



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Informática
Mención en Tecnologías de la Información

**Comparación de visores de datos geográficos sobre
plataformas comercial y open source**

Autor:
Álvaro García Sanabria



Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Informática
Mención en Tecnologías de la Información

**Comparación de visores de datos geográficos sobre
plataformas comercial y open source**

Autor:
Álvaro García Sanabria

Tutor:
Julián Arroyo Álvarez

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) compara diversos aspectos técnicos y económicos de la plataforma comercial de visualización de datos geográficos ArcGIS, con otra plataforma diseñada por este alumno para este TFG empleando elementos software de código abierto, con la que se pueden generar y consultar mapas cartográficos accediendo a través de Internet, así como obtener rutas en base a la información de las redes de vías públicas y ver las rutas recabadas dibujadas sobre el mapa.

Página intencionalmente en blanco

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Motivación	1
1.3. Metodología	1
1.4. Visión general del TFG	2
2. Conceptos ajenos a la Informática de especial interés	3
2.1. Información geográfica	3
2.2. Sistema de Información Geográfica (SIG/GIS)	3
2.2.1. Tipos de informaciones geográficas que manejan	3
2.3. Intervinientes en la representación de información	4
2.4. Referencias del registro EPSG	4
3. Diseño de la solución propuesta y alternativas valoradas	5
3.1. Listado de requisitos	5
3.2. Arquitectura de la solución propuesta	6
3.2.1. Generación de mapas cartográficos: MapServer	6
3.2.2. Sistema operativo: Ubuntu Server 24.04 LTS	11
3.2.3. Aislamiento mediante contenedorización: Docker	12
3.2.4. Geocodificación: Nominatim	14
3.2.5. Motor de rutas: Valhalla	16
3.2.6. Cliente web ligero: Leaflet y React	17
3.2.7. Sistema de información geográfica de escritorio: QGIS LTR	18
3.3. Gestión de datos y servicios	19
4. Prototipado del diseño	21
4.1. Obtención y despliegue del software	21
4.1.1. Ubuntu	21
4.1.2. Docker	22
4.1.3. Contenedor de generación y publicación de mapas	22
4.1.4. Contenedor de bases de datos: PostgreSQL y PostGIS	22
4.1.5. Contenedor de búsqueda de lugares: Nominatim	22
4.1.6. Contenedor de trazado de rutas: Valhalla	22
4.1.7. Contenedor del cliente web ligero	23
4.1.8. QGIS LTR	23
4.2. Configuración y ajustes	23
4.2.1. Comunes a todos los contenedores	23
4.2.2. Apache	24

4.2.3.	MapServer	25
4.2.4.	PostgreSQL	25
4.2.5.	MapCache	26
4.2.6.	Nominatim	33
4.2.7.	Valhalla	34
4.2.8.	Cliente web ligero	34
4.3.	Verificación de rendimiento	35
4.3.1.	Modelado de la carga	35
4.3.2.	Modelado y ejecución de una batería de pruebas de rendimiento	36
5.	Análisis de costes	41
5.1.	Tiempo de operación a presupuestar	41
5.2.	Importe del software de ArcGIS	41
5.2.1.	Esquema de licencias	41
5.2.2.	Otros elementos software de ArcGIS	44
5.2.3.	Sondeo de importes de licencias	44
5.3.	Importe del software de la solución propuesta	44
5.4.	Requisitos mínimos	45
5.4.1.	ArcGIS	45
5.4.2.	Requisitos mínimos de la solución diseñada	46
5.4.3.	Espacio de almacenamiento necesario	47
5.5.	Presupuestos de despliegue y operación	48
5.5.1.	Desplegando en infraestructura propia	48
5.5.2.	Desplegando en la nube	48
5.5.3.	Presupuesto de uso de ArcGIS Online	54
5.6.	Presupuesto de costes humanos futuros	55
5.7.	Revisión de supuestos costes del TFG	56
6.	Comparación de aspectos técnicos de las plataformas involucradas	59
6.1.	Licencia de uso	59
6.2.	Soporte	60
6.3.	Sistemas operativos compatibles	60
6.4.	Métodos de persistencia	61
6.4.1.	Formatos de archivo soportados	61
6.4.2.	Otros métodos soportados	64
6.5.	Protocolos, estándares y normas implementadas	66
6.5.1.	Relativos al cumplimiento de normas y mejores prácticas	66
6.5.2.	Relativos al tratamiento de información geográfica	68
6.6.	Capacidades aportadas	72
6.6.1.	Software de escritorio	72
6.6.2.	Software de servidor	81
6.7.	Dificultad al uso	82
6.7.1.	Localización	82
6.7.2.	Antipatrones y patrones oscuros de diseño	83
6.8.	Diferencias de paradigma	83
7.	Conclusiones	85
7.1.	Recapitulación	85

7.2. Líneas de trabajo futuro	85
A. Datos de mediciones realizadas	I
A.1. Pruebas de MapCache	I
A.1.1. Relación de ajustes de formatos de archivo creados	I
A.1.2. Resultados de la primera fase de pruebas del semillado	III
A.1.3. Resultados de la segunda fase de pruebas del semillado	VII
A.2. Pruebas de carga con JMeter	X
A.2.1. Resultados de las pruebas con 40 hilos	X
A.2.2. Resultados de las pruebas con 50 hilos	XI
A.2.3. Resultados de las pruebas con 60 hilos	XII
B. Relaciones de formatos de archivos compatibles	XIII
B.1. QGIS/GDAL	XIII
B.1.1. Ráster	XIII
B.1.2. Vectorial	XIX
B.2. ArcGIS	XXIII

Índice de cuadros

3.1. Relación de requisitos del sistema a diseñar.	5
4.1. Formatos de imagen candidatos tras el descarte inicial.	30
4.2. Configuraciones consideradas idóneas para los formatos PNG y JPEG.	32
4.3. Parámetros usados para limitar las zonas semilladas en la copia caché.	32
4.4. Relación, para cada actividad con cargas a modelar, de servicios usados y de máximos del número de peticiones HTTP emitidas a estos y del tráfico de red necesario para satisfacerlas.	37
4.5. Estadísticas de carga de CPU soportada por una máquina virtual con el prototipo en ejecución durante pruebas de carga con JMeter con distintos números de usuarios simulados.	38
5.1. Importes estimados y recabados para licenciar ArcGIS Enterprise, Online y Pro	45
5.2. Requisitos mínimos del sistema para ArcGIS Pro	46
5.3. Requisitos mínimos para ArcGIS Enterprise	46
5.4. Requisitos mínimos del sistema para la solución propuesta y prototipada.	46
5.5. Tamaños, en GB, estimados y recabados para diversos elementos geográficos necesarios en el funcionamiento del sistema prototipado, junto a las áreas aproximadas que abarcan y las teselas que conllevan para la realización de cálculos.	47
5.6. Tamaños, en GB, usados por cada 1.000 kilómetros cuadrados de mapa generado, para cada combinación de tipo de mapa y formato de archivo.	47
5.7. Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en infraestructura propia para un tiempo de operación de 5 años.	49
5.8. Presupuesto para un despliegue de la solución diseñada en infraestructura propia para un tiempo de operación de 5 años.	49
5.9. Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en Amazon AWS (EC2/EBS) para un tiempo de operación de 5 años	50
5.10. Presupuesto para un despliegue de la solución propuesta en Amazon AWS (EC2/EBS) para un tiempo de operación de 5 años	50
5.11. Presupuesto para el alojamiento de teselas generables con la solución propuesta en Amazon AWS (EC2/EBS) para un tiempo de operación de 5 años	51
5.12. Costes de alojar teselas de mapa en Amazon S3 por cada 1.000 kilómetros cuadrados plenamente cubiertos, formato de imagen y estereotipo de mapa creado.	51
5.13. Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en GCP para un tiempo de operación de 5 años	52
5.14. Presupuesto para un despliegue de la solución propuesta en GCP para un tiempo de operación de 5 años	52

5.15. Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en Azure para un tiempo de operación de 5 años	53
5.16. Presupuesto para un despliegue de la solución propuesta en Azure para un tiempo de operación de 5 años	53
5.17. Presupuesto para despliegues en Azure por 5 años: Precios de elementos adicionales de interés	54
5.18. Presupuesto para el uso de ArcGIS Online por 5 años	54
5.19. Importes asociados a actividades que consumen créditos de ArcGIS.	55
5.20. Presupuesto para el despliegue y mantenimiento del sistema, a 5 años.	56
5.21. Relación de supuestos costes del proyecto de este TFG	57
6.1. Formatos de archivo auxiliares usados por QGIS.	63
6.2. Implementación de las codificaciones revisadas en las plataformas comparadas. . .	71
6.3. Implementación de los servicios web revisados en las plataformas comparadas. . .	73
A.1. Configuraciones probadas en MapCache para formatos basados en JPEG.	I
A.2. Configuraciones probadas en MapCache para formatos basados en PNG.	III
A.3. Estadísticas de la ejecución de pruebas de carga con JMeter usando 40 hilos . . .	X
A.4. Estadísticas de la ejecución de pruebas de carga con JMeter usando 50 hilos . . .	XI
A.5. Estadísticas de la ejecución de pruebas de carga con JMeter usando 60 hilos . . .	XII
B.1. Mecanismos de almacenamiento de información ráster implementados en GDAL .	XIII
B.2. Mecanismos de almacenamiento de informaciones vectoriales implementados en GDAL	XIX
B.3. Formatos de archivo admitidos por ArcGIS Pro	XXIII

Índice de figuras

3.1.	Diagrama de la arquitectura propuesta como solución de código abierto.	7
3.2.	Ruta dada por Google Maps para el trayecto Calabor-Alcañices sin restricciones .	9
3.3.	Ruta dada por Google Maps para el trayecto Calabor-Alcañices por Castilla y León	9
3.4.	Dominios de la ISO 25010 para la calidad del software y los sistemas informáticos	14
6.1.	Diagrama de la arquitectura de estándares mantenidos por el OGC.	69
A.1.	Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA.	III
A.2.	Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA, excluyendo el metateselado 1x1.	IV
A.3.	Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA y metateselado 15x15, elegido.	IV
A.4.	Gráfica de tamaño final del archivo SQLite que guarda las teselas generadas por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA y metateselado 15x15, elegido.	V
A.5.	Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM.	V
A.6.	Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM, excluyendo el metateselado 1x1.	VI
A.7.	Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM y metateselado 15x15, elegido.	VI
A.8.	Gráfica de tamaño final del archivo SQLite que guarda las teselas generadas por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM y metateselado 15x15, elegido.	VII
A.9.	Gráfica de tiempos medios por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos del PNOA.	VII
A.10.	Gráfica de tamaños medios de los archivos SQLite que guardan las teselas generadas por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos del PNOA.	VIII
A.11.	Gráfica de tiempos medios por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos de OSM.	VIII
A.12.	Gráfica de tamaños medios de los archivos SQLite que guardan las teselas generadas por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos de OSM. .	IX

Capítulo 1

Introducción

En este primer capítulo se responden a las incógnitas básicas aún sin respuesta que, como con todo Trabajo Fin de Grado (TFG), rodean a la realización de éste: qué se pretende conseguir, cómo se va a llevar a cabo el TFG y por qué se elige éste en detrimento de otras posibilidades; y también se aporta al lector una idea global del contenido de este TFG.

1.1. Objetivos

Para este TFG se dispone como objetivos, primero, construir, usando MapServer y otro software de código abierto, una plataforma de visualización interactiva de cartografía en la que se pueda llegar a incorporar información geográfica arbitraria y mediante la que poder recabar y visualizar, sobre las representaciones generadas, rutas; y segundo, tomando la suite software ArcGIS como elemento de contraste, compararlo con la plataforma creada.

1.2. Motivación

En cuanto a la razón principal para emprender este TFG radica en que la formación del Graduado en Ingeniería Informática ha de permitirle trabajar en contextos multidisciplinares, siendo una de las formas de incrementar los contextos a los que se puede acceder la participación en proyectos relacionados con otras áreas poco conocidas y distintas de la Informática.

Otra razón es que este tema, el del tratamiento de la información geográfica, no ha sido objeto de estudio durante el Grado, ya que es una muy especial variante del tratamiento de la información, convirtiéndolo en una oportunidad de aprender más sobre la materia.

1.3. Metodología

En la realización de este TFG se distinguen las siguientes etapas:

1. Diseño y creación del prototipo de plataforma basada en código abierto definido en los objetivos que soluciona el trazado de rutas.
2. Verificación del prototipo.
3. Determinación de necesidades hardware de cada sistema.
4. Determinación de los costes en los que se incurren con cada sistema.
5. Comparación técnica de ambos sistemas.

1.4. Visión general del TFG

Esta obra se estructura por capítulos, cada uno tratando cuestiones determinadas describiéndose a continuación:

- **Capítulo 1: Introducción**, que expone objetivos, metodología, los elementos subjetivos que conforman la motivación, y esta visión general del TFG.
- **Capítulo 2: Conceptos ajenos a la Informática de especial interés**, que define determinados conceptos de otras ciencias considerados muy convenientes o necesarios para entender este TFG.
- **Capítulo 3: Diseño de la solución propuesta y alternativas valoradas**, que explora las diferentes opciones abordadas y las elecciones realizadas al plantear el prototipo creado.
- **Capítulo 4: Prototipado del diseño**, que revisa las diferentes acciones técnicas necesarias para obtener un prototipo funcional.
- **Capítulo 5: Análisis de costes**, que contempla monetariamente las necesidades hardware, software y de horas de trabajo.
- **Capítulo 6: Comparación de aspectos técnicos de las plataformas involucradas**, que examina determinadas características de las plataformas indicadas en los objetivos.
- **Capítulo 7: Conclusiones**, que recoge la síntesis de los resultados adquiridos con este TFG.

Capítulo 2

Conceptos ajenos a la Informática de especial interés

Dado que este Trabajo Fin de Grado (TFG) trata, además de las cuestiones propias de la Ingeniería Informática en las que ha de adentrarse, conceptos que son más manejados por otros campos como son las Ingenierías Geomática, Topográfica o de la Geoinformación, así como por la Geografía, es conveniente facilitar el entendimiento de tales conceptos relativamente extraños a la Informática para facilitar la comprensión de esta Memoria, lo que se aborda a lo largo del presente capítulo.

2.1. Información geográfica

La **información geográfica** abarca *cualquier conjunto de datos que dispone de las referencias o elementos suficientes para situarla en una región o lugar específica del espacio, de dimensiones indefinidas* [1]. También se la denomina con otros nombres relativamente intercambiables entre sí [2], [3], [4], como **datos geográficos**, **geodatos**, **datos o informaciones geoespaciales** o **datos o informaciones con referencias espaciales** o **georreferenciadas**.

2.2. Sistema de Información Geográfica (SIG/GIS)

Un **Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS¹)** es el *conjunto de elementos físicos y lógicos junto a los procedimientos diseñados para capturar, gestionar, modelar, procesar, analizar y presentar datos con referencias espaciales de forma que puedan usarse para solucionar problemas complejos de gestión y planificación* [5].

2.2.1. Tipos de informaciones geográficas que manejan

Los SIG tratan la información geográfica abstrayéndola a dos categorías de datos: datos vectoriales y datos ráster [6].

Por un lado, los **datos vectoriales**, compuestos principalmente por puntos, líneas y polígonos, sitúan lugares usando una o varias posiciones precisas, expresadas mediante sistemas de referencia de coordenadas concretos. Adicionalmente, estos se complementan con cuantos atributos se consideren relevantes.

¹Por sus siglas en inglés.

Por otro lado, los **datos ráster** indican medidas recabadas de magnitudes arbitrarias para la totalidad de una región dada, mediante la división de dicha región en una cuadrícula discreta, en la que cada cuadro almacena únicamente el valor medido en ese espacio.

2.3. Intervenientes en la representación de información

A la hora de representar informaciones geográficas, hay varios conceptos estrechamente relacionados entre sí, necesarios para poder entender cómo se puede disponer en una misma representación casi cualquier combinación de conjuntos de datos geográficos que se dispongan y cuyo entendimiento es importante ya que los abusos del lenguaje que con frecuencia se producen en torno a ellos tienen a llevar a errores de concepto en quienes no han conocido sus definiciones formales. Estos son:

1. **Geoide**: Modelo que abstrae la forma de la Tierra en base a mediciones de la densidad del campo gravitatorio del planeta en cada lugar de su superficie, por lo que su forma es irregular y tiene una excesiva complejidad matemática [7].
2. **Elipsoide**: Figura geométrica tridimensional relativamente simple definida por tres ejes que permite modelar aproximaciones precisas al anterior geoide para la totalidad o para partes de su superficie, abstrayéndolo de nuevo, por lo que se usa como elemento de partida para mediciones y representaciones de datos geográficos [7].
3. **Datum**: Conjunto discreto de puntos de referencia sobre un elipsoide dado y su relativa equivalencia a puntos de la superficie terrestre real, mediante los cuales se pueden abstraer y situar datos geográficos en el modelo matemático del elipsoide anterior [7], [8].
4. **Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC o CRS²)**: Elemento auxiliar al datum anterior que establece un origen de coordenadas fijo y medidas a intervalos regulares en la superficie del elipsoide usado, facilitando la búsqueda y ubicación de puntos en él [9].
5. **Proyección**: Aplicación lineal matemática mediante la que se transforman puntos dados de elipsoides determinados a puntos de un plano bidimensional, permitiendo la representación de informaciones geográficas de todo tipo en pantallas planas o papel [10].
6. **Transformación**: Aplicación lineal matemática mediante la que se convierten las coordenadas entre dos CRS dados, con independencia de que refieran al mismo o a distinto datum [11].

2.4. Referencias del registro EPSG

El uso de **referencias del registro del Grupo de Sondeo del Petróleo Europeo** (EPSG, por sus siglas en inglés) es *de facto* el estándar para referir a un gran número de elementos cartográficos básicos de uso común de forma unívoca e inequívoca, ya que este registro incluye una relación de, entre otros, elipsoides, datums, SRC y unidades de medida en la que todos los elementos constan de un código numérico que los identifica de forma única [12], por lo que suele usarse en y entre los diversos SIG.

²Por sus siglas en inglés.

Capítulo 3

Diseño de la solución propuesta y alternativas valoradas

En este capítulo se disponen los requisitos que ha de satisfacer el diseño y se revisa la arquitectura software elegida como producto del proceso de diseño, así como los motivos de su elección y las otras alternativas revisadas durante tal proceso, siguiéndose un orden similar al que pudiera tener el proceso de despliegue del software para los elementos no fijados en los requisitos.

3.1. Listado de requisitos

En el cuadro 3.1 se disponen los requisitos que ha de cumplir el sistema a diseñar.

Número	Descripción
1	El sistema deberá ser capaz de generar mapas cartográficos personalizados en base a datos geográficos de una o varias fuentes por mapa.
2	El sistema deberá permitir la consulta de los mapas cartográficos generados a través de la web.
3	El sistema deberá ser capaz de ubicar calles en los mapas generados por el nombre de la vía correspondiente.
4	El sistema deberá ser capaz de ubicar poblaciones en los mapas generados por el nombre del municipio correspondiente.
5	El sistema deberá ser capaz de calcular una ruta para un origen, destino y tipo de desplazamiento (a pie o en vehículo) dados en base a la información de vías que disponga.
6	El sistema deberá permitir la consulta y localización de calles y poblaciones por varios usuarios, incluso de forma simultánea.
7	El sistema deberá ser capaz de soportar un volumen de peticiones (de consultas de mapa, búsquedas o trazados de ruta) con una media de 1 por segundo y picos acotados superiormente en 3 por segundo por periodos de 1 segundo con una frecuencia semanal.
8	El sistema deberá usar MapServer para la generación de mapas y componentes de código abierto para el resto de tareas.

Cuadro 3.1: Relación de requisitos del sistema a diseñar.

3.2. Arquitectura de la solución propuesta

Terminada la acción de diseño, se propone como solución el empleo de un servidor con sistema operativo Linux usando la distribución *Ubuntu Server 24.04 LTS “Noble Numbat”* sobre la que disponer el sistema de contenedores *Docker* y a través del cual desplegar y ejecutar los diversos softwares que proveen los servicios necesarios para dar respuesta a las exigencias dispuestas en los requisitos: *Apache*, *MapServer*, *MapCache*, *Node.js*, *PostgreSQL*, *Valhalla* y *Nominatim*.

Para la adecuada operación de los servicios indicados se hace necesario usar también otros *scripts* y programas adicionales (*basemaps* e *imposm3*) en momentos puntuales para asistir o realizar tareas de configuración o importación de datos, cuyo uso puede realizarse, con los ajustes adecuados, tanto desde algún contenedor como directamente desde el sistema operativo sin involucrar a contenedor alguno o incluso desde otras máquinas; eligiéndose dejar estos fuera de los contenedores desplegados para limitar las responsabilidades de estos y reducir los pasos que involucran ejecuciones manuales de programas en ellos.

Aunque los elementos señalados hasta este punto aportan los servicios necesarios para proveer las funcionalidades de generación de mapas y trazado de rutas requeridas, se precisa añadir algún cliente que aporte significatividad a las respuestas de los diversos servicios ya que se obtienen codificadas en lenguajes no naturales¹ o son archivos de imagen con teselas de los mapas generados, sin indicación alguna de cómo acceder a las adyacentes o con mayor o menor escala². Para dar respuesta a estas cuestiones, se seleccionó el uso del cliente web de mapas *Leaflet* junto a una capa de interactividad añadida mediante *React*, combinación que permite, en cualquier navegador web relativamente moderno de uso común sin importar el sistema operativo en uso, mostrar adecuadamente los mapas creados por este sistema mediante el uso de un sistema de particiones denominadas teselas previamente generadas ocultando la teselación aplicada y dibujar sobre estas las rutas solicitadas.

Finalmente, se considera también adecuado abordar qué alternativa de código abierto proveer en sustitución del Sistema de Información Geográfica (SIG) de escritorio ArcGIS Pro incluido en la plataforma comercial. Para ello, se propone el uso de la aplicación SIG de escritorio *QGIS en su edición LTR* (Long Term Release), sin pronunciamiento sobre qué sistema operativo se ha de usar, evitando introducir cambios mayores en los equipos de cualesquiera usuarios.

Todo ello puede verse de manera más gráfica en el diagrama de la figura 3.1 expuesta más adelante.

3.2.1. Generación de mapas cartográficos: MapServer

Dado que, con arreglo a los requisitos, la generación de mapas en el sistema a proponer ha de realizarse necesariamente mediante MapServer, no procede considerar otras alternativas, sino que se procede directamente a elegir MapServer como el software para la tarea, constituyendo el punto de partida sobre el que articular el resto de la solución a proponer.

Teniendo en cuenta la centralidad de MapServer en el diseño a proponer, debe ahora prestarse especial atención a sus características más relevantes, en busca de la mayor sinergia con los otros componentes que se escojan y las configuraciones que se dispongan. En este sentido destacan:

- El uso de la biblioteca de código GDAL [13], para manejar una gran cantidad de métodos de almacenamiento distintos³.

¹Como, por ejemplo, XML, GML o JSON.

²Similares a las hojas de las series topográficas en papel del Instituto Geográfico Nacional, con parte del mapa por página debido al tamaño de la representación a escala.

³Para más información, consulte el apartado 6.4.1.2: “Plataforma de código abierto propuesta”.

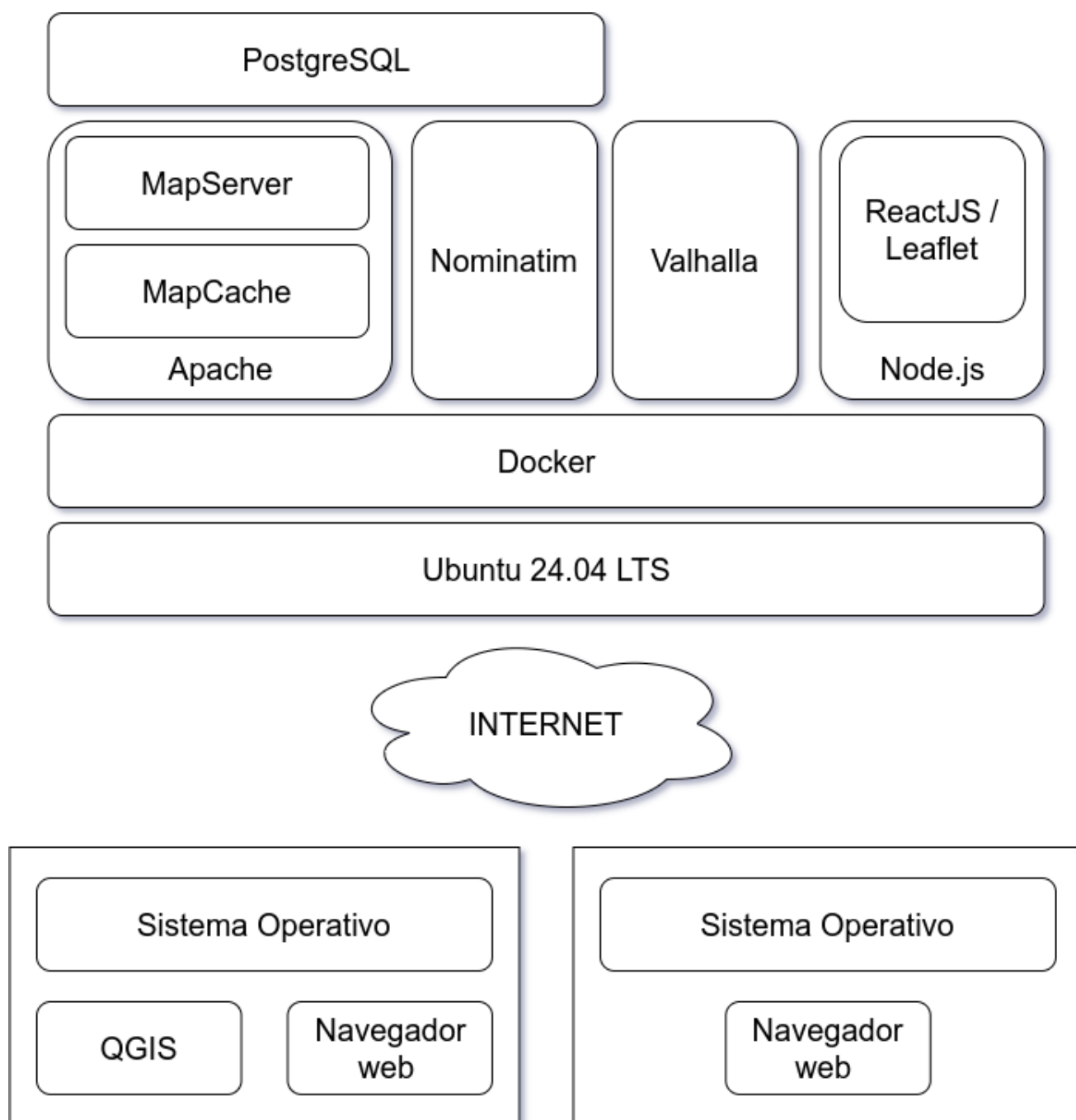


Figura 3.1: Diagrama de la arquitectura propuesta como solución de código abierto.

- La capacidad de publicar información geográfica y/o artefactos derivados (como archivos e imágenes) a través de diversos servicios estandarizados por el Open Geospatial Consortium (OGC)⁴: WMS [14], WFS [15], WCS [16] y API OGC [17].
- La posibilidad de usar fuentes de datos remotas publicadas mediante servicios OGC, constando en su documentación el modo de usarlo como un cliente nativo de servicios WMS [18] o WFS [19]; y mediante GDAL, como cliente de servicios CSW [20], WMTS [21], WCS [22],

⁴Para más información sobre estos servicios, consulte las descripciones disponibles en el apartado 6.5.2.3: “Estándares OGC relativos a servicios web”.

API OGC [23], [24], WMS [25] y WFS [26].

3.2.1.1. Dependencias: Apache y FastCGI

Consultada la documentación de instalación de MapServer [27], como éste en realidad es un ejecutable CGI⁵ resulta que puede usarse bajo cualquier sistema operativo pero requiere de un servidor web con capacidades CGI a través del cual usarlo, por lo que se incluye cómo disponerlo en un servidor web Apache activando el módulo FastCGI, razón por la que se incorporaron ambos elementos como parte de la solución propuesta. Resolverlo así hace que además sea la configuración recomendada por su fabricante y, en previsión de cuantas incidencias pudieran acontecer, es lo más deseable ya que de otra forma podría recibir un menor soporte, o de peor calidad.

3.2.1.2. Software adicional de mejora

Zanjados los elementos mínimos para una instalación de MapServer accesible a través de la web, surgen varias cuestiones adicionales directamente ligadas a éste que atender y que añaden elementos software adicionales al diseño, producto de buscar satisfacer no solo los meros requisitos sino también las expectativas en torno a la solución a aportar.

Contenido y calidad cartográfica: OpenStreetMap como fuente de datos

La primera de tales cuestiones deviene de los requisitos de poder generar mapas cartográficos y trazar rutas con orígenes y destinos en la comunidad autónoma de Castilla y León. Teniendo en cuenta la forma de las lindes de la Comunidad⁶ y sus enclaves⁷, así como las poblaciones cercanas a las lindes de la Comunidad entre las cuales la ruta más rápida es, como puede apreciarse comparando los ejemplos de las figuras 3.2 y 3.3 expuestas más adelante, con diferencia, a través de regiones colindantes, es necesario abarcarlas en la información geográfica que se maneje para dar respuestas adecuadas a estos casos cuando se presenten. Por ello, no se puede recurrir meramente a organismos de la Administración española, ya que no serían autoritativos por la incompetencia por razón de territorio sobre el que se sitúe en Portugal, y aunque se pudiera argumentar que transitar a través de Portugal implica el cruce de fronteras internacionales para excluir la captura e inclusión del trazado viario de este país, tal alegación tiene poco sentido ya que actualmente son pocos los controles fronterizos entre España y Portugal, fruto de la libertad de movimiento existente en la Unión Europea [28], [29], por lo que los retrasos por acceder a Portugal son básicamente inexistentes y por ende las rutas a su través han de ser objeto de consideración.

Así las cosas, queda establecida la necesidad de incluir, al menos, la información de las regiones colindantes con Castilla y León, sean de España o de Portugal. No obstante, obtenerla de los organismos correspondientes de ambos países conlleva el riesgo de obtener conjuntos de datos no reconciliables por falta de referencias compartidas, por lo que es preferible capturarla de otras entidades que aporten mejores garantías. Además, es recomendable usar los mismos datos para las diversas capacidades del sistema en diseño, a fin de evitar la divergencia de resultados. En este sentido conviene señalar que, como se menciona en los apartados correspondientes de este capítulo, resulta que la mayoría de los programas considerados para esta solución se han diseñado para usar la información geográfica mundial mantenida y distribuida al público gratuitamente por OpenStreetMap (OSM) [31], que también puede obtenerse por partes para recabar sólo aquellas

⁵Common Gateway Interface

⁶Véanse los de la provincia de Soria.

⁷En especial, el Condado de Treviño.

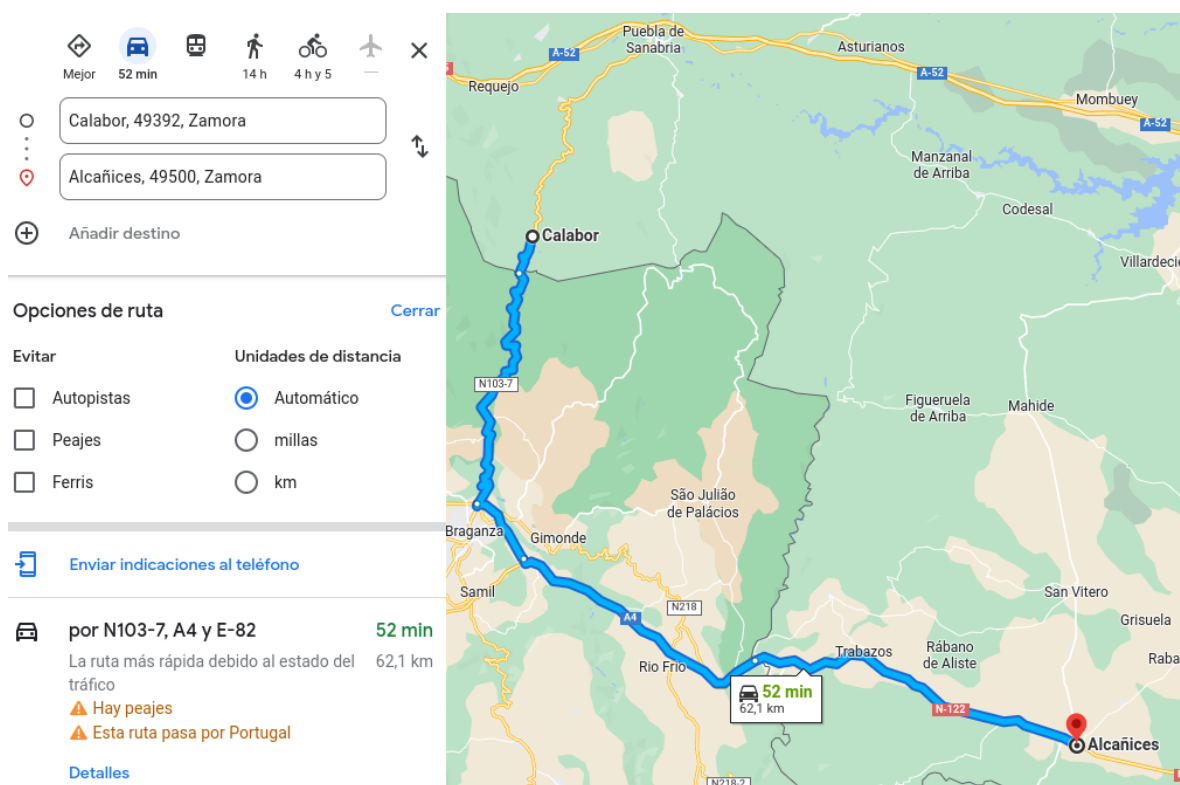


Figura 3.2: Ruta dada por Google Maps para el trayecto Calabor-Alcañices sin restricciones [30].

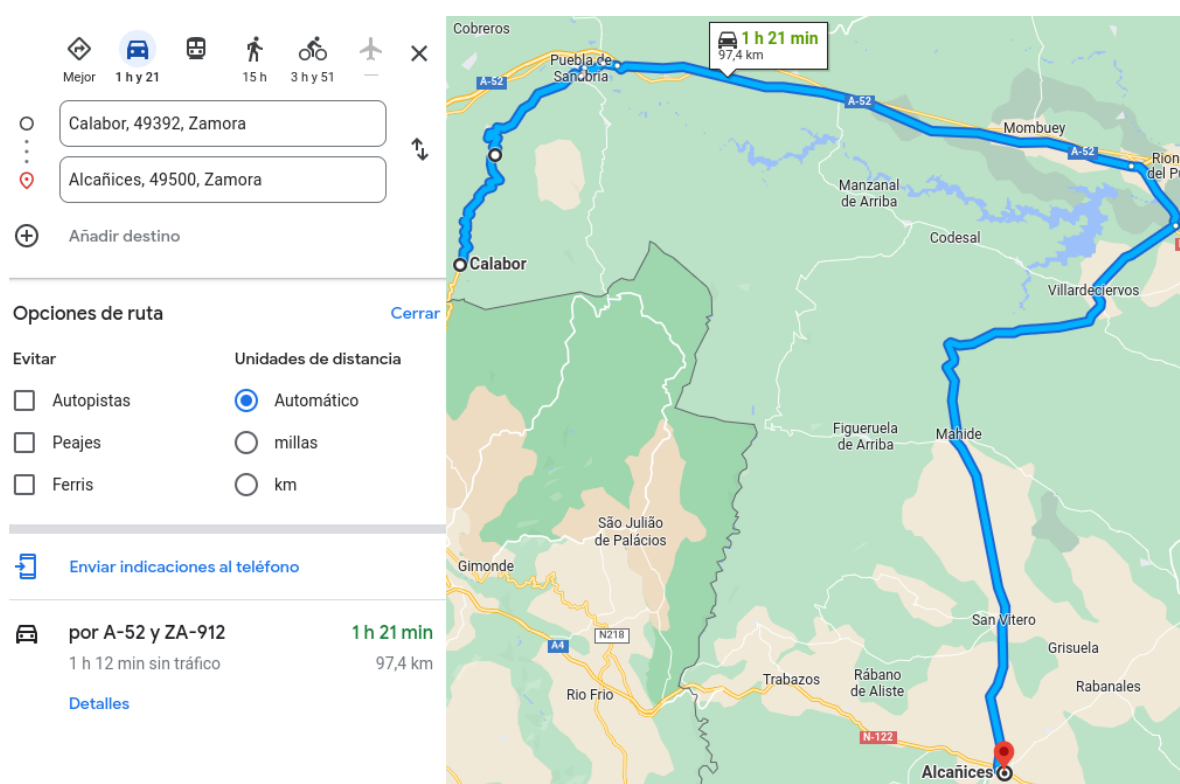


Figura 3.3: Ruta dada por Google Maps para el trayecto Calabor-Alcañices por Castilla y León [30].

que sean de interés⁸, reduciendo así el almacenamiento y procesamiento requeridos [32], [33], [34], por lo que se ha de revisar la viabilidad de su uso.

Para determinar la viabilidad del uso de la información de OSM hay que establecer qué nivel de confianza merece ya que, revisando la cartografía disponible y el proceso de su elaboración, resulta no ser autoritativa al no ser editada por Administraciones con competencias en vías públicas sino por individuos que contribuyen voluntaria y gratuitamente [35]. Asimismo, no permite ediciones anónimas [36], lo que reduce y permite lidiar adecuadamente con el vandalismo que recibe [37]. Y aunque su información no es exhaustiva ya que no incluye todos los detalles del mundo, se constató que la calidad de la información viaria disponible es aceptable para el uso considerado [38], [39].

Teniendo en cuenta lo anterior en conexión con que no se precisa una completa y permanente exactitud y que se busca el posible ahorro monetario, se ha estimado adecuado el uso de OSM como la fuente de información geográfica de elección para este proyecto, procediéndose a su uso.

Plantillas de configuración de mapas: MapServer basemaps

La segunda cuestión deviene de la necesidad de disponer de un archivo de configuración de mapa para que MapServer sepa qué elementos incorporar y cómo renderizarlos gráficamente, que en principio debe ser creado manualmente con el consiguiente riesgo de omitir elementos necesarios en un mapa cartográfico adecuado. Por ello se consultó al fabricante de MapServer⁹ en busca de software complementario útil para generar tales archivos de configuración de mapa, encontrándose [40] un sistema de plantillas al efecto denominado *basemaps* [41], ya preparadas para usar información geográfica publicada por OSM.

Si bien estas plantillas no suministran configuraciones para cualquier mapa deseado sin ediciones manuales, disponen lo necesario para obtener unas que producen mapas similares a los de callejero de OpenStreetMap o Google Maps, por lo que se decidió aprovecharlo y simplificar así la creación de configuraciones. Tal decisión acarreó aceptar también el uso de las herramientas detalladas en sus instrucciones de uso [42], en especial: el uso del software de importación de datos de OSM *imposm3* y el gestor de base de datos *PostgreSQL* junto a su extensión *PostGIS*, que se detallan a continuación.

Importación del corpus geográfico de OSM: imposm3

Como dependencia del sistema de plantillas revisado en los párrafos anteriores, se incorporó el uso de *imposm3* [43], un software que permite importar la información contenida en archivos con formato PBF¹⁰ a una base de datos PostgreSQL local o remota usando un mapa inyectivo de correspondencias entre los atributos del archivo PBF y las tablas y campos que se indiquen para la base de datos PostgreSQL.

Base de datos: PostgreSQL/PostGIS

También como dependencia de los anteriores se incorporó el sistema de gestión de bases de datos relacionales PostgreSQL [44] y, obviamente, su extensión PostGIS [45] para el manejo de información geográfica, ya que sin ella PostgreSQL no es capaz de gestionar adecuadamente y operar con geografías.

⁸Como, por ejemplo, continentes, países, comunidades autónomas o provincias.

⁹Ya que en general, el fabricante de un software es el que mejor lo conoce y, por tanto, el que mejor puede complementarlo.

¹⁰Un formato usado por OSM para compartir información geográfica comprimida, para facilitar su descarga.

Memoria caché: MapCache

La tercera y última de tales cuestiones relativas a MapServer es el rendimiento que alcanza al generar mapas sin más ayudas, percibiéndose uno relativamente bajo ya que cada fragmento de mapa a entregar es generado desde cero con cada solicitud, resultando en tiempos de hasta varios segundos por fracción de mapa servido, lo que en entornos web suele derivar en que los usuarios desisten y abandonan. Buscando cómo paliarlo, se descubrió que el fabricante de MapServer ha publicado un software de memoria caché denominado MapCache [46] que recaba datos de servicios WMS, los guarda y provee servicios WMS y WMTS, decidiéndose incorporarlo al diseño.

3.2.2. Sistema operativo: Ubuntu Server 24.04 LTS

Habiendo revisado MapServer, el único de los componentes fijado a través de los requisitos, así como el software sobre el que depende y los de mejora seleccionados para éste, se continúa ahora con el resto del software seleccionado siguiendo un orden más similar al que pudiera seguirse en su despliegue, lo que implica comenzar por el elemento que todos los equipos informáticos comparten: el sistema operativo.

Analizadas múltiples opciones, se determinó que el uso de *Linux* mediante la distribución *Ubuntu* como sistema operativo en su edición *Server*, preparada para entornos de servidores en los que no se necesitan interfaces gráficas, era la opción más adecuada; la elección fue motivada por ser el único sistema operativo de entre los que Docker, sistema de contenedores seleccionado y revisado más adelante, soporta para la arquitectura de CPU *x86_64*¹¹ [47] y en el que concurre la posibilidad de obtener soporte comercial por parte de su fabricante¹², lo que cobra mayor sentido al considerar que la capacitación en resolución de incidencias de quienes administren el sistema variará a lo largo del tiempo, ya sea por contrataciones, ceses o formaciones, no pudiéndose garantizar que estos puedan afrontar cualquier situación satisfactoriamente sin recurrir a recursos externos.

Elegidos sistema operativo, distribución y edición, el detalle de la elección de versión pasa a ser más sencillo, ya que al comparar las versiones más recientes puede verse cómo, aunque por lo general el ciclo de vida y soporte establecido para cada versión es de apenas 9 meses, cada cierto tiempo se lanzan versiones especiales denominadas “LTS”¹³ [48] que están pensadas para su uso en entornos corporativos, en los que se precisa de la máxima estabilidad posible, razón por la que han sido objeto de mayores pruebas antes del lanzamiento; por ello, para estas versiones LTS el tiempo por el que se mantiene el soporte gratuito se alarga hasta 5 años desde el lanzamiento, tiempo que puede prorrogarse mediante suscripción comercial a Ubuntu Pro durante otros 5 años adicionales, haciendo un posible total de 10 años antes de que quede obsoleto [49]. Así pues, se consideró como el sistema operativo más adecuado el provisto en Ubuntu Server 24.04 LTS, apodado “Noble Numbat” al ser la versión LTS más reciente [50].

3.2.2.1. Otras alternativas consideradas

Aunque Linux fue finalmente la opción elegida para el sistema operativo, no fue la única opción considerada ya que también se consideraron los sistemas operativos Windows, macOS y BSD, encontrándose que los dos primeros no son de código abierto por lo que de ser elegidos incumplirían los requisitos impuestos, así como que el último no permite crear una configuración soportada por

¹¹La arquitectura de CPU más común en equipos de escritorio y servidores, de 64 bits.

¹²Esto es, que de necesitarse escalar problemas emergentes a consultores externos sólo en Ubuntu se encuentra que pueda optarse por unos directamente gestionados por Canonical, su fabricante.

¹³Del inglés *Long Term Support*, en español, con soporte a largo plazo.

Docker [47], [51], lo que dificultaría o impediría obtener soporte ante problemas que ocurran con este otro software.

Visto que el uso de un sistema operativo Linux presentaba menores problemas, fue necesario elegir la distribución del sistema operativo a emplear, para lo que se revisaron, además de la elegida distribución Ubuntu, las demás distribuciones con soporte por parte de Docker para la arquitectura de CPU x86_64 (CentOS, Fedora y Debian) [47], con los siguientes hallazgos:

- Fedora: es una distribución creada por Red Hat como una suerte de entorno de pruebas de nuevo software y funcionalidades que posteriormente incorporar en la distribución comercial del mismo fabricante, RHEL¹⁴ [52], por lo que su plazo de vida se alarga poco más de un año para cada lanzamiento y su estabilidad es reducida [53], [54], por lo que su uso en producción es desaconsejable y a su vez motiva que no haya sido la opción elegida.
- CentOS: aunque históricamente ha sido una especie de reedición de RHEL con carácter no comercial creada también por Red Hat pero mantenida por su comunidad de usuarios, recientemente ha pasado a ser una suerte de entorno de integración para lanzamientos posteriores de RHEL usando un sistema de distribución rodante o de lanzamiento continuo [52], por lo que ahora no aporta garantías suficientes de estabilidad para un entorno de producción y a su vez motiva que no haya sido la opción elegida.
- Debian: creada por el Proyecto Debian y por tanto ajena a las anteriores, aunque sí provee una estabilidad suficiente para su uso en sistemas en producción, tiene un ciclo de vida con un soporte por el fabricante limitado a un año después del lanzamiento de la siguiente versión [55], un soporte a largo plazo hasta los 5 años desde el lanzamiento de cada versión no provisto por el propio fabricante sino por diversas personas y empresas de forma voluntaria [56], y meramente aporta menciones a un soporte comercial ajeno que ofrece un soporte a largo plazo extendido hasta los 10 años del lanzamiento de cada versión [57] así como a una suerte de páginas amarillas de consultores que indican ser capaces de trabajar con la distribución repartidos por el planeta [58]. Dado que, en comparación, la opción elegida provee importantes mejoras sobre el soporte a largo plazo (en Ubuntu, el soporte durante 5 primeros años desde el lanzamiento es gratuito y a cargo del fabricante, y después la opción de extensión comercial es mediante contrato directo con este), finalmente esta opción no fue elegida para formar parte de la solución propuesta.

3.2.3. Aislamiento mediante contenedorización: Docker

Elegido el sistema operativo y siguiendo el orden natural de despliegue ya indicado anteriormente, conviene decidir si el software que proporcionará los servicios será ejecutado directamente sobre el sistema operativo o interponiendo algún tipo de capa de aislamiento que, entre otras capacidades, reduzca la severidad de los fallos que puedan acontecer.

