

Martin Oriol, J, Cabrera Delgado E. (2023). Digitalización de la infraestructura tranviaria del área metropolitana de Barcelona. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* (Artículos), 31, 87-100. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.818>

LA DIGITALIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA TRANVIARIA DEL ÁREA METROPOLITANA DE BARCELONA

^{1a}Jordi Martin Oriol  y ^{2b}Eduard Cabrera Delgado 

¹Dep. de Geografía, Edificio B. Universitat Autònoma de Barcelona.
08193 Bellaterra, España.

²Autoritat del Transport Metropolità (ATM-Barcelona)
c/ de Balmes, 49, 08007 Barcelona, España

^ajordi.martin@uab.cat, ^becabrera@atm.cat

RESUMEN

Se presenta en este artículo una descripción general de las tareas llevadas a cabo en el ejercicio de digitalización de la infraestructura tranviaria del área metropolitana de Barcelona. Gracias a las herramientas que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en tanto que sistemas complejos utilizados para el tratamiento de datos espaciales, podemos presentar este caso de éxito aplicado a la gestión de una infraestructura lineal de tipo ferroviaria. La infraestructura tranviaria del área metropolitana de Barcelona, configurada a partir de dos redes, Trambaix y Trambesòs, y que opera desde el año 2004, aún no disponía de una infraestructura genuinamente digital capaz de gestionar y mantener el conjunto de activos más allá del conjunto de *As-built*s que se entregaron después de la puesta en marcha de la infraestructura y que desde ahora puede gestionarse de manera digital en un entorno SIG, BIM y Lidar. De las conclusiones obtenidas, cabe mencionar que, gracias a este proyecto de digitalización, la gestión de activos de la infraestructura tranviaria es más eficiente y, sobre todo, la capacidad de integración entre herramientas SIG, BIM y Lidar es substancialmente mayor que de haberse mantenido en un entorno CAD.

Palabras clave: tranvía; digitalización; *As-built*s; CAD; SIG; BIM; Lidar; gestión de activos.

THE DIGITIZATION OF THE TRAMWAY INFRASTRUCTURE OF THE BARCELONA METROPOLITAN AREA

ABSTRACT

This paper presents a general description of the tasks carried out in order to digitalize tram infrastructure in Barcelona's metropolitan area. Thanks to Geographic Information System (GIS) tools as complex system tool and spatial representation tool, this paper shows a case of success in the management of a railway infrastructure. Barcelona's tram infrastructure is configured by two networks, Trambaix and Trambesòs operating since 2004 and did not yet have a genuinely digital infrastructure capable of managing and maintaining assets beyond the *As-built*s collection released after the commissioning of the infrastructure. Thanks to this project, tram infrastructure can be managed as digital technology in a GIS, BIM and Lidar environment, much more efficient than in a CAD environment.

Keywords: tramway; digitalization; As-built; CAD; GIS; BIM; Lidar; asset management.

1. Introducción

Es sabido que la transformación digital es uno de los elementos clave para la competitividad tanto de empresas como de administraciones públicas. Personas, procesos y tecnología configuran el ADN de la transformación digital. Cualquier entorno digital ofrece ventajas substanciales no solo a nivel tecnológico sino también a nivel organizativo. Las personas que forman parte de toda organización deben conocer los procesos que se llevan a cabo dentro de dicha organización. Así, estos podrán realizarse de manera eficaz, efectiva y en constante mejoría. Para ello, las personas implicadas deben poder elegir la mejor tecnología a fin de poder transformar información en conocimiento.

Una de las ventajas que ofrece la digitalización es, sin lugar a duda, la mejora efectiva en la gestión de activos de toda organización. En el caso de la infraestructura tranviaria del área metropolitana de Barcelona, la digitalización georreferenciada de dicha infraestructura representa una revolución del ecosistema actual en el que vivimos. Poder poner a disposición de la ciudadanía toda esta información constata un rotundo éxito de los tres vectores de toda transformación digital: la disponibilidad de datos útiles y usables; el uso de tecnología con capacidad analítica y capacitada para poder gestionar dichos datos y, finalmente, el compromiso en el establecimiento de procesos tecnológicos enfocados a innovar en dicha transformación digital. Por todo ello, en este artículo se procederá a exponer de manera detallada el conjunto de procesos que se han llevado a cabo y que, exitosamente, han servido para poder tener digitalizada la infraestructura tranviaria del área metropolitana de Barcelona.

2. Marco teórico

La necesidad de disponer de una infraestructura de datos digital ha sido uno de los pilares de la transformación tecnológica que, a la largo de los últimos años, ha permitido la consolidación de los Sistemas de Información Geográfica -en adelante SIG, como herramienta clave en este proceso de evolución del mundo analógico -del mapa entendido como un elemento temporal en formato papel, al mundo digital -del mapa entendido como un soporte donde incrustar información de modo continuo. En este ecosistema tecnológico, la digitalización de las infraestructuras lineales es un elemento primordial. A pesar de ello, los ejemplos de digitalización de infraestructuras más característicos han sido siempre los vinculados a infraestructuras viarias (inventarios de caminos, programas de mantenimiento de redes de carreteras, censos de tránsito, arañas de tránsito y así un largo etcétera) en detrimento de las infraestructuras ferroviarias - trenes- y, en menor medida, metros y tranvías.

Uno de los ejemplos más relevantes del impacto de las redes en su globalidad y cómo estas condicionan la morfología de la mayoría de las ciudades y áreas metropolitanas europeas es el trabajo de Dupuy (1991) y su definición del concepto *Red de Redes*. Centrándonos exclusivamente en ejemplos de digitalización de las infraestructuras ferroviarias y en la necesidad de cartografiar e inventariar dicha red física, de los numerosos estudios que se han llevado a cabo sobre la aparición del ferrocarril (primeras décadas del siglo XIX), su rápida expansión (hasta mediados del siglo XX) y su lento declive o retroceso en parte debido a la aparición del automóvil (finales del siglo XX y hasta la actualidad), uno de los autores más importantes es el geógrafo Martí-Henneberg con numerosas publicaciones (2013, 2015, 2017 y 2021, y Martí-Henneberg & Alvarez-Palau (2017)) sobre el impacto del ferrocarril en la accesibilidad y en la distribución de población tanto en Europa como en España. Más allá de estos trabajos centrados en disponer de una base de datos homogénea con fechas de apertura y cierre de las líneas ferroviarias, otros científicos como Alvarez-Palau & Aguilar (2015), Solanas *et al.* (2015), Capel (2011), Del Río *et al.* (2008) o Font (1999) han investigado el impacto territorial del ferrocarril en nuestras sociedades contemporáneas desde un punto de vista de la geografía histórica. Pero más allá de esta visión geográfica y descriptiva, hoy en día, la digitalización de la infraestructura ferroviaria tiene parte de su sentido en poder mejorar la automatización de la explotación de dicha infraestructura -véase a Lotz *et al.* (2020), Avramovic *et al.* (2019) o Feyen (2017) y sobre todo en el uso complementario de tecnologías afines como el de las cámaras lidar -de “*Light Detection and Ranging*” o “*Laser Imaging Detection and Ranging*”, en tareas de mantenimiento predictivo de la infraestructura y las interrelaciones que genera con su entorno cercano como por ejemplo el crecimiento de la vegetación que puede ocupar el ámbito del gálibo libre de obstáculos (GLO) del tranvía, el potencial fotovoltaico que podrían tener los techos de las paradas o el impacto en la ocupación de suelo. Todos estos temas han sido estudiados por Bravo (2022), Jiménez *et al.* (2022), Martín (2016) o Sánchez (2014).

