
This is the **published version** of the bachelor thesis:

Mateos Baena, Pau; Vázquez Castro, Ángeles, dir. Digital twins for urban sustainability. 2025. 13 pag. (Grau en Gestió de Ciutats Intel·ligents i Sostenibles)

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/317302>

under the terms of the  license

DIGITAL TWINS FOR URBAN SUSTAINABILITY

Resumen Este proyecto se centra en la implementación de Digital Twins para mejorar la planificación urbana y la eficiencia energética. La solución propuesta integra sensores inteligentes con modelos digitales que optimizan el uso de recursos y facilitan la toma de decisiones basada en datos. A través del análisis de casos de estudio en Singapur, Londres y Barcelona, se demuestra su impacto en la gobernanza, la sostenibilidad y la resiliencia urbana. Además, se exploran desafíos como costos, seguridad de datos y escalabilidad, junto con recomendaciones para su implementación efectiva.

Palabras clave: Digital Twins, Ciudades Inteligentes, Sostenibilidad Urbana, IoT, Big Data, Gobernanza, Gestión Energética.

Abstract This project focuses on the implementation of Digital Twins to enhance urban planning and energy efficiency. The proposed solution integrates smart sensors with digital models that optimize resource use and facilitate data-driven decision-making. Through case studies in Singapore, London, and Barcelona, the impact on governance, sustainability, and urban resilience is demonstrated. Additionally, challenges such as cost, data security, and scalability are explored, along with recommendations for effective implementation.

Keywords: Digital Twins, Smart Cities, Urban Sustainability, IoT, Big Data, Governance, Energy Management.

1. Introducción

1.1. Contexto y relevancia del tema

Las ciudades actuales afrontan desafíos en el siglo XXI por el crecimiento demográfico en constante aumento y la urbanización rápida que requiere la implementación necesaria de modelos sustentables y ecoamigables para asegurar un futuro sostenible para todos los habitantes. En este contexto cambiante de las ciudades actuales, las tecnologías digitales han surgido como herramientas imprescindibles para mejorar la planificación urbanística y garantizar una gestión eficiente de los recursos disponibles en entornos urbanos de más complejidad. Dentro de estas tecnologías nuevas, los Digital Twins han mostrado al mundo un potencial enorme para revolucionar la manera en la que se diseñan las ciudades modernas.

Un Digital Twin es una representación virtual en constante evolución de un entorno físico que combina datos recopilados en tiempo real, simulaciones y evaluaciones predictivas para mejorar la toma de decisiones en la administración de infraestructuras urbanas y optimizar el uso de energía para mejorar la calidad de vida de los residentes. La integración de sensores IoT junto a la inteligencia artificial y análisis de big data facilitan la recopilación y estudio de información a gran escala y los gobiernos y urbanistas cuentan ahora mismo una herramienta muy poderosa a su alcance para enfrentar problemas como son la congestión del tráfico, residuos y la disminución de emisiones de CO₂.

Este estudio investiga de qué manera los Digital Twins pueden ayudar en la sostenibilidad urbana mediante el análisis de casos exitosos y la evaluación de sus ventajas en términos de eficiencia energética y planificación urbana sostenible además de fomentar la participación de los ciudadanos.

1.2. Objetivos del estudio

Este trabajo tiene como objetivo analizar quel impacto tienen los Digital Twins en la sostenibilidad urbana, identificando oportunidades, beneficios y desafíos en su implementación dentro del contexto de las ciudades inteligentes y sostenibles. Dado esto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Comprender tanto el concepto como el funcionamiento de los Digital Twins en la sociedad actual , así como las tecnologías que los hacen posibles.
2. Estudiar su aplicación en la planificación urbana y la gestión de recursos, dando especial importancia en la sostenibilidad y la eficiencia energética.
3. Analizar casos de estudio de ciudades que ya han implementado Digital Twins, estudiando sus beneficios y limitaciones.

4. Identificar los desafíos y barreras para la el uso de esta tecnología, que incluirá aspectos tecnológicos, económicos i también éticos.

5. Realizar propuestas de recomendaciones para implementar de manera efectiva los Digital Twins en la planificación de las ciudades sostenibles actuales.

6. Aplicar el concepto de los Digital Twins a un caso real de mi localidad (Ripollet), analizando en las zonas de mayor congestión de tráfico y realizar por ello una propuesta que se adapte a las necesidades del municipio.

7. Realizar una simulación comparativa donde se pueda ver el impacto de los Digital Twins, a través de análisis para ver como variaría el tiempo medio de espera y la contaminación. También analizar como cambiará el bienestar de la población y el beneficio potencial en términos de sostenibilidad.