Analizadas diversas opciones, se determinó como la opción más adecuada el uso del sistema de aislamiento de aplicaciones mediante contenedorización¹⁵ provista por Docker [59], motivada principalmente por, primero, aislar gran parte de los diversos recursos disponibles en el equipo en el que se usa sin necesidad de intervención manual mediante el aprovechamiento de capacidades existentes en el núcleo de Linux como, por ejemplo, los espacios de nombres [60], que introducen un sobrecoste de gestión mínimo frente a otras opciones consideradas; segundo, disponer nativamente de capacidades orientadas a la detección y subsanación, de manera autónoma, de interrupciones de servicios provistos mediante los contenedores; tercero, incluir herramientas que, bajo demanda, automatizan la generación de contenedores listos para su uso, incluyendo software a elección [61];

¹⁴Acrónimo de Red Hat Enterprise Linux.

¹⁵Ámbitos de ejecución con alto grado de estanquidad.

y cuarto, que la mayoría del software seleccionado ya dispone de imágenes de Docker creadas por sus fabricantes o por sus comunidades de usuarios, con algún nivel de aprobación de aquellos, listas para su uso en producción.

3.2.3.1. Otras alternativas consideradas

A pesar de que Docker haya sido la opción elegida como sistema de aislamiento, de nuevo no ha sido la única opción considerada, habiéndose revisado diversas opciones que abarcan el espectro completo de posibilidades de aislamiento de procesos y/o recursos, desde no emplear sistema de aislamiento alguno a la virtualización completa; a continuación se revisan tales otras opciones en orden creciente de aislamiento.

1. Sin capa de aislamiento: Provee el menor aislamiento, lo que presenta posibles problemas como que existan o se produzcan fallos por cualesquiera razones y que, por la falta de aislamiento, afecten a otros componentes del sistema o faciliten el acceso a otros fallos de estos, cuestión más relevante cuando atacantes maliciosos con intenciones deshonestas aprovechan intencionalmente tales fallos; que elementos software elegidos como parte de la solución propuesta o como parte de posibles futuras ampliaciones requieran de la instalación de otro software incompatible, de bibliotecas software incompatibles o de rangos de versiones de un mismo software irreconciliables, obligando a provisionar múltiples máquinas físicas con el desperdicio de recursos que supondría; y la dificultad añadida para gestionar las necesarias copias de seguridad, ya que en contraposición con la mayoría de entornos dispuestos sobre capas de aislamiento, la realización y restauración de estas suele ser más propensa a errores al requerir configuraciones pormenorizadas y/o acciones manuales. La consideración de tales posibles problemas desaconseja el uso de un esquema de despliegue sin capa de aislamiento interpuesta, por lo que se desechó esta opción.
2. Jaulas `chroot` [62]: Proveen un menor aislamiento que Docker, y tienen el inconveniente que el aislamiento se extiende exclusivamente al sistema de archivos así como que, usándolo, no es extraño que cuando se quieren ejecutar aplicaciones no triviales se necesiten montar metasistemas de archivos¹⁶ [63]. Tales deficiencias en comparación con la opción elegida motivaron descartar esta opción.
3. LXD: Aunque comparte fabricante con Ubuntu [64], [65] y su aislamiento es relativamente igual al de Docker, tiene dos grandes diferencias, que son que mientras que Docker aísla a nivel de aplicación, LXD lo hace a nivel de sistema operativo [66], no incluyendo herramientas que asistan en la creación de imágenes [67]; y la documentación disponible para LXD es de peor calidad respecto a la de la opción elegida [68], [69], [70]. Consideradas tales cuestiones, y como colorarios de lo anterior, el uso de LXD requiere mantener mayores recursos humanos o de mejor calidad para una gestión correcta además de facilitar una menor separación de responsabilidades en los contenedores creados, razones por las que se descartó emplear esta opción.
4. Usando hipervisores de tipo 1 o tipo 2: Pudiéndose implementar mediante opciones como las de KVM [71], QEMU [72], Xen [73] o VirtualBox [74], que brindarían el máximo aislamiento posible sin recurrir a máquinas físicas independientes, incluso mayor que el de la opción elegida, su empleo acarrea necesariamente un desperdicio de recursos hardware no despreciable debido a la necesidad de gestionar el aislamiento ofrecido, así como un mayor coste en recursos humanos para su correcta gestión, ya sea por cantidad o calidad, debido a la complejidad de gestionar las diferentes máquinas virtuales que se creen junto al propio

¹⁶Como los dispuestos habitualmente en las rutas `/dev` o `/proc`.

hipervisor y, en los hipervisores tipo 2, el sistema operativo anfitrión, por lo que también se descartó la virtualización a nivel de máquina mediante hipervisores.

3.2.3.2. Sobre los requisitos satisfechos con Docker

A pesar de que todo elemento del diseño debiera en primera instancia ofrecer elementos para incrementar la consecución de los requisitos impuestos a este, en este momento, mediante la incorporación de Docker al diseño, *no se satisface en mayor grado requisito alguno de los explícitamente impuestos al diseño, sino de los implícitos exigibles a las acciones de ingeniería: que los productos resultantes gocen de la máxima calidad viable*¹⁷.

Contemplando la cuestión de la calidad de los sistemas informáticos como es el del actual proceso de diseño, existen normas que informan las propiedades concretas que deben ser observadas al valorarla, como la norma ISO/IEC 25010 [80], que viene a definir 8 dominios de interés como puede verse en la figura 3.4 expuesta más adelante, entre los que se encuentran varios para los que el uso planteado de Docker resulta en mejoras significativas o muy significativas, como ocurre al contemplar los de compatibilidad, fiabilidad, mantenibilidad y portabilidad.



Figura 3.4: Dominios de la ISO 25010 para la calidad del software y los sistemas informáticos [81].

3.2.4. Geocodificación: Nominatim

Habiéndose seleccionado el sistema de aislamiento a emplear, queda ahora continuar con la elección de los diversos programas no prefijados en los requisitos que proveerán, en su conjunto, los servicios necesarios para satisfacer las capacidades que deberán disponerse en el sistema, entre las que destacan las de geocodificación y de trazado de rutas; este apartado tratará el primero de tales servicios.

¹⁷Lo que en el específico caso actual de la Ingeniería Técnica en Informática cabe entrever, en ausencia de Colegio de Ingenieros Técnicos en Informática en Castilla y León y de su código deontológico asociado, de la lectura del código deontológico actual del Colegio de Ingenieros en Informática de Castilla y León [75] y de los de otros Colegios de Ingenieros Técnicos en Informática de otras regiones de España [76], [77], [78], [79].

Analizadas varias opciones para proveer el servicio de geocodificación, que convierte direcciones o lugares dados en lenguaje natural a coordenadas geográficas, se determinó que el uso de *Nominatim* [82], geocodificador creado por OSM [83], era la opción más adecuada. Tal decisión se fundamentó por, además de cumplir con los requisitos relevantes, usar los mismos conjuntos de datos de OSM seleccionados en la generación de mapas para extraer de ellos direcciones y lugares, tener una arquitectura interna más resistente a fallos que las otras opciones contempladas, tener un consumo notablemente menor de memoria RAM y mantener un enfoque de código abierto o de gratuidad en todos los artefactos software publicados en conexión con este software, incluso aunque no se usen en la solución aquí propuesta.

En cuanto a sus características más relevantes, Nominatim permite configurar el nivel de detalle por el que buscar [84]: demarcación administrativa, calles, números de cada calle o completo¹⁸; puede actualizar la información usada descargando las diferencias que existan en OSM o descartar los metadatos que permiten tales actualizaciones [84] reduciendo el tamaño de la base de datos¹⁹; y usa PostgreSQL como almacenamiento, por lo que se podrían agregar lugares de forma manual.

3.2.4.1. Otras alternativas consideradas

Al igual que en otros elementos escogidos, Nominatim no ha sido la única opción evaluada a la hora de escoger el geocodificador para la propuesta desarrollada, sino que también se valoraron los geocodificadores Pelias, Photon y Gisgraphy.

- Pelias [85], aunque puede usar múltiples conjuntos de datos de diferentes fuentes abiertas, incluyendo a OSM, fue desechado por dos motivos principales: primero, el tiempo que necesita para importar la información a usar, de varias horas; y segundo, *la elección de Elasticsearch* como base de datos, que además de tender a saturar la RAM al usarla como caché, ha sido *diseñado para trabajar en clústeres con particiones y redundancias preparadas en profundidad de antemano* [86] y, aunque puede usarse en un despliegue de servidor único, se pudo observar que, al no garantizar completamente las propiedades ACID²⁰ [87], puede alcanzar estados de corrupción ante los que requiere cantidades muy elevadas de RAM para *intentar* recuperar el servicio normal²¹.
- Photon [88] adolece del mismo problema de diseño que se ha indicado para Pelias: usa a Elasticsearch como base de datos [89], por lo que también se dejó de considerar por los potenciales problemas que pueden surgir por la falta de garantías de las propiedades ACID ya expresadas.
- Gisgraphy [90] fue descartado al encontrar en su documentación que el proceso de importado de la información que se use, además de ofuscar y/u obviar la información de qué fuentes puede capturar, así como de las características que han de cumplir tales fuentes [91], *puede llegar a necesitar más de un mes* para completarse [92], orientando a los usuarios a pagar a los desarrolladores por acceder a volcados del proceso de importación que estos facilitan como producto comercial [93], lo que, implicaciones de la introducción de elementos comerciales en un proyecto software de código abierto aparte, apunta a que en cualquier caso la carga

¹⁸Incluyendo todos los puntos de interés publicados como los turísticos o comerciales.

¹⁹Con ahorros observados que superan el 50 % del espacio originalmente usado.

²⁰Acrónimo de “Atomicity, Consistency, Isolation and Durability”, en español Atomicidad, Consistencia, Aislamiento y Durabilidad, una serie de propiedades que garantizan la seguridad de la información en bases de datos.

²¹En pruebas realizadas, se tuvo que desistir cuando ya se provisionaban más de 12 GB de RAM solamente a fomentar esta recuperación y continuaba fallando, aportando explícitamente el error OOM (del inglés OutOfMemory), que indica falta de memoria RAM, habiendo importado exclusivamente la información correspondiente a Castilla y León.

de la información que se use es un proceso poco optimizado y extremadamente dilatado en el tiempo en comparación con otras opciones.

3.2.5. Motor de rutas: Valhalla

Llegado este punto, entre los servicios a proveer queda por elegir la implementación a usar para el motor de rutas, para lo que tras revisar varias opciones se determinó que la mejor opción contemplada era la provista por Valhalla [94], decisión motivada por posibilitar personalizar parámetros de ruta en tiempo de consulta-ejecución y el contrastado menor uso de memoria RAM en comparación con las alternativas consideradas que permite contemplar su uso incluso en sistemas empotrados, todo ello probablemente motivado por decisiones de diseño como son el uso del lenguaje de programación C++ y el uso de algoritmos para el trazado de rutas basados en aplicar jerarquías en la teselación del mapa [95], [96].

3.2.5.1. Otras alternativas consideradas

Aunque Valhalla ha sido la opción escogida como motor de rutas, no debe sorprender a estas alturas al lector que, de nuevo, no haya sido la única analizada, siendo los otros contendientes valorados como potencialmente viables pgRouting, OpenRouteService, Graphhopper y Open Source Routing Machine (OSRM).

- pgRouting [97], si bien realmente es otro plugin para el binomio PostgreSQL/PostGIS y su uso permitiría trazar las rutas sin desplegar servicios adicionales, parece que no existe una API con un nivel de madurez y mantenimiento suficiente para un uso en producción que facilite explotar del enrutamiento de esta opción. Además, a diferencia de otros motores, pgRouting carece de una característica muy deseable: no puede ofrecer indicaciones giro a giro [98] ni se ha hallado API de código abierto alguna que lo aporte, por lo que no hay forma de detallar las maniobras que se deben llevar a cabo para recorrer una ruta sin embarcarse en un desarrollo *ad hoc*. Ambas cuestiones motivaron el descarte de esta opción.
- OpenRouteService (ORS) [99], basada en Java y *fork* siguiente Graphhopper, fue desechada al constatar experimentalmente un mayor consumo de memoria RAM en comparación con el del elegido y el hecho de que, de necesitar añadir o modificar perfiles de enrutamiento²² para ajustarlos a los cambios se necesiten implementar, como los que el legislador dispusiese en el Reglamento General de Circulación²³, se necesitaría editar el código fuente del propio motor de rutas, recompilarlo y desplegarlo en producción [101], [102], [103].
- Graphhopper [104] al compartir código y enfoques algorítmicos con su *fork* ORS, se dieron por buenas los informes recabados de que comparten un empleo más ineficiente de la RAM, [103], [105] [106], ya que la complejidad computacional entre diversas implementaciones correctamente planteadas de un mismo algoritmo se mantiene en el mismo orden, implicando similar uso de recursos. Adicionalmente, resulta que su fabricante ha alterado el carácter de código abierto del proyecto, decidiendo disponer nuevas partes de éste bajo modelos comerciales [107], lo que hace más probable la materialización del riesgo de que se disponga el carácter exclusivamente comercial de nuevas funcionalidades o del cambio de la licencia del software por una comercial ya que, aunque de forma parcial, ya ha sido capaz de tomar tal decisión. Todo ello resultó en que este software no fuera elegido como parte de la solución diseñada.

²²Que modelan características, como la velocidad o restricciones aplicables, de una forma de desplazamiento, como puede ser a pie, en coche, camión, autobús, etc.

²³Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación [100].

- Open Source Routing Machine (OSRM) [108], fue descartado por primero, ser incapaz de manejar en una única instancia distintos perfiles de enrutamiento necesarios para obtener rutas a pie y en distintos tipos de vehículo, obligando a desplegar una instancia por perfil junto a un *proxy* inverso, con el consiguiente gasto de recursos [109]; segundo, que los parámetros de cómputo de rutas no puedan ser personalizados con cada solicitud sino que tienen que incrustarse en los perfiles y estar activos para todos los usuarios por igual, los quieran o no, impidiendo, por ejemplo, evitar peajes, evitar otros países, o considerar una velocidad máxima por debajo del límite de la vía [103], [110]; y tercero, que usa algoritmos basados en contracciones de jerarquías y/o en el algoritmo de caminos mínimos (Dijkstra) multinivel [108] por lo que se vuelve a encontrar la misma problemática de ORS y Graphhopper: consume más memoria que la alternativa escogida. Todo ello ha motivado que finalmente OSRM no haya sido elegido como parte del diseño expuesto en esta memoria.

3.2.6. Cliente web ligero: Leaflet y React

Alcanzado este punto, para concluir el diseño del lado de servidor sólo resta por elegir un software para facilitar el uso y consulta a través de la web de las capacidades que el resto de componentes aportan y publican sin obligar a los usuarios a emplear otro software especializado adicional. Para ello, la opción que se ha considerado más acertada es la del empleo de un cliente web ligero²⁴.

Concretamente, el cliente seleccionado se trata de una implementación suficientemente parametrizada para su adaptación a diversos entornos que en esencia combina las capacidades de las bibliotecas Leaflet [111] y React [112] y es mantenida por la comunidad de Valhalla, motor de rutas elegido, ya que se trata del cliente usado en la demostración que su equipo de desarrollo expone al público [113]. Este hecho es de especial relevancia ya que reduce el riesgo de que se vuelva obsoleto conforme los otros elementos software propuestos se actualicen, en tanto que es previsible que según cambien se actualice este cliente para mantener tal demostración. Éste constituye el principal motivo que ha guiado la elección de este cliente, seguido por el de resultar ser compatible con el resto del software previamente elegido, evitando así la necesidad de implementar una solución al efecto.

3.2.6.1. Otras alternativas consideradas

Como alternativas al elegido cliente web ligero se revisaron otras posibilidades que fueron descartadas, todas ellas requiriendo implementaciones específicas que excederían ampliamente la mera integración de productos ya creados:

1. Usando las capacidades de MapServer de plantillas HTML [114] para mostrar mapas generados mediante su renderizado dinámico, lo que consecuentemente imposibilitaría usar la necesaria memoria caché de MapCache y obligaría a mantener los retardos en el servicio que esta palia, por lo que se desechó por su inviabilidad.
2. Aprovechando bibliotecas de código abierto para la visualización de mapas como OpenLayers [115] o Leaflet [111] para, desarrollar manualmente lo necesario para tener un sistema que permita emitir consultas a los diversos servicios y dotar de significado a las respuestas

²⁴Esto es, una aplicación cuyo uso se lleva a cabo a través de básicamente cualquier navegador web relativamente moderno accediendo simplemente a una URL y que emplea tecnologías como, por ejemplo, JavaScript, HTML5 y CSS para ir solicitando información a uno o varios servicios y modificando la presentada en base a la interacción del usuario, todo ello sin necesidad de instalaciones adicionales.

recabadas. Esto, aparte de la necesidad de gastar recursos en tal creación, tiene principal desventaja que implica un desarrollo exclusivo para el uso actual, que no será mantenido en el tiempo, implicando una obsolescencia más temprana que la de la opción elegida.

3. Llevando a cabo un desarrollo propio desde cero, opción inviable en el contexto de un TFG ya que fácilmente puede soportar un TFG por sí mismo dada la carga de trabajo que conllevaría, por lo que fue una opción rápidamente abandonada.

3.2.7. Sistema de información geográfica de escritorio: QGIS LTR

Por último, dado se busca ofrecer una alternativa completa al uso de las soluciones comerciales de ArcGIS a otra que emplee componentes de código abierto para comprobar el potencial ahorro de tal cambio y decidir, tendría poco sentido no ofrecer alternativa alguna también al SIG de escritorio de ArcGIS, ArcGIS Pro.

Consideradas varias alternativas, se ha determinado que la provista por el software de escritorio QGIS, otro SIG de código abierto, como la más adecuada, ya que, según se ha podido observar, viene a ofrecer un conjunto de funcionalidades relativamente equivalente al de ArcGIS Pro, con pocas diferencias en funcionalidad que, por lo general, pueden ser cubiertas mediante el uso del sistema de *plugins* o complementos incluido en QGIS, que permite la descarga e instalación directa de más de 2.000 de estos [116] o, de preferirse, mediante el uso del lenguaje de programación Python a través de la consola integrada. Además, provee opciones de instalación para casi cualquier sistema operativo (Linux, Windows, MacOS y BSD) por lo que puede integrarse en cualquier entorno de trabajo sin necesidad de mayores cambios que dificulten la posible adaptación, como pudiera ser el del sistema operativo.

Dado que QGIS ofrece en todo momento dos ediciones, hay que indicar también cuál se propone para su uso que, como ya se apuntaba en el título de este apartado, se corresponde con la edición LTR (Long Term Release). Esta edición permite garantizar la estabilidad del software evitando la aparición de posibles errores que interrumpen las labores que se realicen [117], y recibe soporte durante más tiempo por su fabricante.

3.2.7.1. Otras alternativas consideradas

Las otras alternativas consideradas han sido GRASS GIS, gvSIG y SAGA GIS.

- GRASS GIS [118]: Ha sido diseñado con miras a crear y renderizar mapas a través del propio software en vez de con servicios remotos y está fuertemente orientado al uso su lista cerrada de acciones predefinidas, y aunque permite usar una consola Python con la que interactuar con la información, se ha apreciado una la curva de aprendizaje de este software no precisamente trivial, lo que motivó rechazarlo.
- gvSIG [119]: Si bien tiene a una Administración Pública española detrás de su desarrollo [120], se encontró que el diseño de su interfaz no mantiene una adecuada accesibilidad, con ristras de iconos excesivamente pequeños para ser reconocidos a simple vista sin necesidad de esfuerzos junto a fuentes tipográficas de tipo *serif* (con remates) usando tamaños tan reducidos que dificultan la lectura. Ello hace que el manejo de este software no esté precisamente exento de complicaciones cuando se desconocen las capacidades y cualificaciones de los usuarios que pudieran usarlo, y fomenta desplazarlo en favor de otra opción que disponga de un diseño más accesible.
- SAGA GIS [121]: Con una interfaz relativamente minimalista con pocos menús, requiere del uso intensivo de un catálogo de herramientas que no permite trabajar libremente con la información aportada, además de presentar problemas a la hora de trabajar con servidores

WFS o WMS que impiden incorporar datos de estos. Estos problemas ya hacen que no merezca ser designado parte del diseño.

3.2.7.2. Sobre los requisitos satisfechos con QGIS

Si bien la incorporación de QGIS al diseño no responde estrictamente a los requisitos impuestos, sí está motivada por el contexto en el que tiene lugar este estudio: el de la búsqueda de alternativas no comerciales al uso de la suite software comercial de ArcGIS, que dispone también de un software SIG de escritorio. Es por ello por lo que, advertida su existencia y su empleo al recabar las licencias usadas, este alumno-autor ha considerado más conveniente abordarlo considerando el bajo tiempo y esfuerzo que conlleva ofrecer una alternativa.

3.3. Gestión de datos y servicios

Realizada la selección del software que tratará con la información geográfica necesaria para dar respuesta a las necesidades de los requisitos, ha de plantearse una cuestión final, la de cómo deben gestionarse los datos y servicios que se disponen en el servidor. Es la opinión del alumno-autor que la respuesta a ésta, si bien relativamente obvia para cualquier profesional de la Informática, y por ello no incluido en el diagrama anterior de la arquitectura del diseño, ha de ser también explicitada.

Para la gestión de los diversos servicios y la actualización de las informaciones que estos manejen se plantea el uso de SSH, cuyo correcto uso se sitúa entre las mejores y probablemente más conocidas prácticas en cuanto a la administración de servidores y la transferencia de archivos a equipos remotos. Además, es prácticamente ubicuo en los entornos Linux, y el sistema operativo base Ubuntu Server elegido ya instala un servidor SSH por defecto.

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 4

Prototipado del diseño

Completada la acción de diseño, ha de procederse a generar un primer prototipo o implementación de tal diseño para, a su través, poder validarlo y comprobar que es una solución viable, cuestiones que aborda el presente capítulo.

4.1. Obtención y despliegue del software

Como en toda implementación informática que requiere del uso de software hay que comenzar procurándose copia del software a desplegar, por lo que en este apartado se revisan los orígenes usados en la captura del diverso software usado.

4.1.1. Ubuntu

Para el sistema operativo base, Ubuntu Server, se recabó la correspondiente imagen ISO¹ de instalación desde la sección de descargas de su sitio web [122].

Una vez recabada y dispuesta en un dispositivo desde el que arrancar cual sistema operativo, su instalación es guiada por un asistente interactivo que evita la necesidad de usar comandos en una terminal para completar el proceso, reduciendo el riesgo de errores. No obstante, hay un paso que probablemente toda persona que haya desplegado sistemas operativos concurrirá en su carácter crítico, ya que los errores en él con frecuencia requieren de volver a iniciar el despliegue desde cero: la configuración de particiones de almacenamiento.

Considerando la criticidad señalada en el párrafo anterior, se considera muy adecuado incidir ahora en la posibilidad, durante el particionado, de interponer a LVM [123], un software intermedio de gestión de volúmenes de almacenamiento que, entre otras posibilidades, puede mitigar algunos de los errores que se puedan introducir en el esquema de particionado del almacenamiento que se le asigne, facilitando, entre otras capacidades y siempre que el sistema de archivos en uso lo permita, que las particiones que se dispongan puedan ser dinámicas [124], si se usa espacio gestionado por LVM².

¹ubuntu-24.04-live-server-amd64.iso

²No obstante, su empleo, aunque extremadamente recomendable, no es necesario, sino que dependerá en cada implementación de las políticas a seguir. Lo mismo ocurre con el número de particiones a crear y sus puntos de montaje.

4.1.2. Docker

Para la instalación de Docker, se obtuvo y desplegó mediante la paquetería publicada por su fabricante. Posteriormente, el resto de servicios se desplegaron usando contenedores de éste, estructurados con arreglo a los servicios que prestan para separar responsabilidades.

4.1.3. Contenedor de generación y publicación de mapas

Al primero de tales contenedores se le dispuso las responsabilidades de generar y publicar los mapas, para lo que se combinaron MapServer, Apache, FastCGI y MapCache mediante las capacidades de generación programática de contenedores incluidas en Docker a través de la creación de un archivo `Dockerfile` que detalla los pasos a realizar partiendo de la imagen de Docker de Debian 12 “Bookworm”, para generar otra imagen de contenedor que básicamente incorpore el software escogido.

En cuanto a cómo se integraron los programas mencionados, tras revisar que las versiones disponibles en el sistema de paquetería `apt` incluido en Debian son relativamente recientes, se usó éste como medio para obtener y desplegarlos, disponiendo las siguientes instalaciones:

- Para el servidor web Apache, del paquete `apache2` [125].
- Para FastCGI, del paquete `libapache2-mod-fcgid` [126].
- Para MapServer, de los paquetes `mapserver-bin` [127] y `cgi-mapserver` [128].
- Para MapCache, de los paquetes `mapcache-cgi` [129] y `mapcache-tools` [130].

4.1.4. Contenedor de bases de datos: PostgreSQL y PostGIS

El siguiente contenedor creado aloja al gestor de base de datos relacionales PostgreSQL usado. En este contenedor se dispuso PostgreSQL junto a su extensión PostGIS, que permite tratar información geográfica en el primero, para lo que se partió del repositorio de archivos `Dockerfile` publicados por el equipo de PostGIS [131] que detallan la creación de contenedores con PostgreSQL versión 16 y PostGIS versión 3.4 relativamente listos para su uso en producción, si bien se realizaron modificaciones en él para, entre otros, asegurar que la diversa paquetería esté actualizada.

4.1.5. Contenedor de búsqueda de lugares: Nominatim

El tercer contenedor desplegado alberga el servicio de búsqueda de lugares, para cuyo despliegue se partió del repositorio de archivos `Dockerfile` publicado por un grupo de dedicados usuarios de Nominatim [132] que, aunque provee los pasos para lograr contenedores con instalaciones de Nominatim relativamente listas para su uso en producción, ha sido modificado para, entre otros, retirar elementos innecesarios para el uso actual.

4.1.6. Contenedor de trazado de rutas: Valhalla

Continuando con los contenedores desplegados, se dispuso el que alberga el servicio de trazado de rutas, para cuyo despliegue se partió del repositorio del archivo `Dockerfile` publicado por su comunidad de usuarios [133] que provee cómo conseguir instalaciones de Valhalla relativamente listas para su uso en producción, modificándolo para, entre otros, asegurar que la diversa paquetería que usa esté actualizada.

4.1.7. Contenedor del cliente web ligero

El último contenedor desplegado aloja una copia del cliente web ligero usado por el equipo de Valhalla para la demostración de su sitio web, que con las modificaciones adecuadas sirve de interfaz entre el usuario y las diversas capacidades desplegadas en los otros contenedores, para lo que usa un servidor web mínimo para servir los archivos de este cliente ligero a los usuarios que lo soliciten. En su despliegue se partió, de nuevo, de otro repositorio con un archivo `Dockerfile` publicado por el equipo de desarrollo de Valhalla que indica cómo debe Docker disponer este cliente web en un contenedor [113].

4.1.7.1. Basemaps

Para recabar la copia de basemaps usada se recurrió a clonar su repositorio [41] a una carpeta del sistema operativo anfitrión para usarlo directamente desde ahí, toda vez que no existe lanzamiento alguno que aporte descargables del mismo.

4.1.7.2. Imposm3

Para obtener la copia de imposm3 usada se recurrió a descargar la versión precompilada disponible en la sección de lanzamientos de su repositorio [43], capturando y usando, directamente desde el sistema operativo anfitrión, la versión 0.11.1 del software.

4.1.8. QGIS LTR

Finalmente, para desplegar el SIG de escritorio QGIS se recurrió a su sitio web [134], que provee tanto instaladores para sistemas operativos Windows y macOS como instrucciones para la instalación mediante sistemas de paquetería nativos para BSD y las distribuciones más comunes de Linux; e instrucciones para la instalación mediante sistemas de paquetes independientes de la distribución de Linux usada como Flatpak o Spack.

4.2. Configuración y ajustes

Además del mero despliegue de software, han sido necesarias diversas acciones de configuración y ajustes, que se detallan en los epígrafes siguientes.

4.2.1. Comunes a todos los contenedores

Como los primeros ajustes a revisar tenemos aquellos que no afectan a contenedores concretos sino a todos ellos, que se describen en este apartado.

4.2.1.1. Creación de un archivo de Docker Compose

Docker incluye, además de las capacidades de contenedorización y de generación programática de contenedores, herramientas para simplificar la configuración de los contenedores, lo que logra mediante la herramienta Docker Compose [135].

Ésta básicamente lee la configuración deseada para uno o más contenedores interrelacionados de un archivo y la aplica a estos, reduciendo drásticamente la comisión de errores al introducir comandos. Dicha configuración puede abarcar cuestiones simples como la imagen de contenedor o el nombre del contenedor a desplegar; o más avanzadas, como el montaje transparente bidireccional

de archivos o carpetas del sistema operativo anfitrión en uno o más contenedores, la disposición de espacios privados a cada contenedor de almacenamiento persistente, la configuración de red, o el reinicio automático del contenedor ante fallos.

Considerándose conveniente, se procedió a crear un archivo de configuración de Docker Compose para los contenedores involucrados en este TFG.

4.2.1.2. Actualización de paquetería

En gran parte de los archivos `Dockerfile` usados se detectó y remedió una carencia común: el empleo, como puntos de partida, imágenes de contenedores de diversos sistemas operativos, como por ejemplo Debian, Ubuntu o Alpine, sin disponer la actualización de la paquetería base, lo que puede llevar a que aparezcan problemas de seguridad en dicha paquetería básica que, aunque dispongan de actualizaciones en las que se solventen, nunca se apliquen en los contenedores por falta de las instrucciones correspondientes durante su creación.

Detectada esta importante carencia, se procedió a subsanarla e incluir, en los casos que lo necesitaron, los pasos adicionales para restaurar la operatividad de los contenedores tras la aplicación de actualizaciones.

4.2.2. Apache

Como el servidor web Apache usado ha sido simplemente instalado desde paquetería, necesita de diversos ajustes para que aporte las capacidades deseadas de resolución de consultas usando MapCache o MapServer.

4.2.2.1. Configuración relativa a FastCGI, MapServer y MapCache

Como MapServer y MapCache son internamente aplicaciones CGI³ [136], [137], hay que interponer un módulo GCI en Apache para enlazar las solicitudes que se reciban con aquellos, seleccionándose para ello FastCGI como ya se ha descrito antes. No obstante, su mera instalación no es suficiente para un correcto enlazado, sino que se requiere modificar archivos de configuración de Apache para culminar la integración.

Por un lado, se hizo necesario ajustar el comportamiento de FastCGI, ampliando el tiempo de espera, el máximo de instancias concurrentes, y disponiendo variables a exponer a las aplicaciones CGI, para lo que se copió el archivo `/etc/apache2/mods-available/fcgid.conf` del contenedor al sistema anfitrión del servidor, se dispuso el montaje del archivo en sustitución del del contenedor para facilitar ediciones posteriores y se realizaron las modificaciones correspondientes con arreglo a la documentación de Apache [138].

Por otro lado, se requirieron añadir las directivas adecuadas para exponer ambas aplicaciones a través de Apache como aplicaciones CGI y no como meros archivos, ejecutando su contenido en vez de entregarlos como descargables por lo que, dada la estructura modular de los archivos de configuración de Apache dispuesta en Debian, se inscribieron en el archivo del contenedor situado en `/etc/apache2/conf-available/serve-cgi-bin.conf`, repitiendo el proceso del párrafo anterior.

³Common Gateway Interface, una interfaz que permite interactuar con programas en equipos remotos a través de servidores web.

4.2.3. MapServer

Al igual que Apache, MapServer ha sido meramente instalado desde paquetería, por lo que necesita de ajustes para que muestre el comportamiento deseado.

4.2.3.1. Creación de archivos de configuración de mapa

El principal ajuste requerido por MapServer es la creación de archivos de configuración de mapa que se usen, en los cuales se detallan los elementos a incorporar en las representaciones gráficas que MapServer habrá de generar, así como de qué manera han de incluirse tales elementos, detallando cuestiones como colores, grosores, formato de bordes, etiquetas, iconos, etc.

En este sentido hay que recordar que se seleccionó el uso de configuraciones generadas mediante *basemaps*, para establecer un callejero base, modificando las plantillas a conveniencia y de conformidad con el documentado formato que MapServer dispone [139] para incluir sólo la información deseada en las formas buscadas.

Adicionalmente, se detectó que las plantillas originales incluidas, si bien pueden generar mapas, carecen de los metadatos necesarios para proveer servicios web OGC correctos [140], por lo que también se solventó su falta incorporándolos.

4.2.3.2. Segregación del contenedor y persistencia de configuraciones de mapa

Además de crear las configuraciones de mapa necesarias, se ha considerado necesario mantenerlas fuera del contenedor, facilitando su modificación o la incorporación de otras nuevas y retira la necesidad de crear nuevas imágenes de contenedor con cada cambio deseado, mejorando la mantenibilidad del sistema.

Esto ha sido implementado disponiendo los archivos de configuración en una carpeta en el sistema operativo anfitrión que luego es montada en el contenedor definiendo un punto de montaje a través del archivo de Docker Compose creado.

4.2.3.3. Segregación del contenedor y persistencia de archivos de datos geográficos adicionales necesarios

MapServer permite, mediante los archivos de configuración de mapa, usar múltiples y/o diversas fuentes de datos en un mismo mapa, lo que incluye informaciones dispuestas en archivos locales. Como ya se ha visto antes, incluir informaciones adicionales mediante archivos locales al contenedor se convierte en un reto ya que por defecto los cambios realizados a un contenedor en ejecución no persisten al siguiente inicio del mismo.

No obstante, Docker permite superar tal escollo disponiendo el uso de una carpeta externa al contenedor para almacenar archivos de forma persistente, disponiéndola a través de los mecanismos de automatización de Docker Compose como punto de montaje.

4.2.4. PostgreSQL

El gestor de bases de datos relacionales PostgreSQL usado también ha necesitado de diversos ajustes, que se indican a continuación.

4.2.4.1. Creación de bases de datos necesarias

Desplegado PostgreSQL, por defecto no crea más bases de datos que las mínimas necesarias para proveer sus servicios por lo que se necesitan crear las bases de datos convenientes, lo que

en este caso se materializó en la creación de dos bases de datos diferentes, que albergarán los datos provistos por Imposm y Nominatim respectivamente y la inclusión de las sentencias SQL involucradas en un script creado para asistir en con este paso.

4.2.4.2. Activación de PostGIS en las bases de datos relevantes

Creadas las bases de datos necesarias, estas por defecto no tienen activadas las capacidades de ninguna extensión como es el caso de PostGIS, sino que deben ser activadas manualmente una única vez por base de datos, lo que fue incluido en el script indicado en el párrafo anterior.

4.2.4.3. Creación de usuarios y entrega de permisos

Como en la casi totalidad de los sistemas multiusuario provistos de mecanismos de autenticación y permisos modulares, en PostgreSQL por defecto no se genera más que un usuario, que además dispone de poderes de superusuario⁴. Aunque este usuario podría usarse para dar acceso a toda aplicación que lo necesite, ello supondría una *muy mala práctica*, en tanto que expone el sistema al abuso de privilegios administrativos por parte de usuarios malintencionados.

Por ello, se crearon usuarios para las aplicaciones que necesitan acceso, pudiendo así limitar los privilegios dados y restringirlos a las bases de datos que cada aplicación necesite realmente usar, incluyendo, de nuevo, las sentencias SQL involucradas en el script creado.

4.2.4.4. Segregación del contenedor y persistencia de configuración y estructuras de archivos de almacenamiento

Conocido que PostgreSQL establece una estructura de carpetas y archivos para guardar y garantizar la durabilidad [141] se hace necesario disponer que tales archivos se almacenen realmente en un lugar externo al contenedor para que no se pierdan con cada ciclo de parada y arranque de éste, ya que Docker no conserva los cambios ocurridos en un contenedor durante su ejecución, sino que se reusa la misma inmutable imagen de contenedor en cada reinicio.

Para ello, se procedió a disponer el uso de una carpeta externa al contenedor para el almacenaje de la referida estructura de persistencia, disponiéndola el archivo de Docker Compose como punto de montaje.

4.2.5. MapCache

Dado que el despliegue de MapCache se ha realizado desde cero, es evidente que requirió de ajustes, los cuales se detallan a continuación.

4.2.5.1. Configuraciones del sistema caché

Para que MapCache pueda ser de alguna utilidad, debe proveérsele un archivo que detalle la configuración bajo la que ha de operar, por lo que procedió a su creación usando como guías la página de documentación dedicada a este archivo [142] y el archivo de ejemplo `mapcache.xml.sample` incluido en el repositorio de código del software [143].

No obstante, se percibió que, de no incluirse un origen de información para una caché definida, MapCache no intenta actualizarla sino que continúa usándola indefinidamente, de conformidad con otros parámetros que detallan la caducidad de cada caché definida. Por ello, se crearon realmente dos archivos de configuración de la caché de este software, de contenidos básicamente idénticos,

⁴Esto es, con capacidades administrativas ilimitadas en todas las bases de datos del gestor

pero retirando los orígenes de datos de uno de ellos para que sea usado al responder a las peticiones de los usuarios, y guardando el que define orígenes de información para las ventanas de mantenimiento en las que se actualicen los contenidos de la copia caché que sirve.

4.2.5.2. Elección del método de persistencia de la cache

Durante la creación de la configuración, hay un aspecto que destaca por su carácter crítico: el mecanismo de persistencia de la cache a usar, ya que MapCache permite el uso de diversos métodos [142]:

- Almacenando archivos de imagen en disco;
- Almacenando archivos de imagen encapsulados en una base de datos SQLite;
- Usando un servicio memcache local o remoto;
- Almacenando archivos de imagen encapsulados en un único archivo TIFF georreferenciado o GeoTIFF;
- Usando servicios REST para almacenar las imágenes resultantes en nubes como las de S3/AWS, Azure o Google;
- Usando una base de datos Riak para almacenar las imágenes resultantes;
- Usando una base de datos Berkley DB para almacenar las imágenes resultantes;
- Usando una cache LMDB (*Lightning Memory-Mapped Database*, en español Base de Datos Relámpago Mapeada en Memoria) para almacenar las imágenes resultantes;
- Combinando de alguna manera las opciones anteriores, usándolas como un sistema de imaginarias en busca de una suerte de alta disponibilidad o como un sistema caché multinivel con niveles de distintos rendimientos;
- Combinando capacidades de alta disponibilidad y de caché multinivel señaladas en el punto anterior.

Visto el rango de posibilidades, se hizo necesario considerar cuál es el sistema de persistencia de la caché más adecuado para el uso actual, resultando ser el del uso de bases de datos SQLite, ya que el resto resultaron ser inviables al requerir desplegar servicios adicionales o, en el caso del almacenamiento directo en disco mediante archivos, saturar los inodos disponibles en los sistemas de archivos.

Para este último caso, el del almacenamiento directo en disco de las teselas generadas por MapServer, y a fin de entender la referida saturación de inodos, hay que comprender que, como disponen los estándares del servicio WMTS, el número de archivos generados en cada nivel de escala para abarcar el planeta entero es 4^n donde n indica el nivel de escala [144], por lo que al alcanzar el nivel de escala 18, el mayor configurado, se crearían más de 91.260 millones de archivos o enlaces simbólicos y, aunque se puedan detectar teselas sin contenido y enlazarlas simbólicamente con una única copia reduciendo el uso de disco, no puede reducirse el uso de inodos, por lo que tomando como referencia el tamaño por defecto de 256 bytes por inodo [145] para el sistema de archivos más habitual en Ubuntu⁵, ext4, se necesitarán aproximadamente 22 TB de almacenamiento sólo para los inodos. No obstante, considerando que, por ejemplo, la Península Ibérica viene a ocupar algo más del 1% de la superficie del planeta [146], [147] podemos acotar superiormente la superficie a mapear en el 2%, por lo que se necesitaría alrededor de 450 GB exclusivamente para acomodar los inodos de las teselas de la Península, debiéndose contabilizar por separado el tamaño de los archivos que se generen, que *evidentemente ocuparán un espacio al menos un orden de magnitud superior*.

⁵Los archivos se guardan, con la configuración dispuesta, en el sistema de archivos del sistema operativo anfitrión subyacente, Ubuntu Server.

Finalmente, si bien pudiera elegirse un sistema de archivos que no padeciera estas limitaciones en el número de inodos disponibles (como BTRFS [148]), se seguiría necesitando el espacio de disco necesario para almacenar tales inodos además de los propios archivos, terminando de tornar la opción del almacenamiento directo en disco en un despropósito para el uso ahora contemplado.

En contraposición, al usar un único archivo SQLite que encapsule las teselas guardadas el problema antes descrito desaparece, ya que sólo se necesitará un único inodo (256 bytes en total) y básicamente alojando tantas teselas como permita el espacio disponible, lo que decantó la decisión de continuar exclusivamente con configuraciones que usaran archivos SQLite como método de almacenamiento.

4.2.5.3. Segregación del contenedor y persistencia de estructuras caché y configuración

Conocido que en MapCache se puede controlar en qué lugar se almacenan las estructuras de persistencia de la copia caché, conviene disponer que se guarden realmente en un lugar externo al contenedor para que no se pierdan con cada ciclo de parada y arranque del contenedor, ya que por defecto Docker no guarda los cambios en los contenedores durante su ejecución.

Para ello, se procedió a disponer el uso de una carpeta externa al contenedor para el almacenaje de las referidas estructuras, disponiéndola a través de los mecanismos de automatización de Docker Compose como punto de montaje. La misma operación se llevó a cabo sobre los archivos de configuración de MapCache creados.

4.2.5.4. Ajustes de imagen y de generación de teselas

Otro de los ajustes más importantes en MapCache son los del formato de imagen con el que se almacenan las teselas recabadas [142], ofreciendo en una primera bifurcación alternar entre PNG o JPEG.

En el caso de elegir el uso de PNG, adicionalmente se puede:

1. Alternar el nivel de compresión de entre los dos disponibles: mejor (*best*) y más rápida (*fast*)⁶.
2. Seleccionar si se desea reducir la paleta de colores usada en cada tesela a un conjunto de entre 2 y 256 colores, optimizando su tamaño para su uso en entornos web a costa de posibles pérdidas si aparecen más tonos en cada tesela del máximo especificado.

Y, en el caso de elegir el uso de JPEG, adicionalmente se puede:

1. Establecer el nivel de calidad en el rango 1-100, que a bajos niveles puede llegar a generar artefactos o aberraciones visibles en las imágenes⁷.
2. Elegir la codificación de color entre YCbCr, más habitual en fotografía y vídeo, y el más extendido RGB.
3. Activar o alterar el algoritmo de una segunda compresión sin pérdidas u optimización, pudiendo elegir entre desactivarla, usar el algoritmo de codificación Huffman⁸ o el de codificación aritmética.

⁶Según sus desarrolladores, la elección no tiene un gran impacto en el espacio ocupado por cada tesela, pero sí es significativo en el uso de CPU (debido a la compresión sin pérdidas usada).

⁷Debido al carácter con pérdidas de la compresión en archivos JPEG.

⁸Denotado internamente y documentado sin mención a Huffman, creador del algoritmo, aunque queda claro al consultar el estándar relevante [149].

Además, dado que MapCache dispone de una herramienta de generación procedural de la copia caché (semillado) denominada `mapcache_seed`, se optó por su uso para asegurar disponer de la copia más completa posible. Revisando las opciones disponibles en ella, esta permite alterar, durante el semillado [150], cuestiones como:

- El número de hilos o de procesos a emplear.
- El metateselado a aplicar (el número de teselas a abarcar en cada petición que se haga al servicio-origen de mapas involucrado).
- Los niveles de escala a cubrir.

Dado el extenso abanico de posibles opciones, se hizo necesario realizar pruebas para determinar las mejores combinaciones de las posibilidades anteriores, a fin de elegir, en base a los criterios de rendimiento temporal y eficiencia en el uso de almacenamiento, los ajustes de formato de imagen y de la herramienta de semillado finalmente usados.

Proceso de pruebas

Con motivo de tales pruebas, se crearon diversas permutaciones de configuraciones de formatos de imagen en el archivo de configuración de MapCache, vinculadas biyectivamente a distintos archivos SQLite mediante las entradas de tipo “*tileset*” (conjunto de teselas) necesarias, abarcando la gran mayoría de permutaciones y excluyendo la mera exhaustividad de posibles valores para el nivel de calidad en el formato JPEG y de la reducción de paleta de colores en el PNG, semillando posteriormente las teselas que cubriesen unas mismas extensas áreas mediante `mapcache_seed`. La relación de las combinaciones dispuestas de formatos de imagen puede consultarse en el anexo A.1.1.

En una primera fase, se procedió a buscar los ajustes más adecuados para la herramienta de semillado recurriendo primero al método de prueba y error de forma manual sobre el número de hilos o procesos, determinándose que es mejor el uso de hilos (debido a *bugs* subyacentes en el paralelismo mediante procesos) y que sólo se pueden disponer tantos hilos como núcleos de CPU se dispongan antes de que empiecen a aparecer errores HTTP 503 aleatoria y consistentemente debido a la sobrecarga inducida sobre el sistema local. Posteriormente, y abandonando el sistema de prueba y error anterior, se valoró el tiempo necesario para generar la copia caché de los 7 primeros niveles de escala disponibles de los 19 totales⁹ para la totalidad del globo terrestre usando el mapa generado localmente a partir de datos de OpenStreetMap (OSM) y la representación resultante de obtener sólo imágenes aéreas y de satélite de las publicadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) mediante su servicio WMS, repitiéndolo 10 veces para emplear las medias de tiempos y tamaños observados con tales muestras para hallar el mejor nivel de metateselado.

Partiendo de la hipótesis de que a mayor nivel de metateselado se apreciarán mejores tiempos en el proceso de semillado, sustentada en los menores uso de red y de número de escrituras en el archivo de almacenamiento SQLite dispuesto, se procedió a realizar la prueba descrita disponiendo el metateselado en 15x15, 8x8 y 1x1 teselas, no pudiendo incrementarlo más por limitaciones de la herramienta.