3. Antecedentes

La Autoridad del Transporte Metropolitano -en adelante ATM- es un consorcio interadministrativo constituido en el año 1997 cuya finalidad es coordinar y planificar el transporte público de la región metropolitana de Barcelona. La ATM es una entidad de derecho público, con personalidad jurídica propia y, tal y como queda reflejada en la disposición adicional tercera de la Ley 4/2006, ejerce las funciones de planificación, de ordenación, de construcción y de gestión de la red tranviaria del área metropolitana de Barcelona, por delegación de competencias de su titular, la Generalitat de Catalunya¹

Dentro de las prescripciones de la Ley 4/2006, de 31 de marzo, ferroviaria, está el de la autorización previa de obras o instalaciones en zona definida como de dominio público tranviario por parte de la administración titular de la infraestructura, es decir la ATM, en el ejercicio de sus funciones delegadas. Para poder llevar a cabo esta función es necesario poder suministrar el conjunto de información gráfica detallada y actualizada de la totalidad de servicios y de instalaciones tranviarias a los distintos promotores ya sea para poder actualizar modificaciones derivadas de acciones de conservación y mantenimiento llevadas a cabo por las respectivas concesionarias o bien derivadas de acciones de terceros. Hasta la fecha, el flujo de trabajo

¹ La Ley 4/2006 de 31 de marzo, ferroviaria, establece en su disposición adicional tercera que la red tranviaria del Trambaix y del Trambesòs es de titularidad de la Generalitat de Catalunya. Esta red se planifica, se ordena y se concede según acuerdo establecido en el Decreto 200/1998 de 30 de julio, en el cual se delegan competencias para la implementación del sistema tranviario/metro ligero en el corredor de la Diagonal-Baix Llobregat (Trambaix) y según el Acuerdo de Gobierno del 9 de octubre de 2001 de delegación de competencias para la implementación del sistema tranviario/metro ligero en el corredor de la Diagonal-Besòs (Trambesòs). Ambas infraestructuras tranviarias se integran en el sistema tranviario unificado del área metropolitana de Barcelona de titularidad de la Generalitat de Catalunya. La ATM ejerce las funciones de planificación, de ordenación y de gestión de dicha red en el alcance y en los términos que le sean encargados. Actualmente, la gestión de las infraestructuras tranviarias de Trambaix y Trambesòs se lleva a cabo bajo régimen de concesión en las sociedades Tramvia Metropolità, S.A. y Tramvia Metropolità del Besòs, S.A. respectivamente.

solo permitía distribuir el conjunto de planos en formato CAD² del estado de dimensionado y características de las obras ejecutadas (*As-builts*). Además, tal y como se prevé en los respectivos contratos de concesión, la ATM ejerce las funciones de seguimiento, inspección y control del mantenimiento y calidad de la explotación de las redes tranviarias. Por ello, disponer de información gráfica detallada, actualizada y homogénea es clave para poder ofrecer un servicio de calidad. Sólo si se dispone de dicha información gráfica en un entorno específico de un Sistema de Información Geográfica se podrá responder de manera rápida, veraz y eficiente a cualquier petición del estado de la infraestructura tranviaria. Una parte del éxito de este proyecto nace de la capacidad de ofrecer el potencial del SIG a un sector profesional, el de la ingeniería y de la arquitectura todavía hoy en día acostumbrado a trabajar en entornos CAD y con fuertes reticencias al cambio tecnológico.

4. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria es, sin lugar a duda, aportar una tecnología que facilite la mejora en la gestión de activos necesarios durante todo el ciclo de vida de esta infraestructura: desde su diseño hasta su desmantelamiento. Teniendo en cuenta el espacio temporal en el que se encuentra la infraestructura tranviaria, el proceso de digitalización se incorpora directamente en fase de explotación obviando la fase de diseño y ejecución de la obra.

En paralelo al objetivo principal, existen también una serie de objetivos secundarios del proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria del área de Barcelona a fin de garantizar la integridad y la robustez de la información digital que se genera y se custodia en torno al propio tranvía de tal modo que la ATM pueda:

- Tener una visión integrada a modo de inventario de todos los activos separados por grupos y subgrupos más allá de la actual limitación que se contempla en un entorno clásico en forma de *As-builts* segmentados por hojas y ámbitos territoriales.
- Conocer la cantidad de elementos disponibles y poder visualizar tanto su aspecto gráfico como alfanumérico de manera simultánea.
- Buscar y poder filtrar la información en función de cualquier parámetro de la base de datos y del conjunto de atributos asociados a la misma.
- Poder llevar a cabo consultas espaciales que relacionen qué tipo de elementos existen en según qué tipo de lugares (como, por ejemplo, poder conocer qué elementos hay dentro de un taller, una cochera o una subestación eléctrica).
- Disponer de datos complementarios de los elementos tales como sus características físicas, grupo o subgrupo al cual pertenecen, así como la posibilidad de introducir variables temporales que permitan identificar cambios en función de correcciones, revisiones y/o averías.
- Disponer de información asociada de los elementos de forma relativamente rápida y visual de ficheros asociados en forma de imágenes o documentos en papel escaneados.
- Poder llevar a cabo extracciones de la información de cara a terceros con sólo aquella información que sea relevante.
- Publicar la información en un entorno web *open data* seguro y con las restricciones necesarias de uso y acceso según distintos tipos de perfiles de usuarios finales.
- Incorporar los resultados a un entorno de trabajo bajo los parámetros del *Building Information Modeling* -en adelante BIM- en fase de pruebas.