1.3. Metodología de investigación

Para alcanzar los objetivos que me he propuesto en este trabajo de final de grado, utilizaré una metodología mixta, que combinará un análisis cualitativo y cuantitativo de fuentes documentales; donde se analizará literatura científica y documentos de organismos internacionales de Digital Twins, y estudios de caso; donde evaluaré las iniciativas de ciudades importantes como Singapur, Londres y Barcelona para el uso de esta tecnología en optimizar la planificación urbana.

2. Marco teórico

2.1. Definición de Digital Twin

El concepto de Digital Twin se refiere a una réplica virtual de un sistema, infraestructura o entorno físico que se va actualizando constantemente en tiempo real con datos aportados por sensores, dispositivos IoT (Internet of Things) y algunas otras fuentes de información. Este modelo lo que hace es simular, analizar y predecir el comportamiento del sistema real, mejorando la toma de decisiones, la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad de vida de los ciudadanos.

El término “Digital Twin” se ha introducido por Michael Grieves en 2002 en el contexto de la industria manufacturera, pero su aplicación ha evolucionado mucho en múltiples sectores, sobre todo en la planificación de ciudades inteligentes.

En el ámbito urbano, los Digital Twins pueden llegar a modelar tráfico, calidad del aire, consumo energético, distribución del agua, gestión de residuos y otros aspectos clave que benefician de manera exponencial a la sostenibilidad.

2.2. Tecnologías clave en Digital Twins (IoT, Big Data, IA, GIS, Edge Computing)

Los Digital Twins combinan diferentes tecnologías

complejas para su funcionamiento. Las más relevantes son:

2.2.1 Internet de las Cosas (IoT)

Los dispositivos IoT son fundamentales para recoger datos en tiempo real. Estos sensores instalados en infraestructuras urbanas son capaces de monitorear variables como temperatura, humedad, tráfico y consumo energético, enviando información en tiempo real al modelo digital.

2.2.2 Big Data y Análisis Predictivo

Los Digital Twins tienen grandes volúmenes de datos que necesitan herramientas avanzadas de Big Data para almacenar, procesar y analizar datos. Gracias al aprendizaje automático (Machine Learning), estos sistemas pueden llegar a predecir eventos y optimizar la gestión urbana.

2.2.3 Inteligencia Artificial (IA) y Modelado Predictivo

La Inteligencia Artificial hoy en día es, sin lugar a dudas, uno de los pilares fundamentales que permiten el buen funcionamiento de los Digital Twins. Ya no solo por representar digitalmente un entorno físico, sino por dar a ese entorno virtual de la capacidad de aprendizaje, anticipación y toma de decisión basada en un gran volumen de datos en tiempo real.

Algoritmos de Machine Learning y Deep Learning permiten analizar patrones complejos en los datos que se recogen de la ciudad —como flujos de tráfico, niveles de contaminación, consumo energético o comportamientos de movilidad ciudadana. Gracias a estos modelos, un Digital Twin no solo puede ver lo que está ocurriendo en ese momento, sino predecir lo que posiblemente pasará en los próximos minutos, horas o días.

Como ejemplo personal, en mi entorno urbano en Ripollet, un sistema basado en IA puede llegar a identificar que todos los martes a las 8:00 h se genera una congestión puntual en la rotonda del Pont Vell. Con esa información, se pueden lanzar alertas, ajustar dinámicamente los semáforos o incluso proponer rutas alternativas a través de una app del municipio. Este tipo de análisis predictivo transforma la gestión urbana en un modelo proactivo.

2.2.4 Sistemas de Información Geográfica (GIS)

Los Sistemas de Información Geográfica, conocidos como GIS, aportan mucho al ecosistema de los Digital Twins. No se trata únicamente de mostrar la ciudad en un mapa, sino de juntar capas de información geo espacial con datos dinámicos y análisis de mayor complejidad.

Gracias a estos sistemas, es posible superponer sobre el entorno urbano representado digitalmente varios tipos de información como: el flujo de peatones, flujo de vehículos, densidad de árboles, niveles de ruido, contaminación del aire o temperatura urbana. Esta

visualización, también, permite detectar zonas conflictivas, puntos calientes o desequilibrios territoriales de un vistazo.

En el caso de mi localidad, Ripollet, un GIS bien integrado con un Digital Twin puede, por ejemplo, analizar en el mismo mapa la relación entre la congestión vehicular en los accesos a la C-58 y la calidad del aire en las escuelas cercanas.