Los resultados recabados, cuyas gráficas se disponen en el anexo A.1.2, confirmaron la hipótesis descrita antes, por lo que se continuó fijando el metateselado a 15x15 teselas. Adicionalmente, de la interpretación de las observaciones recabadas, se concluyó:

⁹A fin de concluir en tiempo razonable ya que debe recordarse que con cada nivel de escala el número de teselas a obtener se cuadruplica y, con ello, el tiempo empleado

- Para las combinaciones de configuración de formato de imagen basados en JPEG:
 1. El uso de la codificación de colores RGB resulta en la generación de archivos de almacenamiento que requieren en torno al doble de espacio en comparación con la YCbCr, motivando el descarte de toda opción que emplease la codificación RGB, con independencia de otros parámetros.
 2. El uso de la optimización aritmética implica internamente el empleo de algoritmos que presentan un comportamiento aparente de orden exponencial (respecto del nivel de calidad elegido) en ambos tiempo y tamaño de salida, además de tardar más que otras alternativas con el mismo nivel de calidad, motivando el descarte de toda opción que emplee optimización aritmética, con independencia de otros parámetros.
 3. El uso de la optimización no aritmética¹⁰, aunque incrementa el tiempo total de la generación de teselas del semillado respecto de la misma configuración sin optimizaciones de imagen, supone, en la mayoría de casos, un incremento de en torno a un mero 1% del tiempo total. No obstante, su uso supone, según se ha observado, un ahorro de espacio mínimo aproximado del 15% y con máximos superiores al 50%, motivando el descarte de toda opción que no emplease esta optimización, con independencia de otros parámetros.
- Y para las combinaciones de configuración de formato de imagen basados en PNG:
 1. El uso de reducciones del número de colores presentes en cada tesela conlleva generalmente mayores tiempos en comparación con mantener la totalidad de tonos de color disponibles en las imágenes recabadas, probablemente debido a los cálculos necesarios. Esto motivó el descarte de toda configuración que emplease reducciones del número de colores presentes en cada tesela, con independencia de otros parámetros.
 2. El uso del perfil de compresión “mejor” redundaba en reducciones del tamaño total, pero necesitado, en cualquier caso, más del doble de tiempo para concluir. Esto motivó el descarte de toda configuración que emplease el perfil de compresión mejorada.

Los descartes de configuraciones realizados implicaron continuar ahora sólo con las configuraciones del cuadro 4.1, expuesto más adelante.

	Formato	Compresión	Codificación	Optimización	Calidad
PNG_FAST	PNG	Rápida	N/A	N/A	
JPEG_BEST_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	100
JPEG_95_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	95
JPEG_90_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	90
JPEG_85_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	85
JPEG_80_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	80
JPEG_75_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	75
JPEG_50_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	50
JPEG_25_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	25

Cuadro 4.1: Formatos de imagen candidatos tras el descarte inicial.

Realizado el grueso de descartes anterior, se continuó con una segunda fase en la que se repitió el experimento anterior de semillado alterando algunos parámetros, procediendo a generar copia caché de sólo una región del globo, abarcando un rectángulo que inscribe a Castilla y León y unos

¹⁰Según el estándar JPEG [149], mediante el algoritmo de Huffman.

kilómetros alrededor de la Comunidad para los niveles de escala 7 a 12 (de los existentes 0 a 18). Los resultados recabados, disponibles en el anexo A.1.3, evidencian lo siguiente:

1. Los formatos de imagen seleccionados basados en JPEG con optimización no aritmética y codificación YCbCr son más eficientes en tiempo y espacio que el anteriormente seleccionado basado en PNG.
2. Los formatos de imagen seleccionados basados en JPEG son, entre sí, más ineficientes tanto en tiempo (de forma aparentemente lineal) como en espacio (de forma aparentemente exponencial) conforme se aumenta el nivel de calidad.

Las conclusiones de esta fase hacen que la decisión de qué formato deba usarse deba ser informada por una inspección visual de la fidelidad de las teselas mediante comparación de un mismo conjunto de teselas en los distintos formatos seleccionados ya que, como el formato JPEG acarrea necesariamente una compresión con pérdidas, pueden llegar a producirse artefactos que distorsionen la información de las teselas y lleven a error a las personas cuando estas intenten reconocer los elementos que se plasman en ellas. En este sentido, debe recordarse el objeto del sistema, que es el de asistir en el confeccionamiento de rutas, por lo que tiene sentido que se evalúe si, por ejemplo, los artefactos que aparezcan impiden la lectura del mapa o el reconocimiento de elementos como edificaciones, vías, muros o vallados; y no tiene tanto sentido evaluar si dificultan o impiden reconocer, por ejemplo, la presencia de personas o del pequeño mobiliario urbano.

Tal apreciación se llevó a cabo ampliando las configuraciones candidatas, configurando, generando y comparando copias caché para las mismas regiones del espacio usando JPEG con codificación YCbCr, optimización Huffman y los niveles de calidad 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100; así como con el formato PNG seleccionado previamente (con compresión rápida y sin reducción de paleta de colores) como control, asegurando la revisión de distintos niveles de escala (incluyendo las no generadas hasta este momento) además de distintas regiones del espacio. Como resultado de esta inspección ocular se determinó que el uso de JPEG con los ajustes indicados antes en este párrafo es viable solamente cuando el nivel de calidad se establece igual o superior a 60, detectando los siguientes tipos de distorsiones en niveles inferiores:

- Eliminación de colores usados en zonas extensas.
- Aparición de ruido que dificulta o incluso confunde la interpretación de elementos.
- Infiltración del color de contorno/reborde en elementos tipográficos incrustados, dificultando o impidiendo su correcta lectura.
- Difuminación y/o interrupción de elementos finos.

Si bien algunas de las distorsiones indicadas siguen presentándose a niveles superiores, analizando diversas zonas rurales y urbanas usando el nivel de calidad de compresión 60, no se encontraron ocurrencias donde tales distorsiones dificultaran la lectura, la interpretación o el reconocimiento de elementos plasmados en las teselas. No obstante, es cierto que tal inspección no se realizó de manera exhaustiva, por lo que cabe la posibilidad de que, si bien rara, surgiese alguna tesela en la que las distorsiones acaecidas por la compresión sí pudieran llegar a presentar dificultades al leer, interpretar o reconocer algún elemento aislado. Ello motivó seleccionar tal nivel de compresión como el idóneo para el formato JPEG, ya que seleccionar uno superior conllevaría el gasto de mayores recursos.

Como ya se veía en el cuadro 4.1, sólo quedaba como candidata una única configuración de formato de imagen PNG, por lo que ha de considerarse idónea. Con ello, las configuraciones de formato de imagen consideradas idóneas se recogen en el cuadro 4.2, expuesto más adelante.

	Formato	Compresión	Codificación	Optimización	Calidad
PNG_FAST	PNG	Rápida	N/A	N/A	N/A
JPEG_60_OPTIM_YCBCR	JPEG	N/A	YCbCr	Huffman	60

Cuadro 4.2: Configuraciones consideradas idóneas para los formatos PNG y JPEG.

No obstante, dada la diferencia en tiempo de procesamiento y espacio de almacenamiento usado, y considerada la diferencia final entre imágenes en uno y otro formato en el sentido de las distorsiones anteriormente referidas, se continuó utilizando el formato JPEG de este último cuadro, ya que es más eficiente y la degradación de imagen asociada (ausente en el formato PNG) no se traduce en inconvenientes a la hora de usar las teselas resultantes.

4.2.5.5. Generación de la copia caché de teselas de las zonas de interés

Conocidos los mejores ajustes de la herramienta de semillado `mapcache_seed` y elegido el formato de imagen, se procedió a realizar el semillado, mediante la herramienta al efecto, para las combinaciones de niveles de escala y regiones del espacio señaladas en el cuadro 4.3 disponible más adelante¹¹.

Niveles de escala	Región cubierta *	Coordenadas (EPSG:3857)**			
		Punto 1		Punto 2	
		x	y	x	y
0-6	Planeta Tierra	N/A	N/A	N/A	N/A
7-10	Península Ibérica	-1200000	4000000	550000	5600000
11-13	Castilla y León	-840000	4840000	-130000	5400000
14-16	Término municipal de Valladolid***	-545000	5100000	-518000	5124000
17-18	Valladolid, núcleo principal****	-545000	5100000	-518000	5124000

* Incluye un borde adicional para no obviar elementos de importancia. Además, por limitaciones software, deben ser cuadradas o rectangulares.

** De los extremos que conforman la diagonal entre los puntos con menores y mayores x e y .

*** Incluyendo los enclaves existentes.

**** El interior de las carreteras VA-30 y A-62; junto al Aeropuerto de Valladolid y la autovía A-60.

Cuadro 4.3: Parámetros usados para limitar las zonas semilladas en la copia caché.

Llegado este punto debe reseñarse que, dado que cabe la posibilidad de que los orígenes de información remotos respondan con errores, resultando en la imposibilidad de generar teselas para partes de o todas las zonas solicitadas, la generación de la copia caché ha de hacerse reduciendo sucesivamente el metateselado aplicado, haciendo que tal fallo remoto afecte así exclusivamente al mínimo de teselas sin sacrificar en el proceso la mejora de rendimiento asociada al uso de metateselado.

Estas cuestiones propiciaron la creación de un script que gestiona este proceso de forma automática buscando la eficiencia temporal¹² y asegurando la copia caché más completa posible¹³.

¹¹Las zonas recogidas en el cuadro se corresponden también con las usadas en el proceso de pruebas de los párrafos anteriores.

¹²Repitiendo el semillado con los mismos parámetros hasta que no se puedan generar más teselas.

¹³Reduciendo escalonadamente el metateselado.

4.2.6. Nominatim

Al igual que los otros programas indicados, se necesitaron realizar diversos ajustes de configuración sobre Nominatim que se indican a continuación.

4.2.6.1. Retirada de instancia PostgreSQL del contenedor y uso de base de datos externa

Como la imagen de contenedor usada como base para Nominatim incluye una instancia de PostgreSQL local al contenedor pero innecesaria al haberse dispuesto otra a usar en el diseño, se procedió a la retirada de los elementos de PostgreSQL incluidos en la imagen de Nominatim usada mediante la edición de las instrucciones de generación programática que la crean y de los scripts de inicio del contenedor que automatizan todas las acciones necesarias para proveer el servicio normal de Nominatim para retirar las referencias a tales elementos. Y dado que Nominatim necesita de una base de datos PostgreSQL para funcionar de manera normal, se estableció el uso de la instancia PostgreSQL/PostGIS ya desplegada. Como Nominatim permite cambiar cualquier elemento de su configuración disponiéndola en variables de entorno homónimas (`NOMINATIM_DATABASE_DSN` en el caso de los ajustes de conexión a la base de datos) [151], se modificó el archivo de Docker Compose para disponer el valor adecuado en la variable de entorno señalada y así hacer que Nominatim tenga el comportamiento deseado.

4.2.6.2. Selección del nivel de grano de búsqueda

Nominatim permite alterar la granularidad del proceso de importado de información, permitiendo después poder buscar lugares de distintos tipos. Tal alteración se puede aplicar mediante el ítem de configuración `NOMINATIM_IMPORT_STYLE`, por lo que disponiendo la variable de entorno del mismo nombre se cambia tal configuración [151]. Este elemento de configuración admite 5 valores distintos [84]:

- **admin**: Restringe la información que se capturará (y por ende permitirá buscar) a la de demarcaciones administrativas (como países, comunidades autónomas, provincias o municipios).
- **street**: Restringe la información que se capturará (y por ende permitirá buscar) a la del conjunto anterior junto a la de vías públicas para poder buscar también por calles.
- **address**: Restringe la información que se capturará (y por ende permitirá buscar) a la del conjunto anterior junto a la de números de edificios para poder buscar por direcciones postales.
- **full**: Valor por defecto, con el que se captura toda la información anterior junto a la de todos los puntos de interés disponibles (como negocios, lugares públicos, monumentos, lugares de culto, etc.)
- **extratags**: Este ajuste, además de la información del punto anterior, captura la casi totalidad de la información adicional disponible para cada elemento importado.

4.2.6.3. Persistencia del mapa de codificación internamente generado

Durante las comprobaciones realizadas se descubrió que, debido a un defecto de diseño de la imagen de contenedor y/o de sus instrucciones de Docker Compose asociadas, había un archivo crítico que se genera durante el proceso de volcado inicial de información en la base de datos

pero que no dispone de persistencia alguna, que contiene la especificación de un *tokenizador*¹⁴. Faltando este *tokenizador* [152], Nominatim no es capaz de ofrecer servicio alguno y toda base de datos y/o sus copias son completamente inútiles, por lo que advertida la situación se dispuso este archivo como punto de montaje de Docker para externalizarlo y solventar el fallo encontrado.

4.2.6.4. Segregación del contenedor y persistencia de archivos de información geográfica de OpenStreetMap (OSM) usados

Hallándose que Nominatim emplea, como única entrada externa, un archivo en formato OSM o PBF con la información de las zonas en las que se desea poder buscar lugares, conviene disponer que tales archivos se almacenen realmente en un lugar externo al contenedor para mejorar la mantenibilidad y reducir el tamaño de la imagen de contenedor.

Para ello, se procedió a disponer el uso de una carpeta externa al contenedor para el proveer en esta el archivo indicado, disponiéndola a través de los mecanismos de Docker Compose como punto de montaje.

4.2.7. Valhalla

A estas alturas no debería sorprender al lector que Valhalla también haya necesitado de los ajustes de configuración que se relacionan dentro de esta sección.

4.2.7.1. Activación de capacidades

Revisada la documentación de la imagen de contenedor usada, el uso de ésta con la configuración por defecto [133] hace que no se activen capacidades presentes en el motor de rutas que pueden ser de utilidad (como el uso de información de elevación, demarcaciones administrativas o zonas horarias) y que se pueden alternar cambiando variables de entorno definidas en el archivo de Docker Compose que acompaña a la imagen, por lo que se procedió a la activación de las referidas características.

4.2.7.2. Segregación del contenedor y persistencia de archivos OSM usados y artefactos generados

Encontrándose que Valhalla genera toda una estructura de archivos al interpretar la información geográfica inicial dada a éste, es muy conveniente guardarla para, de tal manera, reducir notablemente el tiempo necesario para restablecer el servicio normal tras cada reinicio de su contenedor.

Para ello, se procedió a disponer el uso de una carpeta externa al contenedor para el almacenaje de las referidas estructuras, disponiéndola a través de los mecanismos de Docker Compose como punto de montaje. La misma operación se llevó a cabo para los archivos de OSM que contienen la información geográfico-viaria de las zonas para las que se desea disponer de enrutamiento.

4.2.8. Cliente web ligero

Siendo el último de los elementos del lado de servidor, también se necesitaron realizar ajustes diversos en el cliente web incluido en el diseño.

¹⁴Según la documentación aplicable, un mapa de correspondencias para normalizar informaciones, ya sean las importadas inicialmente o las entregadas por usuarios con motivo de sus búsquedas, y sirve para poder ejecutar las consultas necesarias con garantías [152].

4.2.8.1. Uso de los otros servicios desplegados

El primer ajuste necesario y realizado en el cliente web desplegado fue disponer en éste el uso del resto de servicios desplegados, editando para ello el archivo de variables de entorno que incluye para cambiar las URL de conexión a los servicios y regenerando la imagen del contenedor.

4.2.8.2. Incorporación de mapas creados

Posteriormente, se procedió a la modificación del código del cliente para incluir los diversos mapas creados como posibles opciones y que así puedan ser consultados.

4.3. Verificación de rendimiento

Terminada la implementación del prototipo satisfaciendo los requisitos funcionales, se ha de comprobar que también satisface los no funcionales que, entre otros, modelan la curva de carga esperada y, con ella, el rendimiento mínimo que debe disponer para que el prototipo sea viable.

4.3.1. Modelado de la carga

Así pues, se ha de empezar por recordar el requisito aplicable al efecto: “*El sistema deberá ser capaz de soportar un volumen de peticiones (de consultas de mapa, búsquedas o trazados de ruta) con una media de 1 por segundo y picos acotados superiormente en 3 por segundo por periodos de 1 segundo con una frecuencia semanal.*”. Éste establece las pautas para hallar el modelo de carga que la aplicación deberá ser capaz de soportar para poder validar el prototipo creado.

4.3.1.1. Determinación de magnitudes técnicas

El requisito anterior ha de ser *minuciosamente* analizado, ya que una lectura superficial llevaría a importantes errores en el análisis a realizar. Y es que en realidad éste nos dice que, tomando el segundo por medida instantánea de tiempo, no se espera que de normal haya más de 1 petición simultánea *en el sentido que un usuario medio pueda tener*: buscar una dirección, solicitar una ruta o recabar un “trozo” cualquiera de un mapa para verlo por pantalla; dar por válido otro entendimiento del requisito sería difícil de entender técnicamente. Pero ha de tenerse la cautela *de que el “trozo” que el usuario solicita no es una tesela aislada de las provistas mediante WMTS, sino la región de mapa que su pantalla abarque*, esto es, la consulta de toda la zona del mapa en la que se está fijando o quiere fijarse.

Resueltas las verdaderas magnitudes de la definición del modelo de cargas, el requisito citado también delimita los picos de carga esperados, para los que sitúa, usando las mismas magnitudes, el tope de 3 peticiones simultáneas en un instante de tiempo a lo largo de una semana.

Ahora bien, este modelo de cargas, si bien es útil para la planificación de recursos organizacionales, requiere de transformaciones para planificar los recursos computacionales a disponer, en tanto que la ejecución de cada voluntad de los usuarios¹⁵, por muy instantáneas que puedan tornarse, pueden conllevar más de una acción técnica de la que estos no tienen necesidad de ser conscientes.

¹⁵Lo que dependiendo de metodologías se conceptualiza mediante, por ejemplo, *historias de usuario* o *casos de uso*.

4.3.1.2. Determinación de medidas técnicas

Así pues, se han de definir los factores de conversión entre las magnitudes usadas en el literal del modelo dispuesto y las que han de manejarse técnicamente, para lo que primero se ha de definir qué comprende cada una de ellas en términos técnicos, teniendo:

- Búsqueda de ubicación, que comprende introducir el nombre de un lugar en el cuadro de texto aplicable, seleccionar el resultado aplicable y centrar el mapa en el resultado.
- Consulta de mapa, que comprende acceder a una región del mapa distinta de la actual, ya sea en posición o en escala, sin indicación de la posibilidad de que el usuario pueda realizar múltiples movimientos intermedios de forma consecutiva.
- Trazados de ruta, que comprende introducir el nombre de un lugar origen en el cuadro de texto aplicable, seleccionar el resultado deseado, repetir lo anterior para cada punto de parada deseado y otra vez más para el destino y recibir la ruta solicitada, centrándose el mapa en ella.

Como puede verse, ninguna de ellas conlleva en el plano técnico una única petición. Además tenemos la cuestión de la carga inicial del cliente web, que el requisito no ha abordado. De tal manera, se observaron experimentalmente:

- Con cada carga del cliente web en un navegador, la emisión de 9 peticiones al servicio Node.js desplegado para recabar los recursos que lo constituyen, consumiendo aproximadamente 2.90 MB de tráfico; y además se consulta la disponibilidad de Valhalla mediante 1 única petición a éste que consume aproximadamente 360 bytes.
- Con cada consulta de mapa, se han contabilizado hasta 46 peticiones a MapCache para obtener teselas del mapa¹⁶ mostrado, con un tráfico de peso variable por la compresión establecida pero que llega hasta los 850 KB.
- Con cada búsqueda tenemos que, al no haber una búsqueda progresiva conforme se escribe, se emite una petición con los términos buscados que viene a recibir una respuesta con un tamaño máximo de en torno a 2.5 kB, realizándose una consulta de mapa posteriormente al elegir un resultado para mostrar el mapa de la zona.
- Con cada trazado de ruta, se ha de repetir, al menos, 2 veces la búsqueda de ruta, aumentando en 1 más por cada parada intermedia deseada, realizándose automáticamente una consulta de mapa con cada punto marcado y realizando otra consulta más para obtener la ruta que consume menos de 200 kB.

Con estos datos, se pueden hacer aproximaciones o acotaciones superiores relativamente fiables para cada proceso involucrado, que se detallan en el cuadro 4.4, expuesta más adelante.

4.3.2. Modelado y ejecución de una batería de pruebas de rendimiento

Recabadas estas medidas, se consideró adecuado crear y ejecutar una batería de pruebas para comprobar que los servicios son estables, al menos, ante los volúmenes de carga que se han modelado.

¹⁶Necesarias para cubrir la ventana del navegador a pantalla completa usando una resolución de 1920x1080 píxeles. Téngase en cuenta que cada tesela es de 256x256 píxeles, y que de cambiar la resolución de pantalla cambiará el número de teselas obtenidas.

Actividad	Servicio	Peticiones HTTP	Tráfico de red
Carga del cliente web	Node.js	9	2,9 MB
	Valhalla	1	360 bytes
Trazado de ruta	Valhalla	1	200 KB
	Nominatim	2	5 KB
Búsqueda de ubicación	Nominatim	1	2,5 KB
Consulta de mapa	MapCache	46	850 KB

Cuadro 4.4: Relación, para cada actividad con cargas a modelar, de servicios usados y de máximos del número de peticiones HTTP emitidas a estos y del tráfico de red necesario para satisfacerlas.

4.3.2.1. Descripción de las pruebas incorporadas

Para ello, se creó un plan de pruebas usando JMeter que simule el comportamiento que los usuarios reales pudieran mostrar interactuando con el prototipo. Dicho plan de pruebas comporta repeticiones de la siguiente secuencia:

1. Obtener el cliente web y cargar los recursos que necesitaría para mostrarse correctamente en un navegador web.
2. La carga de 46 teselas de mapa, equivalentes en número a las que se cargarían inicialmente en el navegador web de usarse una pantalla de resolución 1920x1080.
3. Una pausa de entre medio segundo y segundo y medio, correspondiente al tiempo que pudiera tomar a un usuario empezar a interactuar con la aplicación.
4. Aleatoriamente, una de las dos opciones siguientes:
 - Buscar la ubicación de un lugar¹⁷, y realizar una pausa antes de seguir de entre medio segundo y segundo y medio, simulando el tiempo que, dado que se le mostrarían los resultados de su búsqueda, el usuario tardaría en seleccionar la opción correspondiente al resultado deseado.
 - Recabar una ruta, para lo que primero se solicitan la ubicación de, aleatoriamente, 2 o 3 lugares¹⁸ con una pausa de entre medio segundo y segundo y medio, y posteriormente, se solicita una ruta entre dos puntos de un conjunto cerrado de puntos aleatorios de Castilla y León en su mayoría¹⁹.
5. Recabar, de nuevo, teselas de mapa equivalentes en número a las que se cargarían en el navegador web de usarse una pantalla de resolución 1920x1080, simulando el desplazamiento que ocurre en el mapa tras buscar un lugar u obtener una ruta.

Posteriormente, se ejecutó el indicado plan varias veces contra un despliegue del sistema en una máquina virtual con 4 núcleos de CPU y 4 GB de memoria RAM, monitorizando los niveles de carga de CPU, memoria y disco de tal máquina, y cambiando el número de hilos, que simulan usuarios concurrentes, con los que repetir la secuencia descrita. Dado que en los sistemas Linux tenemos como indicadores de la fracción de carga de CPU soportada²⁰, las mediciones a 1, 5 y 15

¹⁷Usando para ello uno de los nombres de los del conjunto de nombres de calles de Valladolid [153].

¹⁸Con lo que se simula la posibilidad de que las búsquedas realizadas no retornen los resultados esperados

¹⁹Dado que el servicio de búsqueda de lugares y el de trazado de rutas son independientes, la falta de coincidencia no influye en el comportamiento del sistema.

²⁰Lo que implica, que en la máquina virtual del despliegue indicado, con 4 núcleos de CPU, todos ellos estarán ocupados en su totalidad para el tiempo que abarque el indicador correspondiente cuando alcance el valor de 4,00.

minutos en tanto por núcleo de CPU, e indicadores instantáneos del nivel de uso de la memoria y el disco, cada ejecución se realizó durante tiempos notablemente superiores a 15 minutos para así poder desechar los datos de ese tiempo inicial y poder tener una idea adecuada de la carga soportada a largo plazo con cada volumen de usuarios simulados.

4.3.2.2. Resultados de la ejecución de la batería de pruebas

Los resultados recabados indicaron que el primer recurso en saturarse se trata de la CPU, constatándose ninguna incidencia en relación con la memoria y el uso de disco, lo que comenzó a ocurrir al disponer los hilos entre 40 y 60 por ejecución. Dado que aporta relativamente poca información explorar los niveles de carga en incrementos menores a la decena, sólo se ejecutaron pruebas con 40, 50 y 60 hilos. Las estadísticas relevantes con las que tomar decisiones en base a tales resultados, obtenidas de la información de carga de CPU recabada a cada segundo durante la ejecución de cada prueba mediante el uso de `sar`, pueden ser consultadas en el cuadro 4.5, expuesto más adelante.

		1 min	5 min	15 min
40 hilos o usuarios simulados	Máxima	4,04	3,05	2,75
	Media	2,6423	2,6249	2,5001
	Mediana	2,64	2,63	2,55
50 hilos o usuarios simulados	Máxima	6,5	5,05	3,75
	Media	4,2057	4,1662	3,4222
	Mediana	4,06	4,02	3,64
60 hilos o usuarios simulados	Máximo	8,36	6,06	5,03
	Media	5,7875	5,4117	4,5192
	Mediana	5,79	5,43	4,49

Cuadro 4.5: Estadísticas de carga de CPU soportada por una máquina virtual con el prototipo en ejecución durante pruebas de carga con JMeter con distintos números de usuarios simulados.

Del análisis de tales estadísticas, se puede concluir que:

1. Cuando 40 usuarios o menos interactúen a la vez con el sistema, éste responde adecuadamente, lejos de saturarse sus recursos, si bien en algún momento puntual puede llegar a ocurrir que, por la coincidencia de determinadas circunstancias, pueda llegar a trabajar a, aproximadamente, el máximo de su capacidad.
2. Cuando aproximadamente 50 usuarios interactúen a la vez con el sistema, éste llega a alcanzar el puro límite de su capacidad, como evidencian las métricas a 5 y 15 minutos, y podrá observarse algo de degradación en los servicios prestados, especialmente en los tiempos de respuesta, lo que justificaría evaluar y planear el aumento de núcleos de CPU disponibles u otras soluciones que reduzcan la carga soportada.
3. Cuando 60 o más usuarios interactúen a la vez con el sistema, éste se ve completamente desbordado en todo momento, como demuestran las métricas a 15 minutos, y será urgente tomar medidas correctivas encaminadas a ampliar la CPU disponible o reducir la carga soportada.

En cuanto a las condiciones de saturación puntual indicadas para 40 o menos usuarios, se ha constatado que cuando se piden rutas con orígenes o destinos muy alejados de cualquier camino

conocido, Valhalla termina indicando que no puede satisfacer la petición, no sin antes buscar en un radio determinado posibles caminos que usar, lo que es una tarea más intensiva para la CPU. Así pues, es la hipótesis del alumno-autor que con gran probabilidad las saturaciones momentáneas de CPU coincidan con múltiples peticiones simultáneas de rutas imposibles de resolver.

Adicionalmente, JMeter también aporta otros datos estadísticos, fruto de la ejecución de las pruebas, que pueden consultarse en los cuadros del anexo A.2, y sobre estos datos se pueden realizar las siguientes afirmaciones:

- Atendiendo a los mínimos obtenidos, sorprende el hecho de recabar tiempos de cero milisegundos en buena parte de los mínimos, medias y medianas, lo que probablemente sea producto de haber realizado las pruebas sobre la misma máquina física que la virtualizada que aloja los servicios, por lo que básicamente no hay latencias de red, junto a la posible presencia de copias en memoria RAM de elementos usados en las respuestas a las peticiones involucradas, lo que puede llegar a provocar la situación observada en cualquier sistema.
- En relación a la tasa porcentual de errores, el mero hecho de que no todas sean nulas, como ocurre con la mayoría de tipos de solicitudes de rutas a Valhalla, no es indicativo de fallos por saturación, sino que se tratan de rutas que tienen el inicio o final en un lugar demasiado alejado de un camino conocido por lo que, tras la búsqueda de caminos dentro de un radio determinado, al no encontrar uno, el programa devuelve respuestas explicitando tal fallo en sus cabeceras, que son tomadas automáticamente por JMeter como errores.
- Al comparar las distintas estadísticas de los tiempos de respuesta, se puede apreciar que Valhalla necesita, como evidencian las métricas media, mediana y los percentiles 90, 95 y 99, de mayores tiempos que el resto de servicios para responder adecuadamente a las solicitudes que se le hacen, lo que, junto a lo explicado en el punto anterior, indicia que, con gran probabilidad, la hipótesis enunciada por el alumno-autor en los párrafos anteriores es cierta.

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 5

Análisis de costes

Completado el prototipado de la solución diseñada, es el momento idóneo de presupuestar qué costes conlleva su uso y compararlos con los de ArcGIS, plataforma comercial de contraste para este Trabajo Fin de Grado (TFG), lo que conforma la cuestión central de este capítulo.

5.1. Tiempo de operación a presupuestar

Como en cualquier presupuesto de sistemas informáticos, se ha de comenzar por establecer el tiempo de operación esperado para el sistema cuyos costes se calculan, esto es, su vida útil mínima. Para este caso se fija la vida útil inicial en 5 años, ya que alcanzado este tiempo se puede dar contablemente la inversión asociada por amortizada [154], los activos tecnológicos empiezan a quedar desfasados y cabe una posibilidad, no precisamente despreciable de que, por la evolución de la técnica, la solución implantada ya esté completamente obsoleta, justificando su reemplazo.

Será una vez alcanzado este horizonte temporal cuando haya que plantearse si se necesita cambiar la infraestructura o mantenerla, ya que, fijada la vida útil inicial, tener que considerarlo antes sería bien un efecto de avances exponenciales del estado del arte o bien un fallo de planificación.

5.2. Importe del software de ArcGIS

Comencemos abordando los costes que implica el uso de ArcGIS, ya que de no abordarlos sería difícil trazar comparativa alguna en la dimensión monetaria actual.

5.2.1. Esquema de licencias

Para trazar la referida comparativa económica es obligado examinar de qué formas se comercializa ArcGIS ya que, debido a los efectos de la licencia que antepone su fabricante ESRI¹, el acceso al software pasa por la adquisición de meros derechos de disfrute (usufructo) sobre éste, que constituyen el grueso del coste, encontrándose un sistema de segmentaciones y opciones sucesivas, que cambia dependiendo del software específico involucrado.

5.2.1.1. Esquema de licencias de ArcGIS Pro

A fin de simplificar el laberinto de licencias de ArcGIS, centrémonos primero en las opciones para el software de escritorio, ArcGIS Pro. Para él se tiene, primero, tres niveles de licencia, con

¹Véase el apartado 6.1: “Licencia de uso”.

los que aumentan progresivamente las capacidades del software que se pueden usar [155]:

1. **Basic**, que permite el uso de las funcionalidades más básicas del software.
2. **Standard**, que desbloquea, respecto del nivel anterior, capacidades de: creación, uso, gestión, mantenimiento, replicación y detección de fallos de bases de datos geográficas mediante el uso de DBMS² externos y de los datos contenidos en éstas; creación, edición y explotación de topologías³ de trazados parcelarios y/o de redes⁴ y de las propiedades de los elementos constituyentes de tales trazados; la creación de conjuntos de datos basados en mosaicos; y el uso de diversas herramientas prediseñadas para procesar la información que se disponga.
3. **Advanced**, que desbloquea, respecto del nivel anterior, capacidades de: manipular y explorar ortofotogrametrías⁵; usar sistemas de inteligencia artificial para detectar objetos diversos; ejecutar simulaciones gráficas de inundaciones y otras riadas; y desbloquear la amplia mayoría de las herramientas prediseñadas por ESRI para procesar la información que se disponga, exceptuando simplemente aquellas a licenciar por separado.

Segundo, existen tres tipos de licencia en base a las restricciones adicionales [156]:

- **De usuario nominal**, que permiten instalar el software donde se desee pero solamente usarlo en un máximo de 3 equipos a la vez por licencia, extremo controlado por ESRI mediante la autenticación en ArcGIS Online [157].
- **De uso único**, que permiten activar el software en hasta 2 equipos a la vez, pero sólo usarlo en 1 al mismo tiempo, extremo controlado por los servidores de ESRI [158].
- **De uso concurrente**, ancladas a servidores de licencias privados desplegados por las organizaciones que las adquieren, permiten activar la instalación en tantos equipos como se desee pero, siguiendo un esquema similar al de las cerraduras de llave cautiva⁶ o al de DHCP, meramente permite usar tantas instalaciones a la vez como licencias realmente se hayan adquirido [159].

Tercero y último, se disponen dos posibles esquemas de duración/renovación de licencia [156]:

- **Por suscripción anual**, con renovaciones automáticas.
- **A perpetuidad**.

5.2.1.2. Esquema de licencias de ArcGIS Enterprise

El software de servidor de ArcGIS, que permite generar una infraestructura lógica privada equivalente a la de la pública nube de ArcGIS Online y entrelazar con otras instancias o conectar con ArcGIS Pro u Online, tiene otro esquema de licencias, con niveles, roles, perfiles de usuario final, núcleos físicos de CPU y mismas duraciones que ArcGIS Pro.

En cuanto al esquema de niveles de licencia tenemos [160], [161]:

1. **Standard**, que habilita la mayoría de capacidades, a excepción de las licenciadas mediante extensiones o reservadas al nivel de licencia siguiente.
2. **Advanced**, que, respecto del nivel anterior, desbloquea capacidades analíticas, estadísticas

²Sistemas de Gestión de Bases de Datos, por sus siglas en inglés.

³Información, para un espacio tridimensional, sobre la coincidencia en el espacio de distintos elementos y, con ello, de la presencia o ausencia de contacto entre tales elementos.

⁴Entiéndase en el más amplio de los sentidos, esto es, de cualquier tipo, como por ejemplo, los de redes de caminos, vías, tendidos eléctricos, tuberías o de cualquier tipo de conductos.

⁵Fotografías del terreno y mediciones realizadas desde vehículos aéreos o desde el espacio.

⁶En el que cada licencia viene a ser una llave.

y de procesamiento en el servidor, activando en ArcGIS Pro las extensiones “3D Analyst”, “Network Analyst” y “Spatial Analyst”.

Continuando con los roles disponibles, tenemos [161]:

- **GIS Server**, para ofrecer un entorno colaborativo con el que guardar, publicar o editar datos y mapas, mediante ArcGIS Pro o mediante un navegador web.
- **GeoAnalytics Server**, para analizar y procesar datos masivos distribuidamente [162].
- **GeoEvent Server**, para recibir, filtrar, procesar y archivar eventos en tiempo real [163].
- **Image Server**, para generar imágenes dinámicamente [164].
- **Knowledge Server**, para incorporar Neo4j⁷ y cruzar, al menos, datos geográficos con los de relaciones y verlos como grafos o sobre mapas [165].
- **Notebook Server**, para usar el entorno PyArc⁸ a través del editor web “Jupyter Notebook” de manera integrada [166].
- **Workflow Manager Server**, para gestionar y guardar flujos de trabajo para ejecutarlos de forma automática o bajo demanda [167].
- **Video Server**, para buscar y distribuir contenidos audiovisuales en directo, mediante *streaming* e integrarlos en mapas [168].

Atendiendo a los perfiles de usuario, se ofrecen 6 posibles niveles de capacidades que desbloquear para cada usuario que use el sistema [169]:

1. **Viewer**, que pueden acceder e interactuar con los contenidos que se hayan compartido o publicado en el sistema.
2. **Editor**, que, respecto del nivel anterior, desbloquea la posibilidad de editar los contenidos ya compartidos o publicados mediante navegadores web o mediante determinadas aplicaciones de ESRI.
3. **Mobile Worker**, que, respecto del nivel anterior, meramente desbloquea poder usar algunas aplicaciones adicionales para dispositivos inteligentes diseñadas para asistir a trabajadores que realizan tareas de campo en la captura de información.
4. **Creator**, que, respecto del nivel anterior, desbloquea la posibilidad de crear, compartir o publicar nuevos contenidos en el sistema.
5. **GIS Professional**, que, respecto del nivel anterior, pueden ostentar capacidades administrativas e incluyen, en cualquier caso, licencia para el uso de ArcGIS Pro en alguno de sus niveles de licencia (Basic, Standard, Advanced).

En lo referente a los núcleos de procesador, se licencia por múltiplos de 4 núcleos físicos de CPU que tenga la máquina, física o virtualizada, en la que se ejecute [170], debiéndose aplicar tantas licencias como núcleos disponga tal máquina.

Y terminando con la posible duración de la licencia, se disponen las mismas opciones que para ArcGIS Pro: por **suscripción anual** o **perpetua** [171].

5.2.1.3. Esquema de licencia de ArcGIS Online

En cuanto al esquema de licencia para ArcGIS Online, el servicio de ArcGIS Enterprise en la nube de ESRI, es similar al de ArcGIS Enterprise, en tanto que son básicamente el mismo software en distintos entornos de producción.

⁷Un gestor de bases de datos basadas en grafos.

⁸Un entorno de programación Python con ciertas bibliotecas de código prediseñadas por ESRI incorporadas.

Por ello comparten el mismo licenciamiento en base a los 6 tipos de usuarios finales, con renovaciones forzosamente anuales. El resto de elementos que configuran la licencia de ArcGIS Enterprise no son relevantes en esta modalidad de acceso al software, por lo que no se puede configurar la licencia de ArcGIS Online en base a ellos.

5.2.2. Otros elementos software de ArcGIS

ESRI también distribuye y comercializa diversas aplicaciones [172], que vienen a requerir el uso de los anteriores productos de alguna forma, y extensiones para sus productos que permiten expandir sus capacidades, lo que puede ser de interés, ya sea por las nuevas capacidades que brindan como por una de las siguientes: facilitar el acceso a capacidades necesarias pero que, por el ahorro inherente, resulte más ventajoso adquirir mediante esta vía que mejorando la licencia adquirida; o por el acceso a capacidades de otra forma bloqueadas. No obstante, estos otros elementos no han de ser parte forzosa de una infraestructura que cumpla con los requisitos, y cada uno tiene sus propias condiciones a la hora de la adquisición de licencias, por lo que no han sido estudiados en este TFG.

5.2.3. Sondeo de importes de licencias

Para plantear qué importes conlleva el uso de las plataformas objeto de estudio, dada la carencia de precios fijos y públicos para todos los productos de ArcGIS, se partió de diversas listas de precios ofertadas en contratos públicos de varias Administraciones Públicas de los Estados Unidos de América [171], [173], [174], con las que se estableció que adquirir licencias perpetuas para los productos de ArcGIS conlleva, para la gran mayoría de escenarios, un mayor gasto de recursos económicos.

Esto es así debido a que, como para tener acceso a parches y nuevas versiones con todas las licencias perpetuas se requiere mantener un contrato de mantenimiento con pagos anuales ya incluidos en las suscripciones, tras la debida proyección temporal, para ArcGIS Pro y Enterprise no es más rentable la opción perpetua que renovar continuamente una suscripción anual hasta pasados al menos 15 años en el mejor de los casos. Por ello se debe afirmar que la suscripción es, salvo a muy largos plazos, la vía más económica, y descartar realizar el estudio de costes en base a licencias perpetuas cuando haya otras opciones. Adicionalmente, se constató que los precios ofertados para la licencia requerida para cada usuario en ArcGIS Enterprise y Online eran los mismos para cada tipo de los 6 disponibles.

No obstante, vistos todos los precios establecidos por la filial española de ESRI, única distribuidora autorizada para España de ArcGIS, que divulga públicamente los importes para el uso de ArcGIS Online en exclusiva, se observó que, partiendo de una conversión 1:1 entre euros y dólares estadounidenses para mitigar la fluctuación de tipos de cambio, esta filial ha fijado precios en torno a 2,25 veces los recabados de los clientes gubernamentales estadounidenses [175].

Transpuestos los precios locales divulgados para ArcGIS Online, aplicada la igualdad referida para las licencias por usuario de ArcGIS Enterprise y calculados los importes con el indicado factor sobre los otros precios recabados, se obtiene la relación de precios del cuadro 5.1, expuesta más adelante.

5.3. Importe del software de la solución propuesta

En una radical contraposición a ArcGIS, debido al efecto de las licencias de código abierto, en la solución propuesta y prototipada en este TFG no tenemos costes intrínsecos al uso de software,

Producto	Tipo de usuario	Basic	Standard	Advanced
ArcGIS Pro ^a	N/A	3.447,00 €	13.113,00 €	26.039,25 €
<i>Mantenim. anual</i>	N/A	1.046,25 €	3.978,00 €	7.897,50 €
Enterprise, anual	N/A	N/A	26.457,75 €	52.731,00 €
Por cada usuario de	Viewer		242,00 €	
	Editor		484,00 €	
ArcGIS Enterprise	Mobile Worker		786,50 €	
o	Creator		1.197,90 €	
ArcGIS Online	GIS Professional	Desconocido ^b	5.324,00 €	10.164,00 €

^a Si no se acude a las licencias GIS Professional de ArcGIS Enterprise u Online, sólo se puede licenciar a perpetuidad.

^b ESRI España no muestra precios para esta modalidad, y su material de ventas indica que probablemente se encuentren fusionándolo con el tipo *Creator* ya que recientemente se ha modificado lo que éste incluye añadiéndole una licencia de ArcGIS Pro Basic.

Cuadro 5.1: Importes estimados y recabados para licenciar ArcGIS Enterprise, Online y Pro.

sino que estos emanan exclusivamente de la infraestructura que se emplee para ejecutarlo y de los que resultarían del desarrollo y administración del entorno resultante. Tales otros costes se presupuestan con el debido detenimiento para cada plataforma más adelante.

5.4. Requisitos mínimos

A fin de después poder presupuestar los equipos necesarios, se han de revisar los requisitos mínimos que los fabricantes anuncian para las plataformas involucradas, ya que debieran ser respetados.

5.4.1. ArcGIS

En el caso de ArcGIS, tenemos que contemplar por separado a ArcGIS Pro y ArcGIS Enterprise, ya que ArcGIS Online no requiere de más hardware que cualquier ordenador relativamente moderno con conexión a Internet y un navegador actualizado.

5.4.1.1. ArcGIS Pro

Para el programa de escritorio tenemos los requisitos mínimos del cuadro 5.2, expuesto más adelante, de cuya lectura se puede ver que son satisfechos por la casi totalidad de equipos actualmente ofertados en el mercado.

5.4.1.2. ArcGIS Enterprise

Para el software de servidor, se presentan los requisitos mínimos del cuadro 5.3, expuesto más adelante. Debe reseñarse que los espacios de almacenamiento indicados en tal cuadro incluyen, al parecer, una provisión de en torno a 30 GB de espacio libre para almacenar datos geográficos.

Elemento	Mínimo
Sistema operativo	Windows 10, de 64 bits
Procesador	Arquitectura x64, multihilo con 4 núcleos
Memoria RAM	8 GB
Almacenamiento	64 GB
DirectX	Versión 11
OpenGL	Versión 4.3

Cuadro 5.2: Requisitos mínimos del sistema para ArcGIS Pro [176].

Elemento	Windows
Sistema operativo	Windows Server 2016, de 64 bits
Procesador	Arquitectura x86_64 y multihilo con extensiones SSE2, 2.2 GHz y 4 núcleos
Memoria RAM	16 GB
Almacenamiento	72 GB

Cuadro 5.3: Requisitos mínimos para ArcGIS Enterprise [177], [178], [179], [180], [181], [182].

Espacio adicional de almacenamiento necesario

En cuanto al espacio adicional necesario desplegando ArcGIS Enterprise, resulta que ESRI pone a disposición de los usuarios de sus herramientas una colección de mapas que ha hecho públicos en su ArcGIS Living Atlas⁹ [183], lo que evita tener que provisionar almacenamiento y almacenar tales mapas, sino que son obtenidos desde Internet.

Con ello, el espacio adicional de almacenamiento requerido optando por ArcGIS se reduce al necesario para guardar la información que se maneje.

5.4.2. Requisitos mínimos de la solución diseñada

Pasando a la solución aportada en este TFG, se ha probado satisfactoriamente en un equipo virtualizado con las características físicas del cuadro 5.4, expuesto más adelante, constatándose al reducir las una importante degradación del rendimiento. Para tal cuadro debe reseñarse que el espacio de almacenamiento en él indicado no incluye el necesario para el alojamiento de datos geográficos o la memoria caché de teselas, cuya previsión es revisada más adelante en este capítulo.

Elemento	Mínimo
Sistema operativo	Ubuntu 24,04 LTS
Procesador	Arquitectura x86_64, 2 núcleos multihilo (4 percibidos), a 3.2 GHz
Memoria RAM	4 GB
Almacenamiento	30 GB

Cuadro 5.4: Requisitos mínimos del sistema para la solución propuesta y prototipada.

⁹Atlas Vivo del Mundo de ArcGIS.

5.4.3. Espacio de almacenamiento necesario

Otra variable a tener en cuenta es el espacio de almacenamiento que se requiera usar, ya que varía en función del volumen de información provista y de los mapas generados.

Recabados los tamaños de archivos y artefactos usados y generados, y el número de kilómetros cuadrados que se abarcan en cada uno, podemos trazar aproximaciones relativamente razonables por proporcionalidad directa a los tamaños necesarios para generar, a máximo nivel de escala, el planeta entero, la Península Ibérica, Castilla y León y Valladolid, siendo las regiones elegidas antes en el cuadro 4.3, y cuyos resultados se disponen en el cuadro 5.5 dispuesto más adelante.

	Planeta	Península	CyL	Valladolid Mpal.	Urb.
Extensión, en km ²	149.300.000 ^a	1.662.451	221.269	2.516	361
Número de teselas	17.080.891.564 ^b	172.904.739	23.013.285	344.700	111.375
Datos de OSM	75,72	1,45	0,14	N/A	N/A
PostGIS: mapa viario	415 ^b	7,94	0,78	N/A	N/A
PostGIS: Nominatim	1.483 ^b	28,39	3,80	N/A	N/A
Archivos de Valhalla	398 ^b	7,61	1,15	N/A	N/A
Teselas PNG: ortofotografías	2.732.772 ^b	25.149 ^b	3.348 ^b	38,06	11,40
Teselas PNG: callejero	70.100 ^b	646 ^b	85,86	2,23	1,44
Teselas JPEG: ortofotografías	221.868 ^b	2.042 ^b	272 ^b	3,09	0,82
Teselas JPEG: callejero	21.624 ^b	219 ^b	29,13	0,67	0,40

^a Aunque la extensión aproximada del planeta es de aproximadamente 510 millones de kilómetros cuadrados, las regiones marítimas pueden ser optimizadas, dejando como relevantes las correspondientes a tierra firme.

^b Estimado, por su difícil obtención, usando proporcionalidad directa mediante otros conocidos y los números de teselas o el tamaño de los datos disponibles en OSM.

Cuadro 5.5: Tamaños, en GB, estimados y recabados para diversos elementos geográficos necesarios en el funcionamiento del sistema prototipado, junto a las áreas aproximadas que abarcan y las teselas que conllevan para la realización de cálculos.