² Acrónimo de *Computer-Aided Design*. Es el software necesario para ayudar en la creación, modificación, análisis y optimización de un objeto de diseño. A diferencia de lo que ocurre en un software SIG, la información puede no estar georreferenciada y carecer de tablas de atributos asociadas a los vectores gráficos que la representan.

5. Origen de los datos

Si bien el uso de la tecnología CAD dentro de la ingeniería aún sigue siendo un pilar básico, cada vez es más habitual el uso de bases de datos geográficas ya que permiten una gestión mucho más eficaz de la información. El papel relevante de los SIG en tanto que son sistemas de información que gestionan bases de datos geográficas es trascendental. La digitalización de la infraestructura tranviaria del área de Barcelona no es más que la integración dentro del SIG corporativo del ATM de manera coherente del conjunto de *As-built*s que configuran dicha red.

Trambaix entró en servicio el mes de abril del 2004, con 15,1 km de longitud, un ancho de vía de 1435 mm, 29 estaciones y 3 líneas (T1, T2 y T3). La red de Trambaix transportó un total de 20.221.098 pasajeros en 2019 a lo largo de los municipios de Barcelona, l'Hospitalet del Llobregat, Esplugues de Llobregat, Cornellà de Llobregat, Sant Joan Despí, Sant Just Desvern i Sant Feliu de Llobregat. La figura 1 muestra el esquema de la red de Trambaix.

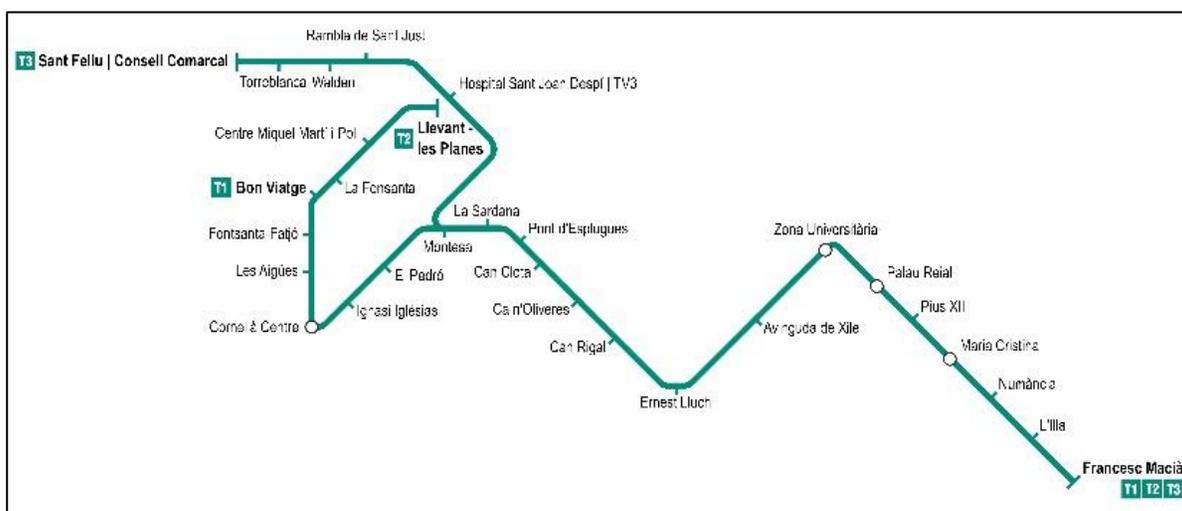


Figura 1. Esquema operacional de la red del Trambaix

Fuente. Elaboración propia

Trambesòs entró en servicio el mes de mayo del 2004, con 14,0 km de longitud, un ancho de vía de 1435 mm, 27 estaciones y 3 líneas (T4, T5 y T6). La red de Trambesòs transportó un total de 9.538.711 pasajeros en 2019 a lo largo de los municipios de Barcelona, Sant Adrià de Besòs y Badalona. La figura 2 muestra el esquema de la red de Trambesòs.

Así, ambas infraestructuras tranviarias conforman una red de algo más de 29 km de longitud, un total de 56 estaciones, operan hasta 6 líneas distintas (T1, T2, T3, T4, T5 y T6) y durante todo el año 2019 transportó a casi 30 millones de viajeros a lo largo del continuo urbano de la ciudad de Barcelona. Cabe mencionar que la situación generada por culpa de la pandemia producida por el Covid-19 mitigó la cifra de viajeros a lo largo de todo el periodo transcurrido entre el mes de febrero 2020 y el pasado mes de febrero 2022 pero, actualmente, a finales de 2022, la cifra de pasajeros/año es prácticamente idéntica a la de 2019.

