicios.



Definir las interacciones y filtros específicos del nuevo gemelo

Una vez cargado el nuevo modelo y conectada la base de datos, es preciso definir cómo se presentará la información al usuario dentro de la interfaz común. Para ello se recomienda:

- Configurar la línea temporal para que, al seleccionar el nuevo territorio, limite automáticamente el rango de fechas y los dispositivos a los asociados a ese ámbito.
- Establecer qué capas ambientales estarán disponibles (por ejemplo, sólo LULUCF y tipo de terreno, o también biomasa y carbono si se han generado) y cómo se activan desde los paneles de filtros.
- Definir la forma en que se identifican los animales y otros elementos dinámicos (nombres, colores, iconos) para el nuevo territorio, manteniendo criterios coherentes con los pilotos anteriores.

El objetivo es que el usuario pueda cambiar de Somiedo o Vilamòs al nuevo gemelo sin necesidad de aprender una interfaz distinta, encontrando las mismas herramientas de navegación 3D, filtros y visualización de trayectorias, pero aplicadas al nuevo entorno.

Verificar el funcionamiento y ajustar el rendimiento

Antes de dar por finalizado el despliegue del nuevo gemelo, conviene realizar una fase de prueba específica centrada en la experiencia de usuario y en el rendimiento. En esta fase se recomienda:

1. Comprobar que el modelo 3D se carga correctamente en escritorio, móvil y, en su caso, dispositivos de Realidad Virtual, sin errores de texturas ni artefactos visibles.
2. Validar que las trayectorias y posiciones de los animales coinciden con la realidad del territorio, revisando varios puntos al azar con apoyo de mapas GIS cuando sea necesario.
3. Evaluar tiempos de carga y fluidez de navegación, ajustando el nivel de detalle del modelo o el número de puntos mostrados simultáneamente si se detectan problemas de rendimiento.

Superadas estas pruebas, el nuevo gemelo queda integrado en la misma plataforma WebXR que los pilotos previos, listo para su uso por parte de pastores, gestores y otros agentes implicados en la gestión del territorio de pastoreo extensivo.



4. Ejemplo de creación de gemelo 3D

Como complemento práctico a la metodología descrita en los apartados anteriores, se incluye a continuación un ejemplo detallado de cómo se abordaría la creación de un gemelo digital 3D aplicado al municipio de Villaviciosa (Asturias). Este ejemplo reproduce paso a paso el flujo de trabajo seguido en los pilotos con el objetivo de ofrecer una referencia operativa, sirviendo como plantilla para la creación de gemelos 3D de otros territorios de pastoreo extensivo.

4.1. Obtención de datos

A continuación se describe en detalle cómo se descargan los archivos necesarios para generar el modelo 3D del territorio de Villaviciosa (Asturias).

Ortofotografías

Para descargar las **ortofotografías (PNOA)** para el territorio de Villaviciosa:

1. Acceder a: <https://centrededescargas.cnig.es/CentroDescargas/ortofotos-historicas-pnoa#>.
2. Seleccionar el municipio de Villaviciosa y las ortofotos más recientes (2023).
3. Descargar todos los elementos de la lista haciendo clic sobre el ícono de “descarga”.

Municipio: Villaviciosa (Asturias) x Año: Ortofotos PNOA 2023 x

Nombre	Formato	Fecha	Resolución	MB	Acciones	Descarga
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0014-4.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	439.41		
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0015-3.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	442.73		
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0015-4.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	233.55		
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0029-2.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	678.38		
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0030-1.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	692.56		
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0030-2.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	688.74		
PNOA-ANUAL-2023-OF-ETRS89-HU30-h25-0030-3.tif	COG	2023	Resolución 0.25 M	692.81		

Figura 2 - Descarga de ortografías del PNOA a través del CNIG

4. Cada uno de estos elementos cubre un área de la zona de Villaviciosa con un detalle de 0.25 m de resolución.
5. Para cargar estas capas de información en QGIS, simplemente basta con arrastrar los ficheros descargados al recuadro de "Capas" de QGIS.



6. De manera adicional, es recomendable crear un grupo contenedor con un nombre representativo para incluir todas las ortofotos que compongan el mapa.

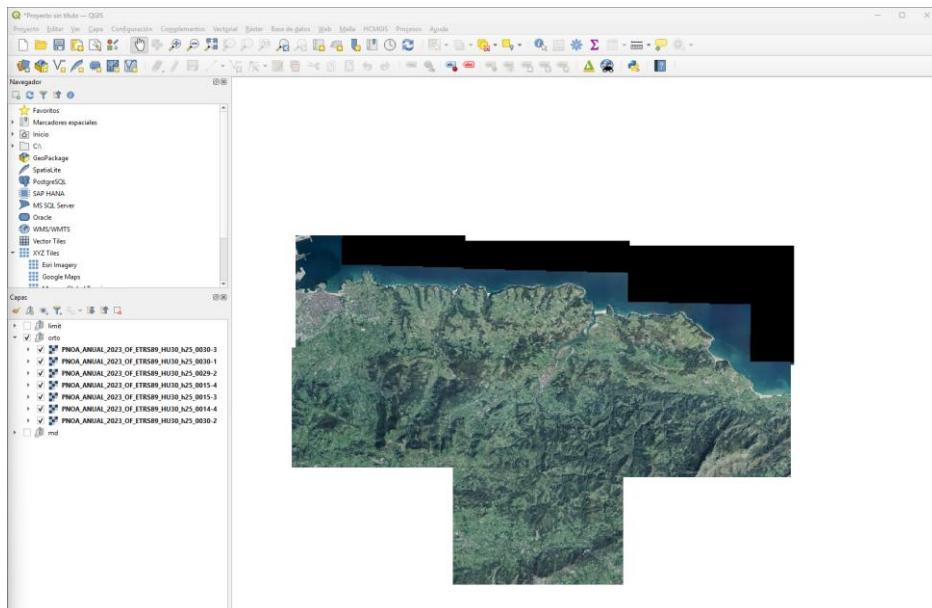


Figura 3 - Carga de capas de información en QGIS

Límites administrativos

Los **límites** incluyen información geoespacial como fronteras administrativas, límites municipales o zonas protegidas.