2.2.5 Edge Computing y Cloud Computing

En una ciudad conectada, donde existen datos constantemente desde muchísimos sensores, semáforos, cámaras, estaciones meteorológicas, contadores de energía, es muy importante contar con una tecnología capaz de procesar esa información de forma rápida y eficiente. Aquí es donde entran en juego el Cloud Computing y el Edge Computing.

El Cloud Computing permite almacenar, procesar y analizar grandes volúmenes de datos en servidores remotos, con enorme potencia computacional. Es ideal para realizar análisis históricos, entrenamiento de modelos de IA o almacenar grandes bases de datos municipales.

Por otra parte, el Edge Computing permite que parte del procesamiento se realice todavía más cerca del lugar donde se generan los datos, o sea, directamente en el sensor, en el semáforo inteligente o en una pasarela urbana. Esto hace que el tiempo entre que se detecta por ejemplo, una retención de tráfico y se toma una decisión, como activar un desvío, disminuya. Los costes también se reducen de transmisión de datos y la dependencia del ancho de banda.

En combinación, estos dos sistemas garantizan que un Digital Twin funcione a la perfección, con fluidez, tanto para tareas más complejas como para respuestas inmediatas necesarias en el día a día.

2.3. Relación entre Digital Twins y ciudades inteligentes

Los Digital Twins están muy relacionados con el concepto de ciudad inteligente, ya que uno de los mayores propósitos es mejorar la calidad de vida de los ciudadanos mediante el uso de los recursos digitales. Según la Comisión Europea, una ciudad inteligente se basa en la integración de infraestructuras digitales para mejorar la sostenibilidad, la eficiencia y la gobernanza.

Los principales beneficios de los Digital Twins en ciudades inteligentes incluyen:

1. Optimización del tráfico y movilidad sostenible: Es uno de los usos más directos y visibles de los Digital Twins, y se encarga de modelar y simular el tráfico en tiempo real. Estos recopilan datos constantemente que vienen de sensores y cámaras, las autoridades pueden visualizar en un entorno virtual cómo se comporta la movilidad en una ciudad, identificar cuellos de botella y puntos críticos, y prever congestiones de tráfico antes de

que sucedan.

Esto ayuda a ajustar constantemente los tiempos de semáforo, proponer rutas que puedan usar como alternativas e incluso diseñar otros nuevos carriles o zonas de bajas emisiones. También, esto se puede aplicar para mejorar la eficiencia del transporte público, ajustando los tiempos y recorridos en función de la demanda real.

2. Gestión eficiente del consumo energético: Gracias a la ayuda de sensores conectados, los Digital Twins permiten analizar cómo se consume la energía tanto en: edificios públicos como privados, en redes de alumbrado, estaciones de carga eléctrica e infraestructuras críticas.

A partir de esta información, detectan patrones inefficientes, prevén grandes picos de consumo y optimizan el uso de los recursos.

3. Control de calidad del aire y medio ambiente: Es otra ventaja esencial de los Digital Twins, ya que tienen capacidad para analizar e integrar variables ambientales como niveles de CO₂, partículas en suspensión (PM10), temperatura y humedad.

Si observamos estos datos sobre el mapa de una ciudad en 3D, podemos entender como factores como el tráfico o la concentración de industrias afectan la calidad del aire. Además, los Digital Twins pueden simular el impacto de medidas específicas, como peatonalizar calles o ampliar zonas verdes, antes de implementarlas en la realidad.

4. Planificación urbana basada en datos: Hoy en día, es posible simular de forma anticipada el impacto de nuevas infraestructuras, proyectos urbanísticos o incluso escenarios de crecimiento poblacional.

Un ejemplo que puedo poner de esta aplicación es Virtual Singapore, un modelo digital 3D de toda la ciudad-estado que permite a las grandes autoridades visualizar datos en tiempo real y tomar decisiones que se basan en evidencias determinadas. Esto ha sido utilizado para la planificación de construcción de viviendas, simular evacuaciones de casos de emergencia y diseñar rutas de accesibilidad alternativas y adicionales para personas con movilidad reducida.

2.4. Digital Twins y su impacto en la sostenibilidad urbana

La sostenibilidad de las ciudades actuales, exige equilibrar el desarrollo económico, bienestar social y cuidado ambiental. Por eso, los Digital Twins están siendo un antes y un después en de que manera las ciudades pueden abordar estos retos de forma inteligente y eficiente..