Así mismo, en el cuadro 5.6 se refleja el espacio usado por cada 1.000 kilómetros cuadrados de mapa generado con cada uno de los 4 estereotipos de combinación de tipo de mapa y formato de archivo definidos.

	Planeta	Península	CyL	Valladolid Mpal.	Urb.
Teselas PNG: ortofotografías	16,640	15,128	15,131	15,128	31,579
Teselas PNG: callejero	0,427	0,389	0,389	0,887	3,989
Teselas JPEG: ortofotografías	1,351	1,229	1,230	1,229	2,272
Teselas JPEG: callejero	0,132	0,132	0,132	0,267	1,109

Cuadro 5.6: Tamaños, en GB, usados por cada 1.000 kilómetros cuadrados de mapa generado, para cada combinación de tipo de mapa y formato de archivo.

En cuanto a los datos adicionales que en cada caso se quieran añadir a los mapas, no se puede asegurar nada sobre su tamaño o el de las teselas en caché resultantes debido a que depende de la cantidad, densidad y variabilidad de los datos, así como de la configuración de mapa dispuesta en

MapServer. No obstante, al igual que en el cuadro, se podría conseguir una relativa aproximación aplicando proporcionalidades respecto de las áreas que cubran los datos.

5.5. Presupuestos de despliegue y operación

Llegado este punto se dispone de los elementos suficientes para poder calcular y emitir presupuestos sobre los costes que acarrea desplegar cada plataforma estudiada en diversas infraestructuras, lo que se desarrolla a continuación.

5.5.1. Desplegando en infraestructura propia

Como la primera forma de alojamiento a presupuestar tenemos usando infraestructura completamente propia, implicando despliegues en servidores físicos en propiedad. Ello implica la necesidad de elegir la supuesta máquina que ejecutará el software, resolviéndose presupuestar un servidor tipo *rack* al efecto.

5.5.1.1. Con ArcGIS Enterprise

Para el caso de optar por un despliegue con ArcGIS Enterprise, se presupuesta la relación de costes del cuadro 5.7, expuesto más adelante. Para tal presupuesto ha de tenerse en cuenta que el precio del software de servidor no es precisamente módico, sino comparable al sueldo de un profesional sénior, convirtiéndolo en algo que difícilmente aceptarían comprar entidades con medios humanos escasos, por lo que se toma, en una primera aproximación, por umbral aceptable el del número mínimo de empleados de una gran empresa, esto es, 250 personas. Para no dejar la supuesta organización al puro borde del umbral indicado, ni inflar el presupuesto innecesariamente sin conocer debidamente cada escenario de implementación, se dispone un reducido número de personas adicionales, dedicadas a la edición de los contenidos geográficos y encabezados por un par de especialistas, que son para los que se disponen las licencias que dan acceso al software de escritorio, mientras que se resuelve disponer, para el resto de la supuesta organización, licencias de mero acceso para la consulta, resultando en la combinación de licencias que se ha indicado en el cuadro presupuestario antes indicado en este párrafo.

5.5.1.2. Con la solución prototipada

Optando por la solución diseñada y prototipada en este TFG, la relación de costes se correspondería con la del cuadro 5.8, expuesto más adelante.

5.5.2. Desplegando en la nube

Otra posibilidad es prescindir de una infraestructura local, externalizándola, lo que ofrecen los proveedores de servicios en la nube. A continuación se analizan los costes necesarios para el despliegue en la nube de ambas posibilidades, en las nubes de los proveedores claramente clasificados como “líderes” en el último cuadrante mágico de Gartner [193] publicado: Amazon, Google y Microsoft.

5.5.2.1. Usando servicios de Amazon (AWS EC2)

La primera de las opciones indicadas es usando los servicios de la nube de Amazon, Amazon Web Services (AWS), mediante los servicios EC2 (Elastic Compute Cloud, servicio de instancias

Costes fijos		Precio/ud.	Uds.	Precio
Servidor físico ^a		4.000,00 €	1	4.000,00 €
Windows Server	Cada 8 núcleos de CPU	3.077,50 €	2 ^c	6.155,00 €
Datacenter ^b [184], [185], [186], [187], [188], [189]	Cada usuario conocido ^d	50,00 €	260	13.000,00 €
	Usuarios ajenos ^e	2.300,00 €	1	2.300,00 €
<i>Total de costes fijos</i>				<i>40.455,00 €</i>
Costes recurrentes				Precio/año
ArcGIS Enterprise Advanced ^f	Cada 4 núcleos de CPU	52.731,00 €	1 ^g	52.731,00 €
Usuarios de ArcGIS Enterprise	Viewer	242,00 €	250	60.500,00 €
	Creator ^h	1.197,90 €	10	11.979,00 €
	GIS Prof. Standard	5.324,00 €	1	5.324,00 €
	GIS Prof. Advanced	10.164,00 €	1	10.164,00 €
<i>Total de costes de cada año</i>				<i>140.698,00 €</i>
<i>Total de costes recurrentes (5 años)</i>				<i>703.490,00 €</i>
TOTAL		(5 años)		743.945,00 €

^a En base a configuraciones de varios fabricantes para un servidor *rack* con 8 núcleos de CPU, 16 GB de RAM o más, varias bahías de almacenamiento y 1 TB de HDD o SSD preinstalado [190] [191] [192].

^b Aunque existe la edición Standard, más barata, no se recomienda por la probabilidad de superar las máquinas virtuales incluidas, teniéndose que adquirir más licencias.

^c Todas las ediciones de Windows Server han de licenciarse por un mínimo de 16 núcleos de CPU.

^d CAL (“Client Access License” – Licencia de Acceso de Cliente) por usuario.

^e Licencia “External Connector” para Windows Server.

^f Las capacidades para trabajar con rásteres son demasiado limitadas con ArcGIS Enterprise Standard [160].

^g Por los requisitos no parece que se necesiten múltiples máquinas, aunque esto requeriría de pruebas que no se pueden realizar en este TFG por el coste involucrado.

^h Úsese al menos este nivel de licencia para quienes necesiten acceso a ArcGIS Pro: incluye licencia Basic.

Cuadro 5.7: Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en infraestructura propia para un tiempo de operación de 5 años.

Descripción	Precio/ud.	Uds.	Precio
Servidor físico	4.000,00 €	1	4.000,00 €
TOTAL			20.000,00

Cuadro 5.8: Presupuesto para un despliegue de la solución diseñada en infraestructura propia para un tiempo de operación de 5 años.

de servidor) y EBS (Elastic Block Store, servicio de almacenamiento para EC2). Estudiadas las diversas opciones para la instancia a usar, se ha determinado, por un lado, que la instancia más adecuada para el despliegue de ArcGIS es la de tipo `c6a.2xlarge` disponible en su Centro de Procesamiento de Datos (CPD) de Irlanda ya que, al momento de la elección, era la más económica [194] que cumple con sus requisitos hardware. Esto nos deja con el presupuesto del cuadro 5.9, expuesto más adelante, sobre el que se repiten las cautelas tomadas respecto de los números y tipos de licencias de los usuarios ya advertidas para el despliegue en infraestructura

propia del apartado 5.5.1.1, y no sumándose tráfico de red dado que el entrante es gratuito y Amazon dispone una franquicia de 100 GB de tráfico por cliente y mes antes de empezar a cobrarlo que, como en ArcGIS Enterprise no se necesita alojar un mapa amplio sobre el que colocar lo que se desee, y en ausencia de un estudio específico de las necesidades concretas de alojamiento, edición y colaboración en línea de algún escenario concreto de implementación, se ha de considerar, a la luz de las circunstancias, suficiente.

Costes recurrentes	Precio/ud.	Uds.	Precio
Instancia de AWS EC2 c6a.2xlarge, 1 año convertible ^a	6.000,00 €	1	6.000,00 €
Volumen EBS de 72 GB con <i>snapshots</i> diarios, por mes ^b	12,27 €	12	147,24 €
Licencias de ArcGIS ^c	N/A ^c	N/A ^c	140.698,00 €
Tráfico saliente, por GB tras 100 GB/mes	0,09 €	N/A	N/A
Ampliaciones del volumen EBS hasta 16 TB, por GB	0,10 €	N/A	N/A
<i>Total de costes de cada año</i>			<i>146.845,24 €</i>
TOTAL (5 años)			734.226,20 €

^a Amazon cubre en el precio de la instancia todas las licencias de Microsoft que sean necesarias [195].

^b Se presupuestan variaciones de 1 GB entre *snapshots*.

^c Conforme al desglose de licencias de ArcGIS del cuadro 5.7, idéntico para todos los presupuestos de ArcGIS en esta Memoria.

Cuadro 5.9: Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en Amazon AWS (EC2/EBS) para un tiempo de operación de 5 años.

Por otro lado, la instancia que se ha considerado más adecuada para la solución prototipada se trata de la de tipo **c6a.xlarge** disponible también en el CPD de Irlanda [194], con hardware más reducido frente a la anterior por los menores requisitos que ostenta. Su uso nos deja con el presupuesto del cuadro 5.10, al que se le ha añadido el tráfico suficiente para hacer frente a la acotación superior de carga esperada que se había requerido en su diseño, calculado usando la media de los consumos de datos que implican las posibles actividades de los usuarios con el sistema, ya recogidas en el cuadro 4.4.

Costes recurrentes	Precio/ud.	Uds.	Precio
Instancia AWS EC2 c6a.xlarge, 1 año convertible	1.500,00 €	1	1.500,00 €
Volumen EBS de 25 GB con <i>snapshots</i> diarios, por mes ^a	5,55 €	12	57,00 €
Tráfico saliente, por GB tras 100 GB/mes	0,09 €	29.280	2.635,2 €
Ampliaciones del volumen EBS hasta 16 TB, por GB	0.10 €	N/A	N/A
<i>Total de costes de cada año</i>			<i>4.192,2 €</i>
TOTAL (5 años)			20.961,00 €

^a Se incluyen variaciones de 1 GB entre *snapshots*.

Cuadro 5.10: Presupuesto para un despliegue de la solución propuesta en Amazon AWS (EC2/EBS) para un tiempo de operación de 5 años.

Este cálculo debe complementarse con el del almacenamiento de teselas de mapa necesario, para el que se propone aprovechar las capacidades de alojamiento en Amazon Simple Storage Service (Amazon S3) [196] de MapCache para optimizar costes. Esto nos deja con la relación de precios

para las teselas de mapas del cuadro 5.11, expuesto más adelante y calculadas en base a los datos de espacio ya reflejados en el cuadro 5.5.

	Planeta	Península	CyL	Valladolid Mpal.	Urb.
Teselas PNG: ortofotografías	3.476.292,47 €	34.705,80 €	4.620,60 €	52,80 €	16,20 €
Teselas PNG: callejero	95.531,60 €	891,60 €	118,80 €	3,60 €	2,40 €
Teselas JPEG: ortofotografías	295.865,50 €	2.818,20 €	375,60 €	4,80 €	1,20 €
Teselas JPEG: callejero	29.841,60 €	302,40 €	40,80 €	1,20 €	0,60 €
Publicar/renovar todo el mapa Cada 1000 teselas solicitadas	85.404,46 €	864,53 € 0.0004 €	115,07 €	1,73 €	0,56 €

Cuadro 5.11: Presupuesto para el alojamiento de teselas generables con la solución propuesta en Amazon AWS (EC2/EBS) para un tiempo de operación de 5 años.

No obstante, y dada la gran probabilidad de necesitar cubrir otras zonas distintas a las calculadas, se ha calculado el coste de mantener y subir las teselas en S3 para cada 1,000 kilómetros cuadrados cubiertos por mes y para el periodo de operación, lo que se expone, más adelante, en el cuadro 5.12.

Coste mensual/1.000 km ²	Planeta	Península	CyL	Valladolid Mpal.	Urb.
Teselas PNG: ortofotografías	0,4269 €	0,3480 €	0,3480 €	0,3479 €	0,7263 €
Teselas PNG: callejero	0,0117 €	0,0090 €	0,0089 €	0,0204 €	0,0917 €
Teselas JPEG: ortofotografías	0,0363 €	0,0283 €	0,0283 €	0,0283 €	0,0523 €
Teselas JPEG: callejero	0,0037 €	0,0032 €	0,0030 €	0,0061 €	0,0255 €
Coste a 5 años/1.000 km²					
Teselas PNG: ortofotografías	25,6124 €	20,8794 €	20,8808 €	20,8766 €	43,5790 €
Teselas PNG: callejero	0,7039 €	0,5382 €	0,5368 €	1,2241 €	5,5048 €
Teselas JPEG: ortofotografías	2,1799 €	1,6974 €	1,6974 €	1,6960 €	3,1354 €
Teselas JPEG: callejero	0,2199 €	0,1932 €	0,1822 €	0,3685 €	1,5304 €
Publicar/renovar cada 1.000 km ² Cada 1000 teselas solicitadas	0,57 €	0,52 € 0.0004 €	0,52 €	0,69 €	1,55 €

Cuadro 5.12: Costes de alojar teselas de mapa en Amazon S3 por cada 1.000 kilómetros cuadrados plenamente cubiertos, formato de imagen y estereotipo de mapa creado.

5.5.2.2. Usando servicios de Google Cloud Platform (GCP)

La siguiente opción es mediante los servicios de Google Cloud Platform (GCP), en los que el tipo de instancia que se ha determinado ser más adecuada para el despliegue de ArcGIS Enterprise es la **n2-highcpu-8** en su CPD de Bélgica [197], cuyo presupuesto se dispone más adelante en el cuadro 5.13, en el que de nuevo se repite, en la partida del coste de licencias, las cauciones detalladas junto al presupuesto para el despliegue de ArcGIS Enterprise en infraestructura propia, detallado

en el cuadro 5.5.1.1, así como en relación con las partidas de tráfico saliente, las indicadas para el presupuesto de este software en AWS.

Costes recurrentes	Precio/ud.	Uds.	Precio
Instancia n2-standard-8, por mes	311,96 €	12	3.743,52 €
Almacenamiento de arranque, 72 GB, por mes	2,88 €	12	34,56 €
Licencia GCP de Windows Server, por mes	268,64 €	12	3.223,68 €
Licencias de ArcGIS	N/A	N/A	140.698,00 €
Ampliación de almacenamiento, por GB y mes	0,04 €	N/A	N/A
Espacio extra, cada 375 GB/mes, PERMANENCIA 3 años	13,50 €	N/A	N/A
Espacio extra, cada 375 GB/mes, PERMANENCIA 1 año	18,90 €	N/A	N/A
Espacio extra, cada 375 GB/mes, sin permanencia	30,00 €	N/A	N/A
Tráfico saliente, por GiB, 200 GiB a 10TiB/mes	0,085 €	N/A	N/A
Tráfico saliente, por GiB, 10-150 TiB/mes	0,065 €	N/A	N/A
Tráfico saliente, por GiB, 150-500 TiB/mes	0,045 €	N/A	N/A
<i>Total de costes de cada año</i>			<i>147.699,76 €</i>
TOTAL (5 años)			738.498,80 €

Cuadro 5.13: Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en GCP para un tiempo de operación de 5 años.

Similarmente, se determinó que la instancia más adecuada para el despliegue de la solución diseñada es, también en el CPD de Bélgica, la **n2-highcpu-4** [197], con presupuesto detallado más adelante en el cuadro 5.14.

Costes recurrentes	Precio/ud.	Uds.	Precio
Instancia n2-highcpu-4, por mes	115,15 €	12	1.381,8 €
Almacenamiento de arranque, 30 GB, por mes	1,20 €	12	14,40 €
Ampliación de almacenamiento, por GB y mes	0,04 €	N/A	N/A
Espacio extra, cada 375 GB/mes, PERMANENCIA 3 años	13,50 €	N/A	N/A
Espacio extra, cada 375 GB/mes, PERMANENCIA 1 año	18,90 €	N/A	N/A
Espacio extra, cada 375 GB/mes, sin permanencia	30,00 €	N/A	N/A
Tráfico saliente, por GiB, 200 GiB a 10TiB/mes	0,085 €	28.080	2.386,8 €
Tráfico saliente, por GiB, 10-150 TiB/mes	0,065 €	N/A	N/A
Tráfico saliente, por GiB, 150-500 TiB/mes	0,045 €	N/A	N/A
<i>Total de costes de cada año</i>			<i>3.783,00 €</i>
TOTAL (5 años)			18.915,00 €

Cuadro 5.14: Presupuesto para un despliegue de la solución propuesta en GCP para un tiempo de operación de 5 años.

GCP también dispone de una franquicia para el tráfico de red, de 200 GB mensuales por cliente [198] y una alternativa propia al sistema de almacenamiento local a la instancia denominada Cloud Storage, pero tras cálculos iniciales no necesariamente sale a cuenta su uso ya que, si se entra en un compromiso de mantener el espacio de almacenamiento SSD local a la instancia que se pida

durante 1 o 3 años, GCP ofrece unos precios que hacen que no sea rentable usar tal alternativa, razón por la que no se procede a su exploración.

5.5.2.3. Usando servicios de Microsoft Azure

La última de las opciones contempladas es usando servicios de virtualización de Microsoft Azure, en donde se anuncia el rendimiento esperable de su almacenamiento en discos duros tradicionales que son suficientes para el uso involucrado, por lo que se ha optado por incluirlos a los presupuestos como almacenamiento. En este servicio se detectó la instancia de tipo `Standard_D8as_v5` en su CPD de Gävle como la más adecuada para ArcGIS Enterprise [199], dejando el presupuesto del cuadro 5.15.

Costes recurrentes	Precio/ud.	Uds.	Precio
Instancia <code>Standard_D8as_v5</code> , por año	6.600,00 €	1	6.600,00 €
Licencias (incluidas) de Windows Server	0,00 €	1	0,00 €
Licencias de ArcGIS	N/A	N/A	140.698,00 €
Unidades de almacenamiento HDD extra	Vea el cuadro 5.17		
Tráfico saliente	Vea el cuadro 5.17		
<i>Total de costes de cada año</i>			<i>147.298,00 €</i>
TOTAL (5 años)			736.490,00 €

Cuadro 5.15: Presupuesto para un despliegue de ArcGIS Enterprise en Azure para un tiempo de operación de 5 años.

Y en lo referente al prototipo, se halló que el tipo de instancia `Standard_D4as_v5`, también en su CPD de Gävle, era el más adecuado para su despliegue [199], lo que conlleva que el presupuesto para esta opción sea el detallado en el cuadro 5.16.

Costes recurrentes	Precio/ud.	Uds.	Precio
Instancia <code>Standard_D4as_v5</code> , por año	3.400,00 €	1	3.400,00 €
Tráfico saliente	0,080 - 0,087 €	29.280	2.342,40 - 2.547,36 €
Unidades de almacenamiento HDD extra	Vea el cuadro 5.17		
Tarifas de tráfico saliente	Vea el cuadro 5.17		
<i>Total de costes de cada año</i>			<i>5.742,40 - 5.947,36 €</i>
TOTAL (5 años)			28.712,00 - 29.736,80 €

Cuadro 5.16: Presupuesto para un despliegue de la solución propuesta en Azure para un tiempo de operación de 5 años.

De forma similar a los otros proveedores, Azure también dispone de un sistema de almacenamiento de objetos denominado Azure Blobs que, si bien podría ser aprovechado por MapCache, se ha determinado que entraña riesgos a la facturación en tanto que parece ser que Microsoft factura algunas peticiones a este sistema de almacenamiento a pesar de no portar la autorización adecuada para la acción que pidan realizar [200]. Si bien cualquier acción debidamente autorizada debiera ser facturada, la posible facturación de solicitudes no autorizadas conlleva un riesgo que este alumno-autor no puede recomendar asumir en cualquier escenario, sino que debe ser evaluado

una vez conocidos la totalidad de pormenores de cada escenario de implementación. Esto implica descartar el análisis tal opción y no proceder a su estudio.

Debido a la coincidencia y número de elementos relativos al almacenamiento adicional y tráfico saliente, se han consolidado en el cuadro 5.17, expuesto más adelante.

	Precio/Ud.	Precio/año	5 años
Unidad HDD adicional, 256 GiB	11,33 €	135,96 €	679,80 €
Unidad HDD adicional, 512 GiB	21,76 €	261,12 €	1.305,60 €
Unidad HDD adicional, 1 TiB	40,96 €	491,52 €	2.457,60 €
Unidad HDD adicional, 2 TiB	81,92 €	983,04 €	4.915,20 €
Unidad HDD adicional, 4 TiB	163,84 €	1.966,08 €	9.830,40 €
Unidad HDD adicional, 8 TiB	327,68 €	3.932,16 €	19.660,80 €
Unidad HDD adicional, 16 TiB	655,36 €	7.864,32 €	39.321,60 €
Unidad HDD adicional, 32 TiB	1.310,72 €	15.728,64 €	78.643,20 €
Tráfico saliente vía Azure WAN, 0-10 TB	0,087 €	N/A	N/A
Tráfico saliente vía Azure WAN, 10-40 TB	0,083 €	N/A	N/A
Tráfico saliente vía Azure WAN, 40-100 TB	0,070 €	N/A	N/A
Tráfico saliente vía Azure WAN, 100-350 TB	0,050 €	N/A	N/A
Tráfico saliente vía Azure WAN, >500 TB		Acuerdo privado	
Otro tráfico saliente, 100 GB-10 TB	0,080 €	N/A	N/A
Otro tráfico saliente, 10-50 TB	0,065 €	N/A	N/A
Otro tráfico saliente, 50-150 TB	0,060 €	N/A	N/A
Otro tráfico saliente, 150-500 TB	0,040 €	N/A	N/A
Otro tráfico saliente, >500 TB		Acuerdo privado	

Cuadro 5.17: Presupuesto para despliegues en Azure por 5 años: Precios de elementos adicionales de interés.

5.5.3. Presupuesto de uso de ArcGIS Online

En aras de ofrecer una visión completa de las posibles opciones, se aporta también presupuesto de la suscripción a ArcGIS Online en el cuadro 5.18, a pesar de que no tenga alternativa equivalente en la solución diseñada en este TFG.

	Precio/Ud.	Precio/año	Precio/5 años
Licencias de ArcGIS	N/A	140.698,00 €	703.490,00 €
Créditos de ArcGIS, lote de 1000	135,00 €	N/A	N/A

Cuadro 5.18: Presupuesto para el uso de ArcGIS Online por 5 años

Como puede verse, ArcGIS tiene una unidad de facturación propia: el crédito de ArcGIS. Lo usa en casi todos los costes indeterminados al contratar licencias, por ser cuestiones a facturar por su uso, como se ve en el cuadro 5.19.

Descripción	Créditos	Importe
Capas de mapa guardadas, 10 MB/mes	2,4	0,32 €
Elementos en ArcGIS Notebooks, cada GB/mes	1,2	0,16 €
Otros contenidos guardados, 1 GB/mes	1,2	0,16 €
Imágenes guardadas, 1 GB/mes	1,2	0,16 €
Imágenes dinámicas guardadas, 1-10, por día	10,0	1,35 €
Imágenes dinámicas guardadas, 11-100, por día	20,0	2,70 €
Imágenes dinámicas guardadas, 101-1.000, por día	40,0	5,40 €
Imágenes dinámicas guardadas, 1.001-10.000, por día	80,0	10,80 €
Imágenes dinámicas guardadas, 10.001-100.000, por día	160,0	21,60 €
Imágenes dinámicas guardadas, >100.000, por día	320,0	43,20 €
Búsqueda de ubicación de sucursal	0,1	0,01 €
Rutas para varios vehículos, por vehículo	1,0	0,14 €
Consulta de puntos de interés, cada 1.000	10,0	1,35 €
Consulta de infografía, cada 1.000	10,0	1,35 €
Exportación de infografía	10,0	1,35 €
Cada informe	10,0	1,35 €
Generación de teselas, cada 10.000	1,0	0,14 €
Ejecución de ArcGIS Notebooks, por hora	3,0	0,41 €
Ejecución de ArcGIS Notebooks con GPU, por hora	30,0	4,05 €
Ejecución interactiva de flujos de datos, por hora	50,0	6,75 €
Ejecución automática de flujos de datos, por hora	70,0	9,45 €
Cálculo del coste de un viaje	0,0005	0,0000675 €
Cada ruta simple	0,005	0,000675 €
Cada ruta optimizada	0,5	0,07 €
Isócrona generada	0,5	0,0675 €
Informe de encuesta	0,5	0,0675 €
Flujos automáticos con ArcGIS Notebooks, marco Estándar, por hora	1,5	0,2025 €
Flujos automáticos con ArcGIS Notebooks, marco Avanzado, por hora	4,5	0,6075 €
Flujos automáticos con ArcGIS Notebooks, marco con GPU, por hora	45,0	6,0750 €

Cuadro 5.19: Importes asociados a actividades que consumen créditos de ArcGIS.

5.6. Presupuesto de costes humanos futuros

Dado que el sistema necesitaría de despliegue y, posteriormente, de mantenimiento, se ha de presupuestar los costes de personal asociados. En tal sentido, se prevé necesaria una semana de trabajo para el despliegue inicial y una media mínima absoluta de cuatro jornadas completas de trabajo al mes en concepto de mantenimientos, ya sean comprobando el correcto funcionamiento, implantando correcciones y mejoras o corrigiendo problemas.

Tales labores, atendiendo a su complejidad, serían propias de analistas y/o analistas-programadores, y como de haber sido este TFG trabajos en el seno de una empresa le correspondería la aplicación del convenio de las empresas de consultoría [201], [202], también le sería de aplicación a los trabajos posteriores, lo que hace que los costes asociados sean, al menos, los reflejados en el cuadro 5.20.

Descripción	Importe
Trabajos de despliegue	601,01 €
Trabajos posteriores de mantenimiento	30.722,46 €

Cuadro 5.20: Presupuesto para el despliegue y mantenimiento del sistema, a 5 años.

5.7. Revisión de supuestos costes del TFG

Finalmente, queda estimar cuáles hubieran sido los costes de este proyecto si se hubieran materializado como un trabajo laboral para un cliente real. Así pues, los costes de mayor envergadura se corresponden con la licencia de ArcGIS usada y con la que sería la partida de salarios del alumno-autor, siendo estos últimos aproximables mediante, con la debida consideración de mínimos, los del convenio aplicable, que se corresponde con el de las empresas de consultoría, reduciendo proporcionalmente el montante a 300 horas, duración dispuesta para la asignatura del TFG. En tal sentido se ha de decidir cómo tipificar el encaje profesional y reparto de los trabajos realizados, habiendo dos claros perfiles diferenciables: el de jefe de proyecto, con encaje en el grupo A del referido convenio y una dedicación al 25 % del tiempo empleado, y el de analista-programador, con encaje en el grupo B y una dedicación del 75 % restante del tiempo.

También se presentan costes derivados del uso de material mueble, al que se le aplica la correspondiente parte de depreciación, material fungible, que se contabilizaría íntegramente, y de locomoción, para los que se repercuten un recorrido de 15 kilómetros por viaje, por lo general suficientes para recorrer la ciudad de Valladolid, a razón de 0,26 € por kilómetro, de conformidad con lo dispuesto en materia tributaria.

Finalmente, estos gastos tendrían que ser incrementados en el beneficio industrial correspondiente, con un habitual mínimo del 10 % y gravados con el correspondiente Impuesto sobre el Valor Añadido. Con ello, y a falta de incorporar beneficio industrial e IVA de las opciones que se escogiesen para el despliegue y mantenimiento, quedarían constituidos los costes de este proyecto, que se relacionan en el cuadro 5.21.

	Precio/Ud.	Uds.	Importe
Trabajo en calidad de jefe de proyecto	16,09 €	75	1.206,75 €
Trabajo en calidad de analista-programador	15,53 €	225	3.494,90 €
Licencia de ArcGIS	10.164,00 €		10.164,00 €
Otro software	100,00 €	0,1112	11,12 €
Hardware destinado al TFG	1.200,00 €	0,1112	133,44 €
Conectividad a Internet	40,00 €	4	160,00 €
Servicios de correo	10,00 €	4	40,00 €
Desplazamientos	3,90 €	10	39,00 €
Consumibles varios	10,00 €		10,00 €
<i>Subtotal</i>			<i>15.259,10 €</i>
Beneficio industrial (10 %)			1.525,91 €
Base imponible			16.785,01 €
IVA (21 %)			3.524,85 €
TOTAL			20.309,86 €

Cuadro 5.21: Relación de supuestos costes del proyecto de este TFG

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 6

Comparación de aspectos técnicos de las plataformas involucradas

Como ya se ha adelantado en capítulos anteriores, las plataformas a comparar (la comercial ArcGIS y la diseñada mediante elementos de código abierto) divergen en diversas cuestiones. Dado que el objeto de este TFG es la comparación de ambas, este capítulo aborda resultados de tal comparación. En especial, se han apreciado diferencias en materia de licencias aplicables al software; costes; asistencia por el fabricante; sistemas operativos compatibles; formatos de archivo soportados; protocolos y/o estándares implementados; capacidades aportadas por cada plataforma; y dificultades al uso.

A continuación, se revisan las diferencias detectadas con más detalle, a excepción de la monetaria, que ya se abordó en el capítulo anterior.

6.1. Licencia de uso

Si bien la licencia bajo la que se distribuye cualquier software, que define las reservas y los derechos otorgados por su autor a quienes lo usen, atañe tanto al campo de la Ingeniería Informática como al Derecho, es sin embargo uno de los más importantes, ya que determina qué puede y qué no puede hacer el usuario con el programa que se le entrega, esto es, de qué libertades dispone, pudiendo ser, de no respetarla, perseguido judicialmente por la intromisión en los derechos que se hayan reservado. Así pues, es evidente que ambos software dispondrán de licencias distintas, dada la naturaleza comercial de ArcGIS y la de código abierto de la plataforma creada.

En este sentido, ESRI, fabricante de ArcGIS, antepone una serie de licencias de creación propia que *básicamente privatizan, obviamente en favor de ESRI, cualquier derecho distinto al disfrute* de las versiones ya compiladas y/o listas para su uso durante los periodos de tiempo que se hayan abonado [203], [204], [205]. Esto especialmente afecta al código fuente que ha desarrollado que, por la naturaleza del contrato dispuesto en la licencia, es de su exclusivo conocimiento¹.

En contraposición, los diversos elementos usados en la plataforma diseñada con software de código abierto disponen de licencias, como la MIT [207], la Apache 2.0 [208] o la GPL [209], que explícitamente indican, de alguna manera, la libertad que se otorga a cualquier usuario que obtenga el software o su código fuente a usarlo de la manera que más le plazca, si bien la última obliga, bajo determinadas condiciones, a licenciar los productos derivados de modificaciones al

¹Con las meras excepciones de los elementos que en relación con los SDK (Kits de Desarrollo de Software) u otros análogos divulgados al efecto, como el entorno de programación Python que comercializa, los cuales contienen código fuente para su uso y/o modificación, parcial o totalmente libre de restricciones por el público que disponga de licencia para estos elementos [206].

menos bajo la misma licencia². Estas otras licencias permiten a cualquier usuario, con los conocimientos adecuados, editar el software a su plena conveniencia, incluso creando y distribuyendo otro diferente basado en el mismo código inicial.

6.2. Soporte

También se han de diseccionar las posibilidades de obtener soporte y asistencia por los fabricantes de los programas involucrados, ya que en los escenarios en los que concurre un menor apetito de riesgo es más deseable disponer de tal soporte.

Por un lado, en el caso de ArcGIS tenemos que con la adquisición de licencias se incluye un soporte a la mera instalación durante 90 días desde la adquisición [210], y que para una verdadera asistencia hay que entrar en un contrato al efecto. No obstante, tal soporte es provisto directamente por ESRI, por lo que es de esperar que, para las cuestiones que cubra mediante su soporte, éste sea, al menos, de una buena calidad. En cuanto a los problemas que este soporte resuelve, se detalla que abarca, para el software que ESRI no ha designado como obsoleto y en entornos que cumplan los requisitos que establece, los procesos de instalación, licenciamiento y configuración; el uso y los conceptos relativos a las capacidades del software; la solución de fallos, errores, problemas de rendimiento, bloqueos o comportamientos inesperados; y la entrega de ejemplos y fragmentos de código como ayuda a desarrollos y personalizaciones. Sin embargo, para aquellas cuestiones que exceden tales límites, ESRI dispone de servicios de consultoría propios con los que dar respuesta a tales demandas [211].

Por otro lado, en el caso del ecosistema diseñado se encuentra que, para la gran mayoría de elementos, sus fabricantes no ofrecen soporte comercial, sino que el soporte disponible a través del fabricante se basa en la ayuda de voluntarios a través de foros, chats, listas de correo, *bugtrackers* y documentación en línea [212], [213], así como de listados de empresas que piden anunciarse ofreciendo servicios de consultoría en relación con cada software [214]. A pesar de todo ello, también se halló que PostGIS y Nominatim ofrecen, respectivamente, las opciones de contratar a desarrolladores del proyecto [215] y de contratar un número de horas mensuales de soporte [216].

6.3. Sistemas operativos compatibles

Otra de las cuestiones que primero se observan al buscar soluciones software, junto con las anteriores, es la cuestión de los sistemas operativos compatibles, en tanto que cambiarlo es una cuestión que no se suele querer afrontar por la degradación temporal que supone en la productividad de los usuarios, producto del cambio de entorno.

En este sentido, ArcGIS es el más restrictivo ya que su software de escritorio, ArcGIS Pro, solamente ha sido diseñado para funcionar bajo Windows [176] y, aunque pudiera llegar a funcionar en otros sistemas operativos interponiendo capas de compatibilidad como Wine [217], tal uso no podría recibir soporte alguno de ocurrir cualquier problema. No obstante, su parte de servidor, ArcGIS Server, si es compatible con entornos tanto Windows [218] como Linux [219].

Bastante distinto es el panorama que plantea la solución propuesta debido a que, mediante la virtualización inherente al uso de Docker, los elementos del lado del servidor debieran poder funcionar sin problemas en entornos Linux, Windows y MacOS [47]. Y en cuanto al software de escritorio QGIS, éste es compatible con Windows, Linux, MacOS y BSD como evidencian los

²No obstante, como la licencia no son más que las reservas impuestas por el autor del software al resto del mundo, éste puede disponer paralelamente y a pura voluntad otras licencias al mismo software.

instaladores disponibles en su página de descargas [134].

6.4. Métodos de persistencia

Vistos ya en este capítulo diversos factores no tan técnicos, pero que en entornos corporativos reales suelen tener un fuerte peso, llega el momento de comenzar a descender a revisar cuestiones que, si bien importantes y mucho más relacionadas con la técnica de la disciplina informática, en tales entornos corporativos no son tan críticas si los factores hasta ahora vistos se alinean con la voluntad de quienes han de decidir el destino de los recursos disponibles, en tanto que es relativamente raro que haya una única manera de solucionar un problema. En este sentido, y valorando la importancia que pueden tener las cuestiones por visitar, es, en la opinión de este alumno-autor, más conveniente hablar primero de los métodos de persistencia aceptados y/o usados por cada plataforma, no debiendo olvidar que ésta no se refiere meramente a la capacidad de guardar información (escritura) sino también a la de recuperarla (lectura).

6.4.1. Formatos de archivo soportados

Comencemos pues por revisar la forma más habitual de persistencia, esto es, mediante archivos. Ambas plataformas de esta comparación permiten la persistencia mediante archivos, pero tienen diferencias importantes al prestar atención a cuáles formatos puede leer o escribir cada una de ellas.

6.4.1.1. ArcGIS

En la plataforma comercial tenemos que la casi totalidad de informaciones que esta maneja han de ser provistas a través del uso de su SIG de escritorio y, aunque puedan llegarse a crear mapas en línea sin el uso de ArcGIS Pro, los recursos que pueden incorporarse a éstos sin usar tal software de edición son más limitados, por lo que queda patente que se han de abordar los tipos de archivo soportados mediante los que permita usar el software de escritorio.

De tal manera, en la documentación publicada de ArcGIS Pro se disponen varias listas de formatos de archivo que acepta dependiendo de los lugares donde se puedan usar [220], dejando:

- 24 formatos de archivo que pueden usarse en cualquier parte del programa para la mera lectura, o para lectura y escritura, relacionados con el ámbito “General” en la tabla anexa B.3.
- 32 formatos que pueden añadirse y usarse a los espacios de trabajo, aunque muchos de ellos son propietarios de ESRI o incluyen información sólo relevante para algunas funcionalidades, por lo que presentan interés reducido, relacionados con el ámbito “Agregable” en la tabla anexa B.3.
- 11 formatos que se corresponden con algunos usados por versiones antiguas de ArcGIS, para los que simplemente se permite importarlos creando en el proceso una copia con los formatos que actualmente ArcGIS usa, relacionados con el ámbito “Importable” en la tabla anexa B.3.
- 59 formatos que *alguna o algunas herramientas pueden usar de alguna forma*, sin especifi-

cación de cuáles sirven en qué procesos ni cómo³, relacionados con el ámbito “Usable” en la tabla anexa B.3.

Teniendo en cuenta que por lo general el resto de software del ecosistema de ArcGIS se basan en los datos entregados por ArcGIS Pro, solo cabe suponer que, de guardar informaciones suministradas en archivos y no en otros sistemas como pudieran ser bases de datos, empleen los mismos formatos que éste.

6.4.1.2. Plataforma de código abierto propuesta

En el caso de la plataforma propuesta tenemos diferencias dependiendo de qué elementos se consideren, debido a que el software incluido no responde a productos del esfuerzo de un único y coincidente grupo de *skateholders* o partes interesadas que, por lo general, terminan influenciando o decidiendo el diseño.

QGIS

Para QGIS, la lectura de su documentación indica que en realidad éste delega la casi totalidad de las operaciones de lectura y escritura en almacenamientos persistentes en una biblioteca de código denominada GDAL, mantenida por su mismo fabricante. GDAL también es de código abierto, al igual que QGIS, y en su documentación se hallan los posibles orígenes de información que soporta, entre los que se incluyen, además de conexiones a bases de datos y algunos procesos internos, los formatos de archivo que puede usar, con un total de 164 posibles orígenes de información ráster y 86 posibles orígenes vectoriales, cuyas relaciones se exponen respectivamente en las tablas anexas B.1 y B.2.

Asimismo existen un puñado de formatos que QGIS puede usar que no se han indicado en dichas tablas, que se corresponden con los usados como algunas entradas o salidas de QGIS y se indican a lo largo de su documentación [221], hallándose los relacionados en la tabla 6.1 expuesta más adelante.

MapServer

Continuando la observación de elementos de la plataforma de código abierto está MapServer, al que le ocurre a un similar que a QGIS, visto en el apartado inmediatamente anterior: delega en GDAL el acceso a la información geográfica, por lo que los formatos de archivo que MapServer admite vienen a ser son los mismos que QGIS (relacionados en las tablas anexas B.1 y B.2), junto a los archivos de configuración en texto plano que emplea.

MapCache

Siguiendo con MapCache, hay que recordar que éste básicamente sólo usa archivos para recuperar su configuración de un archivo XML y para guardar las teselas generadas, si así se le indica, codificadas con PNG o JPEG y guardadas directamente en sus respectivos tipos de archivo o encapsuladas en archivos SQLite (`.sqlite3`, `.db`), MBTiles (`.mbtiles`) o GeoTiff (`.tiff`) [222].

³Citando la documentación que ESRI publica al respecto, es su posición [220] que: “No es práctico mantener una lista completa de qué tipos de archivo son entradas o salidas para qué herramientas y operaciones”, guiando al usuario a tener consultar la documentación de cada herramienta u operación: “En el caso de las herramientas de geoprocésamiento, consulte la documentación de la herramienta para esta información. Para otras operaciones, consulte la documentación correspondiente.”. Esto hace que ante las cerca de 2.000 herramientas disponibles, sea inviable reconocer y disponer qué formatos pueden usarse y de qué maneras en el marco de este TFG.

Descripción	Extensión
Proyecto de QGIS	.qgs .qgz
Imágenes exportadas	.bmp
	.cur
	.icns
	.ico
	.jpeg
	.jpg
	.pbm
	.pgm
	.png
	.ppm
	.svg
	.tif
	.tiff
.wbmp	
.webp	
.xbm	
.xpm	
Estilos de elementos	.qml .sld
Plantillas del compositor de impresión	.qpt
Paletas de colores creadas	.qpl
Escenas 3D	.obj
Modelos de procesamiento de información	.model3
Expresiones del constructor de consultas	.qpf
Definiciones de capas	.qlr
Complementos obtenidos externamente	.zip
<i>Scripts</i> Python	.py
Archivos PDF exportados	.pdf
Informaciones diversas	.xml

Cuadro 6.1: Formatos de archivo auxiliares usados por QGIS.

Nominatim

Pasando a Nominatim, éste recibe archivos de datos de OSM (*.osm.pbf*) y, de desearse, otros auxiliares (*.sql.gz*) [84]; y aunque pueden también aportársele descomprimidos (respectivamente, *.osm* y *.sql*), hacerlo no reporta grandes beneficios. En cuanto a la salida de las consultas que recibe, pueden solicitarse en formatos JSON, GeoJSON, GeocodeJSON y XML, si bien no son entregadas inicialmente como archivos [223].

Valhalla

Llegado el turno de Valhalla, éste recibe archivos de datos de OSM (*.osm.pbf*) al igual que el anterior, crea toda una estructura de archivos y carpetas con diversos formatos donde guarda la información dada ya procesada, de baja relevancia por ser de uso meramente interno al programa,

y emite respuestas a las consultas que se le hacen usando JSON, aunque no los marque como archivos al entregarlos [94].

Imposm

Terminando con Imposm, también usa archivos de datos de OSM (`.osm.pbf`) al igual que Valhalla, creando otra estructura, temporal y diferente a la de éste, de archivos y carpetas con diversos formatos donde guarda la información dada ya procesada para remitirla al RDBMS elegido [43].

6.4.2. Otros métodos soportados

Revisados los formatos de archivo que pueden usar las plataformas en comparación, no se deben relegar otros métodos de persistencia basados en servicios que puedan emplearse.

6.4.2.1. Almacenamiento en la nube

El primero de estos métodos es el del uso de proveedores de servicios en la nube, que dependiendo del software con el que se combinen pueden ser una opción. Veamos posibles combinaciones en los párrafos siguientes.

API REST de ArcGIS

Siendo una de las plataformas a comparar, el hecho de que dispongan de su propia nube de almacenamiento con una API para acceder a ella no podía quedarse en un segundo plano. Esta API RESTful de ArcGIS está disponible a través del uso de ArcGIS Online o Server [224], permitiendo crear nubes públicas o privadas y expone llamadas que permiten editar los contenidos almacenados en tales servidores, pero sólo son de utilidad dentro del ecosistema software de ArcGIS en tanto que, en la plataforma de código abierto diseñada, sólo QGIS implementa algún tipo de soporte para esta API, de forma parcial, y se limita a poder consultar datos de este tipo de API [221].

Continuemos ahora comparando por software cliente en vez de por proveedor.

ArcGIS Pro

ArcGIS Pro, además de a la nube de su propio fabricante, puede conectarse y usar otros sistemas de almacenamiento de otros proveedores *cloud*, en concreto [225]:

- Alibaba Cloud Storage
- Amazon S3
- Azure Data Lake Storage
- Azure Storage Containers
- Google Cloud Storage
- MinIO
- Ozone

Además, también puede conectarse a nubes privadas mediante la API REST WebHDFS de Hadoop [225]. Y para todas las nubes indicadas, ArcGIS Pro puede (con los privilegios adecuados): acceder a (o leer) cualquier tipo de información almacenada y almacenar datos obtenidos con herramientas de geoprocésamiento ráster en su propietario Formato Ráster para la Nube (CRF, por sus siglas en inglés) [226].

ArcGIS Server

En el caso de optar por la plataforma comercial con servidores privados, éstos pueden llegar a conectarse con las nubes de Alibaba, Amazon, Google, Microsoft, Oracle y SAP. Las opciones específicas de a qué proveedores y servicios de éstos puede conectarse depende del uso que se quiera hacer de éstos [227], [228].

MapCache

Continuando con MapCache, éste es capaz de usar como lugar de almacenamiento las nubes de Amazon S3, Microsoft Azure y Google Cloud mediante el uso de sus respectivas API REST, y además puede usar cualquier servidor que implemente una API WebDAV para usarlo como almacenamiento pudiéndose así conectar a Servidores de Almacenamiento en Red (NAS) y nubes privadas [222].

Resto de software

Para el resto del software involucrado en este TFG se encuentra que no disponen de conectores específicos para plataforma *cloud* alguna, y aunque debe recordarse la existencia de otros software ajenos a los involucrados a este TFG que pueden exponer espacios de almacenamiento en la nube, su análisis se aleja del objeto de este Trabajo.

6.4.2.2. Conexión a DBMS y almacenes de datos

Otra vía para lograr la persistencia es usar sistemas de almacenamiento no directamente basados en ficheros, como ocurre mediante el uso de algún DBMS o de *data warehouses* (almacenes de datos), opción viable en ambas plataformas comparadas.

En el caso de la plataforma comercial ArcGIS objeto de estudio, se encuentra para su aplicación de escritorio ArcGIS Pro que puede enlazar [229], [230], [231], [232] con:

- Amazon Redshift.
- Dameng.
- Google BigQuery.
- IBM Db2.
- Microsoft SQL Server.
- Oracle.
- PostgreSQL.
- Snowflake.
- SAP HANA.
- SQLite⁴.
- Teradata Vantage.
- Cualquiera otros DBMS locales, remotos o *cloud* con los que pueda conectar mediante conectores OLE DB (Enlazado e Incrustado de Objetos para Bases de Datos) instalados en el equipo [233].

En cuanto a ArcGIS Server, su documentación indica que viene a ser compatible con los mismos gestores que ArcGIS Pro y que igualmente puede enlazarse con las mismas bases de datos *cloud* y servicios de *data warehousing* [234], [235].

⁴Y, a su través, con *GeoPackages OGC*, que no son sino bases de datos SQLite con disposiciones concretas de tablas, atributos y otros elementos internos.

La revisión de soporte de bases y almacenes de datos para la plataforma diseñada con elementos de código abierto nos deja con otro escenario, con cuatro situaciones distintas dependiendo del software específico involucrado:

1. Para QGIS y MapServer, primeros involucrados en la visualización de información, se tiene que internamente ambos hacen uso de GDAL para acceder a información, pudiendo acceder, como se incluyen en las tablas anexas B.1 y B.2, a bases de datos IBM Informix, Microsoft SQL, MySQL, PostgreSQL, SAP HANA, SQLite y cualquier otra para la que se disponga de conectores ODBC (Conectividad con Bases de Datos Abierta) instalados.
2. Para Nominatim [84] e Imposm, ambos soportan meramente el uso del gestor de bases de datos relacionales PostgreSQL.
3. Para MapCache [222], puede hacer uso de la base de datos SQLite o MBTiles que se le indique.
4. Para el resto del software, no hacen realmente uso de almacenes o bases de datos, por lo que no tienen sistemas de conexión con estas.