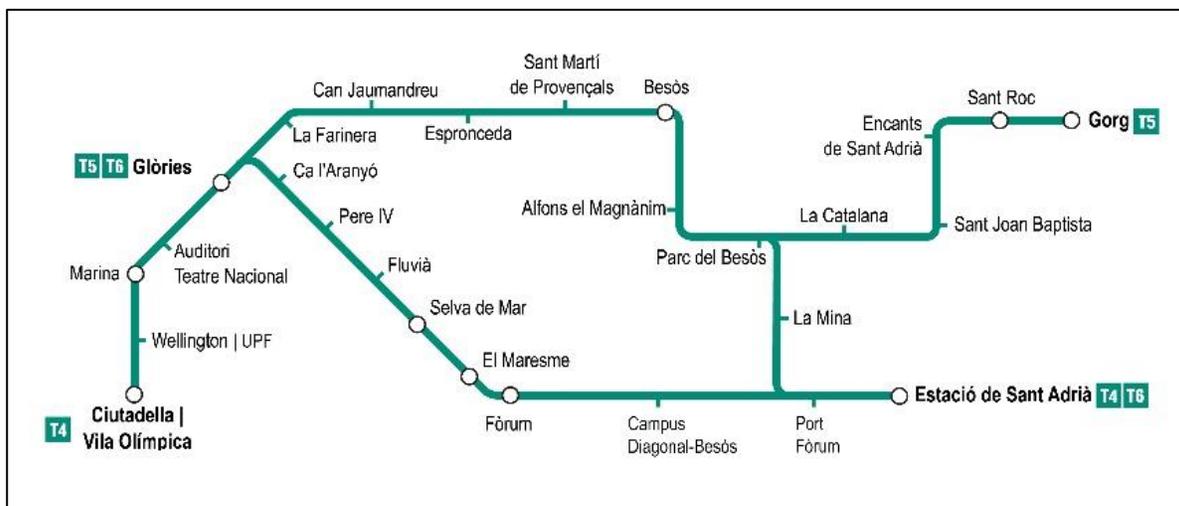


Figura 2. Esquema operacional de la red del Trambesòs

Fuente. Elaboración propia

Con independencia a la puesta en servicio de ambas infraestructuras, una vez se terminaron las obras de construcción de éstas, se libró a la ATM la totalidad de *As-built*s en formato CAD de AutoCAD® así como en formato de impresión “*Portable Document Format*” (*.pdf). Para ambas infraestructuras la información librada corresponde a las diferentes fases de entrada en servicio y no existe una versión ni unificada ni homogénea de ambas redes. La mayoría de los planos se diseñaron a escala 1:500 a excepción de los talleres, las cocheras, secciones y planos de detalle donde se llegó a alcanzar la escala 1:100. El principal motivo por el cual se ha llevado a cabo este proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria ha sido el de poder estructurar de manera continua y sin fisuras toda la red, así como el conjunto de elementos que la configuran de tal modo que no se vea segmentada territorialmente y cualquier elemento de ésta sea identificable, consultable y editable de un modo seguro, eficaz y riguroso. Mantener y gestionar una base de datos en lugar de una biblioteca de ficheros CAD permite, básicamente el acceso mucho más rápido a los datos, evita la repetición o duplicidad de estos, permite la carga masiva de nuevos, permite una compartición de estos de manera global, centraliza la información en un único repositorio con la consecuente reducción física de espacio y el mantenimiento de la información es mucho más fácil. Cabe señalar, que, dentro del apartado de desventajas, mantener y gestionar una base de datos implica gestionar accesos remotos a la misma, posibles fallos críticos a la base de datos, costes de actualización de la propia base de datos y el tamaño creciente de la misma a medida que se van incorporando nuevos activos en su interior. Si dentro de las desventajas añadimos que se requiere capacitación, asesoría y acompañamiento en su manejo, así como la siempre reticencia al cambio tecnológico, durante estos últimos 15 años, la gestión de la infraestructura tranviaria se ha mantenido en el mismo entorno CAD en el que se creó, es decir, como una fotografía fija de la obra ejecutada y no de su estado real. Gracias a las actuales políticas de digitalización en las que la ATM está liderando distintos proyectos tales como la Agenda de la Digitalización de la Movilidad de Catalunya³ o la Digitalización de la Infraestructura Ferroviaria de Catalunya⁴, el proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria del área de Barcelona ha visto definitivamente la luz.

³ La Agenda de la Digitalización de la Movilidad de Catalunya es un documento con la vocación de ofrecer una visión estratégica de cómo desarrollar el proceso de digitalización de la movilidad en Catalunya en el horizonte 2020-2030. De los distintos objetivos de la agenda, el más relevante prioriza la transformación digital del sistema catalán de movilidad como medio destinado a generar un modelo de movilidad más sostenible, productivo, eficiente, inclusivo y, obviamente, digital.

⁴ La Digitalización de la Infraestructura Ferroviaria de Catalunya es un proyecto tecnológico liderado por la ATM y el Ayuntamiento de Barcelona cuya finalidad es disponer de la representación geográfica de las distintas redes ferroviarias a escala 1:50.000, 1:5.000 y 1:1.000, 2D y 3D cuya finalidad es disponer de una base de datos homogénea como instrumento de análisis, planificación y gestión de la ciudad por parte de las distintas administraciones y entes autorizados.

El punto de partida para la creación de esta base de datos es, tal y como se ha mencionado anteriormente, el conjunto de planos *As-built*. La información contenida en estos planos no está estructurada de manera homogénea y el control de capas en las que se han ido dibujando los distintos elementos que configuran la red tranviaria no siempre mantiene los atributos de nivel, simbología y color de un plano a otro. Además, para su elaboración, el conjunto de los planos está segmentado territorialmente y nunca se ha llevado a cabo la fusión de la totalidad de las hojas en una sola hoja que permita la visualización de manera global del conjunto de datos. Y, por último, la validez temporal y la fiabilidad de la información contenida en cada *As-built* es relativa en tanto que se han producido modificaciones y cambios entre el momento de puesta en servicio de la infraestructura tranviaria y la actualidad, y estos no se han trasladado a los correspondientes *As-built*s, sino que se han generado distintos versionados de una misma hoja. Debido a acciones de conservación y mantenimiento inherentes a la propia explotación tranviaria, así como fruto de los distintos trabajos autorizados que pueden llevarse a cabo dentro del dominio público del tranvía, los cambios han sido numerosos y no todos ellos han quedado recogidos manteniendo la estructura original de los *As-built*s. Parte del proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria ha servido para actualizar y poner al día la información de dicha red.

5.1. Modelo conceptual de datos

El modelo conceptual de datos de la infraestructura tranviaria permite describir la estructura de datos de dicha base de datos (el tipo y la forma de cada dato), su integridad (el conjunto de condiciones que deben cumplir los datos para poder reflejar la realidad deseada) así como el conjunto de operaciones que se permiten llevar a cabo dentro de ella (edición a la base de datos para tareas de actualización de elementos ya sea por agregación de nuevos elementos, borrado o actualización de estos).

El marco de referencia en el cual van a representarse todos los datos viene definido por dos parámetros: el sistema de referencia y el sistema de representación. El sistema de referencia de los datos será el *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)* establecido de modo oficial a partir del Decreto 1071/2007 y que toma como referencia el elipsoide *Geodetic Reference System 1980 (GRS80)*. Todos los elementos representados en la base de datos serán cartografiados en dos dimensiones y, allí donde sea necesario, se almacenará su cota tomando como referencia el sistema altimétrico que queda definido en el mismo decreto 1071/2007 y que toma como registro altitudinal de cota cero el nivel medio del mar en Alicante. El sistema de representación planimétrica de los datos utilizará la Proyección Universal Transversa de Mercator UTM-31N.

La representación geográfica del conjunto de elementos de la infraestructura tranviaria incluye la totalidad de los elementos necesarios para la gestión del tranvía y, en función de sus necesidades de análisis será representada por tres tipos distintos de entidades geométricas: puntos, líneas y polígonos. En todos los casos, las coordenadas de estas geometrías tendrán como unidad de medida el metro almacenadas en números reales con doble precisión. Además de la geometría, todo elemento geográfico tendrá asignada una tabla de atributos con todos los atributos necesarios para su identificación.