1. Acceder a: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/límites-municipales-provinciales-autonomicos>.
2. Descargar todos los elementos de la lista haciendo clic sobre el ícono de descarga.

Nombre	Formato	Fecha	Escala	MB	Acciones	Descarga
Límites y Unidades Administrativas	SHPE	27/11/2024	25000	132.64		

Figura 4 - Descarga de límites administrativos del CNIG

3. Extraer la información necesaria del archivo comprimido. En este caso, esto comprende los archivos que se encuentra en: *lineas_limite.zip\SHP_ETRS89\recintos_municipales_inspire_peninbal_etr89*.
4. Para cargar estas capas de información en QGIS, simplemente basta con arrastrar los ficheros descargados al recuadro de "Capas" de QGIS.
5. Para mejorar la visibilidad de las zonas limitadas, es recomendable cambiar el estilo de dibujo. Esto se puede configurar haciendo clic derecho sobre la capa "*recintos_municipales_inspire_peninbal_etr89*", seleccionado "propiedades" y eligiendo la "simbología" que sea más adecuada para cada caso.

2.2.1.3. CÓMO HACER UN GEMELO DIGITAL DE UNA ZONA DE PASTOREO

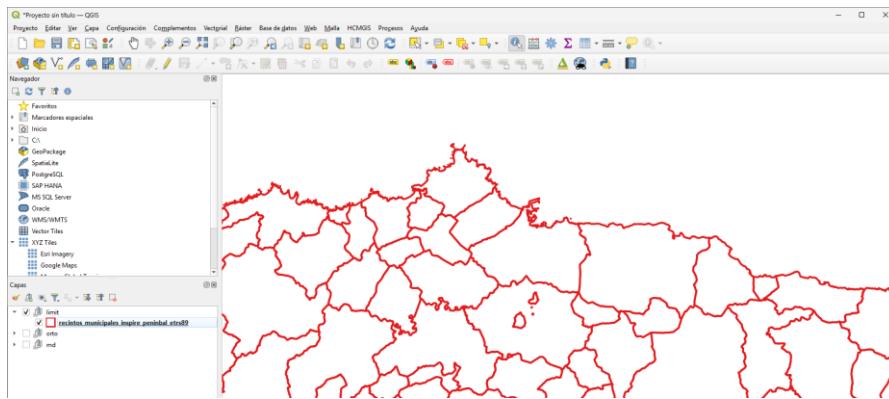


Figura 5 - Visualización de límites administrativos en QGIS

6. Una vez cargadas todas las capas de límites territoriales, es importante definir cuál(es) de ellas son de interés, con el objetivo de limpiar el resto y poder trabajar con la zona fácilmente.

- a. Para ello se usará la herramienta de selección para resaltar todas aquellas zonas de interés.
- b. Una vez seleccionadas las áreas de interés, se hará clic derecho sobre la capa "recintos_municipales_inspire_peninbal_etrs89".