6.4.2.3. Otros servicios remotos

Excluyendo los servicios web y la API REST estandarizados por el OGC, que tienen la importancia suficiente para merecer su propio apartado en los siguientes párrafos, hay que reseñar la presencia en ArcGIS Pro de conectores específicos para acceder a servicios *cloud* de Autodesk Construction, también llamados BIM 360 [236], y a los de la API STAC (Catálogo de Activos Espacio-Temporales, por sus siglas en inglés) de Computación Planetaria de Microsoft [237].

6.5. Protocolos, estándares y normas implementadas

Continuando con las cuestiones relevantes identificadas para esta comparación, tenemos los estándares y protocolos implementados en cada una de las plataformas comparadas junto a las normas que cumplen, observándose diferencias al respecto. No obstante, la comparación de un conjunto de programas independientes que este alumno-autor ha interconectado con toda una plataforma comercial plenamente desarrollada hace que solamente en la documentación de esta última se puedan apreciar referencias a verificaciones del cumplimiento de diversas normativas aplicables a cualesquiera entornos corporativos, y que guardan menos relación con la información geográfica en especial, como son las normas ISO 27001, las acreditaciones SOC 2/3, la estadounidense HIPAA o el europeo RGPD. Tal disparidad debe ser reconocida y abordada adecuadamente, implicando que se deban separar para tratar más formalmente los más estrechamente relacionados con el manejo de la información geográfica y de forma más informal los orientados al cumplimiento legal y normativo.

6.5.1. Relativos al cumplimiento de normas y mejores prácticas

Así pues, tenemos en la plataforma comercial que ésta indica que sus servicios son de conformidad con ciertas normas o mejores prácticas de la industria digital, o que puede proveerlos conforme a tales normas y mejores prácticas, aportando evidencias de tal conformidad o conformabilidad, como certificados de auditorías, autocertificados o declaraciones. En concreto, ESRI indica cumplir con las siguientes:

1. **ISO 20243**⁵, mediante declaración de autoevaluación positiva que únicamente englobó a ArcGIS Online [239].
2. **CSA STAR (CAIQ/Level 1)**⁶, mediante autoevaluación [241].
3. **SOC 2**⁷, mediante auditoría externa [243].
4. **SOC 3**⁸, mediante auditoría externa [243].
5. **RGPD**, mediante autoevaluación y puesta a disposición de clientes de instrumentos jurídicos y de otras herramientas [244], [245], [246].
6. **CCPA**⁹, mediante declaración e instrumentos jurídicos [247].
7. **HIPAA**¹⁰, mediante declaración e instrumentos jurídicos para *algunos* de sus servicios¹¹ [248].
8. **FERPA**¹², mediante declaración de que sus servicios pueden configurarse para cumplir con los requisitos de tal norma [249].
9. **FedRAMP**¹³, mediante autorización y verificación administrativa para gran parte de sus productos *cloud*, independientemente de que usen los servidores de ArcGIS Online o instancias de ArcGIS Server desplegadas en otras nubes [250].
10. **VPAT 508**¹⁴, mediante autoevaluación [251] de varias [252], [253], [254] normas:
 - **Norma europea EN 301 549.**
 - **Pautas de Accesibilidad al Contenidos Web (WCAG)** del World Wide Web Consortium (W3C).
 - **Sección 508 de la Ley (estadounidense) de Rehabilitación de 1973.**
11. **FIPS 140-2**¹⁵, mediante declaración de compatibilidad de sus productos con algoritmos de cifrado que lo cumplan [255].

⁵Esta norma provee directrices, requisitos y recomendaciones abordando amenazas a la integridad de productos hardware y software durante su ciclo de vida [238].

⁶El *Cuestionario de la Iniciativa de Evaluación de lo Consuetudinario* (CAIQ) para la inclusión en el *Registro de Seguridad, Confianza, Garantía y Riesgo* (STAR) de la Cloud Security Alliance (CSA), asociación que aglutina a gran parte de los principales proveedores de servicios *cloud*, recopila respuestas “sí o no” de tales proveedores a preguntas sobre los controles de seguridad que existen en un servicio *cloud* ofertado [240].

⁷El “*Informe sobre Controles en una Organización de Servicios Relevantes a la Seguridad, Disponibilidad, Procesamiento, Integridad, Confidencialidad, o Privacidad*” (SOC 2) según el método del Instituto Americano de Contables Públicos Certificados (AICPA, una suerte de equivalente al Consejo General de Economistas español), provee información pormenorizada de una auditoría realizada y los resultados de esta en relación con procesos y controles implementados en una organización que ofrece servicios de cualquier tipo [242].

⁸El informe “*Confianza en los Principios, Criterios e Ilustraciones de los Servicios*” (SOC 3), según el método del AICPA, provee información básica sobre cómo de confiables ha apreciado una auditoría que son los controles de una organización que ofrece servicios de cualquier tipo en torno a la seguridad, disponibilidad, integridad del procesamiento, confidencialidad y privacidad [242].

⁹La Ley (estadounidense) de Privacidad del Consumidor de California (CCPA), que crea vías para que los consumidores dispongan de derechos similares a los del RGPD y restringir la venta de información recabada sobre ellos, ya que en EE. UU. se puede capturar, procesar y comerciar con datos de personas sin consentimiento.

¹⁰La Ley (estadounidense) de Portabilidad y Responsabilidad de Seguros Médicos (HIPAA), que establece obligaciones sobre privacidad de la información de salud en poder de terceros (como las aseguradoras y los proveedores de servicios médicos y de salud) de forma relativamente similar al RGPD europeo.

¹¹Aunque el cumplimiento de tal norma ha de ser certificada por entidades externas independientes, ESRI no ha publicado resultado alguno de tal certificación o las condiciones que impone para acceder a la misma.

¹²La Ley (estadounidense) de Derechos Educativos y Privacidad de la Familia, que establece la privacidad a mantener por las instituciones educativas de EE. UU. sobre determinados datos de sus alumnos.

¹³El Programa de Gestión Federal de Riesgos y Autorizaciones (FedRAMP) de la Administración de EE. UU., que revisa si los servicios *cloud* que quieran participar en sus procesos de contratación administrativa cumplen con los requisitos y reservas que ellos han establecido.

¹⁴La Plantilla de Evaluación Voluntaria de Productos (VPAT), que recaba en un formato estandarizado la conformidad de productos a una o varias normas de accesibilidad.

¹⁵El Estándar Federal de Procesamiento de la Información (FIPS) 140-2, que define requisitos que han de cumplir determinados sistemas de cifra.

12. **DoD IL2**¹⁶ mediante declaración de equivalencia, ya que la autorización FedRAMP positiva de nivel moderado de la que dispone es equivalente o superior a los requisitos de seguridad que este estándar dispone [256].

Como puede observarse, gran parte de este bloque de estándares guardan estrecha relación con las diferentes Administraciones Públicas de los Estados Unidos de América, dado que éstas vienen adquiriendo productos de ESRI [171], [173], [174] y es el país donde ubica su sede principal [203], por lo que está especialmente vinculada a la legislación y regulaciones de tal país.

En contraposición, la plataforma diseñada no puede ofrecer garantías del cumplimiento de regulaciones o estándares no relacionados con la información geográfica en tanto que sus elementos no han superado auditorías o verificaciones al efecto. Ésta es una situación típica en los desarrollos de código abierto ya que, con la financiación más limitada que estos proyectos tienen al no recibir ingresos por ventas, no suelen poder permitirse los costes de auditorías externas.

6.5.2. Relativos al tratamiento de información geográfica

En cuanto a los estándares y protocolos más relacionados con el manejo de información geográfica, en ambas plataformas se encuentra una *fuerte* predilección por los publicados por una organización: el Consorcio Geoespacial Abierto (OGC). Ésta es una suerte de asociación de ámbito internacional que ha desarrollado un ecosistema de estándares abiertos y accesibles al público de forma gratuita y sin regalías para servicios geoespaciales mediante el consenso de sus miembros, entre los que constan individuos, empresas, órganos de diversos países y organismos internacionales [257]. Actualmente mantiene más de 60 familias de estándares distintos que se basan en normas ISO o, directamente, conforman las propias normas ISO (véase la relación no exhaustiva de la figura 6.1) [258].

En especial, hay tres materias que, en el contexto de este TFG, son de mayor interés de entre las que versan los estándares de este editor: el almacenamiento de la información, la codificación de información y servicios web.

6.5.2.1. Estándares OGC relativos al almacenamiento de información

En la lista a continuación se relacionan los estándares relevantes, en relación con este TFG, publicados por el OGC que establecen sistemas de almacenamiento de información geográfica.

- **CDB (Common DataBase)** [259]: Describe, extensa y minuciosamente, un modelo y una estructura mediante la que poder mantener una única representación, versionable, del Planeta Tierra, que puede ser accedida y modificada por diversos clientes simultáneamente y tener un gran nivel de realismo para su uso en entornos de simulación.
- **GeoPackage** [260]: Describe cómo almacenar características vectoriales, teselas de mapas de diversos niveles de escala y otras informaciones en una base de datos SQLite mediante extensiones de este último, si bien por abuso del lenguaje el término GeoPackage o su traducción, paquete geográfico, también se usa para nombrar a cada contenedor (archivo) SQLite que cumple con el formato del estándar.
- **netCDF (network Common Data Form)** [261]: Describe cómo disponer informaciones abstraíbles en matrices n-dimensionales junto a las metainformaciones suficientes para que se mantenga el significado del modelo de datos usado y de forma que cada archivo resultante

¹⁶El Nivel de Impacto 2 (IL2) para las informaciones manejadas por el Departamento de Defensa de EE. UU., una categoría de seguridad aplicada a cualquier información corporativa no sujeta a limitación alguna, como pudieran ser la clasificación o la reserva interna.

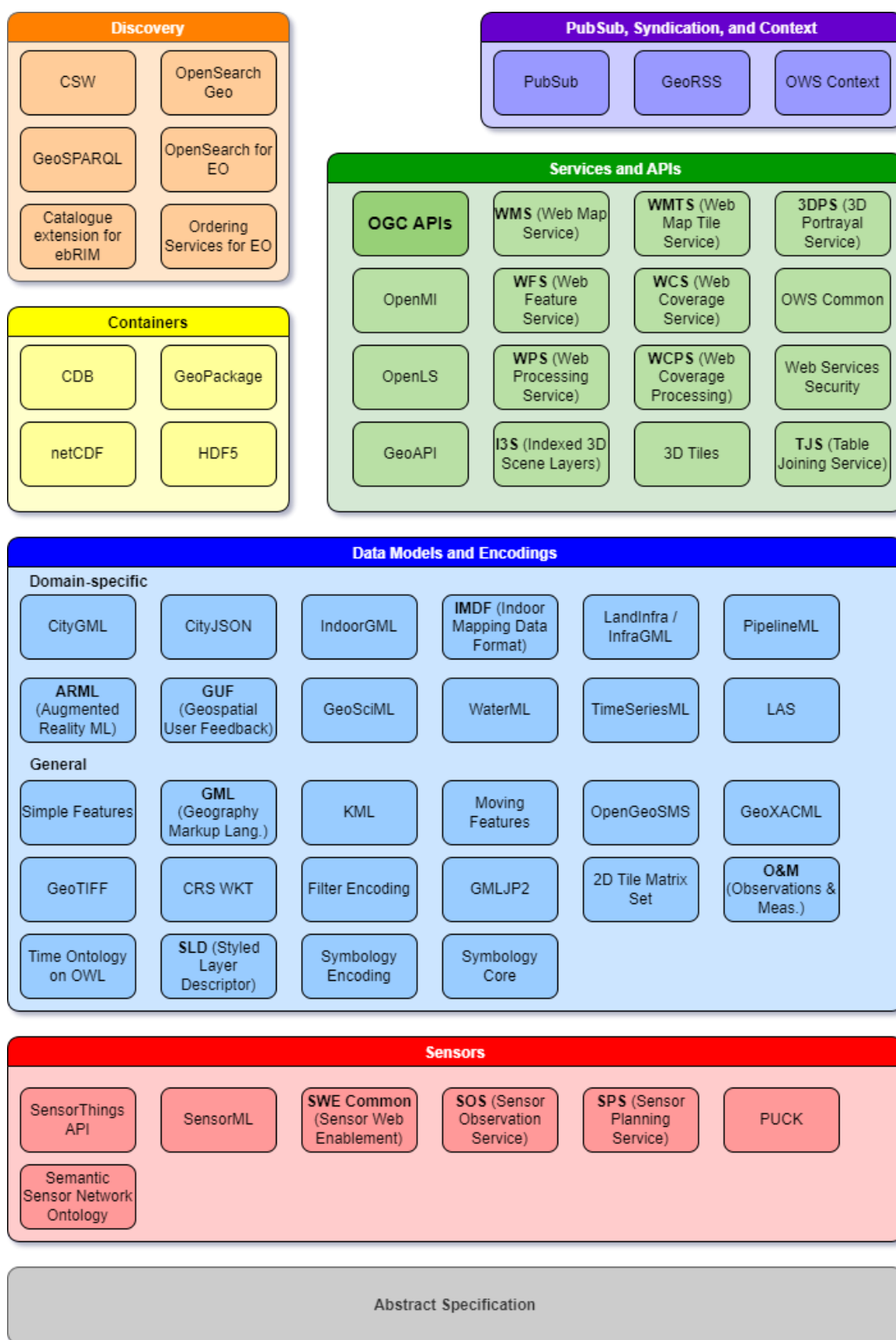


Figura 6.1: Diagrama de la arquitectura de estándares mantenidos por el OGC.

sea autodescriptivo, portable, accesible aleatoriamente, compartible, anexable y archivable. Además, sus promotores han creado bibliotecas que sirven de referencia [262] y aspiran a que el formato se mantenga independiente de las arquitecturas de cómputo.

- **LAS** [263]: Define un formato de archivo que pueda contener los registros asociados a nubes de puntos recabados mediante sensores LiDAR¹⁷.

Para estos estándares de almacenamiento, se encuentra el mismo soporte en ambas plataformas, pudiendo usar los tres últimos y no pudiendo operar con el CDB.

6.5.2.2. Estándares OGC relativos a la codificación de información

De manera similar se exponen a continuación los estándares publicados por el OGC que, con interés para este TFG, establecen codificaciones de la información geográfica.

- **Geographic Markup Language (GML)** [264]: Describe una gramática derivada del estándar XML adecuada para describir propiedades geográficas y poder intercambiar dichas descripciones entre sistemas heterogéneos.
- **Keyhole Markup Language (KML)** [265]: Describe una gramática derivada del estándar XML enfocada a comprender cualquier aspecto relacionado con la visualización de información geográfica, buscando abarcar, por ejemplo, la presentación de datos de cualquier parte del planeta, los desplazamientos del usuario en las visualizaciones o las anotaciones de mapas e imágenes mostradas.
- **Simple Features** [266], [267]: Describe cómo estructurar, consultar y manipular información geográfica en bases de datos y otros conjuntos estructurados sin describir cómo debiera disponerse en los soportes finales de almacenamiento.
- **GeoTIFF** [268]: Describe una extensión al estándar TIFF 6.0 [269] para almacenar, en los metadatos del propio formato TIFF, la información geográfica asociada a imágenes guardadas en archivos TIFF [268].
- **Coordinate Reference System Well-Known Text (CRS WKT)** [270]: Describe la estructura y el contenido que debiera cumplir cada cadena de texto bien conocida para describir los elementos notables de un Sistema de Referencia de Coordenadas (CRS) y disponer así de los parámetros necesarios para poder realizar las operaciones matemáticas necesarias en relación con uno o varios CRS.
- **GML in JPEG 2000 (GMLJP2)** [271]: Describe cómo almacenar información geográfica estructurada como GML dentro de un archivo conforme al formato de archivo del estándar JPEG 2000, aprovechando que éste permite incrustar elementos XML dentro de los archivos de imagen.
- **2D Tile Matrix Set** [144]: Define un sistema de divisiones de mapas digitales para series arbitrarias de niveles de escala, empleado en el servicio del estándar WMTS (recogido en el apartado siguiente), que convierte el mapa de cada escala en un mosaico de imágenes relativamente pequeñas, cada una de las cuales se divide en 4 al acceder al nivel de escala siguiente.
- **Styled Layer Description (SLD)** [272]: Define una sintaxis basada en XML que se puede usar para transmitir el estilo que aplicar a los elementos de un mapa.
- **Symbology Core** [273]: Define un léxico expandible con el que poder modelar los símbolos que se quieran aplicar a elementos concretos en representaciones.

¹⁷Light Detection and Ranging, en español Medición de Distancias y Detección de Luces, un tipo de sensores equipados con láseres mediante los que logran los objetivos de su nombre.

- **Symbology Encoding** [274]: Define una sintaxis mediante la que poder transmitir la información modelada con el estándar inmediatamente anterior.

Para estos estándares se encuentra la relación de soporte de la tabla 6.2, expuesta más adelante.

Estándar	Plataforma comercial	Plataforma diseñada
GML	Sí	Sí
KML	Sí	Sí
Simple Features	Sí ¹⁸	Sí (PostgreSQL)
GeoTIFF	Sí	Sí (MapCache)
CRS WKT	Sí	Sí (MapServer)
GMLJP2	Sí	Sí (MapCache)
2D Tile Matrix Set	Sí	Sí (MapCache)
SLD	No	Sí (MapServer)
Symbology Core	No	Sí (MapServer)
Symbology Encoding	No	Sí (MapServer)

Cuadro 6.2: Implementación de las codificaciones revisadas en las plataformas comparadas.

6.5.2.3. Estándares OGC relativos a servicios web

Finalmente, el OGC ha publicado varios estándares que definen servicios web mediante los que publicar, editar o procesar información geográfica o representaciones de ésta; y difundir o descubrir otros servicios. De ellos, hay 11 de mayor atractivo para este TFG, que se revisan en los siguientes párrafos:

- **Web Feature Service (WFS)** [275]: Describe el comportamiento de un servicio que mediante HTTP permite, al menos, buscar y consultar pormenorizadamente elementos concretos y/o características determinadas de estos en los conjuntos de información geográfica que maneje sin necesidad de involucrar conocimiento alguno de los archivos o elementos de persistencia subyacentes que se usen. Opcionalmente, un servicio conforme a este estándar también puede facilitar la edición de los elementos manejados.
- **Web Map Service (WMS)** [276]: Describe el comportamiento de un servicio que, de forma dinámica y para regiones del espacio indicadas por el usuario, es capaz de generar representaciones pictográficas digitales para su visualización en pantallas de ordenador, esto es, mapas digitales, en base a informaciones geográficas a través de navegadores web mediante el uso de HTTP. Opcionalmente, un servicio conforme a este estándar también puede facilitar la consulta de características de elementos representados.
- **Web Map Tile Service (WMTS)** [277]: Describe el comportamiento de un servicio que mediante HTTP entrega a los usuarios porciones (teselas) de mapas digitales con dimensiones y escalas prefijadas.
- **Catalogue Service for the Web (CSW)** [278], [279]: Describe el comportamiento de un servicio que mediante HTTP permite publicar y buscar colecciones de metadatos sobre servicios, datos geográficos y otras informaciones relacionadas, facilitando tanto el descubrimiento como el acceso a los elementos indicados en tales colecciones.
- **Web Coverage Service (WCS)** [280]: Describe el comportamiento de un servicio que mediante HTTP permite acceder a datos multidimensionales que cubran regiones del espacio

dadas (datos de cobertura). En este estándar el concepto de dimensión se usa en el más amplio de los sentidos, si bien se ha diseñado con la intención de servir datos de fenómenos espaciotemporales como pudieran ser las precipitaciones, el viento, la temperatura o los niveles de polución; estructurándolos, por ejemplo, en cuadrículas, mallas o nubes de puntos.

- **Web Processing Service (WPS)** [281]: Describe el comportamiento de un servicio que mediante HTTP permite consultar y ejecutar procesos de cómputo, síncronos o asíncronos, sobre informaciones, geográficas o no, para obtener otras derivadas de aquellas.
- **Web Coverage Processing Service (WCPS)** [282]: Describe el comportamiento de un servicio que mediante HTTP y bajo demanda permite recabar, procesar y analizar coberturas estructuradas en matrices multidimensionales que representen, por ejemplo, información estadística, de imágenes o de sensores.
- **OWS Common** [283], [284]: Describe elementos comunes a los servicios web del OGC. En especial, establece las codificaciones a usar en las comunicaciones de y con ellos, cómo negociar o intercambiar algunos parámetros (como la versión de los servicios a usar, los formatos o los lenguajes aceptados, el tipo de servicio al que se desea acceder o el tipo de petición realizada) y dispone algunos tipos de peticiones y respuestas¹⁹.
- **Web Services Security** [285]: Describe cómo disponer, en respuestas a peticiones sobre las capacidades de servicios web conformes al estándar OWS Common anterior, metadatos que señalen la presencia de controles de acceso a los servicios que se relacionen en tales respuestas.
- **OWS context** [286]: Describe la codificación a usar para intercambiar la información necesaria para que diversos servicios web de los indicados hasta ahora atiendan peticiones de usuarios de forma coherente aunque no se comuniquen entre sí.
- **API OGC** [287]: Aunque los servicios web del OGC anteriores, que se pueden implementar usando intercambios de pares clave-valor o como APIs SOAP accesibles vía HTTP con, respectivamente, cargas de texto plano o XML han sido bien acogidos como indican los pocos programas que los implementan [288], se han desfasado con el auge de las nuevas API REST basadas en JSON. Por ello, se están creando nuevos estándares para que las capacidades de los antiguos servicios web puedan implementarse vía APIs REST(ful) [289] con la intención de que terminen sustituyéndolos [17]. No obstante, estas API aún no han alcanzado un nivel de madurez suficiente dado que varios de los estándares que la conforman todavía son meros borradores.

Para estos servicios, la tabla 6.3, expuesta más adelante, indica su presencia en las plataformas objeto de comparación.

6.6. Capacidades aportadas

Avanzando a otro campo de la comparativa, veamos qué capacidades aporta cada plataforma.

6.6.1. Software de escritorio

Comparando las funcionalidades presentes en los software de escritorio de ambas plataformas, se encuentra que ambos comparten el grueso de funcionalidades de las que disponen, con presencia de la mayoría de las no compartidas en ArcGIS.

¹⁹En especial, la del documento de capacidades o “*Capabilities*” que indica qué puede hacer el servicio que lo entrega.

Servicio	Plataforma comercial	Plataforma diseñada	Necesaria
WFS	Sí, completo	Sí, sin ediciones (MapServer)	Sí, sin ediciones
WMS	Sí	Sí (MapServer)	Sí
WMTS	Sí	Sí (MapCache)	Sí
CSW	Sí	No	No
WCS	Sí	Sí (MapServer)	No
WPS	Sí	No	No
WCPS	No	No	No
API OGC	No	Si (MapServer)	No

Cuadro 6.3: Implementación de los servicios web revisados en las plataformas comparadas.

6.6.1.1. Capacidades compartidas

A pesar de ello, es conveniente repasar las capacidades más relevantes de las compartidas y profundizar en las divergentes, por lo que bajo este epígrafe se abarcan las primeras que vienen a corresponderse con las que cabe esperar de un Sistema de Información Geográfica de escritorio. Estas son:

- Gestión de archivos y carpetas mediante interfaces distintas a las del sistema operativo.
- Creación de representaciones bidimensionales o tridimensionales de regiones del espacio.
- Soporte para manejar y representar informaciones vectoriales, ráster, en mallas, topológicas y de cobertura.
- Libre selección del sistema de coordenadas usado en las representaciones del espacio y para situar los elementos inscritos en ellas.
- Libre selección y cambio de la proyección aplicada al dibujar las representaciones del espacio creadas.
- Libre movimiento por las representaciones creadas en los cuatro ejes cardinales.
- Libre selección de la altura o de la escala aplicada en las representaciones creadas.
- Gestión de distintos conjuntos de elementos mediante el uso de capas.
- Creación, modificación y borrado de elementos en las representaciones del espacio.
- Creación, modificación y borrado de otros atributos de elementos, adicionales a su posición en el espacio.
- Selección de elementos interactiva desde la representación del espacio creada.
- Selección de elementos mediante la formulación de expresiones o fórmulas.
- Selección de elementos desde la consulta de los atributos de los elementos de una capa.
- Selección de elementos en base a la distancia a otro dado.
- Acoplamiento, a voluntad, del lugar efectivo de acciones realizadas interactivamente mediante el uso de ratón sobre las representaciones a otros elementos preexistentes.
- Medición de distancias, áreas y ángulos.
- Diseñador de símbolos para los elementos representados.
- Libre elección del símbolo usado para señalar la presencia de los elementos de cada capa representada.
- Limitación de la visibilidad de elementos a cuando se visualicen escalas determinadas.
- Dibujado por capas de diagramas, de barras, barras apiladas o circulares, centrados en cada elemento de cada capa en base a informaciones incluidas sus atributos.
- Enriquecimiento de la información de elementos en sus atributos mediante la unión de conjuntos de datos.

- Conectividad con dispositivos GPS locales para la toma de datos en movimiento.
- Establecimiento, para cada capa, de etiquetas textuales en torno a cada elemento representado, de contenido único e idéntico o dinámico en base a valores asignados a atributos de cada elemento.
- Libre elección de la fuente y del tamaño de letra del etiquetado.
- Establecimiento de prioridades entre capas para el etiquetado en caso de conflicto por su posicionamiento.
- Cambio de ubicación, a voluntad, de la ubicación en la que disponer cada etiqueta
- Generación de marcas lineales de llamada que unen etiquetas voluntariamente disociadas de las inmediaciones del elemento con el que se corresponden.
- Detención, a voluntad, del etiquetado sin cambiar su configuración.
- Creación, manejo y borrado de anotaciones (puntos, líneas, curvas, polígonos o textos) sobreimpuestos a la representación mostrada que no forman parte de las capas dispuestas.
- Opción de simular distintos tipos de discromatopsias (daltonismos).
- Creación de esquemas de procesamiento de datos usando interfaces gráficas mediante el modelado del uso de herramientas de procesamiento de información disponibles en el software.
- Creación, gestión y uso de marcadores para el desplazamiento rápido en las representaciones creadas.
- Conectividad con bases de datos alojadas en servicios remotos o archivos locales.
- Creación de montajes para impresión basados en las representaciones creadas.
- Exportado de representaciones como archivos de imagen, CAD y PDF.
- Exportado de montajes de impresión como archivos de imagen, imagen vectorial y PDF.
- Exportado de esquemas de procesamiento como archivos de imagen, imagen vectorial, PDF y código Python.
- Guardado de las representaciones, los montajes de impresión y los esquemas de procesamiento creados.
- Creación de índices basados en atributos o en la ubicación.
- Acceso a mapas precompilados que poder usar como base.
- Extensibilidad de capacidades mediante complementos.
- Opción de interactuar con el software mediante scripts Python.
- Opción de expandir las capacidades del software mediante complementos.
- Acceso a diversas herramientas de procesamiento geográfico que transforman la información según se disponga.

No obstante, la mera inclusión de una capacidad en la lista anterior no implica que esté presente de la misma manera en ambos software, esto es, que sea algorítmicamente equivalente, sino que simplemente está presente de alguna manera, conforme se cita en la lista.

6.6.1.2. Capacidades divergentes

Vistas las capacidades compartidas, ha de pasarse a las diferencias entre los programas, que se detallan a lo largo de este apartado.

Bloqueo por defecto de la edición

Pensando en aplicar un paso más por seguridad, en QGIS encontramos que no se pueden añadir, editar o borrar elementos de los mapas o sus atributos sin antes desbloquear explícitamente la edición de la capa en la que se encuentren, algo que ArcGIS implementa de manera algo diferente: no bloquea la edición sino se han de guardar, posteriormente, las ediciones.

Catálogo de complementos disponibles

Aunque se detallaba al final de la lista anterior que ambos SIG de escritorio compartían la posibilidad de ampliar sus capacidades mediante complementos, sólo en QGIS se dispone por parte del fabricante de un catálogo de complementos del que poder descargar directamente los que se deseen usar, que está integrado en el software de forma que se pueden consultar e instalar sin necesidad de abandonar el programa. Además, se ha de recalcar que el número de complementos disponibles en tal catálogo, superando las 2.000 distintas extensiones [116], implica que básicamente existen complementos para casi cualquier acción que se desee realizar y no se pueda llevar a cabo con las capacidades originales de QGIS.

En contraposición, en ArcGIS Pro resulta que para incorporar nuevas funcionalidades al programa ha de hacerse una búsqueda externa al programa ya que, salvo que éstas se publiquen no como complementos sino como colecciones de scripts (o, en su argot, cajas de herramientas) dentro de la misma organización de ArcGIS Online o Server, el acceso y obtención habrá de ser manual, ya se publiquen como extensiones o como cajas de herramientas.

Herramientas de procesamiento disponibles

Antes se apuntaba, en las capacidades compartidas por ArcGIS Pro y QGIS, que ambos se disponen de herramientas de procesamiento de información para transformarla. No obstante, su número en uno y otro software es muy dispar, en favor de ArcGIS Pro; pero debe indicarse que en ambos se encontraron herramientas que no disponen de otra equivalente o de una vía relativamente simple en su homólogo para conseguir el mismo resultado. En el caso de QGIS, parece que la falta de homologías indicadas se cumple para las siguientes herramientas, transcritas literalmente:

1. Análisis de vector: Ascender con una línea.
2. Análisis del terreno ráster: Curvas hipsométricas.
3. Análisis del terreno ráster: Índice de irregularidad.
4. Análisis ráster: Rango de porcentaje de pila de celdas desde un valor.
5. Análisis ráster: Rango percentil de pila de celdas desde una capa ráster.
6. Análisis ráster: Volumen de la superficie ráster.
7. Creación de vectores: Generar puntos (centroides de píxel) a lo largo de línea.
8. Creación de vectores: Generar puntos (centroides de píxel) dentro de polígonos.
9. Geometría vectorial: Búfer múlti-anillos (distancia constante).
10. Geometría vectorial: Cambiar las coordenadas X e Y.
11. Geometría vectorial: Concave hull.
12. Geometría vectorial: Convertir a geometrías curvadas.
13. Geometría vectorial: Crear buffer de cuñas.
14. Geometría vectorial: Establecer el valor de M desde ráster.
15. Geometría vectorial: Fuerza la regla de la mano derecha.
16. Geometría vectorial: Geometría por expresión.
17. Geometría vectorial: Línea geodésica dividida en antimeridiano.
18. Geometría vectorial: Polo de inaccesibilidad.
19. Geometría vectorial: Promover a multiparte.
20. Geometría vectorial: Puntos del proyecto (cartesianos).
21. Geometría vectorial: Rectángulos, óvalos, diamantes.
22. Geometría vectorial: Recuadro delimitador mínimo orientado.
23. Geometría vectorial: Redondez.
24. Geometría vectorial: Rotar.

25. Geometría vectorial: Sistema de Referencia Coordinado Qgs [sic²⁰].
26. Geometría vectorial: Subdividir.
27. Geometría vectorial: Variable ancho del buffer (por valor M).
28. Gráficos: Trazado de dispersión de capa vectorial 3D.
29. Gráficos: Trazado de media y desviación estándar.
30. Gráficos: Trazado polar.
31. Herramientas de ráster: Genera teselas XYZ (Directorio).
32. Herramientas de ráster: Genera teselas XYZ (MBTiles).
33. Vector general: Emparejar Relación [sic²¹].
34. Vector general: Convertir marcadores espaciales a una capa.
35. Vector general: Convertir una capa a marcadores espaciales.
36. Vector general: Detectar cambios del conjunto de datos.
37. Vector general: Dividir entidades por carácter.
38. Vector general: Encontrar proyección.
39. Vector general: Establecer codificación de capa.
40. Vector general: Extraer la codificación de Shapefile.
41. Vector general: Reparar Shapefile.
42. Superposición vectorial: Diferencia (múltiple).
43. Superposición vectorial: Intersección (múltiple).
44. Superposición vectorial: Unión (múltiple).
45. Selección vectorial: Extracción aleatoria.
46. Selección vectorial: Extracción aleatoria dentro de subconjuntos.
47. Selección vectorial: Filtrar por tipo de geometría.
48. Selección vectorial: Selección aleatoria.
49. Selección vectorial: Selección aleatoria dentro de subconjuntos.
50. Tabla vectorial: Añadir campo índice de valor único.
51. Tabla vectorial: Conservar campos.
52. Tabla vectorial: Explotar campo HStore.
53. Tabla vectorial: Extraer campo binario.
54. GDAL – Análisis ráster: Casi negro.
55. GDAL – Análisis ráster: Cuadrícula (Desplazamiento medio).
56. GDAL – Análisis ráster: Cuadrícula (vecino más próximo).
57. GDAL – Análisis ráster: Filtrado.
58. GDAL – Análisis ráster: Índice de irregularidad del terreno (TRI).
59. GDAL – Análisis ráster: Índice de posición topográfica. (TPI).
60. GDAL – Análisis ráster: Irregularidad.
61. GDAL – Análisis ráster: Relieve de color.
62. GDAL – Conversión ráster: gdalAxyz.
63. GDAL – Conversión vectorial: Rásterizar (sobrescribir con atributo).
64. GDAL – Conversión vectorial: Rásterizar (sobrescribir con valor fijo).
65. GDAL – Geoprocesamiento vectorial: Desplazar curva.
66. GDAL – Miscelánea ráster: gdalAteselas.
67. GDAL – Miscelánea ráster: Índice de teselas.
68. GDAL – Miscelánea ráster: Reteselar.
69. GDAL – Miscelánea vectorial: Información del vectorial.

²⁰Error de traducción, en realidad se trata de “Búfer cónico”.

²¹Error de traducción, en realidad se trata de “Aplanar Relación”.

Teniendo en cuenta que, sin instalar complementos adicionales, en QGIS el total de herramientas disponibles es de aproximadamente 400 y que el conteo de las de ArcGIS Pro es de aproximadamente 2.000, resulta obvio que no es viable (por el espacio que ocuparía) detallar las herramientas de este software que no tienen homólogo en aquél, en tanto que la lista sería más de un orden de magnitud superior a la anterior.

La circunstancia indicada cobra su máximo sentido cuando se revisan las herramientas de procesamiento incluidas en ArcGIS Pro, ya que tras descartar las redundantes y las que disponen de homologías en QGIS resulta que gran parte de las restantes guardan estrecha relación con las funcionalidades que le son exclusivas, toda vez que en ArcGIS Pro la casi totalidad de funcionalidades nativas se presentan, además de en los menús correspondientes, mediante estas herramientas. Así pues, las herramientas que no gozan de homólogas conforme lo indicado en el párrafo anterior vienen a implementar las siguientes características:

- Trazado de campos y/o líneas de visión desde y, en su caso, a puntos dados.
- Simulación de las sombras de objetos presentes en representaciones tridimensionales en base a la fecha y hora que se indique para la posición del Sol.
- Representación de elementos aeronáuticos, pudiendo generar cartas de navegación aéreas completas y conformes a estándares de reguladores como la FAA²² o la internacional ICAO²³, además de facilitar realizar estudios del despeje de zonas circundantes a aeropuertos y de la viabilidad de zonas para aterrizar helicópteros o la práctica del paracaidismo.
- Realización de investigaciones de diversa índole, como pudieran ser las criminológicas.
- Soporte y gestión de archivos incrustados en Geodatabases, así como su compresión.
- Soporte y gestión de un sistema de licencias para los datos en Geodatabases que se editan o acceden, que permiten limitar el acceso o el uso de estos.
- Gestión de replicaciones de bases de datos locales o remotas de diversos tipos.
- Gestión de anotaciones unidas a otras características dispuestas en representaciones.
- Uso de capacidades en línea aportadas por servidores de ArcGIS Online, Server o Portal, como las de publicar o acceder a contenidos.
- Gestión de informaciones batimétricas e hidrológicas, con las que se facilita la creación de cartas náuticas conformes a diversas normas dispuestas por la OHI²⁴ que las regula.
- Realización de estudios de mercado sobre la base de combinar datos locales con datos estadísticos que ESRI maneja.
- Gestión administrativa de alto y bajo nivel de gestores de bases de datos remotos sin usar lenguajes de consultas alguno, como SQL.
- Establecimiento y comprobación de reglas que permitan validar la calidad de los diversos tipos de información incorporadas.
- Ofrecimiento de un *framework* (andamiaje) a través del que poder explotar capacidades de inteligencia artificial, exponiéndose opciones de *deep learning* (aprendizaje profundo) y *machine learning* (aprendizaje automático).
- Consolidación de todos los artefactos en uso en un proyecto bajo una misma carpeta.
- Explotación de opciones de geocodificación²⁵ y/o de geocodificación inversa²⁶ provistas por servidores de ArcGIS Online o Server.
- Gestión de vídeos como elementos geográficos a través del uso de las coordenadas incrustadas

²²Administración Federal de Aviación, de los Estados Unidos de América.

²³Organización de Aviación Civil Internacional.

²⁴Organización Hidrológica Internacional

²⁵Conversión de coordenadas geográficas a direcciones de vías en lenguaje natural.

²⁶Conversión de direcciones de vías en lenguaje natural a coordenadas geográficas.

del lugar de grabación en los metadatos de tales vídeos, pudiéndolos agregar en mapas y situándolos en donde se tomaron.

- Control de versiones de los cambios realizados en los conjuntos de datos que se usen.
- Creación y uso de sistemas de posicionamiento de interiores en dispositivos inteligentes mediante el SDK²⁷ de ArcGIS Maps junto a informaciones externas que reciban.
- Creación y explotación de topologías que describen redes de elementos como son, por ejemplo, las viarias, férreas, eléctricas, de aguas, de comunicaciones, de oleoductos, etc.
- Creación y uso de sistemas de referencias lineales basados en los elementos lineales incorporados a las representaciones generadas.
- Creación y uso de cubos que inscriben nubes de puntos variantes a lo largo del espacio-tiempo.
- Explotación de topologías creadas, pudiendo, por ejemplo, trazar rutas entre elementos de la topología, obtener matrices de los costes de recorrer partes de esta u obtener el camino más corto a alguna instalación de determinado tipo dado.
- Creación de reglas para la aplicación automatizada de símbolos a elementos de topologías.
- Incorporación de imágenes tomadas en cualquier lugar, ángulo y orientación a representaciones tridimensionales en la posición en la que fueron tomadas, mediante los metadatos que se incorporan al tomarse.
- Uso de topologías para representar tejidos parcelarios, como es el del Catastro.
- Generación de artefactos en formato GTFS que aporten información de trayectos y horarios de servicios de transporte público.
- Procesamiento de imágenes de drones y otras fuentes aéreas para generar ortofotografías, perfiles de la superficie terrestre, nubes de puntos y mallas 2.5-3D, corrigiendo las distorsiones que aparezcan por la no perpendicularidad de la cámara.
- Creación de memorias caché de servidores en línea arbitrarios.
- Realización de estudios relacionados con repartos de territorios.
- Automatización de medidas que aseguren el cumplimiento de estándares o normas dadas.
- Realización de interpolaciones sobre elementos de representaciones usando diversos algoritmos.
- Creación de flujos de trabajo, usando otras herramientas del software, parcial o completamente automatizados.
- Realización de estudios multivariantes sobre elementos de representaciones usando diversos algoritmos.
- Realización de estudios multidimensionales sobre elementos de representaciones usando diversos algoritmos.
- Trazado de gráficas varias sobre características de elementos de representaciones usando diversos algoritmos.
- Realización de estudios estadísticos sobre elementos de representaciones usando diversos algoritmos.
- Agrupado de elementos de representaciones en clústeres usando diversos algoritmos.
- Realización de estudios de regresión sobre elementos incorporados a representaciones usando diversos algoritmos.

Acceso a infografías

Otra capacidad exclusiva de ArcGIS Pro es la generación bajo demanda de infografías sobre estadísticas de la población para regiones indicadas en base a conjuntos de datos estadísticos

²⁷Kit de Desarrollo de Software.

preseleccionados por ESRI. Si bien tales capacidades podrían llegar a imitarse en QGIS, requeriría de una serie de trabajos de selección, validación y composición que su competidor evita al usuario.

Conversión de coordenadas

ArcGIS incluye una herramienta de forma nativa que sin el uso de *plugins* está ausente en QGIS: un conversor de coordenadas entre los sistemas de referencia de coordenadas más habituales, lo que puede ser útil cuando hay que incluir información nueva manualmente en la que el formato de las coordenadas no coincide con las que espera el software ya que están en otro formato distinto.

Acceso a mapas base

Si bien por defecto ambos programas permiten acceder a algún mapa base con el que poder orientarse y sobre el que colocar otros elementos, la presencia de esta capacidad aquí se debe a su disparidad en las opciones entre ambos softwares: mientras que en QGIS se puede acceder exclusivamente a un único mapa base 2D, provisto por OpenStreetMap, en ArcGIS se nos presenta en todo momento una amplia gama de opciones con opciones basadas en fotografías aéreas, en mapas de carreteras con distintas paletas de colores y en combinaciones del mapa de carreteras con las fotografías aéreas, cambiando entre versiones 2D y 3D según el tipo de mapa con el que se trabaje, permitiendo alternar, para las versiones 3D, entre incorporar el mero relieve del terreno o incluir también siluetas de edificios.

Motores de programación y complementos

En cuanto a las opciones de expansión de las capacidades del software, ambos usan un sistema de *scripting* basado en el uso de Python, si bien cada uno tiene su propia API para interactuar con el software. Esto facilita que, aunque se cambie de plataforma, los cambios a hacer para adaptar los *scripts* sean muchos menos que si hubiera que portarlos a otro lenguaje. No obstante, la cuestión cambia radicalmente al hablar de complementos, ya que aquí sí hay diferencia en los lenguajes de programación: QGIS usa una API programada en C++ y ArcGIS impone el uso de un SDK basado en .NET, haciendo que la programación sea en C#.

Gestor de tareas

En ArcGIS también se halló otra funcionalidad no implementada en QGIS: un sistema de gestión de tareas pendientes que permite inscribir cuestiones por hacer, asignarlas y hacer seguimientos sobre ellas de manera similar a como se pudiera hacer en un sistema de *tickets*.

Ayudas a la navegación

Como ayudas a la navegación se encontraron sólo en ArcGIS la presencia de tres funcionalidades relativamente interactivas para asistir en la consulta del mapa:

- Navegador, que establece una brújula en parte de la vista de la representación creada que, además de marcar la dirección norte, puede ser usado para mover el mapa mediante clic y arrastrado en la dirección que se desee moverse.
- Lupa, que crea una ventana dentro de la representación activa que amplía la escala de la región que abarca.
- Cámara, que muestra los ajustes de posición y ángulo actuales de la representación.

Validación de datos

Aparte de las posibilidades ya vistas de validación de datos a través de herramientas en ArcGIS Pro, también en este software se dispone de interfaces más gráficas a través de las cuales interactuar con las capacidades de validación de datos, haciendo el proceso más interactivo de desearse, tanto para agregar reglas como para evaluarlas y resolver los problemas detectados.

Investigaciones y Grafos

Otra capacidad solamente disponible en ArcGIS es la de mostrar relaciones entre elementos geográficos mediante el uso de grafos, una capacidad que recibe dos nombres dependiendo de dónde, con qué elementos se procesan internamente los grafos y cuáles sean los límites de tal sistema de grafos.

Bajo el nombre de “Gráfica de enlaces” y usando un motor de grafos local y relativamente limitado [290], pero plenamente integrado en ArcGIS Pro²⁸, tenemos un sistema que permite modelar relaciones entre elementos con los que estemos trabajando y obtener grafos que las representa y con los que hacer valoraciones y estudios básicos, en el mapa o por separado. Y bajo el nombre de “Investigaciones” y que en realidad es fruto de integrar ArcGIS Pro, ArcGIS Server y la base de datos no relacional basada en grafos Neo4j, por lo que se ha de desplegar ArcGIS privadamente para su disfrute, tenemos aparentemente²⁹ una suerte de evolución del sistema de grafos local anterior, que permite visualizar las informaciones que se manejen y sus relaciones en grafos y mapas, y explotarlas en base a los tipos de relaciones existentes, como los caminos o circuitos de determinados tipos o características que se puedan formar [291].

Línea de visión

Otra herramienta disponible exclusivamente en ArcGIS es la de comprobación de línea de visión, que permite comprobar si entre dos puntos dados, y con los elementos que se hayan dispuesto en la representación tridimensional en la que se use, la visión que tengan el uno del otro está obstruida o no. No obstante, aparentemente la implementación trata más de responder a si un láser emitido desde uno de los puntos dados podría llegar al otro teniendo en cuenta los obstáculos presentes en la representación.

Acotaciones de distancias

Otra capacidad no observada en QGIS, y que sí está presente en ArcGIS, es la de poder incorporar acotaciones que indican la distancia real existente entre elementos de un mapa, de forma básicamente idéntica a las acotaciones en los planos industriales de piezas.

Entrenamiento de inteligencias artificiales

ArcGIS incluye un entorno de inteligencia artificial a través del que se puede entrenar y usar capacidades de inteligencia artificial para automatizar tareas como la determinación y clasificación de objetos y características, la censura de imágenes o el seguimiento de objetos en secuencias de fotos o vídeos.

²⁸Similar al de otros programas de investigaciones basadas en grafos, como Maltego.

²⁹Ya que debido a los requisitos de despliegue no se ha podido probar esta capacidad.

Manejo de vídeos

ArcGIS incluye una herramienta para filtrar en colecciones de vídeos a través de los metadatos de éstos, concretamente mediante el filtrado de la ubicación y/o de la hora del dispositivo cuando capturó el vídeo; luego puede incluir los resultados a mapas.

Monitor de diagnóstico

ArcGIS incluye una herramienta de registro y monitorización del software que permite corroborar la existencia de fallos y errores e indagar en algunas posibles causas de estos.

6.6.2. Software de servidor

Comparados los componentes de escritorio de ambas plataformas, procedamos a establecer similitudes y diferencias en la parte de servidor.

6.6.2.1. Controles de acceso

Mientras que en la plataforma comercial se incluyen desplegados diversos controles de acceso que evitan accesos no autorizados, en la diseñada puede verse que, en la configuración actual, no se disponen controles sino que está abierto al mundo. No obstante, debe recordarse que esto es completamente intencionado, fruto de una situación de no necesidad de controles de acceso en base a los requisitos elicitados inicialmente y que, en cualquier caso, no impide la implantación posterior de tales controles, bien mediante modificaciones a los contenedores diseñados, bien mediante la interposición de *proxys* inversos.