En la tabla 1, se lista a modo de catálogo el inventario de los elementos que forman la base de datos de la infraestructura tranviaria. Entre paréntesis se indica para cada grupo, subgrupo y elemento el número total de entidades geométricas que contiene.

Así, se constata que para la concreción de los distintos elementos que configuran la infraestructura tranviaria, el modelo de datos se organiza en 3 grupos: obra civil, sistemas tranviarios y sistemas auxiliares. La obra civil se organiza en 7 subgrupos que a su vez incluyen hasta un total de 44 elementos. Los sistemas tranviarios se organizan en 10 subgrupos que a su vez incluyen hasta un total de 38 elementos. Finalmente, los sistemas auxiliares se organizan en 2 subgrupos que a su vez incluyen hasta un total de 4 elementos. Para la representación total de la infraestructura tranviaria el modelo de datos utiliza un total de 3 grupos, 19 subgrupos y 86 elementos. Cada elemento estará configurado por n atributos que permiten su identificación y caracterización.

Tabla 1. inventario de los elementos que forman la base de datos de la infraestructura tranviaria

<p>I. Obra Civil (39.088)</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Dominio Público (195) <ul style="list-style-type: none"> i. Infraestructura tranviaria (193) ii. Franja de protección (2) b. Trazado (2.784) <ul style="list-style-type: none"> i. Eje de plataforma (23) ii. Eje de vía (82) iii. Carriles (526) iv. Gálibo libre de obstáculos (64) v. Geometría de los ejes de vía en planta (1.123) vi. Geometría de los ejes de vía en alzado (966) c. Paradas (1.926) <ul style="list-style-type: none"> i. Andén (95) ii. Marquesina (93) iii. Mueble técnico (95) iv. Cuadro eléctrico (58) v. Armario de telecomunicaciones (56) vi. Distribuidor automático de billetes (111) vii. Sistema de información al viajero (122) viii. Sistema de interfonía (116) ix. Sistema de megafonía (56) x. Escaparate (241) xi. Escalera mecánica (2) xii. Ascensor (3) xiii. Barandilla (142) xiv. Papelera (206) xv. Banco (474) xvi. Nombre de parada (56) d. Pavimentación (2.687) <ul style="list-style-type: none"> i. Pavimento (2.687) e. Sistema de riego (15.910) <ul style="list-style-type: none"> i. Arquetas (338) ii. Canalizaciones (8.710) iii. Acometidas (44) iv. Punto de riego (6.604) v. Armario de riego (16) vi. Elementos de medida y telegestión (157) vii. Programadores (41) f. Sistema de drenaje (10.176) <ul style="list-style-type: none"> i. Arquetas (1.390) ii. Drenajes centrales y laterales (3.880) iii. Reja (841) iv. Tubo de desguace (1.454) v. Imbornal de plataforma (271) vi. Drenaje vertical (1.697) vii. Punto de conexión (643) g. Sistema de iluminación (5.410) h. Líneas (1.696) <ul style="list-style-type: none"> i. Puntos de luz (2.502) ii. Columnas (1.060) iii. Elementos LED de parada (110) iv. Cuadros municipales (42) 	<p>II. Sistemas Tranviarios (10.069)</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Catenaria (2.481) <ul style="list-style-type: none"> i. Seccionadores (21) ii. Línea aérea de contacto (173) iii. Palo de catenaria (1.527) iv. Sujeciones (269) v. Pórticos (155) vi. Tensores (336) b. Multitubular (2.906) <ul style="list-style-type: none"> i. Arquetas (1.264) ii. Prisma (1.642) c. Energía (236) <ul style="list-style-type: none"> i. Feeder (30) ii. Indicadores de tensión (48) iii. Armarios (110) iv. Cableado de distribución (48) d. Subestaciones (170) <ul style="list-style-type: none"> i. Obra civil (13) ii. Transformadores (31) iii. Celdas de media tensión (15) iv. Rectificadores de corriente eléctrica (18) v. Cargadores y baterías (15) vi. Cuadro de baja tensión (13) vii. Cuadro de control (14) viii. Cuadro de seccionadores (12) ix. Disyuntores de la subestación (21) x. Seccionador de aislamiento automático (18) e. Sistema de ayuda a la explotación (185) <ul style="list-style-type: none"> i. Etiqueta (185) f. Señalización ferroviaria (1.101) <ul style="list-style-type: none"> i. Accionamiento (122) ii. Armario (43) iii. Elementos de detección (340) iv. Señales fijas (486) v. Señales luminosas (110) g. Semaforización (1.384) <ul style="list-style-type: none"> i. Detectores (703) ii. Reguladores (163) iii. Semáforos tranvía (366) iv. Cruces (152) h. Señalización viaria (1.183) <ul style="list-style-type: none"> i. Señalización viaria vertical (477) ii. Señalización viaria horizontal (706) i. Videovigilancia (414) <ul style="list-style-type: none"> i. Cámaras (237) ii. Armarios (177) j. Talleres y cocheras (9) <ul style="list-style-type: none"> i. Ubicación (2) ii. Edificios (7) <p>III. Sistemas Auxiliares (429)</p> <ul style="list-style-type: none"> k. Mobiliario urbano (413) <ul style="list-style-type: none"> i. Árbol (399) ii. Andenes de parada de bus (7)
---	--

De los 13.113 ficheros CAD (*.dwg) que configuran la totalidad de *As-built*s, el proceso de migración a la base de datos ha generado una cifra total de 49.586 elementos geométricos que constituyen la totalidad de la infraestructura tranviaria. De estos, 39.088 elementos forman parte de la obra civil, 10.069 del sistema tranviario y, por último, 429 elementos son sistemas auxiliares. Todos y cada uno de estos elementos contienen los atributos necesarios para su identificación (código de activo) así como los distintos atributos para su correcta clasificación según tipologías⁵ La figura 3 muestra, a modo de ejemplo, la visualización de la infraestructura tranviaria en un entorno SIG