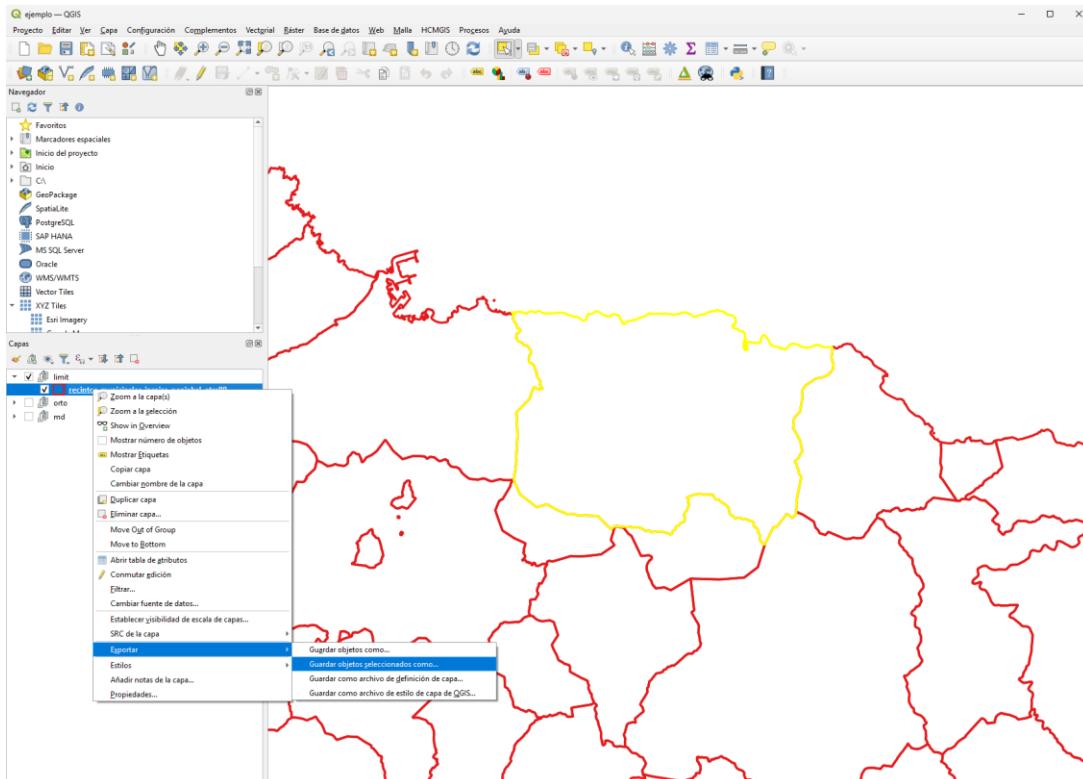


Figura 6 - Exportación de áreas de interés en QGIS

- c. Exportar como "recinto_villaviciosa" y se creará una nueva capa con el mismo nombre. Se debe recordar exportar esta nueva capa como



un archivo nuevo, ya que durante la creación el archivo es solo temporal.

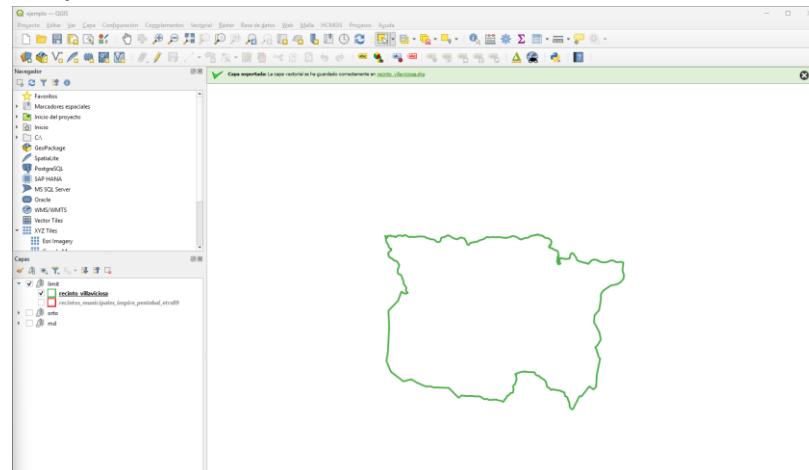


Figura 7 - Nueva capa con el área de interés exportada en QGIS

Mapas de alturas

Los **mapas de alturas** son imágenes aéreas georreferenciadas que permiten visualizar las elevaciones del territorio con gran detalle. Para descargar desde el PNOA:

1. Acceder a: <https://pnoa.ign.es/web/portal/pnoa-lidar/productos-a-descarga>.
2. Seleccionar el nivel de cobertura deseado dentro de los Modelos Digitales del Terreno disponibles (ej. MDT25).
3. Seleccionar el municipio de Villaviciosa (Asturias) y las ortofotos más recientes (2023).
4. Descargar todos los elementos de la lista haciendo clic sobre el icono de “descarga”.

Municipio: Villaviciosa (Asturias) x	Nombre	Formato	Fecha	Resolución	MB	Acciones	Descarga
PNOA-MDT25-ETRS89-HU30-0014-LID.TIF	COG	2012	Resolución 25 M	1.60			
PNOA-MDT25-ETRS89-HU30-0015-LID.TIF	COG	2012	Resolución 25 M	0.69			
PNOA-MDT25-ETRS89-HU30-0029-LID.TIF	COG	2012	Resolución 25 M	3.34			
PNOA-MDT25-ETRS89-HU30-0030-LID.TIF	COG	2012	Resolución 25 M	3.32			

Figura 8 - Descarga de MDT25 del PNOA a través del CNIG

5. Cada uno de estos elementos cubre un área de la zona de Villaviciosa con un detalle de 25 m de resolución.
6. Para cargar estas capas de información en QGIS, simplemente basta con arrastrar los ficheros descargados al recuadro de "Capas" de QGIS.

2.2.1.3. CÓMO HACER UN GEMELO DIGITAL DE UNA ZONA DE PASTOREO

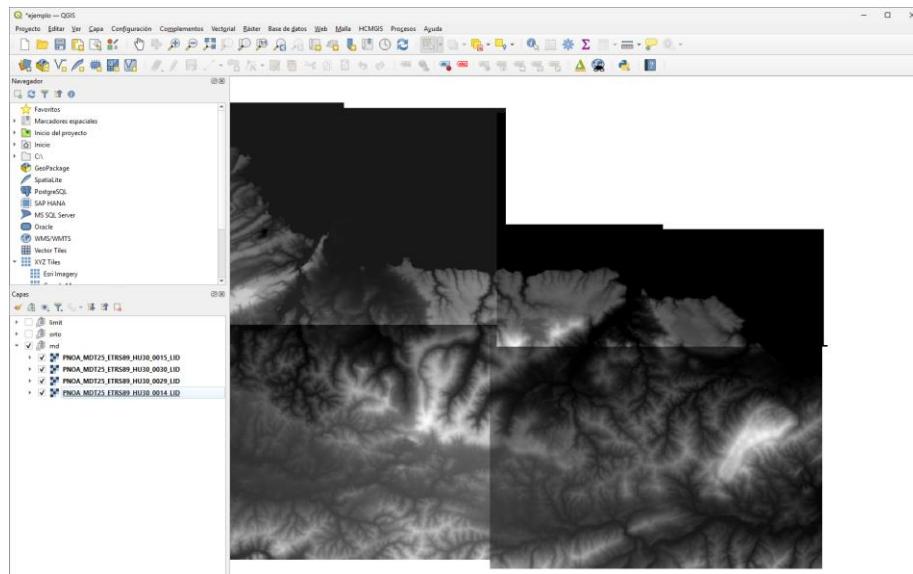


Figura 9 - Mapas de alturas (MDT25) cargados en QGIS

7. De manera adicional, es recomendable crear un grupo contenedor con un nombre representativo para incluir todas las ortofotos que compongan el mapa.
8. Una vez cargadas todas las capas de información, se puede observar que la transición entre las mismas no parece adecuada, pues se ven los límites entre ellas. Esto se debe a los diferentes límites de altura que tiene cada imagen, y es posible solventarlo combinando los múltiples mapas en uno único de la siguiente manera:
 - a. Seleccionar la opción del menú superior *Raster > Miscelánea > Combinar*.
 - b. Seleccionar todas las capas de información *PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_X_LID* y ejecutar el comando.