6.6.2.2. Geocodificación

En cuanto a las capacidades de geocodificación, puede verse que ambas plataformas son capaces de realizar codificación directa e inversa, por lo que en este aspecto resultan relativamente parejas, si bien hay una ligera diferencia: el nivel de completitud que tienen los datos de ambas plataformas. En ArcGIS, que dispone de más zonas en las que ha llegado a ubicar el número de cada puerta, se pueden buscar en más zonas recabando directamente el lugar de la puerta o edificio que corresponde a la vía y al número solicitado, a diferencia de en la plataforma propuesta, que al usar datos menos completos de OpenStreetMap, tiene más zonas en las que tales búsquedas sólo pueden ser respondidas con la vía en la que se encuentren, dejando en manos del usuario descubrir qué parte de tal calle es la que busca.

6.6.2.3. Enrutamiento

Pasando a las capacidades de enrutamiento, ambas plataformas disponen de formas de generar y mostrar rutas e isócronas. No obstante, también ambas pueden generar matrices de costes (tiempos o distancias) entre conjuntos de orígenes y destinos, pero sólo ArcGIS lo anuncia ya que al no ser una funcionalidad requerida este alumno-autor no buscó clientes que implementaran solicitar y mostrar tales tablas. Además, ArcGIS implementa otras opciones relacionadas con el enrutamiento que pueden ser llegar a ser deseables en determinados entornos, que son la búsqueda del lugar de determinado tipo más cercano, la optimización de rutas y la búsqueda de asentamientos óptimos.

6.6.2.4. Herramientas de procesamiento en línea

Al considerar las capacidades que puedan aportar ambas plataformas de procesar en sus respectivos servidores la información que se les entrega, hay una clara disparidad en la que, de nuevo, la comercial emerge beneficiada, dado que implementa capacidades equivalentes a las del estándar WPS en ArcGIS Online y Server, por lo que puede aplicar cálculos complejos a cualquier información geográfica a la que tenga acceso, cuyos resultados puede guardar a futuro o entregar directamente al usuario. No obstante, MapServer también implementa capacidades procedurales para procesar y transformar, en el limitado contexto efímero y volátil de cada petición individual que reciba, la información que maneja mediante, entre otros, el uso de JavaScript, pudiendo llegar a realizar mediante el uso de tal lenguaje de programación transformaciones complejas que no obstante tendrá que repetir con cada petición y que sólo pueden servir como paso intermedio para dibujar los mapas que tenga configurados.

En definitiva, si bien en ambas plataformas hay mecánicas que permiten procesar a relativa voluntad la información que se haya entregado a los servidores, sólo en la comercial se puede encontrar que se puedan realizar sin que tal procesamiento sea un mero paso en la renderización de mapas y que pueda guardar los resultados de las transformaciones solicitadas sin tener que entregarlos de alguna manera al usuario al instante.

6.6.2.5. Visor en línea

Otra gran diferencia entre los elementos en línea de las plataformas es el de sus visores web, que en el caso de la plataforma creada se limita a poder mostrar los mapas que se le hayan configurado, realizar búsquedas de lugares, ejecutar búsquedas de rutas y mostrar la información de los resultados correspondientes; mientras que en la comercial [292] también permite, con los permisos adecuados, editar la información aplicando las herramientas de procesamiento del lado del servidor del punto anterior; incorporando nuevas informaciones publicadas en internet, publicadas en el mismo despliegue de ArcGIS Server u Online que se esté o disponibles en los equipos de los usuarios; añadiendo manualmente elementos vectoriales; incorporando anotaciones; generando gráficas; o alterando los símbolos usados. No obstante, las capacidades de edición del visor web de ArcGIS son, obviamente, limitadas en comparación con las que se aportan en ArcGIS Pro, ya que el entorno en línea dispone, en comparación, de una menor cantidad de recursos disponibles por usuario.

6.7. Dificultad al uso

Continuando con las áreas de la comparativa, tenemos la dificultad que ofrece cada una de las plataformas al uso. En este sentido, se han detectado diversas cuestiones en cada una de las plataformas comparadas que pueden afectar al hecho de que sean fáciles de usar, lo que se revisa a continuación.

6.7.1. Localización

Para el más común de los usuarios hay una cuestión primordial que afectará a la dificultad que le suponga ponerse frente a un programa: la capacidad de entender qué hace o qué hará cuando interactúe con él, cuestión que se aborda habitualmente localizando³⁰ las interfaces de usuario.

Así pues, hay que señalar que ambas plataformas presentan retos en este sentido. En la de código

³⁰Más informalmente, traduciendo.

abierto, QGIS dispone de una traducción al español que en algunos puntos presenta errores que parecen fruto de traducciones automatizadas o que parecen deberse a disponer las traducciones en lugares equivocados del código fuente, rotulando incorrectamente algunos elementos; y el cliente web seleccionado directamente no dispone de traducción al castellano ni se la ha practicado en tanto que no formaba parte de los objetivos o requisitos de este TFG. Y en la comercial, debe indicarse que ESRI no sincroniza el lanzamiento de sus productos con el de sus traducciones, encontrándose que la versión más reciente de ArcGIS, la 3.3, sólo está disponible en inglés a pesar de ser una versión estable, y no se dispone de fecha de lanzamiento de la citada traducción.

6.7.2. Antipatrones y patrones oscuros de diseño

Otros escollos que pueden encontrar los usuarios de estas plataformas es la presencia de los poco deseables antipatrones de diseño o, incluso, de los menos deseables patrones oscuros de diseño, ya que vienen a provocar frustraciones o enfados en los usuarios. Lamentablemente, ninguna de las dos plataformas se libra de ellos. En la de código abierto, al considerar a QGIS tenemos:

- La ocultación por defecto de herramientas de procesamiento de su lugar correspondiente del menú archivo, quedando solo accesibles a través del panel de caja de herramientas con la reducción de espacio de visualización del mapa abierto que conlleva dado que, básicamente, ha de quedar siempre abierto.
- El rotulado de funcionalidades, basados en nomenclaturas académicas para cada acción en vez de en base a lo que espere obtener el ciudadano medio que las usará³¹.
- La posición de la barra de búsqueda del programa, en una de las esquinas inferiores, donde recibe menores atenciones de los usuarios.

Y en el caso de ArcGIS, se encuentra:

- El uso de menús basados en cinta de opciones en el que las pestañas disponibles mutan dependiendo de qué se está haciendo, lo que por un lado guía al usuario pero por otro puede llevar a que éste no pueda encontrar lo que está buscando y con ello no darse cuenta de que no cumple las condiciones para usar la acción ocultada en la cinta.
- El uso por defecto, o a veces obligado, de formatos de archivo propietarios que dificultan el cambio de ecosistema o de vendedor.
- La imposición de ESRI de atar el uso del software de escritorio a la suscripción a ArcGIS Online³².
- La no aparición, para algunos elementos de la cinta de opciones, de descripciones detalladas de los motivos por los que no se pueden usar en contraposición a otros que si disponen de tales descripciones.

6.8. Diferencias de paradigma

Como última cuestión, pero muy lejos de ser la menos importante, se sitúa el hecho de que cada plataforma y sus componentes responden a paradigmas distintos, cuestión que no puede quedar en la sombra en una comparación como esta. Y es que si nos detenemos a dilucidar, se puede apreciar

³¹Por ejemplo, la herramienta denominada “Ortogonalizar”, que simplemente halla perpendiculares a las geometrías que se le den como entradas.

³²Salvo en los probablemente pocos casos en que se compran licencias perpetuas de ArcGIS Pro y Server, en tanto que no incluyen actualizaciones.

que cada una de las plataformas, y más en el caso de la comercial ArcGIS, vienen a constituir ecosistemas independientes.

En el caso del referido ecosistema comercial, se puede apreciar como en realidad ArcGIS Pro no es un mero SIG de escritorio, sino que se trata del cliente de un ecosistema de software como servicio (SaaS) que, como queda patente por los patrones oscuros de diseño ya señalados, no interesa a su fabricante que sea disociado del correspondiente servicio del ecosistema, ya sea mediante conexión a ArcGIS Online o a una instancia de ArcGIS Server. Con tal situación en este ecosistema, queda evidenciado cómo ArcGIS Pro no es más que el cliente de los servicios en la nube de ESRI de colaboración y alojamiento de mapas de sus clientes, previo engrosamiento de su cuenta de beneficios, y es por ello por lo que con sus servicios tiene la máxima sinergia. No obstante, las prerrogativas que aplica ESRI en su propio favor no son sino de las más comprensibles, dado el entorno de competencia de libre mercado en el que se mueve cualquier negocio de ámbito internacional en la época contemporánea.

Y, en el caso del ecosistema de código abierto diseñado, cada uno de sus elementos tiene unas razones de ser únicas, pero con una misma base común: son frutos de contribuciones completamente desinteresadas de personas que han decidido dejar su tiempo y esfuerzo en tales programas, y que no esperan dinero a cambio. Eso hace que no puedan competir en la totalidad de aspectos con una multinacional y los esfuerzos se concentren en los elementos más básicos e importantes de cada software, como evidencia, por ejemplo, el hecho de que QGIS todavía conserve un fuerte legado de sus primeras versiones, datadas circa 2005 [293], época en la que los dispositivos inteligentes aún no se habían popularizado en la sociedad y los planos en papel eran *relativamente* frecuentes, y es que actualmente sigue presentando el compositor de montajes de impresión como el cuarto icono con el que el usuario se topa nada más abrir el programa, a pesar de que actualmente la impresión de mapas ha decaído en favor de los mapas en línea.

Es esta radical diferencia de paradigmas en el desarrollo de todo el software involucrado en este TFG por lo que *cabe esperar que mantengan diferencias sustanciales a todo plazo*. Y son tales diferencias las que hacen que unos y otros programas sean mejores como solución a distintos escenarios, lo que viene a confirmar lemas bien conocidos en la Ingeniería Informática como es el de que “no existe una bala de plata” [294], esto es, que no existen las soluciones únicas para cualesquiera necesidades.

Capítulo 7

Conclusiones

Este capítulo final acoge una síntesis de las diversas informaciones vertidas en este TFG, así como la relación de posibles trabajos posteriores que dimanen de él.

7.1. Recapitulación

Para este TFG se ha realizado, por un lado, un prototipo de sistema web que permite la generación y almacenamiento de mapas cartográficos con informaciones arbitrarias, la búsqueda de lugares y la obtención de rutas, que ha sido validado para su uso concurrente por un modesto número de usuarios, conllevando, especialmente, el estudio del formato de almacenamiento de artefactos gráficos generados para optimizar el espacio usado sin reducir la comprensibilidad de las imágenes obtenidas.

Por otro lado, se ha realizado una comparativa de costes y técnica, de este prototipo frente a la solución comercial ArcGIS. El estudio de costes abarca, primero, presupuestos para desplegar el prototipo creado y la plataforma comercial en diversos entornos, de autoalojamiento y en la nube; segundo, ofrece para la comercial un presupuesto del uso de su servicio online con desglose de los costes tarificados por uso; tercero, presupuesto para el personal involucrado en el despliegue y mantenimiento; y cuarto, relación de los costes que este TFG hubiera supuesto en un entorno empresarial. Y la comparativa técnica contempla diferencias en diversas áreas entre ambas plataformas, hallando presencia de elementos singulares, fundamentalmente, en la comercial, si bien ambas disponen de elementos que les son exclusivos.

Por ello, el alumno-autor reconoce que, como en la gran mayoría de situaciones, no existe una “bala de plata” o solución universal, y en definitiva, no se decanta a favor ni en contra de ninguna de las dos opciones analizadas, pues aunque el sistema prototipado implica menores costes económicos, ofrece globalmente menores prestaciones. Por ello, se exponen los hallazgos más relevantes para que cada organización pueda decidir cuál opción considera más idónea implementar.

7.2. Líneas de trabajo futuro

Como con todo trabajo, académico o profesional, ejecutado este TFG se han detectado diversas evoluciones horizontales y verticales que surgen del mismo.

Los principales caminos descubiertos abarcan:

- Mejoras de bastionado al prototipo creado y/o a su entorno de implementación.
- Extensiones de funcionalidades del prototipo diseñado, destacando las posibilidades de incorporar un sistema de gestión de contenidos, que facilite cambios en la información usada y

mostrada, o la de integrar un *dashboard* o panel de mando, que permita visualizar fácilmente determinadas métricas en base a la información disponible.

- Extender la comparativa realizada, incorporando otras soluciones existentes en el mercado como son GeoServer o QGIS Server, que en este TFG no han podido ser consideradas por contradecir los requisitos.
- Empezar o colaborar en el desarrollo de una API de direcciones de rutas que se alimente de bases de datos PostgreSQL, ya que si existiera una opción madura, estable y mantenida en el tiempo se debería barajar el reemplazo del sistema de rutas.

Bibliografía

- [1] M. L. Morea Rodríguez y J. C. Huerta Rodríguez, *SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. [En línea]. Disponible: https://administracionelectronica.gob.es/pae/Home/dam/jcr:3440992b-44ee-4240-8000-ac0a502ffb56/Ponencia_130.pdf (Aparece en pág. 3).
- [2] S. Hahmann y D. Burghardt, “How much information is geospatially referenced? Networks and cognition,” *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 27, núm. 6, págs. 1171-1189, 2013. DOI: 10.1080/13658816.2012.743664. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.743664> (Aparece en pág. 3).
- [3] S. Hahmann, D. Burghardt y B. Weber, ““80 % of All Information is Geospatially Referenced”??? Towards a Research Framework: Using the Semantic Web for (In)Validating this Famous Geo Assertion,” en *The 14th AGILE International Conference on Geographic Information Science: Advancing Geoinformation Science for a Changing World*, S. Geertman, W. Reinhardt y F. Toppen, eds., 2011, ISBN: 978-90-816960-1-2. [En línea]. Disponible: https://agile-gi.eu/images/conferences/2011/documents/shortpapers/sp_158.pdf (Aparece en pág. 3).
- [4] M. F. Goodchild, M. J. Egenhofer, K. K. Kemp, D. M. Mark y E. Sheppard, “Introduction to the Varenius project,” *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 13, núm. 8, págs. 731-745, 1999. DOI: 10.1080/136588199240996. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/136588199240996> (Aparece en pág. 3).
- [5] D. Cowen, “Unit 01 - What is GIS?” En *Core Curriculum-Geographic Information Systems*, National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA), 1990. [En línea]. Disponible: <https://escholarship.org/uc/item/71p6229c> (Aparece en pág. 3).
- [6] Proyecto QGIS, *Gentle GIS Introduction*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://docs.qgis.org/3.34/pdf/en/QGIS-3.34-GentleGISIntroduction-en.pdf> (Aparece en pág. 3).
- [7] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *The geoid, ellipsoid, spheroid, and datum, and how they are related*. [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/map/projections/about-the-geoid-ellipsoid-spheroid-and-datum-and-h.htm> (Aparece en pág. 4).
- [8] H. A. Mamani Gutiérrez, “INFLUENCIA DE LA ADOPCIÓN DE UN NUEVO MARCO DE REFERENCIA GEODÉSICO NACIONAL EN EL CATASTRO URBANO DEL MUNICIPIO DE LA PAZ,” *Revista Tecnológica*, vol. 13, págs. 12 -16, 2017, ISSN: 1729-7532. [En línea]. Disponible: http://revistasbolivianas.umsa.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-75322017000100004 (Aparece en pág. 4).

- [9] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *What are geographic coordinate systems?* [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/map/projections/about-geographic-coordinate-systems.htm> (Aparece en pág. 4).
- [10] —, *What are map projections?* [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/map/projections/what-are-map-projections.htm> (Aparece en pág. 4).
- [11] —, *Choosing an appropriate transformation.* [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/map/projections/choosing-an-appropriate-transformation.htm> (Aparece en pág. 4).
- [12] Klokan Technologies GmbH, *EPSG.io: Coordinate Systems Worldwide.* [En línea]. Disponible: <https://epsg.io/?q=> (Aparece en pág. 4).
- [13] GDAL/OGR contributors, *GDAL/OGR Geospatial Data Abstraction software Library*, Open Source Geospatial Foundation, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.5884351. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org> (Aparece en pág. 6).
- [14] J. McKenna, “WMS Server,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2022. [En línea]. Disponible: https://mapserver.org/ogc/wms_server.html (Aparece en pág. 7).
- [15] J. McKenna y E. Rouault, “WFS Server,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.mapserver.org/ogc/wfs_server.html (Aparece en pág. 7).
- [16] J. McKenna, S. Meissl y F. Schindler, “WCS Server,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2021. [En línea]. Disponible: https://www.mapserver.org/ogc/wcs_server.html (Aparece en pág. 7).
- [17] J. McKenna, “OGC API: Features,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.mapserver.org/ogc/ogc_api.html (Apariciones en págs. 7, 72).
- [18] —, “WMS Client,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.mapserver.org/ogc/wms_client.html (Aparece en pág. 7).
- [19] J.-F. Doyon y J. McKenna, “WFS Client,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2020. [En línea]. Disponible: https://www.mapserver.org/ogc/wfs_client.html (Aparece en pág. 7).
- [20] GDAL/OGR contributors, “CSW - OGC CSW (Catalog Service for the Web),” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/vector/csw.html> (Aparece en pág. 7).
- [21] —, “WMTS – OGC Web Map Tile Service,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/raster/wmts.html> (Aparece en pág. 7).
- [22] —, “WCS – OGC Web Coverage Service,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/raster/wcs.html> (Aparece en pág. 7).
- [23] —, “OGC API - Features,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/vector/oapif.html> (Aparece en pág. 8).
- [24] —, “OGCAPI – OGC API Tiles / Maps / Coverage,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/raster/ogcapi.html> (Aparece en pág. 8).

-
- [25] —, “WMS – Web Map Services,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/raster/wms.html> (Aparece en pág. 8).
- [26] —, “WFS - OGC WFS service,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/vector/wfs.html> (Aparece en pág. 8).
- [27] Open Source Geospatial Foundation, “Installation: Compiling on Unix,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/installation/unix.html> (Aparece en pág. 8).
- [28] Unión Europea, “Acervo de Schengen: Convenio de aplicación del Acuerdo de Schengen de 14 de junio de 1985 entre los Gobiernos de los Estados de la Unión Económica Benelux, de la República Federal de Alemania y de la República Francesa relativo a la supresión gradual de los controles en las fronteras comunes,” *Diario Oficial de la Unión Europea*, núm. L 239, CELEX:42000A0922(02). [En línea]. Disponible: <http://data.europa.eu/eli/convention/2000/922/oj> (Aparece en pág. 8).
- [29] —, “Versión consolidada del Tratado de la Unión Europea,” *Diario Oficial de la Unión Europea*, núm. C 202/1, CELEX:12016M/TXT. [En línea]. Disponible: http://data.europa.eu/eli/treaty/teu_2016/oj (Aparece en pág. 8).
- [30] Google LLC *et al.*, *Google Maps*. [En línea]. Disponible: <https://www.google.es/maps> (Aparece en pág. 9).
- [31] OpenStreetMap Foundation *et al.*, “Downloading data,” en *OpenStreetMap Wiki*. [En línea]. Disponible: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Downloading_data (Aparece en pág. 8).
- [32] OpenStreetMap Foundation, *Planet OSM*. [En línea]. Disponible: <https://planet.openstreetmap.org/> (Aparece en pág. 10).
- [33] Geofabrik GmbH, *Geofabrik Download Server*. [En línea]. Disponible: <https://download.geofabrik.de/> (Aparece en pág. 10).
- [34] OpenStreetMap Foundation *et al.*, “Planet.osm,” en *OpenStreetMap Wiki*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Planet.osm> (Aparece en pág. 10).
- [35] OpenStreetMap Foundation, *FAQ - OpenStreetMap Foundation*. [En línea]. Disponible: <https://osmfoundation.org/wiki/FAQ> (Aparece en pág. 10).
- [36] OpenStreetMap Foundation *et al.*, “Anonymous edits,” en *OpenStreetMap Wiki*. [En línea]. Disponible: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Anonymous_edits (Aparece en pág. 10).
- [37] OpenStreetMap Foundation, *Ban Policy - OpenStreetMap Foundation*. [En línea]. Disponible: https://osmfoundation.org/wiki/Ban_Policy (Aparece en pág. 10).
- [38] C. Barrington-Leigh y A. Millard-Ball, “The worlds user-generated road map is more than 80 % complete,” *PLOS ONE*, vol. 12, 2017. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180698> (Aparece en pág. 10).
- [39] O. Roick, J. Hagenauer y A. Zipf, “OSMatrix – Grid-based Analysis and Visualization of OpenStreetMap,” 2011. [En línea]. Disponible: https://www.geog.uni-heidelberg.de/md/chemgeo/geog/gis/roick_2011_sotm.pdf (Aparece en pág. 10).
- [40] Open Source Geospatial Foundation, “Basemaps,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://www.mapserver.org/basemaps/index.html> (Aparece en pág. 10).

- [41] Open Source Geospatial Foundation *et al.*, *GitHub - MapServer/basemaps: Scripts to generate MapServer mapfiles based on OpenStreetMap data*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/MapServer/basemaps> (Apariciones en págs. 10, 23).
- [42] Open Source Geospatial Foundation, “Basemaps: Installation,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://www.mapserver.org/basemaps/install.html> (Aparece en pág. 10).
- [43] Omniscale GmbH & Co. KG, *GitHub - omniscale/imposm3: Imposm imports OpenStreetMap data into PostGIS*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/omniscale/imposm3> (Apariciones en págs. 10, 23, 64).
- [44] PostgreSQL Global Development Group, *PostgreSQL: The world's most advanced open source database*. [En línea]. Disponible: <https://www.postgresql.org/> (Aparece en pág. 10).
- [45] PostGIS Project Steering Committee y OSGeo, *PostGIS*. [En línea]. Disponible: <https://postgis.net/> (Aparece en pág. 10).
- [46] Open Source Geospatial Foundation, “MapCache 1.14.0,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://www.mapserver.org/mapcache/index.html> (Aparece en pág. 11).
- [47] Docker Inc., “Install Docker Engine,” en *Docker Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/engine/install/> (Apariciones en págs. 11-12, 60).
- [48] Canonical Ltd., *Ubuntu release cycle | Ubuntu*. [En línea]. Disponible: <https://ubuntu.com/about/release-cycle> (Aparece en pág. 11).
- [49] —, *Enterprise open source support | Ubuntu*. [En línea]. Disponible: <https://ubuntu.com/support> (Aparece en pág. 11).
- [50] —, *Releases - Ubuntu Wiki*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.ubuntu.com/Releases> (Aparece en pág. 11).
- [51] Docker Inc., “Install Docker Engine from binaries,” en *Docker Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/engine/install/binaries/> (Aparece en pág. 12).
- [52] Red Hat, Inc., *What is CentOS? 2021*. [En línea]. Disponible: <https://www.redhat.com/en/topics/linux/what-is-centos> (Aparece en pág. 12).
- [53] Fedora Project, Red Hat, Inc. *et al.*, “Fedora and Red Hat Enterprise Linux,” en *Fedora Docs, 2023*. [En línea]. Disponible: <https://docs.fedoraproject.org/en-US/quick-docs/fedora-and-red-hat-enterprise-linux/> (Aparece en pág. 12).
- [54] —, “Fedora Linux Release Life Cycle,” en *Fedora Docs, 2022*. [En línea]. Disponible: <https://docs.fedoraproject.org/en-US/releases/lifecycle/> (Aparece en pág. 12).
- [55] Debian Project *et al.*, *DebianReleases - Debian Wiki, 2023*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.debian.org/DebianReleases> (Aparece en pág. 12).
- [56] —, *LTS - Debian Wiki, 2023*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.debian.org/LTS> (Aparece en pág. 12).
- [57] —, *LTS/Extended - Debian Wiki, 2022*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.debian.org/LTS/Extended> (Aparece en pág. 12).
- [58] —, *Debian - Debian Consultants, 2023*. [En línea]. Disponible: <https://www.debian.org/consultants/> (Aparece en pág. 12).

-
- [59] Docker Inc., “Docker overview,” en *Docker Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/get-started/overview/> (Aparece en pág. 12).
- [60] A. Colomar, M. T. Kerrisk *et al.*, “namespaces(7),” en *Linux man-pages*, 6.04, 2023. [En línea]. Disponible: <https://man7.org/linux/man-pages/man7/namespaces.7.html> (Aparece en pág. 12).
- [61] Docker Inc., “Dockerfile reference,” en *Docker Docs*. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/engine/reference/builder/> (Aparece en pág. 12).
- [62] P. Brady *et al.*, “chroot(1),” en *GNU coreutils man-pages*, 9.3, 2023. [En línea]. Disponible: <https://man7.org/linux/man-pages/man1/chroot.1.html> (Aparece en pág. 13).
- [63] Arch Linux Team *et al.*, *chroot - ArchWiki*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.archlinux.org/title/Chroot> (Aparece en pág. 13).
- [64] C. Brauner, S. Hallyn y S. Graber, *Linux Containers - LXD - Has been moved to Canonical: Project announcement*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://linuxcontainers.org/lxd/> (Aparece en pág. 13).
- [65] Canonical Ltd., *Run system containers with LXD | Ubuntu*. [En línea]. Disponible: <https://ubuntu.com/lxd> (Aparece en pág. 13).
- [66] M. Aleksic, *LXD vs Docker*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://ubuntu.com/blog/lxd-vs-docker> (Aparece en pág. 13).
- [67] S. Graber *et al.*, *dockerfile and docker-compose equivalent | Issue #4166 | canonical/lxd | GitHub*, 2018. [En línea]. Disponible: <https://github.com/canonical/lxd/issues/4166> (Aparece en pág. 13).
- [68] Viswanath V S, *LXD vs Docker - Comparing Two Container Management Tools*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://mindmajix.com/lxd-vs-docker> (Aparece en pág. 13).
- [69] harleenk_99, *Difference Between LXD and Docker*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-lxd-and-docker/> (Aparece en pág. 13).
- [70] S. Graber, R. Fuchss, T. Parrott *et al.*, *The documentation isn't comprehensive enough when it comes to manipulation with the devices. | Issue #11747 | canonical/lxd | GitHub*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/canonical/lxd/issues/11747> (Aparece en pág. 13).
- [71] KVM Group, *KVM*. [En línea]. Disponible: https://www.linux-kvm.org/page/Main_Page (Aparece en pág. 13).
- [72] F. Bellard, A. Liguori, P. Bonzini *et al.*, *QEMU*. [En línea]. Disponible: https://wiki.qemu.org/Main_Page (Aparece en pág. 13).
- [73] The Linux Foundation, L. Kurth *et al.*, *Xen Project Software Overview - Xen*. [En línea]. Disponible: https://wiki.xenproject.org/wiki/Xen_Project_Software_Overview (Aparece en pág. 13).
- [74] Oracle Corporation, *Oracle VM VirtualBox*. [En línea]. Disponible: <https://www.virtualbox.org/> (Aparece en pág. 13).
- [75] Consejo General de Colegios Oficiales de Ingeniería en Informática, *Código ético y deontológico de la Ingeniería Informática*. [En línea]. Disponible: <https://ccii.es/servicios/area-de-descargas/send/12-etica/50-codigo-etico-y-deontologico-de-la-ingenieria-informatica> (Aparece en pág. 14).

- [76] Colegio Profesional de Ingenieros Técnicos en Informática de Andalucía, *Código Deontológico: Ingenieros Técnicos en Informática de Andalucía. Aprobado en Asamblea General Extraordinaria de 15/02/2013*. [En línea]. Disponible: <https://www.cpitia.org/wp-content/uploads/2017/03/Deontolog\%C3%ADa-CPITIA.pdf> (Aparece en pág. 14).
- [77] Colegio Profesional de Ingenieros Técnicos en Informática de Canarias, *Código Deontológico del Ilustre Colegio Profesional de Ingenieros Técnicos en Informática de Canarias*. [En línea]. Disponible: <https://coitic.es/el-coitic/codigo-deontologico/> (Aparece en pág. 14).
- [78] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Informática de Castilla-La Mancha, *Código Deontológico del COITICLM*. [En línea]. Disponible: <https://www.coiticlm.es/ARCHIVO/documentos/codigo-deontologico-COITICLM.pdf> (Aparece en pág. 14).
- [79] Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Informática de la Comunitat Valenciana, *Código Deontológico COITICV*. [En línea]. Disponible: https://www.coiticv.org/images/coiticv/documentacion/Codigo_deontologico_COITICV.pdf (Aparece en pág. 14).
- [80] International Organization for Standardization, *ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models*, 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.iso.org/standard/35733.html> (Aparece en pág. 14).
- [81] M. Rodríguez, O. Pedreira y C. M. Fernández, “Certificación de la Mantenibilidad del Producto Software: Un Caso Práctico,” en *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*, 3, vol. 3, 2015, págs. 127-134. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.18294/relais.2015.127-134> (Aparece en pág. 14).
- [82] S. Hoffmann *et al.*, *Nominatim*. [En línea]. Disponible: <https://nominatim.org/> (Aparece en pág. 15).
- [83] OpenStreetMap, *GitHub - osm-search/Nominatim: Open Source search based on OpenStreetMap data*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/openstreetmap/Nominatim> (Aparece en pág. 15).
- [84] S. Hoffmann, K.-M. Ang y B. Kaushik, *Import - Nominatim 4.4.0 Manual*. [En línea]. Disponible: <https://nominatim.org/release-docs/latest/admin/Import/> (Apariciones en págs. 15, 33, 63, 66).
- [85] P. Johnson, J. Simioni *et al.*, *GitHub - pelias/pelias: Pelias is a modular open-source geocoder using Elasticsearch*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/pelias/pelias> (Aparece en pág. 15).
- [86] Elasticsearch B.V., “Add and remove nodes in your cluster,” en *Elasticsearch Guide [8.8]*. [En línea]. Disponible: <https://www.elastic.co/guide/en/elasticsearch/reference/current/add-elasticsearch-nodes.html> (Aparece en pág. 15).
- [87] T. John y P. Misra, *Data Lake for Enterprises*. Packt Publishing, 2017, ISBN: 9781787281349 (Aparece en pág. 15).
- [88] Komoot GmbH, *Photon, search-as-you-type with OpenStreetMap*. [En línea]. Disponible: <https://photon.komoot.io/> (Aparece en pág. 15).
- [89] S. Hoffmann, Komoot GmbH *et al.*, *GitHub - komoot/photon: an open source geocoder for openstreetmap data*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/komoot/photon/tree/master> (Aparece en pág. 15).

-
- [90] D. Masclet *et al.*, *Open source geocoder and addresses database / POIs database in CSV*. [En línea]. Disponible: <https://www.gisgraphy.com/index.php> (Aparece en pág. 15).
- [91] D. Masclet, *Gisgraphy configuration*. [En línea]. Disponible: <https://www.gisgraphy.com/documentation/installation/configuration.php> (Aparece en pág. 15).
- [92] —, *Gisgraphy user guide*. [En línea]. Disponible: <https://www.gisgraphy.com/documentation/user-guide.php> (Aparece en pág. 15).
- [93] —, *Gisgraphy Geo-Marketplace: pricing*. [En línea]. Disponible: <https://premium.gisgraphy.com/pricing> (Aparece en pág. 15).
- [94] N. Nolde, K. Kreiser, D. Nesbitt *et al.*, *GitHub - valhalla/valhalla: Open Source Routing Engine for OpenStreetMap*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://github.com/valhalla/valhalla/> (Apariciones en págs. 16, 64).
- [95] N. Nolde *et al.*, *valhalla/README.md at 0825735bc3a3b139f73305ba1716bf2ca13a9fcd | valhalla/valhalla | GitHub*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://github.com/valhalla/valhalla/blob/0825735bc3a3b139f73305ba1716bf2ca13a9fcd/README.md> (Aparece en pág. 16).
- [96] K. Kreiser, D. Nesbitt, N. Nolde *et al.*, “Why tiles?” En *Valhalla Docs*, 2023. [En línea]. Disponible: https://valhalla.github.io/valhalla/mjolnir/why_tiles/ (Aparece en pág. 16).
- [97] pgRouting Community, *pgRouting Project – Open Source Routing Library*. [En línea]. Disponible: <https://pgrouting.org/> (Aparece en pág. 16).
- [98] S. Woodbridge, “Driving Direction Instructions,” en *pgRouting/pgrouting Wiki | GitHub*, 2014. [En línea]. Disponible: <https://github.com/pgRouting/pgrouting/wiki/Driving-Direction-Instructions> (Aparece en pág. 16).
- [99] HeiGIT gGmbH, Universidad de Heidelberg *et al.*, *GitHub - GIScience/openrouteservice: The open source route planner api with plenty of features*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/GIScience/openrouteservice> (Aparece en pág. 16).
- [100] España, “Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real Decreto Legislativo 339/1990, de 2 de marzo (Legislación consolidada),” *Boletín Oficial del Estado*, CVE: BOE-A-2003-23514. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2003/11/21/1428/con> (Aparece en pág. 16).
- [101] R. Hazem y A. Butzer, *Define new profile - openrouteservice - openrouteservice*. [En línea]. Disponible: <https://ask.openrouteservice.org/t/define-new-profile/3059> (Aparece en pág. 16).
- [102] N. Nolde *et al.*, *Adding a custom profile - openrouteservice / directions - openrouteservice*. [En línea]. Disponible: <https://ask.openrouteservice.org/t/adding-a-custom-profile/961> (Aparece en pág. 16).
- [103] N. Nolde, *Open Source Routing Engines And Algorithms – An Overview*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://gis-ops.com/open-source-routing-engines-and-algorithms-an-overview/> (Apariciones en págs. 16-17).
- [104] GraphHopper GmbH *et al.*, *GitHub - graphhopper/graphhopper: Open source routing engine for OpenStreetMap. Use it as Java library or standalone web server*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/graphhopper/graphhopper> (Aparece en pág. 16).

- [105] —, *graphhopper/docs/core/deploy.md at master | graphhopper/graphhopper | GitHub*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/graphhopper/graphhopper/blob/master/docs/core/deploy.md> (Aparece en pág. 16).
- [106] M. Tretiakov, *Taming Europe routes, part 3*. [En línea]. Disponible: <https://programmernotes.info/taming-europe-routes-3/> (Aparece en pág. 16).
- [107] GraphHopper GmbH, *Releasing GraphHopper 0.4 and the GraphHopper Directions API*, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.graphhopper.com/blog/2015/03/09/releasing-graphhopper-0-4-and-the-graphhopper-directions-api/> (Aparece en pág. 16).
- [108] Proyecto Open Source Routing Machine *et al.*, *GitHub - Project-OSRM/osrm-backend: Open Source Routing Machine - C++ backend*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/Project-OSRM/osrm-backend> (Aparece en pág. 17).
- [109] —, *Running OSRM | Project-OSRM/osrm-backend Wiki | GitHub*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://github.com/Project-OSRM/osrm-backend/wiki/Running-OSRM> (Aparece en pág. 17).
- [110] Daniel J. H., T. Smith *et al.*, *Restricting border crossings? | Issue #5238 | Project-OSRM/osrm-backend | GitHub*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/Project-OSRM/osrm-backend/issues/5238> (Aparece en pág. 17).
- [111] V. Agafonkin, *Leaflet - a JavaScript library for interactive maps*. [En línea]. Disponible: <https://leafletjs.com/> (Aparece en pág. 17).
- [112] Meta Platforms, Inc., *React*. [En línea]. Disponible: <https://react.dev/> (Aparece en pág. 17).
- [113] GIS-OPS UG (haftungsbeschränkt) *et al.*, *GitHub - gis-ops/valhalla-app: This is the demo web app running on https://valhalla.openstreetmap.de*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/gis-ops/valhalla-app> (Apariciones en págs. 17, 23).
- [114] F. Koormann y J. McKenna, “Templating,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/mapfile/template.html> (Aparece en pág. 17).
- [115] A. Hocevar, F. Junod, T. Schaub *et al.*, *OpenLayers - Welcome*. [En línea]. Disponible: <https://openlayers.org/> (Aparece en pág. 17).
- [116] Proyecto QGIS, *QGIS Python Plugins Repository*. [En línea]. Disponible: <https://plugins.qgis.org/plugins/> (Apariciones en págs. 18, 75).
- [117] —, *Road Map*. [En línea]. Disponible: <https://www.qgis.org/en/site/getinvolved/development/roadmap.html> (Aparece en pág. 18).
- [118] GRASS Development Team, *GRASS GIS - Bringing advanced geospatial technologies to the world*. [En línea]. Disponible: <https://grass.osgeo.org/> (Aparece en pág. 18).
- [119] Asociación GVSIG, *Home - Portal gvSIG*. [En línea]. Disponible: <http://www.gvsig.com/> (Aparece en pág. 18).
- [120] F. J. Peñarrubia Martínez, “gvSIG: El S.I.G. LIBRE DE LA GENERALITAT VALENCIANA,” en *Jornadas Técnicas de la Infraestructura de Datos Espaciales de España*, IVER T.I. S.A., Consejo Superior Geográfico de España, 2004. [En línea]. Disponible: https://idee.es/resources/presentaciones/JIDEE04/JIDEE2004_gvSIG.pdf (Aparece en pág. 18).

-
- [121] SAGA User Group Association, *SAGA - System for Automated Geoscientific Analyses*. [En línea]. Disponible: <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (Aparece en pág. 18).
- [122] Canonical Ltd., *Get Ubuntu Server / Download / Ubuntu*. [En línea]. Disponible: <https://ubuntu.com/download/server> (Aparece en pág. 21).
- [123] LVM Team, *LVM2 Resource Page*. [En línea]. Disponible: <https://sourceware.org/lvm2/> (Aparece en pág. 21).
- [124] Arch Linux Team *et al.*, *LVM - Archwiki*. [En línea]. Disponible: <https://wiki.archlinux.org/title/LVM> (Aparece en pág. 21).
- [125] SPI Inc., *Debian - Details of package apache2 in bookworm*. [En línea]. Disponible: <https://packages.debian.org/bookworm/apache2> (Aparece en pág. 22).
- [126] —, *Debian - Details of package libapache2-mod-fcgid in bookworm*. [En línea]. Disponible: <https://packages.debian.org/bookworm/libapache2-mod-fcgid> (Aparece en pág. 22).
- [127] —, *Debian - Details of package mapserver-bin in bookworm*. [En línea]. Disponible: <https://packages.debian.org/bookworm/mapserver-bin> (Aparece en pág. 22).
- [128] —, *Debian - Details of package cgi-mapserver in bookworm*. [En línea]. Disponible: <https://packages.debian.org/bookworm/cgi-mapserver> (Aparece en pág. 22).
- [129] —, *Debian - Details of package mapcache-cgi in bookworm*. [En línea]. Disponible: <https://packages.debian.org/bookworm/mapcache-cgi> (Aparece en pág. 22).
- [130] —, *Debian - Details of package mapcache-tools in bookworm*. [En línea]. Disponible: <https://packages.debian.org/bookworm/mapcache-tools> (Aparece en pág. 22).
- [131] PostGIS PSC y OSGeo, *GitHub - postgis/docker-postgis: Docker image for PostGIS*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/postgis/docker-postgis> (Aparece en pág. 22).
- [132] MediaGIS *et al.*, *GitHub - mediagis/nominatim-docker: 100 % working container for Nominatim*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/mediagis/nominatim-docker> (Aparece en pág. 22).
- [133] GIS-OPS UG (haftungsbeschränkt) *et al.*, *GitHub - gis-ops/docker-valhalla: This is our hyper-flexible Docker repository for the Valhalla routing engine*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/gis-ops/docker-valhalla> (Apariciones en págs. 22, 34).
- [134] Proyecto QGIS, *Descarga QGIS*. [En línea]. Disponible: <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html> (Apariciones en págs. 23, 61).
- [135] Docker Inc., “Docker Compose overview,” en *Docker Docs*. [En línea]. Disponible: <https://docs.docker.com/compose/> (Aparece en pág. 23).
- [136] J. McKenna, D. Fawcett y H. Butler, *An Introduction to MapServer*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/introduction.html> (Aparece en pág. 24).
- [137] Open Source Geospatial Foundation, “MapCache 1.14.0: Compilation & Installation,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/mapcache/install.html> (Aparece en pág. 24).
- [138] The Apache Software Foundation, *Apache HTTP Server Version 2.4 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://httpd.apache.org/docs/current/> (Aparece en pág. 24).

- [139] Open Source Geospatial Foundation, “Mapfile,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/mapfile/index.html> (Aparece en pág. 25).
- [140] —, “OGC Support and Configuration,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/ogc/index.html> (Aparece en pág. 25).
- [141] The PostgreSQL Global Development Group, *PostgreSQL 16.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://www.postgresql.org/docs/current/index.html> (Aparece en pág. 26).
- [142] Open Source Geospatial Foundation, “MapCache 1.14.0: Configuration File,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/mapcache/config.html> (Apariciones en págs. 26-28).
- [143] T. Bonfort *et al.*, *mapcache/mapcache.xml.sample at main | MapServer/mapcache | GitHub*. [En línea]. Disponible: <https://github.com/MapServer/mapcache/blob/main/mapcache.xml.sample> (Aparece en pág. 26).
- [144] *OGC Two Dimensional Tile Matrix Set and Tile Set Metadata*, OGC Implementation Standard 17-083r4, Open Geospatial Consortium, 2022. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/tms/2.0> (Apariciones en págs. 27, 70).
- [145] D. J. Wong y T. Ts’o, *mke2fs: warn about missing y2038 support when formatting fresh ext4 fs*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://git.kernel.org/pub/scm/fs/ext2/e2fsprogs.git/commit/misc/mke2fs.conf.in?id=a23b50cdb55cb826b8745cbc37429c93f7b60c66> (Aparece en pág. 27).
- [146] Instituto Nacional de Estadística (España) e Instituto Nacional de Estatística (Portugal), *Península ibérica en cifras 2022*. 2022, ISBN: 978-989-25-0529-9. [En línea]. Disponible: <https://www.ine.es/prodyser/pubweb/pin/pin2022/index.html> (Aparece en pág. 27).
- [147] Instituto Geográfico Nacional, *España a Través de los Mapas: Mapa físico del mundo*. [En línea]. Disponible: https://www.ign.es/espmap/mapas_mundo_bach/Mundo_Mapas_02.htm (Aparece en pág. 27).
- [148] J. Corbet, *The Btrfs inode-number epic (part 2: solutions)*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://lwn.net/Articles/866709/> (Aparece en pág. 28).
- [149] *Information technology — Digital compression and coding of continuous-tone still images – Requirements and guidelines*, CCITT Recommendation T.81, International Telegraph and Telephone Consultative Committee, 1992 (Apariciones en págs. 28, 30).
- [150] T. Bonfort, J. McKenna, J. Boué *et al.*, *mapcache_seed(1) – mapcache-tools – Debian bookworm – Debian Manpages*. [En línea]. Disponible: https://manpages.debian.org/bookworm/mapcache-tools/mapcache_seed.1.en.html (Aparece en pág. 29).
- [151] S. Hoffmann *et al.*, *Configuration Settings - Nominatim 4.4.0 Manual*. [En línea]. Disponible: <https://nominatim.org/release-docs/latest/customize/Settings/> (Aparece en pág. 33).
- [152] S. Hoffmann y K.-M. Ang, *Tokenizers - Nominatim 4.4.0 Manual*. [En línea]. Disponible: <https://nominatim.org/release-docs/latest/develop/Tokenizers/> (Aparece en pág. 34).
- [153] Ayuntamiento de Valladolid, *Nombres de calles con entrada y salida*. [En línea]. Disponible: <https://www10.ava.es/cartografia/Documentacion/CallesAlfabeticoEntradaSalida.pdf> (Aparece en pág. 37).

- [154] España, “Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades (Legislación consolidada),” *Boletín Oficial del Estado*, 2024, CVE: BOE-A-2014-12328. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/eli/es/l/2014/11/27/27/con> (Aparece en pág. 41).
- [155] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *ArcGIS Pro license levels*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/license-levels.htm> (Aparece en pág. 42).
- [156] —, *ArcGIS Pro licensing*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/about-licensing.htm> (Aparece en pág. 42).
- [157] —, *Named User licensing in ArcGIS Online*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/named-user-licenses.htm> (Aparece en pág. 42).
- [158] —, *Single Use licensing*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/single-use-licenses.htm> (Aparece en pág. 42).
- [159] —, *Concurrent Use licensing*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/concurrent-use-licenses.htm> (Aparece en pág. 42).
- [160] —, *ArcGIS GIS Server capabilities and extensions*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/server/latest/get-started/windows/server-extensions.htm> (Apariciones en págs. 42, 49).
- [161] —, *ArcGIS Enterprise Functionality Matrix*. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/manuals/arcgis-enterprise-functionality-matrix-current.pdf> (Apariciones en págs. 42-43).
- [162] —, *What is ArcGIS GeoAnalytics Server?* [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/geoanalytics/latest/install/windows/what-is-arcgis-geoanalytics-server-.htm> (Aparece en pág. 43).
- [163] —, *Introduction to ArcGIS GeoEvent Server*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/es/geoevent/11.2/get-started/what-is-arcgis-geoevent-server.htm> (Aparece en pág. 43).
- [164] —, *What is ArcGIS Image Server?* [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/es/image/11.2/get-started/windows/what-is-arcgis-image-server-.htm> (Aparece en pág. 43).
- [165] —, *What is ArcGIS Knowledge?* [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/knowledge/latest/introduction/what-is-arcgis-knowledge.htm> (Aparece en pág. 43).
- [166] —, *What are ArcGIS Notebooks?* [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/notebook/latest/use/windows/what-is-an-arcgis-notebook-.htm> (Aparece en pág. 43).
- [167] —, *Introduction to ArcGIS Workflow Manager*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/es/workflow/latest/help/an-introduction-to-arcgis-workflow-manager.htm> (Aparece en pág. 43).
- [168] —, *ArcGIS Video Server*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/video/latest/use/what-is-video-server.htm> (Aparece en pág. 43).
- [169] —, “User types – Portal for ArcGIS,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/portal/latest/administer/windows/user-types-orgs.htm> (Aparece en pág. 43).