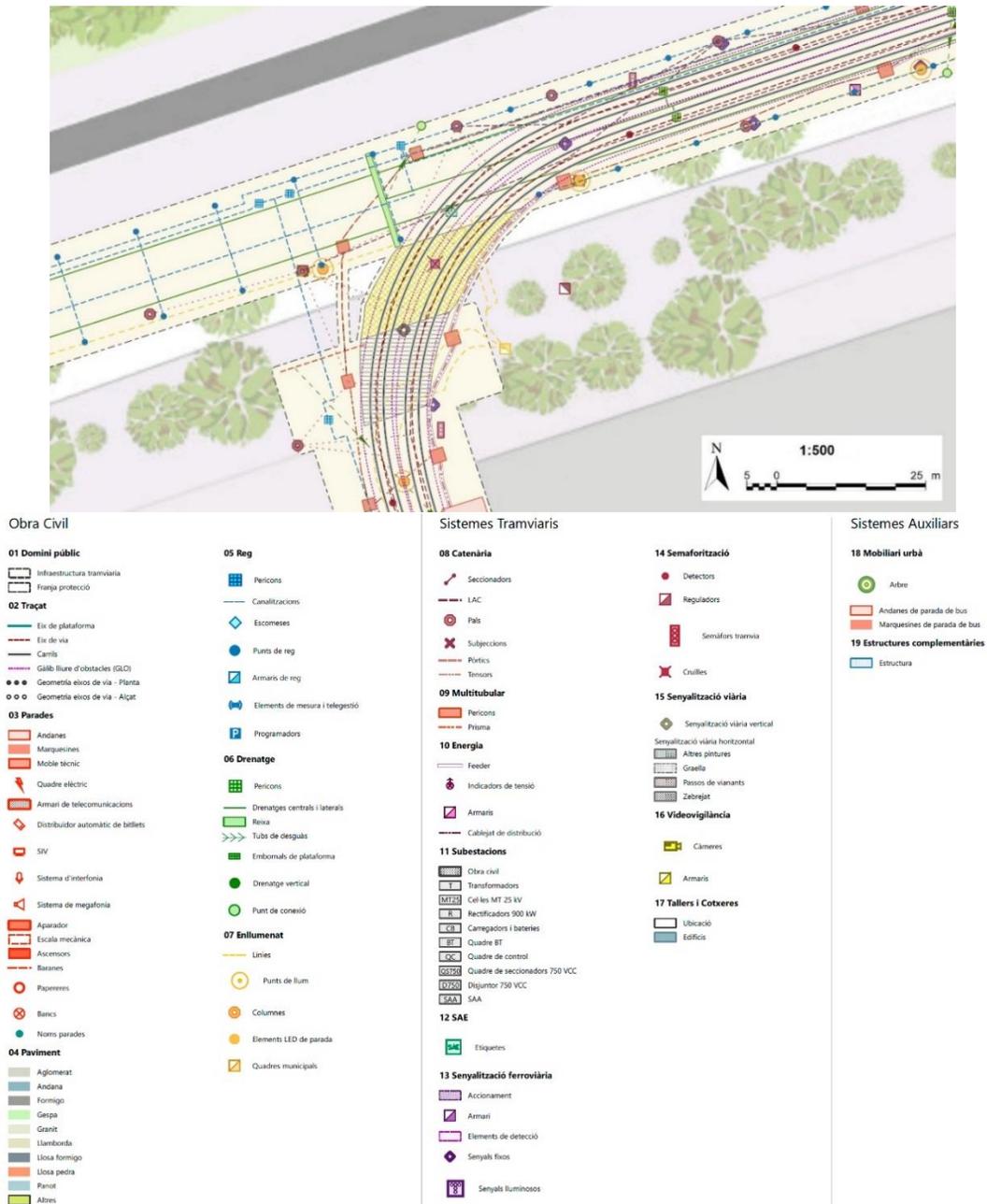


Figura 3. Ejemplo de visualización por capas de la infraestructura tranviaria

⁵ Toda la colección de atributos de cada elemento es de tal complejidad que no se incluye descripción detallada alguna dentro de este artículo. Estos se pueden consultar en la documentación asociada al conjunto de metadatos del proyecto en <https://atm-tram-modeldades.github.io/>

.5.2. Tareas de homogeneización de los datos

Tal y como se ha citado en el apartado “5. Origen de los datos”, el mero hecho de no poder disponer de un único *As-built* homogéneo, actualizado y correctamente estructurado a nivel de capas constituye el principal y mayor reto de este proyecto: definir una base de datos capaz de incorporar todos los elementos de los distintos *As-built* de manera homogénea y sin costuras que permita identificar gráficamente todo elemento de la infraestructura tranviaria y tener todos sus atributos más relevantes vinculados en la misma base de datos. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el número global de ficheros CAD (*.dwg) asciende a una cifra total de 13.113 ficheros. Para poder procesar toda esta información de manera relativamente automatizada y poder migrarla a un entorno SIG en una base de datos relacional se han utilizado las herramientas que ofrece FME©. FME (“*Feature Manipulation Engine*” o “Motor de Manipulación de Entidades”) es un software propietario de Sage Software© que permite la extracción, transformación y carga de datos hacia un entorno SIG. Se trata de una aplicación de escritorio que permite automatizar tareas de limpieza, transformación y conversión de formatos CAD estándares a formatos SIG estándares. Así, una vez definido el modelo conceptual de datos, pueden llevarse a cabo las tareas de homogeneización de los distintos elementos que se irán adicionando a la base de datos siguiendo el modelo conceptual definido.

Antes de llevar a cabo la automatización de este proceso es necesario haber definido la base de datos donde se irán adicionando los distintos elementos que configuran la infraestructura tranviaria siguiendo los parámetros expuestos en el capítulo anterior “5.1. Modelo Conceptual de Datos”. Esta base de datos debe poder describir con el máximo nivel de detalle todos los elementos geográficos, así como todos sus atributos alfanuméricos de dicha infraestructura de tal modo que, a partir de su puesta en funcionamiento, sea el único gestor de activos para el mantenimiento y la actualización de la red tranviaria del área de Barcelona. El flujo operacional de trabajo parte del acceso a los distintos *As-built*, su manipulación en un entorno FME y su volcado a la base de datos⁶ SIG tal y como se puede apreciar en la figura 4.

Finalmente, y atendiendo a las nuevas necesidades tecnológicas, el proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria incluye la redacción de un plan estratégico de cómo implementar la metodología BIM que permita la creación de modelos virtuales en 3D de las instalaciones más representativas de la infraestructura tranviaria gracias a poder disponer de una nube de puntos fruto de un escaneo láser tridimensional con tecnología lidar.