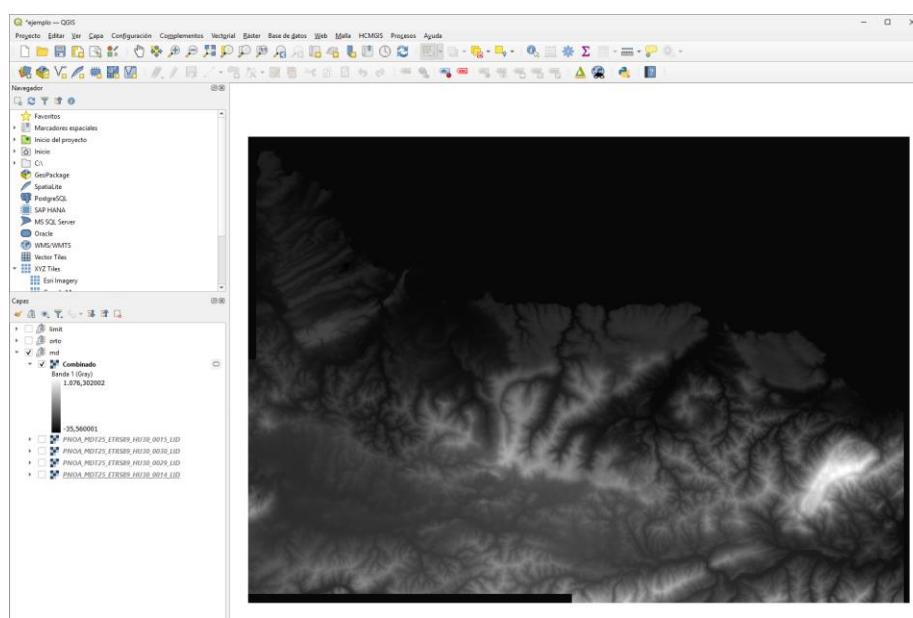


Figura 10 - Mapa de alturas combinado en QGIS



- c. El resultado se encontrará en la capa “Combinado”. Se debe recordar exportar esta nueva capa como un archivo nuevo, ya que durante la creación el archivo es solo temporal.

4.2. Obtención del modelo 3D con QGIS-2-threejs

Qgis2threejs es un complemento de QGIS que permite generar modelos 3D interactivos a partir de datos GIS y exportarlos en formato glTF.

Es posible descargar este complemento desde el siguiente enlace, e instalarlo desde la opción del menú superior de QGIS *Complementos > Administrar e instalar complementos*:

→ <https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs/>

Continuando con el ejemplo de Villaviciosa, los pasos para generar el modelo 3D del terreno son los siguientes:

1. Antes de acceder al editor 3D, se deben ocultar todas las capas que no vayan a visualizarse como "textura" en el modelo. En este caso, solo se deben mantener activas las ortofotos.

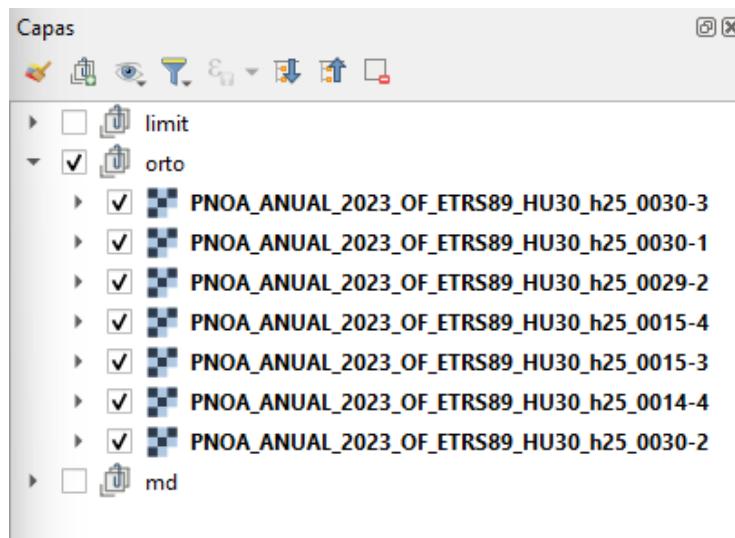


Figura 11 - Configuración de capas visibles en QGIS para generar el glTF

2. Acceder al editor de Qgis2threejs (acceso directo desde el segundo nivel de la barra superior de herramientas).
3. En el editor, activar la capa "Combinado" que contiene tanto la información de alturas como de color del modelo.