- [170] —, *Licensing ArcGIS Enterprise: Deployments in Virtualized and Cloud Environments*. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/technical-papers/licensing-arcgis-enterprise-deployments-in-virtualized-and-cloud-environments.pdf> (Aparece en pág. 43).
- [171] —, *Master Price Agreement (MPA) Price List: Commonwealth of Massachusetts - MPA-01-1Q2024*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.commbuys.com/bsso/external/purchaseorder/poSummary.sdo?docId=PO-22-1080-OSD01-OSD13-29758&releaseNbr=0&external=true&parentUrl=close> (Apariciones en págs. 43-44, 68).
- [172] —, *Mapping Products | GIS Software Products - Esri*. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/index> (Aparece en pág. 44).
- [173] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc. y Carolina del Norte (Estados Unidos de América), *Amendment No. 11 to State Contract No. ITS-004971MPA Esri No. 00234464.0*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://it.nc.gov/media/1739/open> (Apariciones en págs. 44, 68).
- [174] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *Texas DIR MPA Price List MPA*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/pdf/texas-dir-mpa-price-list.pdf> (Apariciones en págs. 44, 68).
- [175] ESRI España Soluciones Geoespaciales, S.L., *Precios de ArcGIS Online para equipos y usuarios individuales | Coste de suscripción*. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.es/es-es/store/products/buy/arcgis-online> (Aparece en pág. 44).
- [176] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *ArcGIS Pro 3.3 system requirements*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/get-started/arcgis-pro-system-requirements.htm> (Apariciones en págs. 46, 60).
- [177] —, “Base ArcGIS Enterprise deployment – ArcGIS Enterprise,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/get-started/latest/windows/base-arcgis-enterprise-deployment.htm> (Aparece en pág. 46).
- [178] —, “Portal for ArcGIS 11.3 system requirements – ArcGIS Enterprise,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/portal-for-arcgis-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 46).
- [179] —, “ArcGIS Server 11.3 system requirements – ArcGIS Enterprise,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/arcgis-server-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 46).
- [180] —, “ArcGIS Data Store 11.3 system requirements – ArcGIS Enterprise,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/arcgis-data-store-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 46).
- [181] —, “ArcGIS Web Adaptor 11.3 system requirements – ArcGIS Enterprise,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/arcgis-web-adaptor-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 46).

- [182] —, *ArcGIS License Manager system requirements – License Manager Guide / Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/en/license-manager/2022.1/arcgis-license-manager-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 46).
- [183] —, “Configure ArcGIS Living Atlas content,” en *Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/portal/latest/administer/windows/configure-living-atlas-content.htm> (Aparece en pág. 46).
- [184] Microsoft Corporation, *Pricing and licensing for Windows Server 2022*. [En línea]. Disponible: <https://www.microsoft.com/en-us/windows-server/pricing> (Aparece en pág. 49).
- [185] —, *Licensing Windows Server by virtual machine*. [En línea]. Disponible: <https://getlicensingready.com/HandoutStore/Licensing%20Windows%20Server%20by%20virtual%20machine%20v23.30.pdf> (Aparece en pág. 49).
- [186] IT Partner, LLC, *About us*. [En línea]. Disponible: <https://o365hq.com/about> (Aparece en pág. 49).
- [187] Microsoft Corporation, *Find the right app | Microsoft AppSource: IT Partner, LLC (Office 365/Microsoft 365, Dynamics 365 and Azure Solutions)*. [En línea]. Disponible: <https://appsource.microsoft.com/en-us/marketplace/partner-dir/4ed6ea8d-6f86-411d-b7e0-37401bdb9b68> (Aparece en pág. 49).
- [188] IT Partner, LLC, *Windows Server 2022 - 1 User CAL - Commercial*. [En línea]. Disponible: <https://o365hq.com/license/CSP-DG7GMGF0D5VX-0007> (Aparece en pág. 49).
- [189] —, *Windows Server 2022 External Connector - Commercial*. [En línea]. Disponible: <https://o365hq.com/license/CSP-DG7GMGF0D515-0001> (Aparece en pág. 49).
- [190] Dell Inc., *Servidores de montaje en rack PowerEdge*. [En línea]. Disponible: <https://www.dell.com/es-es/shop/serveurs-rack/sr/servers/poweredge-rack-servers?sortBy=price-ascending> (Aparece en pág. 49).
- [191] Hewlett Packard Enterprise Company, *Buy HPE ProLiant DL110 Gen11 Servers - Price Specs : HPE Store US | HPE Store Spain*. [En línea]. Disponible: <https://buy.hpe.com/es/es/compute/rack-servers/c/3328412> (Aparece en pág. 49).
- [192] Lenovo, *Rack Servers | ThinkSystem Computer Server Racks Cabinets | Lenovo US*. [En línea]. Disponible: <https://www.lenovo.com/us/en/c/servers-storage/servers/racks/?sortBy=priceUp> (Aparece en pág. 49).
- [193] D. Wright, D. Smith, K. Ji, M. A. Borrega, A. Galimberti y S. Bauman, “Magic Quadrant for Strategic Cloud Platform Services,” Gartner Inc., 2023 (Aparece en pág. 48).
- [194] VNTG Inc., *Amazon EC2 Instance Comparison*. [En línea]. Disponible: <https://instances.vantage.sh/> (Apariciones en págs. 49-50).
- [195] Amazon Web Services, Inc., *Licencias de Microsoft en AWS*. [En línea]. Disponible: <https://aws.amazon.com/es/windows/resources/licensing/> (Aparece en pág. 50).
- [196] —, *Precios de Amazon S3*. [En línea]. Disponible: <https://aws.amazon.com/es/s3/pricing/> (Aparece en pág. 50).
- [197] Viktor Kiselev e.K, *Google Compute Engine Instances Comparison*. [En línea]. Disponible: <https://cloudprice.net/gcp/compute> (Apariciones en págs. 51-52).
- [198] Google LLC, *Network Service Tiers pricing*. [En línea]. Disponible: <https://cloud.google.com/network-tiers/pricing> (Aparece en pág. 52).

- [199] VNTG Inc., [En línea]. Disponible: <https://instances.vantage.sh/azure/> (Aparece en pág. 53).
- [200] S. McCullough, T. Myers, N. Estabrook, J. Howell y R. Shahan, *Storage Analytics logged operations and status messages*. [En línea]. Disponible: <https://learn.microsoft.com/en-us/rest/api/storageservices/storage-analytics-logged-operations-and-status-messages> (Aparece en pág. 53).
- [201] Dirección General de Trabajo, “Resolución de 13 de julio de 2023, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XVIII Convenio colectivo estatal de empresas de consultoría, tecnologías de la información y estudios de mercado y de la opinión pública.,” *Boletín Oficial del Estado*, 2023, CVE: BOE-A-2023-17238. [En línea]. Disponible: [https://www.boe.es/eli/es/res/2023/07/13/\(5\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2023/07/13/(5)) (Aparece en pág. 55).
- [202] —, “Resolución de 27 de marzo de 2024, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XVIII Convenio colectivo estatal de empresas de consultoría, tecnologías de la información y estudios de mercado y de la opinión pública.,” *Boletín Oficial del Estado*, 2024, CVE: BOE-A-2024-7019. [En línea]. Disponible: [https://www.boe.es/eli/es/res/2024/03/27/\(3\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2024/03/27/(3)) (Aparece en pág. 55).
- [203] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *Master Agreement, Products and Services (E204)*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/ma-full/ma-full.pdf> (Apariciones en págs. 59, 68).
- [204] —, *Click-Through Master Agreement, Products Only (E204CW)*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/ma-translations/english.pdf> (Aparece en pág. 59).
- [205] —, *Product-Specific Terms of Use (E300)*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/product-specific-terms-of-use/e300.pdf> (Aparece en pág. 59).
- [206] —, *Shrinkwrap Master Agreement, Swift and Kotlin Only (E204SW)*, 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/ma-swift-kotlin/ma-swift-kotlin.pdf> (Aparece en pág. 59).
- [207] Massachusetts Institute of Technology, *The MIT License*. [En línea]. Disponible: <https://opensource.org/license/mit> (Aparece en pág. 59).
- [208] The Apache Software Foundation, *Apache License, Version 2.0*, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0> (Aparece en pág. 59).
- [209] Free Software Foundation, Inc., *GNU General Public License, Version 2*, 1991. [En línea]. Disponible: <https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0-standalone.html> (Aparece en pág. 59).
- [210] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *ArcGIS for Personal Use pricing*. [En línea]. Disponible: <https://int-store.esri.com/en-us/store/products/buy/arcgis-for-personal-use> (Aparece en pág. 60).
- [211] —, *Alcance del soporte*. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.es/es-es/servicios/soporte-tecnico/alcance-soporte> (Aparece en pág. 60).
- [212] Proyecto QGIS, *Soporte*. [En línea]. Disponible: <https://www.qgis.org/es/site/forusers/support.html> (Aparece en pág. 60).
- [213] Open Source Geospatial Foundation, *Community Activities*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/community/index.html> (Aparece en pág. 60).

-
- [214] Proyecto QGIS, *SopORTE Comercial*. [En línea]. Disponible: https://www.qgis.org/es/site/forusers/commercial_support.html (Aparece en pág. 60).
- [215] PostGIS PSC y OSGeo, *Support*. [En línea]. Disponible: <https://postgis.net/community/support/> (Aparece en pág. 60).
- [216] S. Hoffmann *et al.*, *Supporting Nominatim Development*. [En línea]. Disponible: <https://nominatim.org/funding/> (Aparece en pág. 60).
- [217] WineHQ, *WineHQ - Run Windows applications on Linux, BSD, Solaris and macOS*. [En línea]. Disponible: <https://www.winehq.org> (Aparece en pág. 60).
- [218] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *ArcGIS Server 11.3 system requirements (Windows)*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/arcgis-server-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 60).
- [219] —, *ArcGIS Enterprise 11.3 system requirements (Linux)*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/linux/arcgis-enterprise-overall-system-requirements.htm> (Aparece en pág. 60).
- [220] —, *Tipos de datos y elementos admitidos*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/projects/supported-data-types-and-items.htm> (Apariciones en págs. 61-62, XXIII).
- [221] Proyecto QGIS, *QGIS Desktop 3.34 User Guide*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://docs.qgis.org/3.34/pdf/en/QGIS-3.34-DesktopUserGuide-en.pdf> (Apariciones en págs. 62, 64).
- [222] Open Source Geospatial Foundation, “MapCache 1.14.0: Cache Types,” en *MapServer 8.0.1 Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://mapserver.org/mapcache/caches.html> (Apariciones en págs. 62, 65-66).
- [223] S. Hoffmann, A. Ziablytskyi *et al.*, “Place Output,” en *Nominatim 4.4.0 Manual*. [En línea]. Disponible: <https://nominatim.org/release-docs/latest/api/Output/> (Aparece en pág. 63).
- [224] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., “Scripting languages and the ArcGIS REST API,” en *ArcGIS Server | Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/server/10.8/administer/linux/scripting-languages-and-the-arcgis-rest-api.htm> (Aparece en pág. 64).
- [225] —, “Create Cloud Storage Connection File (Data Management),” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/create-cloud-storage-connection-file.htm> (Aparece en pág. 64).
- [226] —, “Work with multidimensional raster data,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/working-with-a-multidimensional-raster-layer.htm> (Aparece en pág. 64).
- [227] —, “Cloud options for ArcGIS,” en *ArcGIS Enterprise in the cloud | Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/cloud/latest/intro/cloud-options.htm> (Aparece en pág. 65).
- [228] —, “Requirements for using ArcGIS 11.3 and ArcGIS Pro 3.3 with databases in the cloud,” en *ArcGIS Enterprise | Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Dispo-

- nible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/databases-in-the-cloud.htm> (Aparece en pág. 65).
- [229] —, “Connect to Google BigQuery from ArcGIS,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/databases/connect-bigquery.htm> (Aparece en pág. 65).
- [230] —, “Connect to Amazon Redshift from ArcGIS,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/databases/connect-redshift.htm> (Aparece en pág. 65).
- [231] —, “Connect to Snowflake from ArcGIS,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/databases/connect-snowflake.htm> (Aparece en pág. 65).
- [232] —, “Supported databases and data warehouses,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/databases/dbms-support.htm> (Aparece en pág. 65).
- [233] —, “Connect to a database,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/projects/connect-to-a-database.htm> (Aparece en pág. 65).
- [234] —, “Requirements for using ArcGIS 11.3 and ArcGIS Pro 3.3 with databases in the cloud,” en *ArcGIS Server | Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/system-requirements/latest/windows/databases-in-the-cloud.htm> (Aparece en pág. 65).
- [235] —, “Supported databases and data warehouses,” en *ArcGIS Server | Documentation for ArcGIS Enterprise*. [En línea]. Disponible: <https://enterprise.arcgis.com/en/server/latest/manage-data/windows/dbms-support.htm> (Aparece en pág. 65).
- [236] —, “Connect to a BIM cloud repository,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/projects/connect-to-bim-cloud-connection.htm> (Aparece en pág. 66).
- [237] —, “Create a STAC connection,” en *ArcGIS Pro | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/create-a-stac-connection.htm> (Aparece en pág. 66).
- [238] *Information technology – Open Trusted Technology Provider™ Standard (O-TTPS) – Mitigating maliciously tainted and counterfeit products. Part 1: Requirements and recommendations*, 1.^a ed., ISO/IEC 20243-1:2018, International Organization for Standardization, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.iso.org/standard/74399.html> (Aparece en pág. 67).
- [239] —, “ISO,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/iso-information.htm> (Aparece en pág. 67).
- [240] Cloud Security Alliance, *STAR Level 1: Security Questionnaire (CAIQ v4)*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://cloudsecurityalliance.org/artifacts/star-level-1-security-questionnaire-caiq-v4> (Aparece en pág. 67).
- [241] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., “CSA STAR,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/es/compliance/csa-caiq.htm> (Aparece en pág. 67).

- [242] Association of International Certified Professional Accountants, *Service Organization Control Reports*, 2014. [En línea]. Disponible: <https://us.aicpa.org/content/dam/aicpa/interestareas/frc/assuranceadvisoryservices/downloadabledocuments/soc-reports-flyer-final.pdf> (Aparece en pág. 67).
- [243] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., “SOC/SSAE,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/es/compliance/soc-ssae-resource.htm> (Aparece en pág. 67).
- [244] —, “GDPR,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/gdpr.htm> (Aparece en pág. 67).
- [245] —, “DPA,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/es/compliance/data-processing-addendum.htm> (Aparece en pág. 67).
- [246] —, “DPF,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/dpf.htm> (Aparece en pág. 67).
- [247] —, “CCPA,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/ccpa.htm> (Aparece en pág. 67).
- [248] —, “HIPAA,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/hipaa.htm> (Aparece en pág. 67).
- [249] —, “FERPA,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/ferpa.htm> (Aparece en pág. 67).
- [250] —, “FedRAMP,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/fedramp-oct-2023.htm> (Aparece en pág. 67).
- [251] —, “Accessibility Conformance Reports,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/en-us/legal/accessibility/conformance-reports> (Aparece en pág. 67).
- [252] —, *Esri Accessibility Conformance Report: ArcGIS Pro*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/vpats/arcgis-pro-30-vpat.pdf> (Aparece en pág. 67).
- [253] —, *Esri Accessibility Conformance Report: ArcGIS Online*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/vpats/arcgis-online-march-2022-vpat.pdf> (Aparece en pág. 67).
- [254] —, *Esri Accessibility Conformance Report: ArcGIS Enterprise*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/legal/vpats/arcgis-enterprise-11-1-vpat.pdf> (Aparece en pág. 67).
- [255] —, “FIPS 140-2,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/fips-140-2.htm> (Aparece en pág. 67).
- [256] —, “DoD IL2,” en *ArcGIS Trust Center | Documentation*. [En línea]. Disponible: <https://trust.arcgis.com/en/compliance/dod-il2.htm> (Aparece en pág. 68).
- [257] Open Geospatial Consortium (OGC), *About OGC | OGC*. [En línea]. Disponible: <https://www.ogc.org/about> (Aparece en pág. 68).
- [258] —, *OGC Standards | OGC*. [En línea]. Disponible: <https://www.ogc.org/docs/is> (Aparece en pág. 68).

- [259] —, *CDB / OGC*. [En línea]. Disponible: <https://www.ogc.org/standards/cdb> (Aparece en pág. 68).
- [260] *OGC GeoPackage Encoding Standard*, OGC Encoding Standard 12-128r18, Open Geospatial Consortium, 2021. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/geopackage/1.3> (Aparece en pág. 68).
- [261] *OGC Network Common Data Form (NetCDF) Core Encoding Standard version 1.0*, Candidate OpenGIS Encoding Standard 10-090r3, Open Geospatial Consortium, 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/netcdf/1.0> (Aparece en pág. 68).
- [262] University Corporation for Atmospheric Research, *Unidata / NetCDF*. [En línea]. Disponible: <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/> (Aparece en pág. 70).
- [263] *LAS Specification 1.4*, OGC Community Standard 17-030r1, Open Geospatial Consortium, 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/CS/las/1.4> (Aparece en pág. 70).
- [264] *OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard*, OpenGIS Implementation Standard 07-036, Open Geospatial Consortium, 2007. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=20509 (Aparece en pág. 70).
- [265] *OGC KML 2.3*, OGC Implementation Standard 12-007r2, Open Geospatial Consortium, 2015. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/kml/2.3> (Aparece en pág. 70).
- [266] *OpenGIS Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 1: Common architecture*, OpenGIS Implementation Standard 06-103r4, Open Geospatial Consortium, 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/is/sfa/1.2.1> (Aparece en pág. 70).
- [267] *OpenGIS Implementation Standard for Geographic information - Simple feature access - Part 2: SQL option*, OpenGIS Implementation Standard 06-104r4, Open Geospatial Consortium, 2010. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=25354 (Aparece en pág. 70).
- [268] *OGC GeoTIFF Standard*, OGC Implementation Standard 19-008r4, Open Geospatial Consortium, 2019. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/GeoTIFF/1.1> (Aparece en pág. 70).
- [269] *GeoTIFF Format Specification: GeoTIFF Revision 1.0*, Versión 1.8.2, GeoTIFF Working Group, NASA, 1995. [En línea]. Disponible: <https://gis-lab.info/docs/geotiff-1.8.2.pdf> (Aparece en pág. 70).
- [270] *Geographic information - Well-known text representation of coordinate reference systems*, OGC Implementation Standard 18-010r7, Open Geospatial Consortium, 2019. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/is/wkt-crs/2.0.6> (Aparece en pág. 70).
- [271] *OGC GML in JPEG 2000 (GMLJP2) Encoding Standard*, OGC Implementation Standard 08-085r8, Open Geospatial Consortium, 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/GMLJP2/2.1> (Aparece en pág. 70).
- [272] *Styled Layer Descriptor profile of the Web Map Service Implementation Specification*, OGC Implementation Specification 05-078r4, Open Geospatial Consortium, 2007. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=22364 (Aparece en pág. 70).

- [273] *OGC Symbology Conceptual Model: Core Part*, OGC Conceptual Model Standard 18-067r3, Open Geospatial Consortium, 2020. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/SymCore/1.0> (Aparece en pág. 70).
- [274] *Symbology Encoding Implementation Specification*, OpenGIS Implementation Specification OGC 05-077r4, Open Geospatial Consortium, 2006. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=16700 (Aparece en pág. 71).
- [275] *OpenGIS Web Feature Service 2.0 Interface Standard*, OpenGIS Implementation Standard 09-025r1 e ISO/DIS 19142, Open Geospatial Consortium (OGC) e International Organization for Standardization (ISO), 2010. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=39967 (Aparece en pág. 71).
- [276] *OpenGIS Web Map Server Implementation Specification*, OGC Implementation Standard 06-042, Open Geospatial Consortium, 2006. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=14416 (Aparece en pág. 71).
- [277] *OpenGIS Web Map Tile Service Implementation Standard*, OpenGIS Implementation Standard 07-057r7, Open Geospatial Consortium, 2010. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=35326 (Aparece en pág. 71).
- [278] *OpenGIS Catalogue Services Specification*, OpenGIS Implementation Specification 07-006r1, Open Geospatial Consortium Inc., 2007. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=20555 (Aparece en pág. 71).
- [279] *Corrigendum for OpenGIS Implementation Specification 07-006: Catalogue Services, Version 2.0.2*, OGC IS Corrigendum 07-010, Open Geospatial Consortium Inc., 2007. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=20561 (Aparece en pág. 71).
- [280] *OGC Web Coverage Service (WCS) 2.1 Interface Standard - Core*, OGC Implementation Standard 17-089r1, Open Geospatial Consortium, 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/wcs-core/2.1> (Aparece en pág. 71).
- [281] *OGC WPS 2.0.2 Interface Standard, Corrigendum 2*, OGC Implementation Standard 14-065r2, Open Geospatial Consortium, 2021. [En línea]. Disponible: <http://docs.opengeospatial.org/is/14-065/14-065.html> (Aparece en pág. 72).
- [282] *Web Coverage Processing Service (WCPS) Language Interface Standard*, OGC Implementation Standard 08-068r3, Open Geospatial Consortium, 2021. [En línea]. Disponible: <http://www.opengis.net/doc/IS/wcps/1.1> (Aparece en pág. 72).
- [283] *OGC Web Services Common Standard*, OGC Implementation Standard 06-121r9, Open Geospatial Consortium, 2010. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=38867 (Aparece en pág. 72).
- [284] *Corrigendum 1 for OGC Web Services Common Standard v2.0.0 - Multilingual*, OGC Corrigendum, Open Geospatial Consortium, 2011. [En línea]. Disponible: https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=46435 (Aparece en pág. 72).
- [285] *OGC Web Services Security*, OGC Implementation Standard 17-007r1, Open Geospatial Consortium, 2019. [En línea]. Disponible: <http://docs.opengeospatial.org/is/17-007r1/17-007r1.html> (Aparece en pág. 72).
- [286] *OGC OWS Context Conceptual Model*, OGC Implementation Standard 12-080r2, Open Geospatial Consortium, 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.opengeospatial.net/doc/IS/owc-conceptual/1.0> (Aparece en pág. 72).

- [287] Open Geospatial Consortium, *OGC API*. [En línea]. Disponible: <https://ogcapi.ogc.org/> (Aparece en pág. 72).
- [288] Open Geospatial Consortium (OGC), *Certified Product List / OGC*. [En línea]. Disponible: <https://www.ogc.org/resource/products> (Aparece en pág. 72).
- [289] Open Geospatial Consortium, *OGC API - Common*. [En línea]. Disponible: <https://ogcapi.ogc.org/common/> (Aparece en pág. 72).
- [290] COSPNWGuy y AdamMartin, *Link Charts In ArcGIS Pro vs ArcGIS Knowledge*, 2023. [En línea]. Disponible: <https://community.esri.com/t5/arcgis-knowledge-questions/link-charts-in-arcgis-pro-vs-arcgis-knowledge/td-p/1202725> (Aparece en pág. 80).
- [291] M. Banaski, T. Fitzpatrick e Y. Yang, *ArcGIS Knowledge: An Introduction*, 2022. [En línea]. Disponible: https://mediaspace.esri.com/media/t/1_nupbcifa (Aparece en pág. 80).
- [292] Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc., *ArcGIS Map Viewer*. [En línea]. Disponible: <https://maps.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html> (Aparece en pág. 82).
- [293] G. E. Sherman, T. Sutton, R. Blazek *et al.*, *Quantum GIS User Guide, Version 0.7 'Seamus'*, 2005. [En línea]. Disponible: <https://web.archive.org/web/20051216012210/http://qgis.org/docs/userguide.pdf> (Aparece en pág. 84).
- [294] F. P. Brooks Jr., “No Silver Bullet - Essence and Accidents of Software Engineering (Invited Paper),” en *Information Processing 86, Proceedings of the IFIP 10th World Computer Congress, Dublin, Ireland, September 1-5, 1986*, H. Kugler, ed., North-Holland/IFIP, 1986, págs. 1069-1076. [En línea]. Disponible: <https://www.cs.unc.edu/techreports/86-020.pdf> (Aparece en pág. 84).
- [295] GDAL/OGR contributors, “Raster drivers,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/raster/index.html> (Aparece en pág. XIII).
- [296] —, “Vector drivers,” en *GDAL documentation*. [En línea]. Disponible: <https://gdal.org/drivers/vector/index.html> (Aparece en pág. XIX).

Apéndice A

Datos de mediciones realizadas

Este anexo incluye informaciones relacionadas con las mediciones mencionadas en esta Memoria, y en las que se sustentan las conclusiones alcanzadas.

A.1. Pruebas de MapCache

Esta sección contiene las relaciones de ajustes dispuestos en MapCache y los resultados de sus pruebas.

A.1.1. Relación de ajustes de formatos de archivo creados

Dado el número de diferentes posibles ajustes de formato de archivo que se pueden establecer en MapCache, se detalla, en el cuadro A.1 expuesto a continuación, la configuración de los que, basados en el estándar JPEG, se han establecido y dispuesto para la ejecución de las pruebas realizadas.

Cuadro A.1: Configuraciones probadas en MapCache para formatos basados en JPEG.

Nombre	Formato	Calidad	Optimización	Codificación
JPEG_25_ARITH	JPEG	25	Aritmética	RGB
JPEG_25_ARITH_YCBCR	JPEG	25	Aritmética	YCbCr
JPEG_25_NOOPT	JPEG	25	Ninguna	RGB
JPEG_25_NOOPT_YCBCR	JPEG	25	Ninguna	YCbCr
JPEG_25_OPTIM	JPEG	25	Huffman	RGB
JPEG_25_OPTIM_YCBCR	JPEG	25	Huffman	YCbCr
JPEG_50_ARITH	JPEG	50	Aritmética	RGB
JPEG_50_ARITH_YCBCR	JPEG	50	Aritmética	YCbCr
JPEG_50_NOOPT	JPEG	50	Ninguna	RGB
JPEG_50_NOOPT_YCBCR	JPEG	50	Ninguna	YCbCr
JPEG_50_OPTIM	JPEG	50	Huffman	RGB
JPEG_50_OPTIM_YCBCR	JPEG	50	Huffman	YCbCr
JPEG_75_ARITH	JPEG	75	Aritmética	RGB
JPEG_75_ARITH_YCBCR	JPEG	75	Aritmética	YCbCr
JPEG_75_NOOPT	JPEG	75	Ninguna	RGB

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro A.1, continuación)

Nombre	Formato	Calidad	Optimización	Codificación
JPEG_75_NOOPT_YCBCR	JPEG	75	Ninguna	YCbCr
JPEG_75_OPTIM	JPEG	75	Huffman	RGB
JPEG_75_OPTIM_YCBCR	JPEG	75	Huffman	YCbCr
JPEG_80_ARITH	JPEG	80	Aritmética	RGB
JPEG_80_ARITH_YCBCR	JPEG	80	Aritmética	YCbCr
JPEG_80_NOOPT	JPEG	80	Ninguna	RGB
JPEG_80_NOOPT_YCBCR	JPEG	80	Ninguna	YCbCr
JPEG_80_OPTIM	JPEG	80	Huffman	RGB
JPEG_80_OPTIM_YCBCR	JPEG	80	Huffman	YCbCr
JPEG_85_ARITH	JPEG	85	Aritmética	RGB
JPEG_85_ARITH_YCBCR	JPEG	85	Aritmética	YCbCr
JPEG_85_NOOPT	JPEG	85	Ninguna	RGB
JPEG_85_NOOPT_YCBCR	JPEG	85	Ninguna	YCbCr
JPEG_85_OPTIM	JPEG	85	Huffman	RGB
JPEG_85_OPTIM_YCBCR	JPEG	85	Huffman	YCbCr
JPEG_90_ARITH	JPEG	90	Aritmética	RGB
JPEG_90_ARITH_YCBCR	JPEG	90	Aritmética	YCbCr
JPEG_90_NOOPT	JPEG	90	Ninguna	RGB
JPEG_90_NOOPT_YCBCR	JPEG	90	Ninguna	YCbCr
JPEG_90_OPTIM	JPEG	90	Huffman	RGB
JPEG_90_OPTIM_YCBCR	JPEG	90	Huffman	YCbCr
JPEG_95_ARITH	JPEG	95	Aritmética	RGB
JPEG_95_ARITH_YCBCR	JPEG	95	Aritmética	YCbCr
JPEG_95_NOOPT	JPEG	95	Ninguna	RGB
JPEG_95_NOOPT_YCBCR	JPEG	95	Ninguna	YCbCr
JPEG_95_OPTIM	JPEG	95	Huffman	RGB
JPEG_95_OPTIM_YCBCR	JPEG	95	Huffman	YCbCr
JPEG_BEST_ARITH	JPEG	100	Aritmética	RGB
JPEG_BEST_ARITH_YCBCR	JPEG	100	Aritmética	YCbCr
JPEG_BEST_NOOPT	JPEG	100	Ninguna	RGB
JPEG_BEST_NOOPT_YCBCR	JPEG	100	Ninguna	YCbCr
JPEG_BEST_OPTIM	JPEG	100	Huffman	RGB
JPEG_BEST_OPTIM_YCBCR	JPEG	100	Huffman	YCbCr
JPEG_1_OPTIM_YCBCR	JPEG	1	Huffman	YCbCr
JPEG_10_OPTIM_YCBCR	JPEG	10	Huffman	YCbCr
JPEG_20_OPTIM_YCBCR	JPEG	20	Huffman	YCbCr
JPEG_30_OPTIM_YCBCR	JPEG	30	Huffman	YCbCr
JPEG_40_OPTIM_YCBCR	JPEG	40	Huffman	YCbCr
JPEG_50_OPTIM_YCBCR	JPEG	50	Huffman	YCbCr
JPEG_60_OPTIM_YCBCR	JPEG	60	Huffman	YCbCr
JPEG_70_OPTIM_YCBCR	JPEG	70	Huffman	YCbCr
JPEG_80_OPTIM_YCBCR	JPEG	80	Huffman	YCbCr
JPEG_90_OPTIM_YCBCR	JPEG	90	Huffman	YCbCr

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro A.1, continuación)

Nombre	Formato	Calidad	Optimización	Codificación
JPEG_100_OPTIM_YCBCR	JPEG	100	Huffman	YCbCr

De igual manera, se detalla, en el cuadro A.2 expuesta a continuación, las configuraciones, basados en el estándar PNG que se han establecido y dispuesto para la ejecución de las pruebas realizadas.

Nombre	Formato	Reducción de la paleta de colores	Compresión
PNG_BEST	PNG	No	Mejor
PNG_FAST	PNG	No	Rápida
PNGQ_BEST	PNG	Si (256)	Mejor
PNGQ_FAST	PNG	Si (256)	Rápida

Cuadro A.2: Configuraciones probadas en MapCache para formatos basados en PNG.

A.1.2. Resultados de la primera fase de pruebas del semillado

Indicadas antes las configuraciones probadas, este apartado contiene los resultados de las pruebas realizadas.

A.1.2.1. Semillado de los niveles 0 a 6 con datos del PNOA

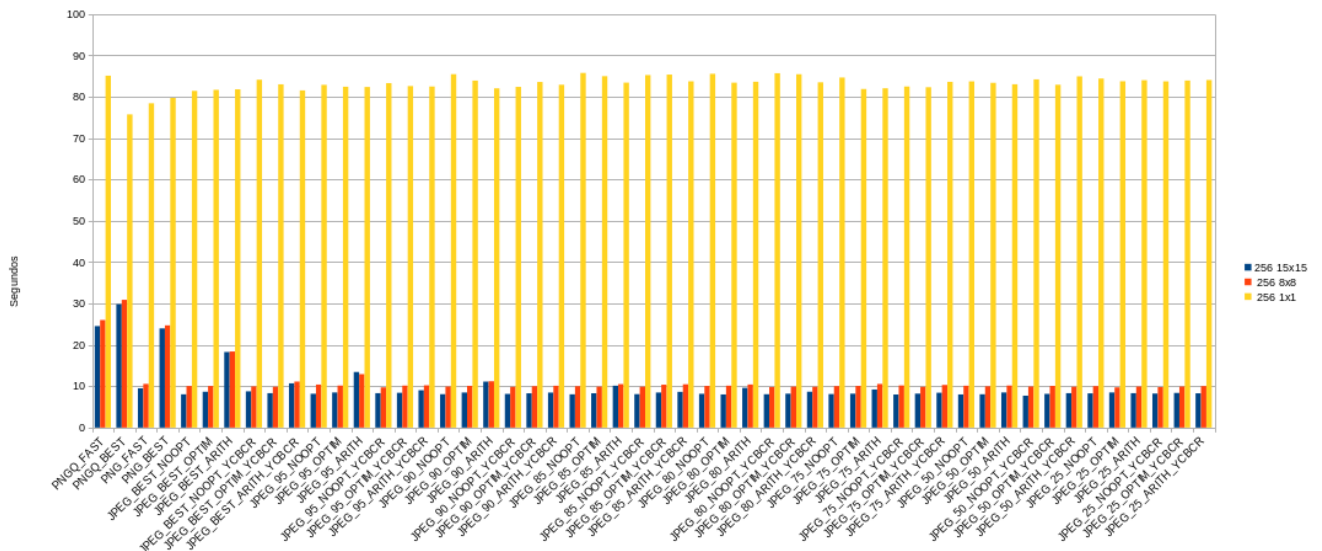


Figura A.1: Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA.

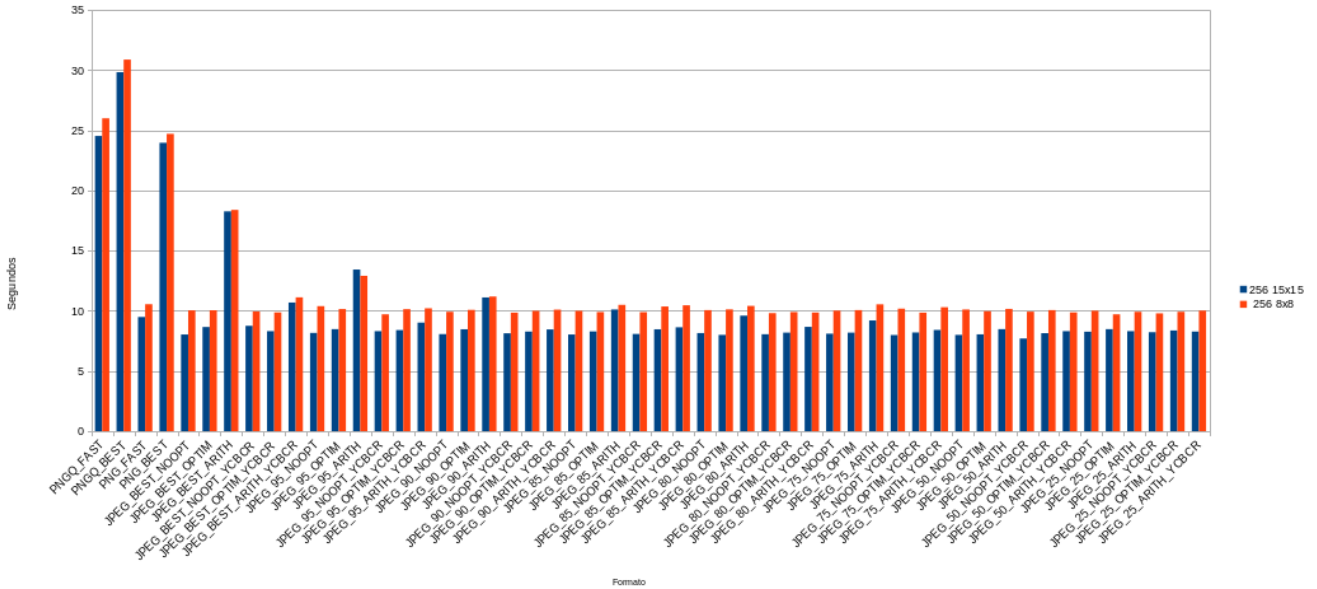


Figura A.2: Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA, excluyendo el metateselado 1x1.

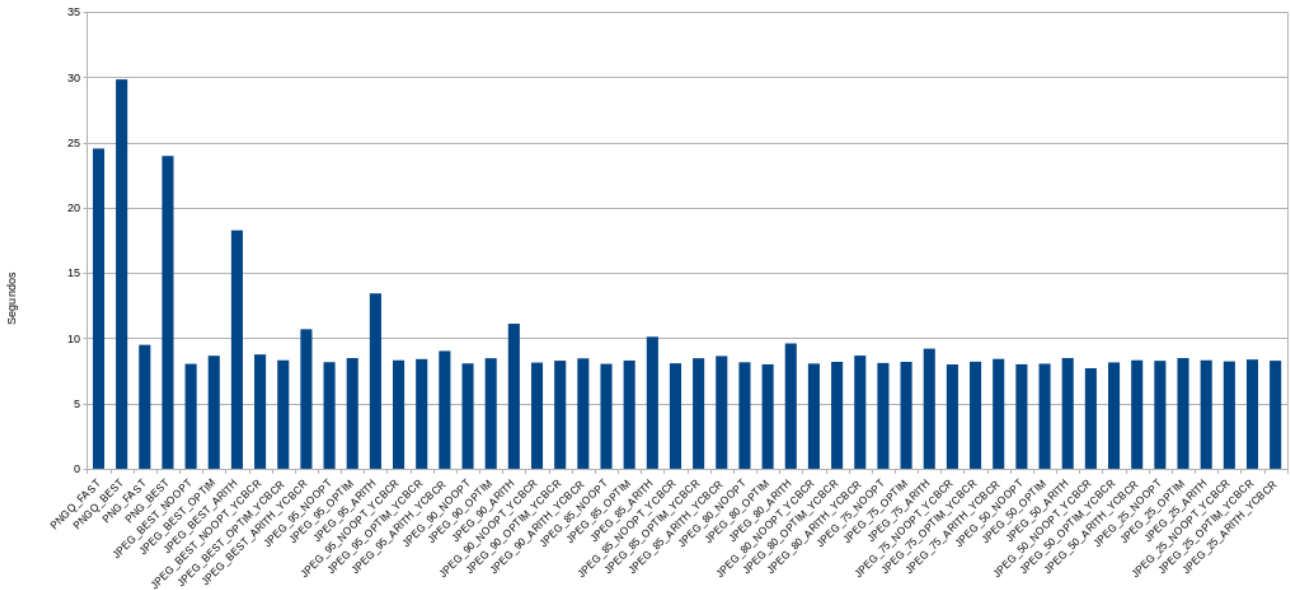


Figura A.3: Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA y metateselado 15x15, elegido.

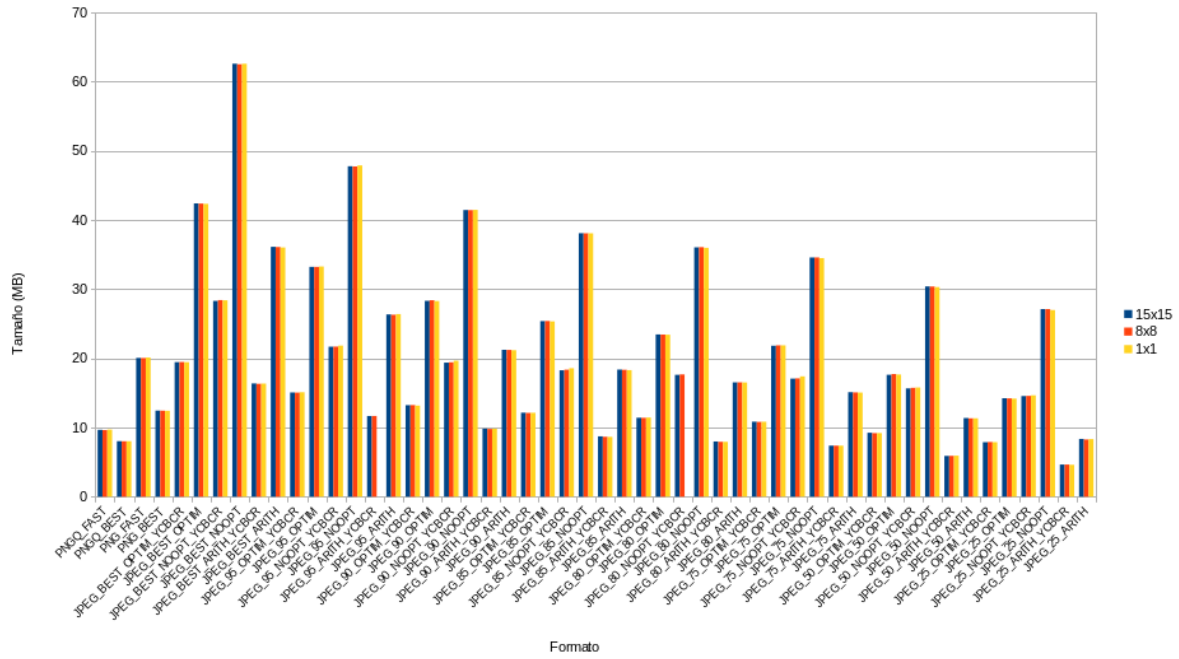


Figura A.4: Gráfica de tamaño final del archivo SQLite que guarda las teselas generadas por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos del PNOA y metateselado 15x15, elegido.

A.1.2.2. Semillado de los niveles 0 a 6 con datos de OSM

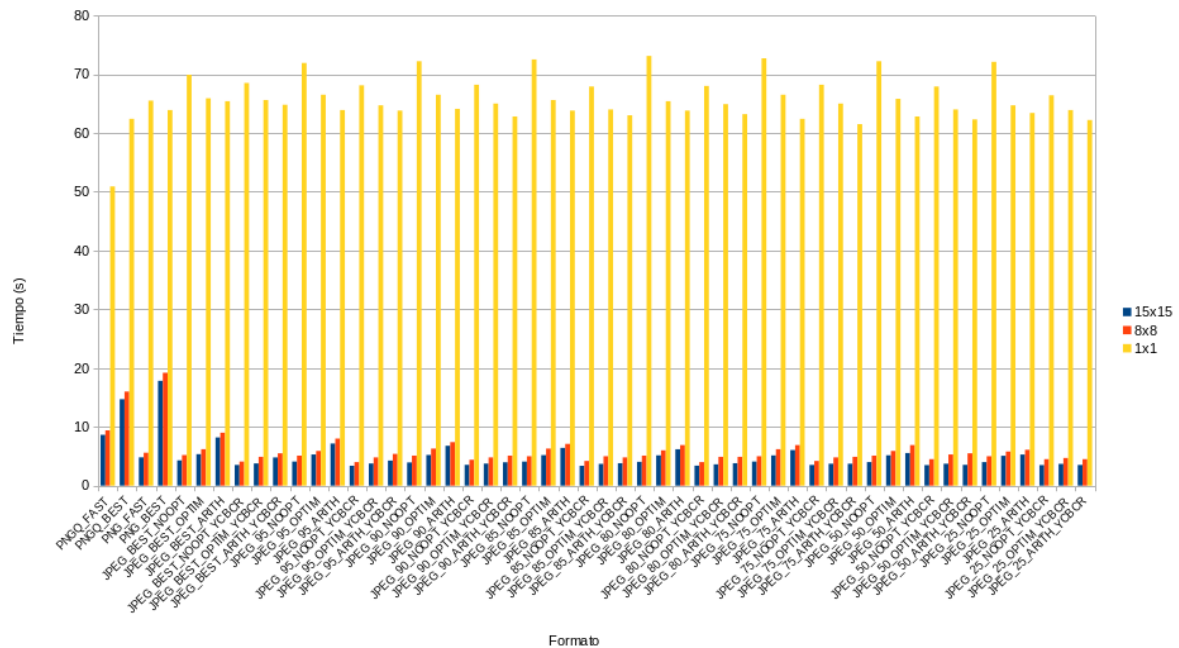


Figura A.5: Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM.

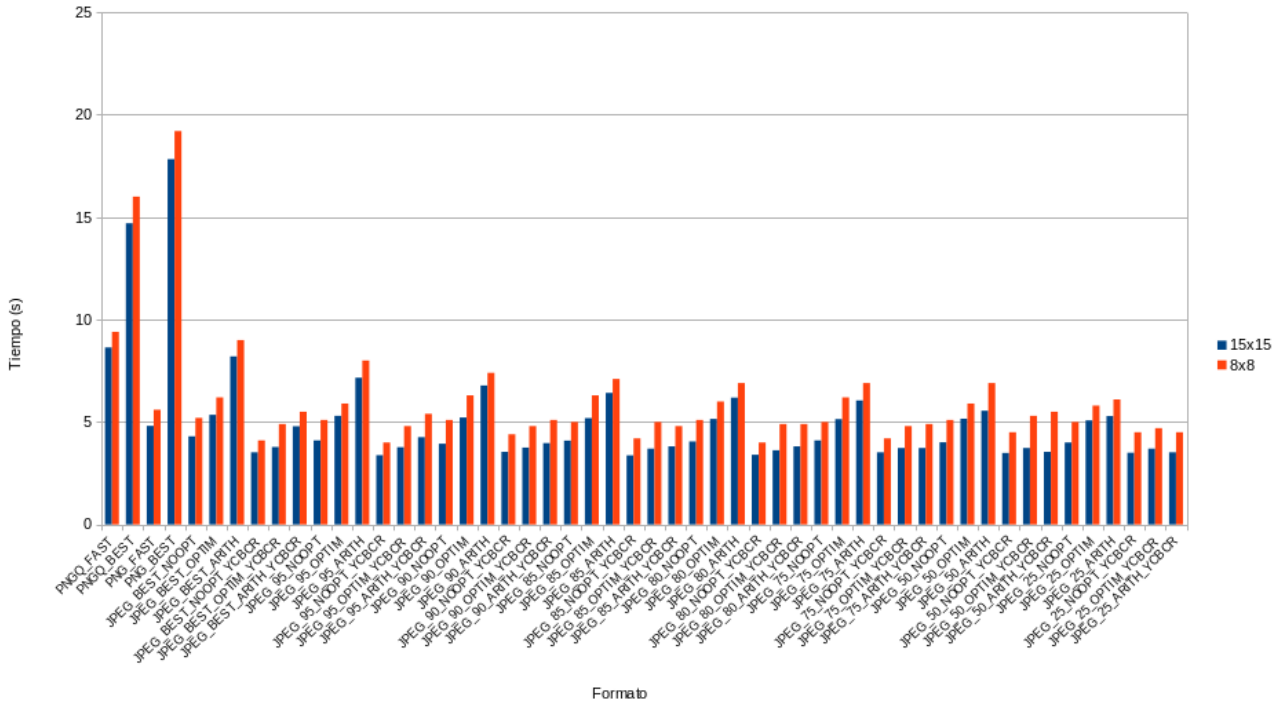


Figura A.6: Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM, excluyendo el metateselado 1x1.