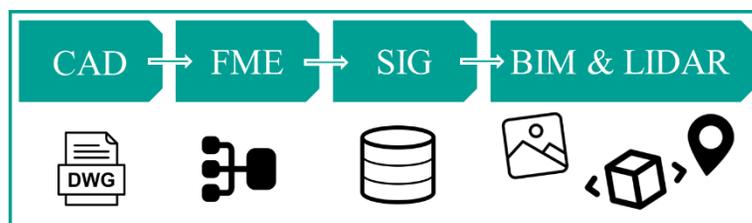


Figura 4. Flujo operacional de trabajo

Fuente. Elaboración propia

⁶ Una primera versión de la base de datos espacial se construye en un entorno *PostGIS*. *PostGIS* es un módulo de *PostgreSQL* con estándares abiertos que soporta objetos geográficos en una base de datos relacional y bajo Licencia Pública General de GNU. Este formato permite la conexión a la mayoría de software SIG de escritorio tanto en un entorno de software libre (*QGIS*, por ejemplo) como en un entorno de software propietario (*ArcGIS*®, por ejemplo). Puesta en servicio, testada y comprobada su consistencia, la base de datos *PostGIS* ha sido substituida por una base de datos en entorno *ORACLE*®.

6. Resultados

Una vez ha sido definido el modelo conceptual y la auditoria del proyecto ha podido analizar el estado en el que se encuentra la información vectorial en formato CAD del conjunto de *As-builts*, se procede a integrar y convertir dichos *As-builts* al modelo de datos definido. Con la carga de estos, cualquier usuario final puede conectarse a la base de datos y según sus credenciales, explotar dicha base de datos en modo consulta o en modo edición.

En paralelo a esta tarea que forma parte del núcleo central del proyecto y, aprovechando las sinergias que facilita la tecnología, el proyecto de digitalización de la infraestructura tranviaria ha generado hasta tres productos adicionales no por ello menos importantes en tanto que reducen las visitas a campo y ofrecen un nuevo entorno colaborativo de trabajo:

- Captura de imágenes panorámicas georreferenciadas del tranvía al estilo de las que proporciona Google Street View©: a partir del uso de una cámara 360° embarcada en un vehículo, se ha recorrido toda la infraestructura tranviaria y capturado el mosaico de fotografías que permiten la consulta interactiva, así como la navegación en un entorno web a lo largo de toda la franja de protección del tranvía.



Figura 5. Imagen panorámica de la infraestructura tranviaria

Fuente. Elaboración propia

- Captura de la nube de puntos lidar⁷ de la infraestructura tranviaria a partir del escaneo mediante láser transportado en un vehículo⁸.



Figura 6. Detalle de la nube de puntos lidar

Fuente. Elaboración propia

⁷ Lidar es una técnica de teledetección óptica que mediante el uso de una luz láser permite obtener una densa muestra de la superficie de la tierra con exactas medidas en x, y y z. La tecnología LÍDAR produce datasets masivos en forma de nubes de puntos que pueden ser administrados, visualizados y analizados en un entorno SIG.

⁸ La captura o *mobile mapping* es una captura dinámica llevada a cabo mediante una integración de sensores embarcados en un vehículo. El conjunto de sensores está formado por: odómetro, sistema inercial, receptor GNSS, cámara esférica de 360° y lidar. El recorrido genera una nube de puntos en 3D del entorno, así como el conjunto de imágenes esféricas de 360° cada 5 m en el sistema oficial de coordenadas del propio proyecto.

- Modelado de una estación tipo en un entorno BIM: a partir de la nube de puntos lidar y de la cartografía recogida en la base de datos se ha procedido a modelar en 3D una estación de la infraestructura tranviaria a modo de prueba según parámetros preestablecidos en la clasificación *GuBIMclas*⁹.

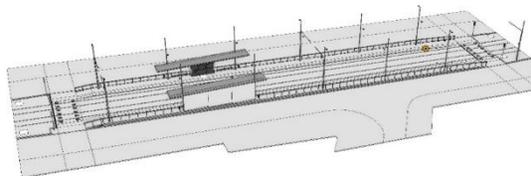


Figura 7. Detalle de la estación de Can Rigal en entorno BIM

Fuente. Elaboración propia

7. Conclusiones

Poder disponer de toda esta información en una base de datos homogénea constituye, en primer lugar, un hito histórico tanto para la propia ATM en tanto que administración responsable del proyecto, cómo ejercicio de digitalización de una infraestructura lineal y a su vez, ferroviaria que vaya más allá de la mera conceptualización.

Una vez se han migrado los datos desde un entorno CAD a un entorno SIG, podemos afirmar que:

1. Disponer del cuadro de activos de la red tranviaria de Barcelona en un entorno SIG permite un control de calidad, de mantenimiento de la información y de actualización de los cambios mucho más eficiente de cómo se controlaba, se mantenía y se actualizaba bajo un ecosistema en formato CAD.
2. La definición y ejecución del modelo conceptual de datos tal y como se ha planteado, permite incorporar la tecnología BIM de manera relativamente sencilla en futuras incorporaciones de nuevos activos o de nueva infraestructura. Más allá del modelado tridimensional de los objetos geométricos, la base de datos es lo suficientemente robusta para poder incorporarse a nivel BIM-2 de robustez¹⁰ en un entorno de trabajo 100 % BIM.
3. Este proyecto pone en valor cómo una infraestructura física puede y debe disponer de un gemelo digital en forma de infraestructura digital. Poder disponer de un gemelo digital en forma de representación virtual, en este caso de una infraestructura lineal como el caso del tranvía del área de Barcelona, puede servir para examinar su diseño, testear cambios potenciales, así como detectar errores no identificables en la vida real.

⁹ Esta clasificación es la utilizada por los actores principales del sector BIM y traslada los elementos del modelo conceptual 2D a 3D. A diferencia del modelo 2D, el modelo 3D utiliza una base de datos propia definida por: muros exteriores, elementos arquitectónicos, elementos estructurales, elementos eléctricos, elementos mecánicos y tuberías y canalizaciones.

¹⁰ Actualmente existen cuatro niveles de madurez de la tecnología BIM. El nivel BIM-0 tiene un nivel bajo de colaboración, la información se produce en 2D y los ficheros digitales generados se comparten separando las fuentes de información. El nivel BIM-1 tiene un nivel intermedio de colaboración. Los equipos de trabajo utilizan entornos CMD (*Common Data Environment*) para recolectar, gestionar y compartir la información. El desarrollo de los proyectos y la producción de información combina dibujos en 2D y en 3D. El nivel BIM 2 ya tiene un nivel de colaboración plena. Toda la información se modela en 3D y comparte un mismo modelo de datos (tipo IFC o *Industry Foundation Classes*) que ya es capaz de incorporar la variable tiempo y la variable coste en el proyecto. El nivel BIM-3 o de plena integración (iBIM) incorpora el modelo en sistema basados en el *cloud* y cualquiera que esté involucrado en el proyecto, tiene acceso a la información de acuerdo con los roles que se le hayan asignado a la largo de todo el ciclo de vida de la infraestructura. Más información en Bermejo *et al.* (2018) y Biljecki, F *et al.* (2019).