2.2.1.3. CÓMO HACER UN GEMELO DIGITAL DE UNA ZONA DE PASTOREO

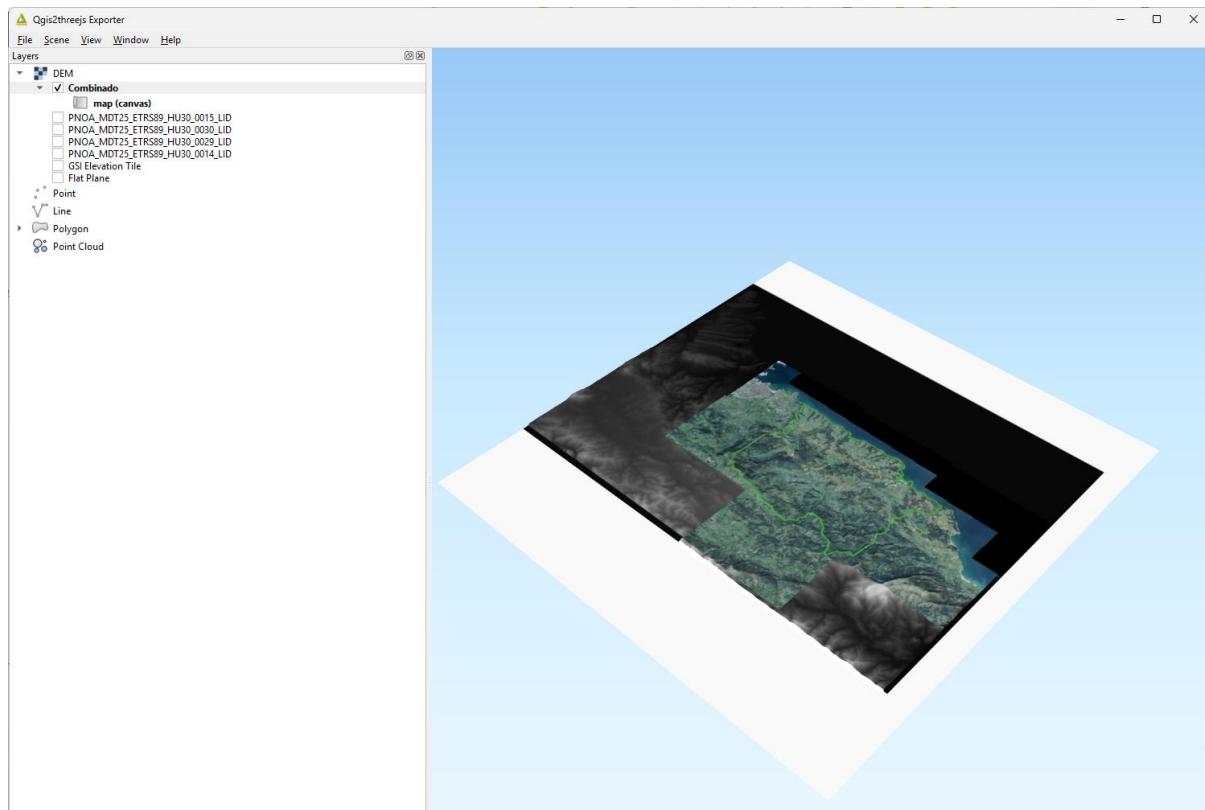


Figura 12 - Capa combinada en el editor de Qgis2threejs

4. Limitar la zona al recinto definido por los límites haciendo clic derecho sobre la capa "Combinado" > "Properties":
 - a. Activar la opción de "Clip DEM with polygon".
 - b. Seleccionar el recinto.
 - c. Definir la resolución deseada para el mapa en el campo "Image width".