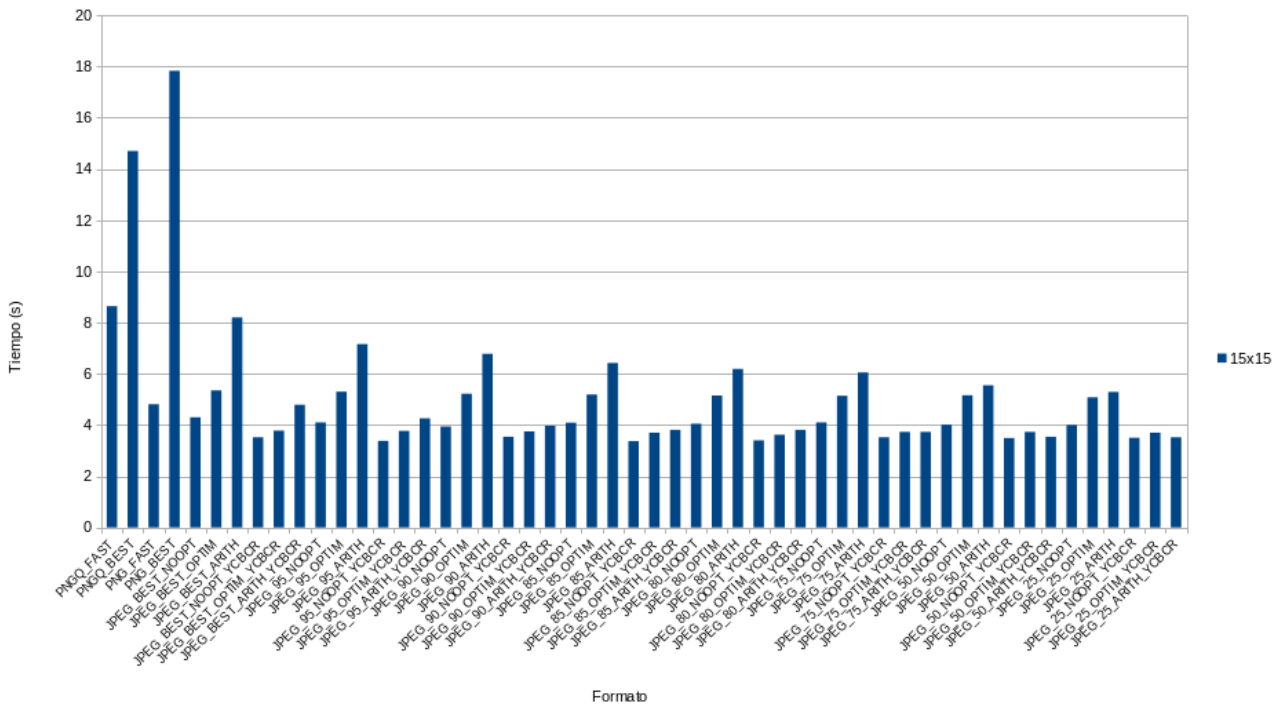


Figura A.7: Gráfica de tiempos medios por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM y metateselado 15x15, elegido.

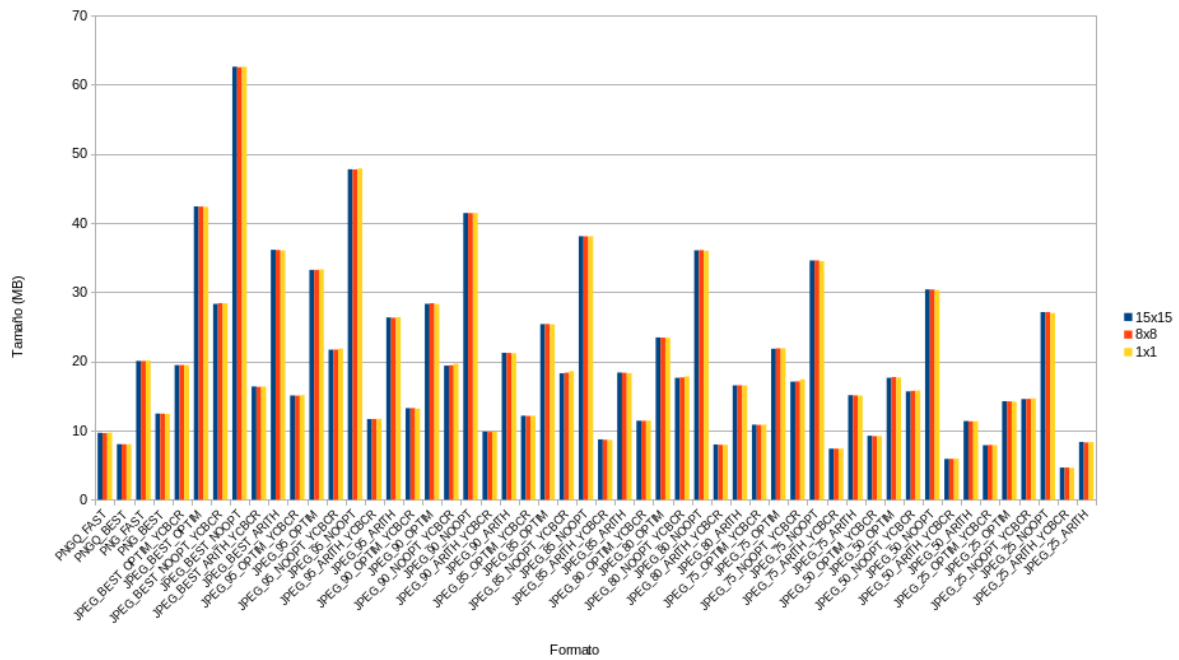


Figura A.8: Gráfica de tamaño final del archivo SQLite que guarda las teselas generadas por formato y metateselado configurado para el semillado de los niveles 0-6 con datos de OSM y metateselado 15x15, elegido.

A.1.3. Resultados de la segunda fase de pruebas del semillado

A.1.3.1. Semillado de los niveles 7 a 12 con datos del PNOA

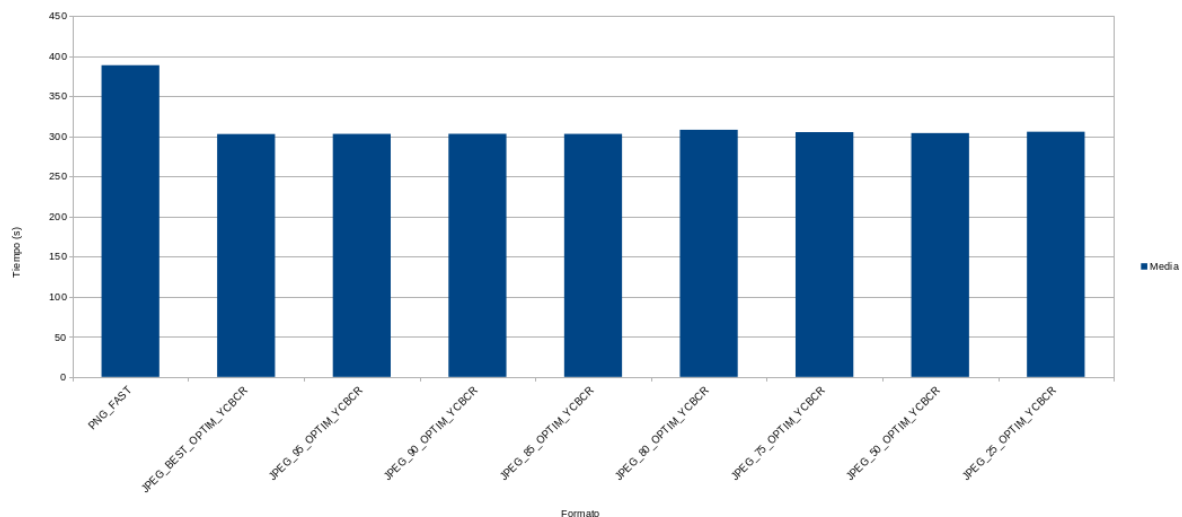


Figura A.9: Gráfica de tiempos medios por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos del PNOA.

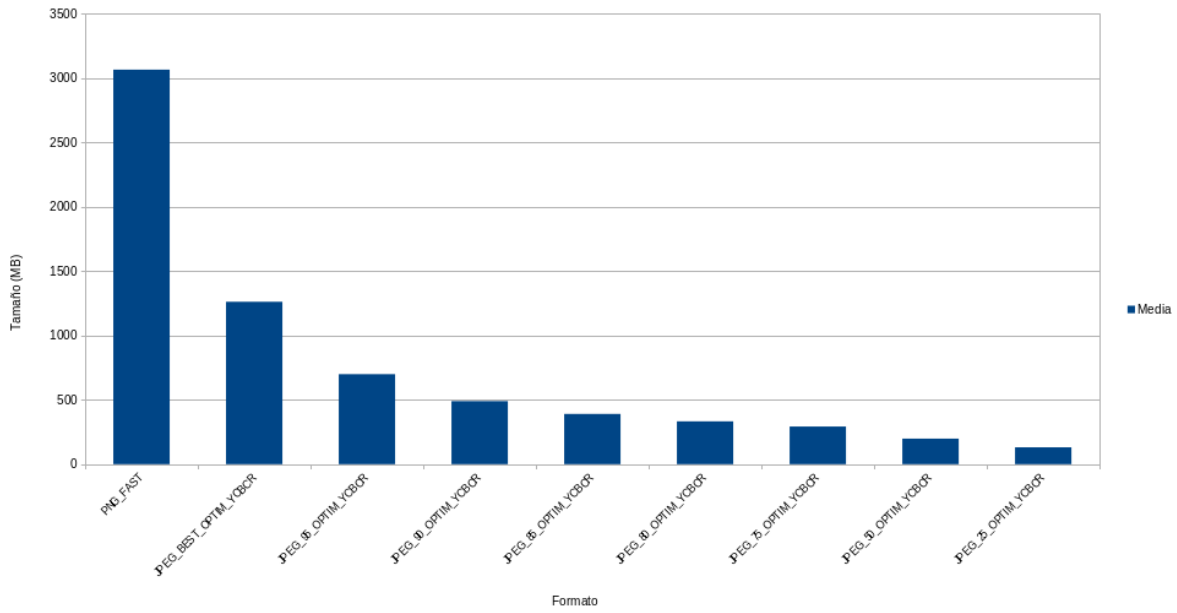


Figura A.10: Gráfica de tamaños medios de los archivos SQLite que guardan las teselas generadas por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos del PNOA.

A.1.3.2. Semillado de los niveles 7 a 12 con datos de OSM

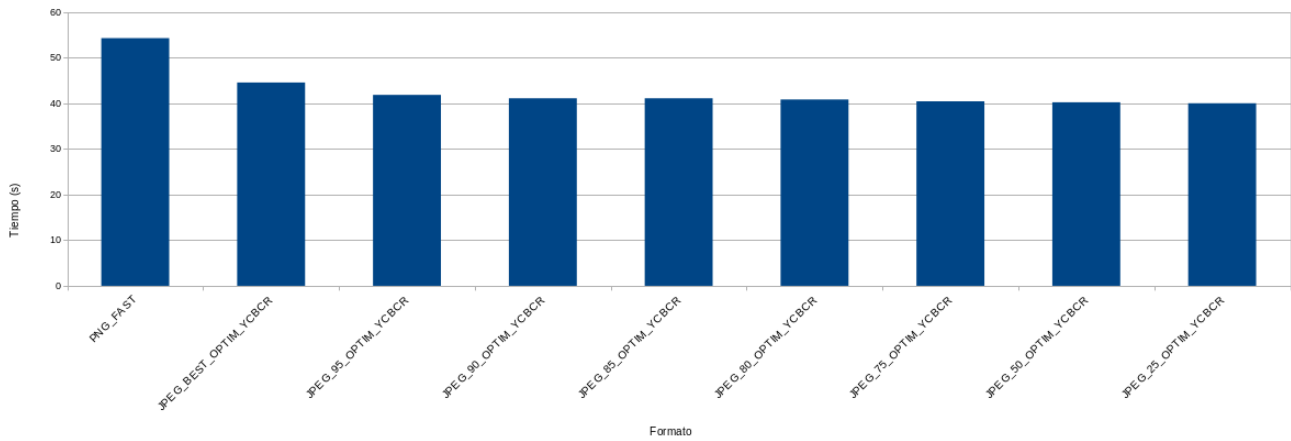


Figura A.11: Gráfica de tiempos medios por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos de OSM.

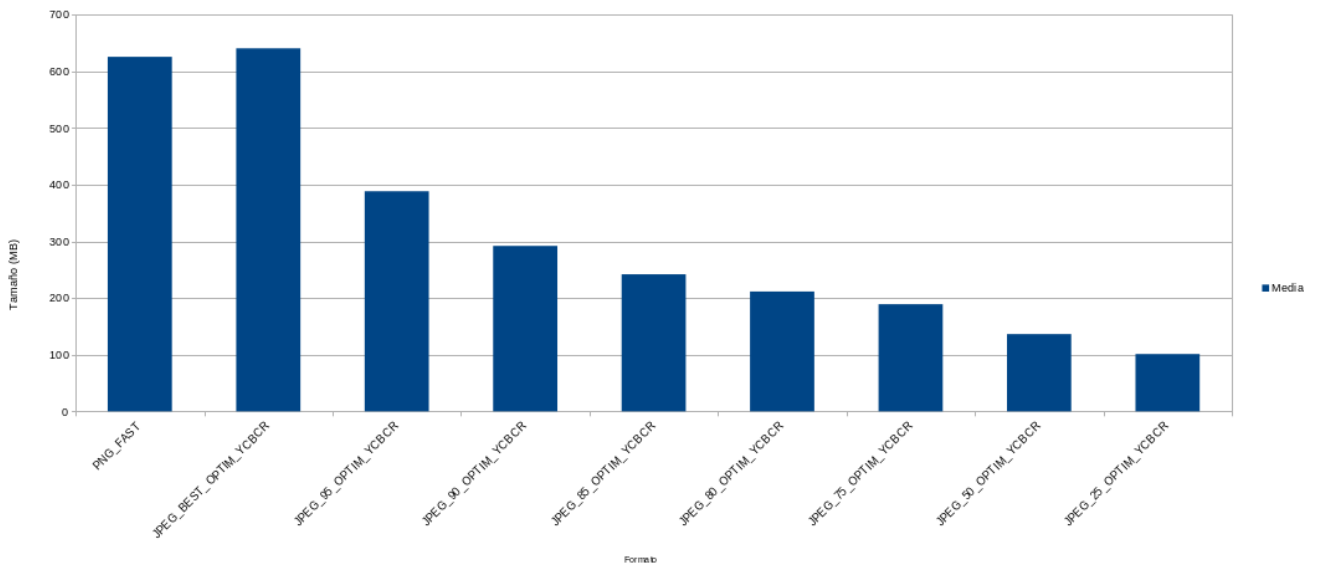


Figura A.12: Gráfica de tamaños medios de los archivos SQLite que guardan las teselas generadas por formato configurado para el semillado de los niveles 7-12 con datos de OSM.

A.2. Pruebas de carga con JMeter

A.2.1. Resultados de las pruebas con 40 hilos

Descripción	Núm. Muestras	Media	Mediana	Mín.	Máx.	Desv. estándar.	Percentil		T. Error	Rend.	
							90	99			
C. web: index.html	134.851	0	0	0	21	0,58	1	1	2	0,000 %	13,485
C. web: main.*.js	134.851	2	2	1	23	0,99	3	5	6	0,000 %	13,485
C. web: fossjis.*.png	134.851	0	0	0	34	0,52	1	1	2	0,000 %	13,485
Valhalla: estado	134.851	5	2	0	2.133	34,79	5	8	70	0,000 %	13,485
C. web: area-chart.*.svg	134.851	0	0	0	19	0,51	1	1	2	0,000 %	13,485
C. web: favicon.png	134.851	0	0	0	18	0,51	1	1	2	0,000 %	13,485
C. web: valhalla.*.png	134.851	0	0	0	9	0,51	1	1	2	0,000 %	13,485
C. web: icons.*.woff2	134.851	0	0	0	8	0,53	1	1	2	0,000 %	13,485
C. web: main.*.css	134.851	1	1	0	11	0,60	2	2	4	0,000 %	13,485
WMTS: Teselas PNOA	12.404.452	0	1	0	1.187	14,02	1	2	3	0,000 %	1.240,467
Nominatim: geocodificación	235.764	26	24	8	366	12,71	42	50	71	0,000 %	23,580
C. web: markers_default.*.png	235.747	0	1	0	29	0,72	1	2	3	0,000 %	23,581
Valhalla: Ruta en coche	11.340	35	29	2	1.456	40,10	58	71	148	1,578 %	1,135
Valhalla: Ruta en bus	11.111	35	29	2	2.031	38,98	58	70	132	1,836 %	1,112
Valhalla: Ruta en camión	11.350	39	32	2	1.048	38,60	64	79	154	2,300 %	1,136
Valhalla: Ruta en moto	10.998	44	35	2	1.438	45,88	85	108	199	18,194 %	1,101
Valhalla: Ruta en bicicleta	11.074	563	396	3	3.588	513,64	1.356	1.630	2.132	0,000 %	1,108
Valhalla: Ruta a pie	11.259	200	116	0	2.021	248,58	504	821	1.106	11,342 %	1,127
TOTAL	14.156.754	2	1	0	3.588	27,22	1	2	27	0,028 %	1.415,585

Cuadro A.3: Estadísticas de la ejecución de pruebas de carga con JMeter usando 40 hilos.

A.2.2. Resultados de las pruebas con 50 hilos

Descripción	Núm. Muestras	Media	Mediana	Mín.	Máx.	Desv. están.	Percentil		T. Error	Rend.
							90	99		
C. web: index.html	41.736	0	0	0	12	0,59	1	1	0,000 %	16,755
C. web: main.*.js	41.736	2	2	1	24	1,01	3	4	0,000 %	16,756
C. web: favicon.png	41.736	0	0	0	15	0,54	1	1	0,000 %	16,756
C. web: icons.*.woff2	41.736	0	0	0	7	0,55	1	1	0,000 %	16,756
C. web: valhalla.*.png	41.736	0	0	0	8	0,54	1	1	0,000 %	16,756
Valhalla: estado	41.736	14	2	0	3.228	83,39	8	308	0,000 %	16,756
C. web: fossgis.*.png	41.736	0	0	0	16	0,54	1	1	0,000 %	16,756
C. web: area-chart.*.svg	41.736	0	0	0	6	0,53	1	1	0,000 %	16,756
C. web: main.*.css	41.736	1	1	0	10	0,66	2	2	0,000 %	16,756
WMTS: Teselas PNOA	3.837.412	0	1	0	1.100	8,28	1	2	0,000 %	1.540,580
Nominatim: geocodificación	72.805	27	24	1	268	14,17	44	79	0,001 %	29,241
C. web: markers_default.*.png	72.774	0	1	0	32	0,74	1	2	0,000 %	29,240
Valhalla: Ruta a pie	3.529	228	131	0	1.960	285,32	597	911	11,873 %	1,419
Valhalla: Ruta en moto	3.346	58	38	2	2.680	94,51	107	166	17,663 %	1,345
Valhalla: Ruta en coche	3.501	47	32	2	1.722	80,97	72	103	1,742 %	1,409
Valhalla: Ruta en camión	3.495	50	35	2	3.008	109,34	79	111	2,060 %	1,406
Valhalla: Ruta en bus	3.444	47	32	2	1.781	80,45	72	108	1,800 %	1,389
Valhalla: Ruta en bicicleta	3.396	641	463	4	3.370	581,53	1.517	1.841	0,000 %	1,367
TOTAL	4.379.326	2	1	0	3.370	29,40	2	3	0,028 %	1.758,114

Cuadro A.4: Estadísticas de la ejecución de pruebas de carga con JMeter usando 50 hilos.

A.2.3. Resultados de las pruebas con 60 hilos

Descripción	Núm. Muestras	Media	Mediana	Mín.	Máx.	Desv. están.	Percentil		T. Error	Rend.	
							90	99			
C. web: index.html	35.544	0	0	0	10	0,61	1	1	3	0,000 %	19,515
C. web: main.*.js	35.544	2	2	1	13	1,05	3	5	7	0,000 %	19,515
C. web: main.*.css	35.544	1	1	0	11	0,70	2	2	5	0,000 %	19,515
C. web: favicon.png	35.544	0	0	0	11	0,58	1	1	2	0,000 %	19,515
C. web: area-chart.*.svg	35.544	0	0	0	10	0,58	1	1	2	0,000 %	19,515
C. web: fossgis.*.png	35.544	0	0	0	11	0,58	1	1	2	0,000 %	19,515
Valhalla status	35.544	35	3	0	3.608	142,64	50	195	671	0,000 %	19,515
C. web: valhalla.*.png	35.544	0	0	0	7	0,58	1	1	2	0,000 %	19,515
C. web: icons.*.woff2	35.544	0	0	0	13	0,60	1	1	2	0,000 %	19,515
WMTS: Teselas PNOA	3.267.297	1	1	0	1.116	18,52	2	3	4	0,000 %	1.793,727
Nominatim: geocodificación	61.948	31	27	8	289	16,74	52	63	91	0,000 %	34,027
C. web: markers_default.*.png	61.909	0	1	0	23	0,76	1	2	3	0,000 %	34,024
Valhalla: Ruta en moto	2.879	88	47	2	2.526	152,07	177	331	773	18,270 %	1,584
Valhalla: Ruta en bus	2.973	74	38	2	2.390	141,78	120	253	733	1,917 %	1,639
Valhalla: Ruta en camión	2.899	78	43	2	3.480	154,29	134	259	728	1,759 %	1,596
Valhalla: Ruta en bicicleta	2.949	754	539	4	4.410	683,44	1.761	2.213	2.840	0,000 %	1,625
Valhalla: Ruta en coche	2.922	74	39	2	2.872	145,46	127	260	728	1,677 %	1,610
Valhalla: Ruta a pie	3.012	275	151	1	2.428	340,70	736	1.038	1.567	11,687 %	1,660
TOTAL	3.728.684	3	1	0	4.410	39,79	2	3	34	0,028 %	2.047,010

Cuadro A.5: Estadísticas de la ejecución de pruebas de carga con JMeter usando 60 hilos.

Apéndice B

Relaciones de formatos de archivos compatibles

B.1. QGIS/GDAL

B.1.1. Ráster

Cuadro B.1: Mecanismos de almacenamiento de informaciones ráster implementados en GDAL [295].

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
AIGrid	Cuadrícula ASCII de ESRI	RW ^c
ACE2	ACE2	?
ADRG	Gráficos rasterizados digitalizados	R-
AIG	Cuadrícula binaria de ESRI	R-
AIRSAR	Formato polarimétrico AIRSAR	R-
BAG	Cuadrícula con atributos batimétricos	RW ^c
BASISU	Basis Universal	?
BLX	Archivo topográfico Magellan BLX	RW ^c
BMP	Mapa de bits independiente del dispositivo de Microsoft Windows	RW ^c
BSB	Formato de carta náutica Maptech/NOAA BSB	R-
BT	Terreno binario VTP	RW

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.1, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
BYN	Geoide de Recursos Naturales de Canadá	?
CAD	Capa ráster DWG de AutoCAD	RW ^c
CALS	CALS Tipo 1	RW ^c
CEOS	Imagen CEOS	R-
COASP	Ráster del procesador DRDC COASP SAR	?
COG	GeoTIFF optimizado para la nube	RW ^c
COSAR	Producto de datos de SAR Complejo del TerraSAR-X	R-
CPG	Datos Convair PolGASP	?
CTable2	Información del movimiento de la cuadrícula en formato Ctable2	?
CTG	Cuadrícula temática compuesta USGS LULC	?
DAAS	Controlador para Airbus DS Intelligence	? ^b
DDS	Superficie DirectDraw	RW ^c
DERIVED	Controlador para conjuntos subordinados y derivados de datos	RW ^b
DIMAP	Spot DIMAP	R-
DIPEX	ELAS DIPEX	?
DOQ1	USGS DOQ de primera generación	R-
DOQ2	USGS DOQ de segunda generación	R-
DTED	Datos militares de elevación	R-
ECRGTOC	Índice de gráficos rasterizados comprimidos mejorados	R-
ECW	Wavelet Comprimido Mejorado	RW
EEDAI	Imágen de la API del Motor de Datos de Google Earth	R- ^b
EHdr	Bandas Intercaladas por Líneas con encabezados de ESRI	RW
EIR	Erdas Imagine Raw	R-
ELAS	Archivos de programas del Laboratorio de Recursos Terrestres	?
ENVI	Ráster con Bandas Intercaladas por Líneas con encabezados de ENVI	R- ^c
ERS	ERMapper .ERS	RW ^c
ESAT	Producto de Imágen de Envisat	R-
ESRIC	Cache Compacta de ESRI	R-
EXR	Imágen de Rango Dinámico Extendido	RW

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.1, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
FAST	Formato EOSAT FAST	R- ^c
FIT	FIT	?
FITS	Sistema flexible de transporte de imágenes	RW
GenBin	Binario genérico (Archivo de Bandas Intercaladas por Líneas con encabezados)	R
GeoRáster	GeoRáster Espacial de Oracle	RW ^b
GFF	Archivo GSAT de los Laboratorios Nacionales Sandia	R-
GIF	formato de gráficos intercambiable	RW ^c
GPKG	Ráster GeoPackage	RW ^c
GRASS	Ráster GRASS	R-
GRASSASCIIGrid	Cuadrícula ASCII de GRASS	R-
GRIB	Información de la OMM-ONU distribuida periódicamente en forma binaria	RW ^c
GS7BG	Cuadrícula binaria de Golden Software Surfer 7	?
GSAG	Cuadrícula ASCII de Golden Software	RW ^c
GDBG	Cuadrícula binaria de Golden Software	RW
GSC	Geomalla GSC	?
GTA	Matrices genéricas etiquetadas	RW ^c
GTI	Índice de mosaicos ráster de GDAL	?
GTiff	Archivo GeoTIFF	RW ^c
GXF	Archivo de intercambio de cuadrícula	R-
HDF4	Versión 4 del Formato de Datos Jerárquicos, versión 4	R-
HDF5	Versión 4 del Formato de Datos Jerárquicos, versión 5	R-
HEIF	Imagen de alta eficiencia conforme a ISO/IEC 23008-12:2017	R-
HF2	Ráster de mapa de altura HF2/HFZ	RW ^c
HFA	Erdas Imagine .img	RW
RST	Ráster Idrisi	?
ILWIS	Mapa ráster	RW ^c
IRIS	Formato del software de radar meteorológico de Vaisala	R- ^c
ISCE	ISCE	?
ISG	Servicio Internacional para el Geode	R-

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.1, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
ISIS2	Cubo ISIS del Centro de Astrogeología del USGS (Versión 2)	RW
ISIS3	Cubo ISIS del Centro de Astrogeología del USGS (Versión 3)	RW
JDEM	DEM japonés (.mem)	R-
JP2ECW	ERDAS JPEG2000 (.jp2)	RW
JP2KAK	JPEG 2000 (basado en Kakadu SDK)	RW ^c
JP2LURA	Controlador JPEG2000 basado en la biblioteca Lurawave	RW ^c
JP2MrSID	JPEG2000 a través del SDK MrSID	R-
JP2OpenJPEG	Controlador JPEG2000 basado en la biblioteca OpenJPEG	RW ^c
JPEG	Formato de archivo JPEG JFIF	RW ^c
JPEGXL	Formato de archivo JPEG-XL	RW ^c
JPIP KAK	JPIP Streaming	?
KEA	KEA	RW
KMLSuperoverlay	Supersuperposición KML	?
KRO	Formato KOLOR en bruto	RW
KTX2	KTX2	?
L1B	Conjunto de datos de nivel 1b del Orbitador Polar de la NOAA (AVHRR)	R- ^c
LAN	Erdas 7.x .LAN y .GIS	RW ^c
LCP	Formato LCP FARSITE v.4	R-
Leveller	Mapa de altura nivelador Daylon	RW ^c
LOSLAS	Datos de cambio de cuadrícula NADCON .los/.las	?
MAP	OziExplorer .MAP	?
MRF	Formato metaráster	?
MBTiles	MBTiles	RW
MEM	Ráster en memoria	RW ^b
MFF	Ráster Vexcel MFF	RW
MFF2	Imagen Vexcel MFF2	RW
MrSID	Base de datos de imágenes fluidas de múltiples resoluciones	R-
MSG	Meteosat de Segunda Generación	R-
MSGN	Formato de archivo nativo Meteosat de Segunda Generación (.nat)	R-

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.1, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
NDF	Formato de datos NLAPS	R ^c
netCDF	NetCDF: Forma de Datos Común en la Red	RW
NGSGEOID	Cuadrículas de altura de geoides NOAA NGS	R-
NGW	NextGIS Web	RW ^{7bc}
NITF	Formato de transmisión de imágenes nacionales	RW ^{7bc}
NOAA_B	Formato NOAA GEOCON/NADCON5 .b	R-
NSIDCbin	Formato de concentraciones de hielo marino del Centro Nacional de Datos sobre Nieve y Hielo	R-
NTv2	Datos de cambio de cuadrícula NTv2	?
NWT_GRD	Formato de archivo Northwood/Vertical Mapper	RW
NWT_GRC	Formato de archivo Northwood/Vertical Mapper	R-
OGCAPI	Mosaicos API de OGC / Mapas / Cobertura	R- ^{bc}
OpenFileGDB	Rásteres en Geodatabases de ESRI	R-
OZI	Ráster OZF2/OZFX3	R-
JAXAPALSAR	Productos Procesados JAXA PALSAR	R-
PAux	PCI en bruto etiquetado .aux	RW ^c
PCIDSK	Base de datos de PCI Geomatics	RW ^c
PCRáster	Ráster PCRáster	RW
PDF	PDF geoespacial	R-
PDS	Sistema de datos planetarios v3	R-
PDS4	Sistema de datos planetarios de la NASA (Versión 4)	RW
PLMosaic	PLMosaic (API de mosaicos de Planet Labs)	R-
PNG	Gráficos de red portátiles	RW ^c
PNM	Netpbm (.pgm, .ppm)	RW
PostGISráster	Controlador de rásteres PostGIS	R- ^b
PRF	Ráster PHOTOMOD	?
R	Almacén de datos de objetos R	RW ^c
Rásterlite	Rásteres en SQLite DB	RW ^c
SQLite	Rásteres en SQLite DB	RW ^c
RDB	Base de datos RIEGL	R-

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.1, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
RIK	Mapas de cuadrícula suecos	R-
RMF	Formato de matriz ráster	?
ROI_PAC	ROI_PAC	RW ^c
RPFTOC	Formato de producto ráster/RPF (a.toc)	R-
RRASTER	R ráster	R-
RS2	Producto XML del RadarSat 2	R- ^c
S102	S-102: Producto batimétrico de superficie	R-
S104	S-104: Información del nivel del agua para productos de navegación en superficies acuáticas	R-
S111	S-111: Producto de corrientes acuáticas superficiales	R-
SAFE	Producto XML SAFE del Sentinel-1	R- ^c
SAR_CEOS	Imagen CEOS SAR	R-
SAGA	Cuadrícula binaria de SAGA GIS	RW ^c
SDTS	USGS SDTS DEM	R-
SENTINEL2	Productos Sentinel-2	?
SGI	Formato de imagen SGI	RW
SIGDEM	DEM de cuadrícula de enteros escalados	RW ^c
SNODAS	Sistema de asimilación de datos de nieve	R-
SRP	Formato de producto estándar (ASRP/USRP) (.gen)	?
SRTMHGT	SRTM HGT	RW ^c
STACIT	Artículos de catálogos de activos espacio-temporales	R-
STACTA	Elementos en mosaico de Catálogos de activos espacio-temporales	R-
Terragen	Archivo de terreno Terragen	?
TGA	Formato de archivo de imagen TARGA	R-
TIL	EarthWatch/DigitalGlobe .TIL	?
TileDB	Ráster TileDB	RW
TSX	Producto TerraSAR-X	?
USGSDEM	USGS ASCII DEM (y CDED)	R-
VICAR	VICAR	?
VRT	Formato virtual GDAL	RW ^b

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.1, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
WCS	Servicio de cobertura web OGC	R-
WEBP	WEBP	RW ^c
WMS	Servicios de mapas web	R-
WMTS	Servicio de mosaicos de mapas web de OGC	R-
XPM	Mapa de píxeles X11	RW ^c
XYZ	XYZ con cuadrícula ASCII	RW ^c
Zarr	Zarr	RW ^c
ZMAP	Cuadrícula ZMap Plus	RW ^c

^a R-: Solo lectura

RW: Lectura y escritura

?: Capacidades de lectura y escritura no documentadas.

^b Realmente se trata de un conector para usar el tipo de fuente señalado.

^c La implementación de capacidades de lectura y/o escritura es parcial según documentación disponible.

B.1.2. Vectorial

Cuadro B.2: Mecanismos de almacenamiento de información vectorial implementados en GDAL [296].

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
AmigoCloud	AmigoCloud	R-
Arrow	Comunicación Entre Procesos (Geo)Arrow	R-
AVCBIN	Cuadrícula binaria de ESRI	R-
AVCE00	Cobertura E00 (ASCII) de ESRI	R-
CAD	DWG de AutoCAD	RW ^b
CARTO	Carto	RW
CSV	Valores separados por comas	RW

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.2, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
CSW	Servicio de catálogo para la Web del OGC	R- ^{b,c}
DGN	DGN de Microstation	R-
DGNv8	DGN de Microstation, versión 8	RW
DWG	DWG de AutoCAD	R- ^b
DXF	DXF de AutoCAD	R-
EDIGEO	EDIGO	R-
EEDA	API de datos del motor de Google Earth	R-
Elasticsearch	Objetos Codificados Geográficamente para Elasticsearch	RW
ESRIJSON	Controlador ESRIJSON/FeatureService	R-
FileGDB	Geodatabase de archivos ESRI (FileGDB)	RW
FlatGeobuf	FlatGeobuf	RW
Geoconcept	Texto exportado desde GeoConcept	RW ^b
GeoJSON	GeoJSON	RW
GeoJSONSeq	Secuencia de características GeoJSON	RW
GeoRSS	Objetos codificados geográficamente para canales RSS	RW
GML	Lenguaje de marcado geográfico	RW ^b
GMLAS	Lenguaje de marcado geográfico (GML) impulsado por esquemas de aplicación	RW ^b
GMT	Vectores ASCII GMT	RW
GPKG	Vectores empaquetados mediante GeoPackage	RW ^b
GPSTables	GPSTables	R-
GPX	Formato de intercambio de GPS	RW
GRASS	Formato vectorial de GRASS	R-
GTFS	Especificación General de Canales de Tránsito	R-
HANA	SAP HANA	RW
IDB	IDB	R-
IDRISI	Vectores de Idrisi	R-
INTERLIS 1	Controladores para INTERLIS 1 e INTERLIS 2	RW ^b
INTERLIS 2	Controladores para INTERLIS 1 e INTERLIS 2	RW ^b
JML	Formato JML OpenJUMP	RW

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.2, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
JSONFG	Características y geometrías en JSON del OGC	RW
KML	Lenguaje de Marcas de Keyhole	RW ^b
LIBKML	Controlador LIBKML	RW
LVBAG	Extracto del Catastro holandés LV BAG 2.0	R- ^b
MapML	MapML	RW ^b
Memory	Datos en Memoria	RW ^{b,c}
MiraMonVector	Vector MiraMon	RW
MapInfo File	Archivos TAB, MIF y MID de MapInfo (ESRI)	RW
MongoDBv3	MongoDBv3	RW ^b
MSSQLSpatial	Bases de datos espaciales Microsoft SQL Server	RW ^c
MVT	Mosaicos vectoriales de Mapbox	RW
MySQL	MySQL	RW ^c
NAS	ALQUIS	R-
netCDF	Vector	RW ^b
NGW	NextGIS Web	RW ^b
UK .NTF	Cartografía gubernamental del Reino Unido	R-
OAPIF	API de características del OGC	R- ^c
OCI	Bases de datos espaciales Oracle	RW ^c
ODBC	Interfaz Open DataBase Connectivity para Gestores de Bases de Datos Relacionales	RW ^{b,c}
ODS	Documento libre de hoja de cálculo	RW ^b
OGDI	Vectores mediante OGDI (Open Geographic Datastore Interface)	R- ^c
OpenFileGDB	Vectores en archivos Geodatabase de ESRI	RW
OSM	OpenStreetMap XML y PBF	R-
Parquet	(Geo)Parquet	RW
PDF	PDF geoespacial	RW
PDS	Tabla del Sistema de Datos Planetarios de la NASA	R-
PostgreSQL	PostgreSQL/PostGIS	RW ^c
PGDump	Volcado SQL de PostgreSQL	-W
PGGeo	Base de datos geográfica personal de ESRI	R-

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.2, continuación)

Conector	Descripción	Modos de acceso ^a
PLScenes	PLScenes (API de catálogo/escenas de Planet Labs)	? ^c
PMTiles	Mosaicos de ProtoMaps	RW ^b
S57	Carta de navegación electrónica conforme a S-57 de la OHI	R-
SDTS	Estándar de Transferencia de Datos Espaciales del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares	R-
Selafin	Archivos Selafin	RW ^b
ESRI Shapefile	Archivo Shapefile de ESRI	RW
SOSI	Estándar SOSI noruego	?
SQLite	Sistemas de bases de datos SQLite/Spatialite	RW ^{b,c}
SVG	Gráficos Vectoriales Escalables	R-
SXF	SXF	R-
TIGER	Datos del Censo de Estados Unidos en formato TIGER o de línea	R-
TileDB	Vector TileDB	RW
TopoJSON	Controlador TopoJSON	?
VDV	Formatos de datos VDV-451/VDV-452/INTREST	RW ^b
VFK	Formato de datos de intercambio catastral checo	R-
VRT	Formato Virtual	RW ^{b,c}
WAsP	Formato WAsP .map	-W
WFS	Servicio OGC WFS	RW ^{b,c}
XLS	Formato de Microsoft Excel	R-
XLSX	Hoja de cálculo XML abierta de Microsoft Office	RW

^a R-: Solo lectura

RW: Lectura y escritura

?: Capacidades de lectura y escritura no documentadas.

^b La implementación de capacidades de lectura y/o escritura es parcial según documentación disponible.

^c Realmente se trata de un conector para usar el tipo de fuente señalado.

B.2. ArcGIS

Cuadro B.3: Formatos de archivo admitidos por ArcGIS Pro [220].

Ámbito	Formato	Modos de acceso ^a
General	Archivo 3D Tiles Archive (.3tz)	R-
General	Dataset de teselas 3D	R-
General	Archivos de conexión de big data (.bdc)	R-
General	Espacio de trabajo de archivo BIM (.rvt)	R-
General	Datasets de CAD (.dgn, .dwg, .dxf)	R-
General	Hojas de cálculo de Excel (.xls, .xlsx)	R-
General	Archivos de lenguaje de marcado keyhole (.kml, .kmz)	R-
General	Imágenes en movimiento	R-
General	Productos ráster	R-
General	Tablas de texto (.asc, .csv, .psv, .tab, .tsv, .txt)	R-
General	Datasets VPF (.aft, .pft, .lft)	R-
General	Tablas de dBASE (.dbf)	RW
General	Rásteres de función (.afr)	RW
General	Datasets LAS (.las, .lasd, .zlas)	RW
General	Datasets ráster	RW
General	Shapefiles (.shp)	RW
General	Datasets de TIN	RW
General	Datasets de caché (.tiles)	RW ^b
General	Paquete de capas de escena extraído (.eslpk)	RW ^b
General	Conexiones de entidades multiarchivo (.mfc)	RW ^b
General	Paquetes de capas de escena (.slpk, .spk)	RW ^b
General	Paquetes de teselas (.tpk, .tpkx)	RW ^b
General	Dataset de caché de vectores (.vtiles)	RW ^b
General	Paquetes de teselas vectoriales (.vtpk)	RW ^b
Agregable	Archivo de capa (.lyrx)	RW
Agregable	Archivo de diseño (.pagx)	RW
Agregable	Archivo de mapa (.mapx)	RW

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.3, continuación)

Ámbito	Formato	Modos de acceso ^a
Agregable	Archivos de informe (.rptx)	RW
Agregable	Base de datos de SQLite (.sqlite)	RW
Agregable	Caja de herramientas (geodatabase, .atbx,.pyt, .tbx)	RW
Agregable	Captura de datos estadísticos de ArcGIS (.sdcx)	RW
Agregable	Conexión a la carpeta de almacenamiento en ArcGIS Cloud (.acs)	RW
Agregable	Conexión de ArcGIS Server (.ags)	RW
Agregable	Conexión de base de datos (.sde)	RW
Agregable	Conexión de base de datos de ArcGIS Workflow Manager (Classic) (.jtc)	RW
Agregable	Conexión del espacio de trabajo de Data Reviewer (.gdb)	RW
Agregable	Conexión del servidor de OGC API (.ogc)	RW
Agregable	Conexión del servidor WCS de OGC (.wcs)	RW
Agregable	Conexión del servidor WFS de OGC (.wfs)	RW
Agregable	Conexión del servidor WMS de OGC (.wms)	RW
Agregable	Conexión del servidor WMTS de OGC (.wmts)	RW
Agregable	Contenedor de modelos de adecuación (.sam)	RW
Agregable	Estilos y estilos móviles (.stylx)	RW
Agregable	Geodatabase de archivos (.gdb)	RW
Agregable	Geodatabase móvil (.geodatabase)	RW
Agregable	GeoPackage (.gpkg)	RW
Agregable	Grupo objetivo de segmentación de ArcGIS (.sgtargetgroup)	RW
Agregable	Localizador (.loc)	RW
Agregable	Modelo de Huff de ArcGIS (.huffmodel)	RW
Agregable	Notebook de Python (.ipynb)	RW
Agregable	Paquete de capas (.lpx)	RW
Agregable	Paquete de geoprosamiento (.gpkx)	RW
Agregable	Paquete de mapas (.mpkx)	RW
Agregable	Perfil de segmentación de ArcGIS (.sgprofile)	RW
Agregable	Tareas (.esriTasks)	RW
Agregable	Trabajo por lotes de Data Reviewer (.rbj)	RW

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.3, continuación)

Ámbito	Formato	Modos de acceso ^a
Importable	Archivos de capa (.lyr)	Copia transformada
Importable	Archivos de marcadores de ArcGIS Pro (.bkmx)	Copia transformada
Importable	Archivos de ubicación de ArcGIS (.dat)	Copia transformada
Importable	Documentos de ArcGlobe (.3dd)	Copia transformada
Importable	Documentos de ArcMap (.mxd)	Copia transformada
Importable	Documentos de ArcScene (.sxd)	Copia transformada
Importable	Estilos de Desktop (.style)	Copia transformada
Importable	Paquetes de capas (.lpk)	Copia transformada
Importable	Paquetes de escenas móviles (.mspk)	Copia transformada
Importable	Paquetes de mapas (.mpk)	Copia transformada
Importable	Paquetes de mapas móviles (.mmpk)	Copia transformada
Usable	3D Studio (.3ds)	Desconocido
Usable	Formato de documento portátil de Adobe (.pdf)	Desconocido
Usable	Autorización de ArcGIS (.ecp)	Desconocido
Usable	Definiciones de servicio de ArcGIS Server (.sd)	Desconocido
Usable	Reasignación ASCII (.rmp)	Desconocido
Usable	Mapa de bits (.bmp)	Desconocido
Usable	Collada (.dae)	Desconocido
Usable	Mapa de color (.clr)	Desconocido
Usable	Archivo comprimido (.z, .zip)	Desconocido
Usable	Expresión de Calcular campo (.exp, .cal)	Desconocido
Usable	Metarchivo mejorado (.emf)	Desconocido
Usable	Definición de clasificador Esri (.ecd)	Desconocido
Usable	Esquema de clasificación de Esri (.ecx)	Desconocido
Usable	Ejecutable (.exe)	Desconocido
Usable	Herramienta de análisis exploratorio (.eat)	Desconocido
Usable	Transformación de lenguaje de hojas de estilo extensible (.xsl, .xslt)	Desconocido
Usable	FDP (.fdp)	Desconocido
Usable	Archivo de mapa de campo (.fieldmap)	Desconocido

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.3, continuación)

Ámbito	Formato	Modos de acceso ^a
Usable	FME Workbench (.fmw)	Desconocido
Usable	GeoJSON (.geojson)	Desconocido
Usable	Paquete de geoprocesamiento (.gpk)	Desconocido
Usable	Binario de formato de transmisión GL (.glb)	Desconocido
Usable	Formato de transmisión GL (.gltf)	Desconocido
Usable	Formato de intercambio de GPS (.gpx)	Desconocido
Usable	Formato de intercambio de gráficos (.gif)	Desconocido
Usable	Lenguaje de marcado de hipertexto (.html)	Desconocido
Usable	Notación de objetos de JavaScript (.json)	Desconocido
Usable	Joint Photographic Experts Group (.jpeg)	Desconocido
Usable	Expresión de etiqueta (.lxp)	Desconocido
Usable	Paquete de localizador (.gcpk)	Desconocido
Usable	Diccionario de abreviaturas Maplex (.dic)	Desconocido
Usable	Comandos de MS-DOS (.com)	Desconocido
Usable	Dataset NetCDF (.nc)	Desconocido
Usable	OpenFlight (.flt)	Desconocido
Usable	Binario OpenSceneGraph (.osgb)	Desconocido
Usable	Catálogo de imágenes orientadas (.oic)	Desconocido
Usable	Datos de entrenamiento de detección de objetos de nube de puntos (.pcotd)	Desconocido
Usable	Dataset de entrenamiento de nube de puntos (.pctd)	Desconocido
Usable	Gráfico de red portátil (.png)	Desconocido
Usable	Script de Python (.py)	Desconocido
Usable	Expresión de consulta (.exp)	Desconocido
Usable	Script de R (.r)	Desconocido
Usable	Clasificación de bosque aleatorio (.rfm)	Desconocido
Usable	Plantilla de función ráster (.rft.xml)	Desconocido
Usable	Catálogos de ráster	Desconocido
Usable	Gráficos vectoriales escalables (.svg)	Desconocido
Usable	Definición de servicio (.sd)	Desconocido

(Continúa en la página siguiente)

(Cuadro B.3, continuación)

Ámbito	Formato	Modos de acceso ^a
Usable	SketchUp (.skp)	Desconocido
Usable	Firma de Spatial Analyst (.gsg)	Desconocido
Usable	Referencia espacial (.prj)	Desconocido
Usable	Matriz de ponderaciones espaciales (.swm)	Desconocido
Usable	Paquete de teselas (.tpk)	Desconocido
Usable	Regla topológica (.rul)	Desconocido
Usable	Cámara UAV/UAS (.cam)	Desconocido
Usable	Lenguaje de Modelado de Realidad Virtual (.wrl)	Desconocido
Usable	Objeto de Wavefront (.obj)	Desconocido
Usable	Lote de Windows (.batj)	Desconocido
Usable	World (.wid)	Desconocido
Usable	World 3D (.wid3)	Desconocido

^a R-: Solo lectura

RW: Lectura y escritura

^b La implementación de capacidades de lectura y/o escritura es parcial según documentación disponible.