4. Gracias a incorporar datos lidar de toda la infraestructura tranviaria, se pueden aplicar tareas de mantenimiento predictivo o incluso mantenimiento basado en la condición o bien como apoyo a sistemas de asistencia y ayuda a la conducción (ADAS).

Por ello, este proyecto de diseño de una infraestructura digital supone un hito en tanto que ha de permitir una gestión inteligente de las estaciones del tranvía, el tráfico que genera, el flujo de pasajeros y su interrelación con su entorno urbano próximo. Gracias a esta digitalización, se inicia la posibilidad de un mejor control de activos encaminado a mejorar la monitorización de toda la red, su mantenimiento y su control predictivo con capacidad para adelantarse a averías y otros incidentes. La digitalización exhaustiva de esta infraestructura es un claro ejemplo de mejora en la gestión de la movilidad, imprescindible para poder afrontar un futuro mucho más sostenible en términos medioambientales y mucho más eficiente en términos de seguridad con el objetivo intrínseco de convertir nuestras ciudades en espacios más respirables, más verdes, más silenciosos y, en definitiva, más agradables.

Referencias bibliográficas

Alvarez-Palau, E.J. & Aguilar, A. (2015). Accesibilidad territorial ferroviaria y distribución de población: Inglaterra y Gales, 1871 – 1931. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 15, 75–104.

Autoritat del Transport Metropolità (2019). *Evolució de la demanda del tramvia Metropolità*. Autoritat del Transport Metropolità. Barcelona.

Avramović Z.Ž., Marinković D.M., Lastrić I.T. (2019). Digitalization of Railways – ICT Approach to the Development of Automation, *JITA – Journal of Information Technology and Applications Banja Luka*, PanEuropean University APEIRON, Banja Luka, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina, JITA 9, 1:17-23, (UDC: 656.2: [621.313:681.5), Volume 9, Number 1, Banja Luka, June 2019 (1-48), ISSN 2232-9625 (print), ISSN 2233-0194 (online), UDC 004. DOI: [10.7251/JIT1901017A](https://doi.org/10.7251/JIT1901017A)

Bermejo, F., Coloma, E., Diéguez, F.J., Pérez, I., Roig, V. & Soldevilla, J.I. (2018). *Llibre blanc sobre la definició estratègica d'implementació BIM a la Generalitat de Catalunya*. Generalitat de Catalunya i Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya. Departament de Territori i Sostenibilitat. Barcelona.

Biljecki, F. & Tauscher, H. (2019). “Quality of BIM-GIS Conversion” en International Society for Photogrammetry and remote sensing. *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-4/W8. Singapore. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W8-35-2019>

Bravo, R. (2022). *Usabilidad en la gestión de datos LIDAR: De la construcción de un visor web al análisis de la interferencia de la vegetación sobre la infraestructura tranviaria de Barcelona*. METIP. Trabajo fin de máster. Facultad de Filosofía y Letras, Universitat Autònoma de Barcelona.

Capel, H. (2011). *Los ferro-carriles en la ciudad. Redes técnicas y configuración del espacio urbano*. Madrid. Colección de Historia Ferroviaria. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

Del Río, E., Martí-Henneberg, J. & Valentín, A. (2008). La Evolución de la red ferroviaria en el Reino Unido (1825-2000). *Treballs de La Societat Catalana de Geografia*, 65: pp. 654–663.

Dupuy, G. (1991). *L'urbanisme de les xarxes. Teories i mètodes*. Barcelona. Editorial Oikos-tau

Feyen E. (2017). *Digitalisation in road-rail combined transport*. Presentation delivered at IRFC 2017. International Rail Forum & Conference, Prague, 22 March 2017.

Font, J. (1999). *La transformació de les xarxes de transport a Catalunya (1761-1935)*. Barcelona. Editorial Oikos-tau

Jiménez, A., Vázquez, F.J. & Calzado, A. (2022). Individualización de copas en encinares (*Quercus ilex* L.) mediante el empleo de técnicas de segmentación de imágenes y clasificación por objetos. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 29, 131–144. <https://doi.org/10.21138/GF.693>

LLEI 4/2006, de 31 de març, Ferroviària. Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya, núm. 4611, del 10 d'abril de 2006.

Lotz, C., Ott, A., Stern, S. & Vandieken, T. (2020). *Digitizing Europe's railways: A call to action*. McKinsey & Company.

Martí-Henneberg, J. (2021). “From State-Building to European Integration: The Role of the Railway Network in the Territorial Integration of Europe, 1850–2020”. *Social Science History*, vol. 45, no 2, 221–231. <https://doi.org/10.1017/ssh.2021.7>

Martí-Henneberg, J. (2017). The influence of the railway network on territorial integration in Europe (1870–1950). *Journal Of Transport Geography*, 2017, vol. 62, p. 160–171. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2017.05.015

Martí-Henneberg, J., Alvarez-Palau, E.J. (2017). HSR and the city: Accessibility to stations and intermodality. Evaluating High-Speed Rail Interdisciplinary perspectives en Daniel Albalade y Germà Bel (Ed.): *Evaluating High-Speed Rail: Interdisciplinary Perspectives*, Routledge, 82–99.

Martí-Henneberg, J. (2015). Challenges facing the expansion of the high-speed rail network. *Journal Of Transport Geography*, 2015, vol. 42, 131–133.

Martí-Henneberg, J. (2013). European integration and national models for railway networks (1840–2010). *Journal Of Transport Geography*, 2013, vol. 26, 126–138.

Martín, A.M., Domínguez, J. & Amador, J. (2016). Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 18, 147–167.

SAFE SOFTWARE (2019): FME® Desktop 2019.2 Administrator's Guide. Surrey. Canadá.

SAFE SOFTWARE (2019): FME® Transformer. Reference Guide. Surrey. Canadá.

Sánchez, J. & Lerma, J.L. (2012). Actualización de cartografía catastral urbana mediante LIDAR y SIG. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 12, 53–70.

Solanas, J., Alvarez-Palau, E.J. & Martí-Henneberg, J. (2015). Estación ferroviaria y ciudades intermedias: lectura geo-espacial del crecimiento urbano mediante indicadores SIG vectoriales. El caso de Cataluña (1848 – 2010). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 16, 253–280.