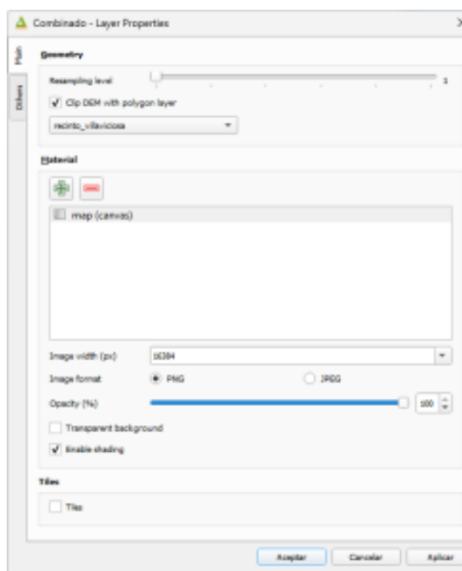


Figura 13 - Propiedades de la capa “Combinado” en QGIS

5. Exportar el modelo desde el menú superior “File” > “Save Scene As” > “glTF”.

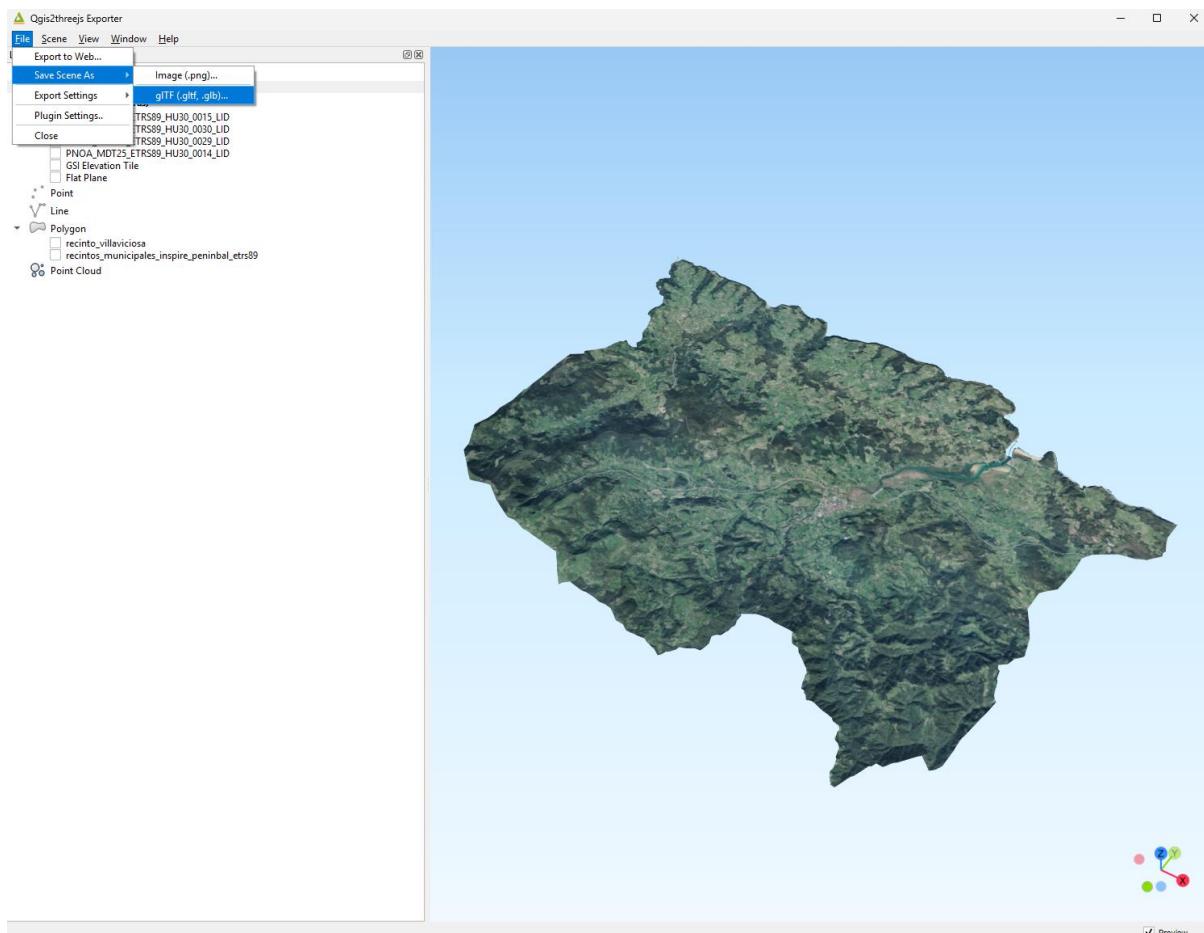


Figura 14 - Menú de exportación del glTF desde el editor Qgis2threejs

4.3. Postprocesado en Blender

Una vez obtenido el modelo en formato glTF, se recomienda importarlo en algún programa de modelado 3D (por ejemplo, Blender) para comenzar con el proceso de limpieza.

Optimización de la malla

Típicamente, los modelos generados a partir de GIS pueden presentar una disposición poco optimizada de los vértices. Se recomienda:

1. Realizar un ajuste manual en los bordes de la malla para mejorar su topología, eliminar vértices duplicados y desniveles.
2. Aplicar el modificador "Decimate" de Blender para reducir la cantidad de polígonos sin perder calidad en el modelo.
3. Eliminar vértices innecesarios para mejorar el rendimiento del modelo.

2.2.1.3. CÓMO HACER UN GEMELO DIGITAL DE UNA ZONA DE PASTOREO

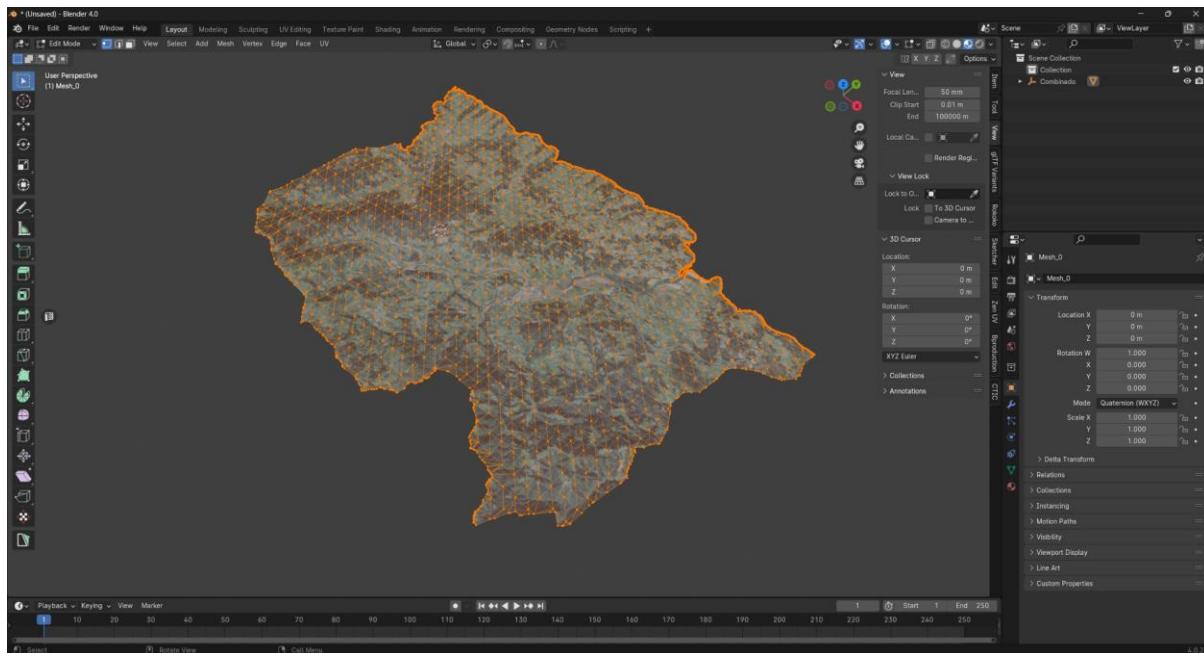


Figura 15 - Modelo glTF del terreno importado en Blender

Aumento de resolución de la textura

Para mejorar la calidad de la textura del modelo del terreno se deben realizar las siguientes acciones:

1. Volver a QGIS y exportar la ortofoto con mayor resolución.
 - a. Antes de acceder al menú de exportación, es necesario asegurarse de ocultar todas las capas que no vayan a intervenir como "textura" en el modelo. En este caso, se mantendrán activas únicamente las ortofotos.

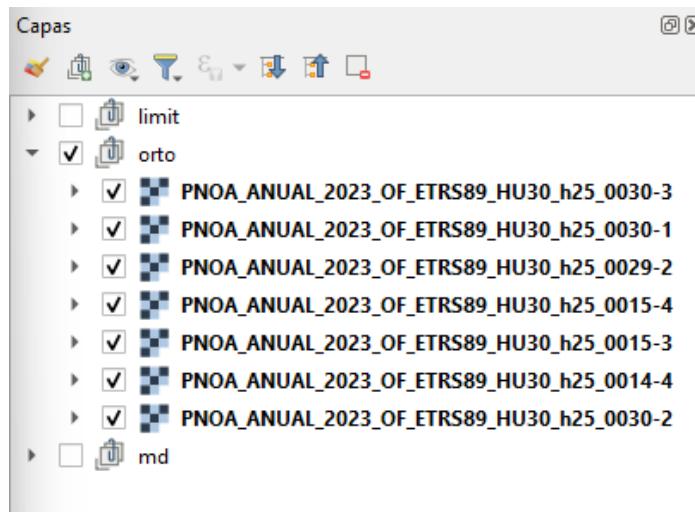


Figura 16 - Configuración de capas visibles en QGIS para generar la textura

- b. Seleccionar la opción del menú superior “Proyecto” > “Importar/Exportar” > “Exportar mapa a imagen”.

2.2.1.3. CÓMO HACER UN GEMELO DIGITAL DE UNA ZONA DE PASTOREO



- c. Elegir “Calcular a partir de Capa” para seleccionar el recinto y especificar la resolución deseada.

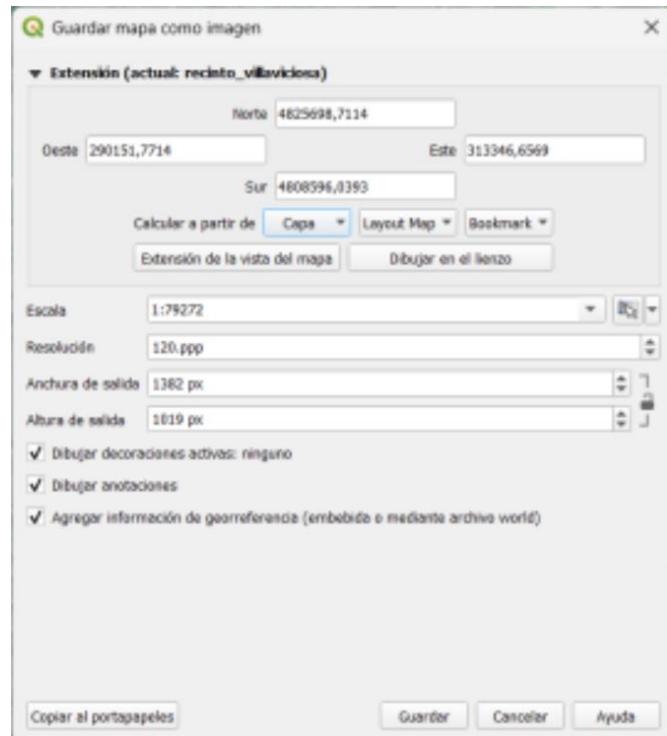


Figura 17 - Menú “guardar mapa como imagen” de QGIS

- d. Guardar el archivo con formato “.png”.

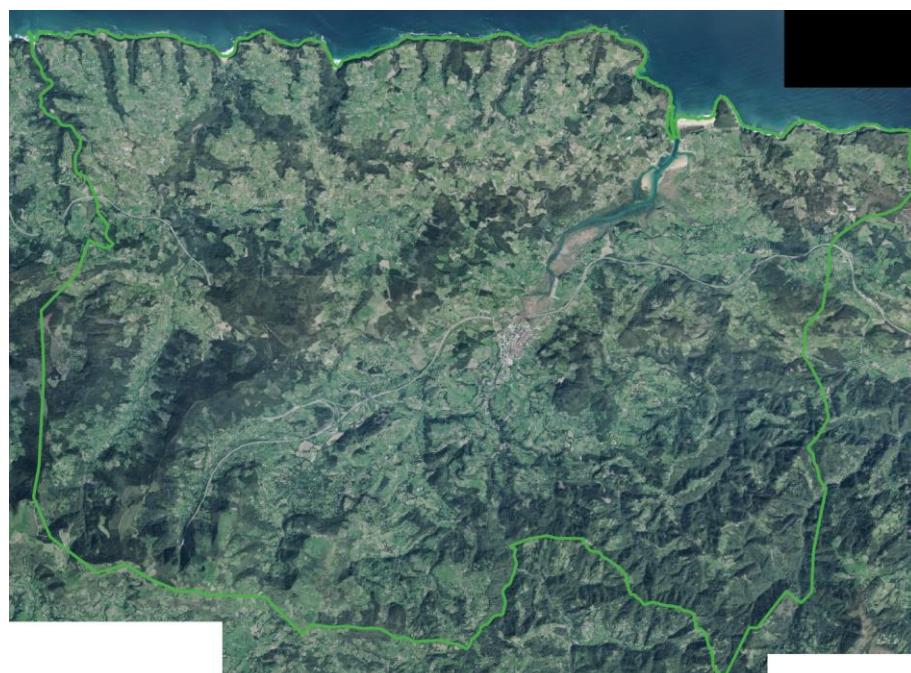


Figura 18 - Textura exportada desde QGIS



2. Pasar el archivo generado por un programa optimizador de imágenes de (por ejemplo, Riot, que se puede encontrar en el siguiente enlace) para reducir en gran medida el tamaño del archivo gráfico.
 - a. Software Riot: <https://riot-optimizer.com/>
3. Importar la nueva imagen optimizada como textura en Blender.
4. Ajustar las UVs del modelo 3D cuando sea necesario para que coincidan con el nuevo mapa de texturas.

Tras la optimización y mejora de la textura, el modelo 3D estará listo para ser utilizado en la plataforma.



5. Conclusiones

La experiencia acumulada en los gemelos digitales de Somiedo y Vilamòs ha permitido definir una metodología completa y replicable para la creación de modelos 3D interactivos de zonas de pastoreo extensivo, integrando de forma coherente datos geoespaciales abiertos, seguimiento ganadero y análisis avanzado del terreno. El uso de QGIS para la preparación de datos, combinado con procesos de postprocesado 3D, una base de datos relacional escalable y una plataforma de visualización WebXR multidispositivo, configura un flujo de trabajo robusto que puede aplicarse a nuevos territorios manteniendo la misma arquitectura técnica.

Esta guía sistematiza dicho flujo en fases claramente diferenciadas, facilitando su adopción por equipos técnicos con perfiles diversos. La separación entre la capa de datos (base de datos y análisis GIS/satelital), la generación del modelo 3D y la capa de visualización interactiva ofrece, además, flexibilidad para evolucionar cada componente de forma independiente, incorporando nuevos proveedores de collares, nuevas capas ambientales o mejoras en la experiencia de usuario sin necesidad de rediseñar el sistema en su conjunto.

Los casos de uso identificados en los pilotos demuestran que el gemelo digital aporta valor tanto a la gestión operativa de rebaños comunales como a la evaluación de impactos ambientales y a la divulgación sobre la bioeconomía forestal en zonas de montaña. Replicar esta herramienta en otros territorios de pastoreo extensivo, siguiendo los pasos aquí descritos, permite avanzar hacia modelos de gestión más informados, transparentes y participativos, apoyados en datos objetivos y en visualizaciones accesibles para pastores, gestores y ciudadanía.



6. Referencias bibliográficas

Fuentes de datos geoespaciales:

- Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Portal de descargas:
 - <https://centrodedescargas.cnig.es>
 - Acceso a PNOA ortofotos, MDS02 alturas, límites administrativos/municipales.
- Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Ortoimágenes históricas:
 - <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/ortofotos-historicas-pnoa>
 - Resolución 0.25m.
- Sentinel-2 / Copernicus (Comisión Europea): <https://www.copernicus.eu/es>
 - Mosaicos multiespectrales: Copernicus Open Access Hub (procesado vía Google Earth Engine)
 - Bandas espectrales, NDVI.
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Cubiertas de usos del suelo 2019-2022: <https://www.icgc.cat>
 - SIGPAC, Corine Land Cover.
- LULUCF (Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura):
 - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Directrices para la elaboración de los informes nacionales de inventario de gases de efecto invernadero (2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volumen 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use - AFOLU). Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), 2006.
 - <https://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>

Herramientas y software:

- QGIS. Software SIG libre:
 - <https://qgis.org>
 - Procesamiento rasters geoespaciales, geoetiquetado.
- Qgis2threejs. Plugin QGIS para exportar glTF:
 - <https://plugins.qgis.org/plugins/Qgis2threejs>
 - Generación de modelos 3D de territorio.
- Blender. Modelado 3D:
 - <https://www.blender.org>



- Optimización de mallas, extracción de heightmaps.
- Supabase. Base de datos en tiempo real:
 - <https://supabase.com>
 - Almacenamiento de registros de collares geolocalizados de ganado.
- Google Earth Engine. Plataforma análisis satelital:
 - <https://earthengine.google.com>
 - Adquisición de recursos Sentinel.
- WebXR. Estándar de renderizado inmersivo a través de la web:
 - <https://immersive-web.github.io/webxr-samples>
 - Presentación en Realidad Virtual de la plataforma de visualización.
- Three.js. Librería de renderizado 3D WebGL:
 - <https://threejs.org>
 - Motor gráfico de la plataforma de visualización.
- Docker Compose. Orquestación del despliegue:
 - <https://docs.docker.com/compose>
 - Servicios frontend/backend de la plataforma.
- Riot. Optimizador de imágenes:
 - <https://riot-optimizer.com/>
 - Optimización y compresión de textura (ortofotografía).

Proveedores de collares de ganado geolocalizados:

- Nofence. Vallado virtual.
 - <https://nofence.com>
- Digitanimal. Geolocalización.
 - <https://digitanimal.com/>
- Innogando. Geolocalización.
 - <https://innogando.com/>
- Ixorigue. Geolocalización.
 - <https://ixorigue.com/es>