2.4.1 Reducción del consumo de energía

La eficiencia energética es una de las aplicaciones más destacadas, ya que los Digital Twins pueden detectar patrones de consumo en infraestructuras públicas y

privadas y proponer ajustes automáticos para reducir el gasto sin que disminuya el confort. Como ejemplo, en edificios inteligentes se puede adaptar el uso de calefacción e iluminación dependiendo de la ocupación real del espacio o las condiciones climáticas del exterior, disminuyendo así tanto los costes como emisiones.

3. Aplicaciones de los Digital Twins en la planificación y sostenibilidad urbana

Los Digital Twins han revolucionado la planificación y gestión urbana al proporcionar una representación virtual de la ciudad en tiempo real. Esto permite a los urbanistas, gobiernos y empresas tomar decisiones basadas en datos, optimizando el uso de recursos y mejorando la sostenibilidad. A continuación, se analizan sus principales aplicaciones en la planificación urbana y la eficiencia de recursos.

3.1. Optimización de recursos urbanos (agua, energía, transporte, residuos)

Uno de los principales beneficios de los Digital Twins es su capacidad para optimizar el uso de recursos urbanos esenciales, mejorando la eficiencia y reduciendo el impacto ambiental.

3.1.1 Gestión inteligente del agua

La gestión de residuos y recursos hídricos, tiene su importancia, ya que mediante la implementación de sensores IoT en los sistemas de recogida o distribución, los Digital Twins pueden trazar recorridos más eficientes para los camiones de basura e incluso detectar fugas de agua en redes subterráneas antes de que puedan producirse daños mayores. Esto mejora tanto la eficiencia operativa, y hace que no se desperdicien tantos recursos.

3.1.2 Optimización energética

- Predicción y gestión del consumo de electricidad en edificios mediante modelos de simulación.
- Integración con redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) para equilibrar la oferta y la demanda.
- Identificación de áreas donde la instalación de paneles solares o turbinas eólicas puede ser más efectiva.

Ejemplo: Ámsterdam usa un Digital Twin para optimizar el consumo energético en edificios públicos.

3.1.3 Mejora de la movilidad y reducción del tráfico

En cuanto a la movilidad, los modelos predictivos de los Digital Twins pueden anticipar niveles de congestión en tiempo real y proponer rutas alternativas tanto para vehículos privados como para el transporte público. Además, ayudan a planificar medidas como la peatonalización de algunas zonas, creación de carriles bici o la redistribución de semáforos, basándose en datos en tiempo real del flujo de tráfico. Este enfoque no solo

mejora la fluidez del tráfico, sino también se reducen las emisiones de los vehículos.

3.2. Simulación y modelado para la planificación urbana

Los Digital Twins permiten crear escenarios virtuales donde se pueden probar diferentes estrategias antes de aplicarlas en el mundo real. Esto es especialmente útil para la planificación de infraestructuras, zonas verdes y expansión urbana.

3.2.1 Evaluación del impacto de nuevas infraestructuras

Con la ayuda de los Digital Twins se pueden prever los efectos que tendrían nuevas infraestructuras en Ripollet previo a construirlos. Por ejemplo, he podido simular cómo afectaría al tráfico la apertura de una nueva zona comercial cerca de la rotonda del Pont Vell. Al tener datos en tiempo real, se puede anticipar un posible colapso si no se rediseñan los accesos o no se mejoran la coordinación de los semáforos. Este tipo de simulaciones ayudan a distribuir mejor los servicios urbanos, como paradas de bus y carriles bici, pensando en que todos los barrios tengan un acceso por igual. Otro ejemplo parecido se ha visto en el caso de Virtual Singapore, donde antes de autorizar obras, evalúan el impacto urbano con modelos 3D detallados.

3.2.2 Creación de ciudades más sostenibles

También he hecho el estudio con modelos que permiten ver cómo se pueden introducir más zonas verdes o puntos de recarga de vehículos eléctricos con el fin de mejorar la calidad del aire o reducir las islas de calor en zonas muy urbanizadas como por ejemplo, el casco antiguo de Ripollet. Al aplicar esto, he comprobado que colocar árboles o espacios peatonales de manera estratégica, incluso en calles más estrechas, puede tener efectos reales en la temperatura ambiente y la salud urbana. En ciudades como por ejemplo Helsinki, ya están aplicando estos modelos para planificar más espacios verdes, y pienso que en mi municipio de Ripollet también podríamos seguir esa línea con algunas medidas pensadas con datos

3.3. Integración con sistemas de gestión en tiempo real

El hecho de que los Digital Twins se puedan conectar con plataformas de gestión urbana en tiempo real es una ventaja muy grande. Esto hace que, por ejemplo, supervisar el estado de infraestructuras como puentes o redes eléctricas y detectar fallos previamente a que ocurran problemas mayores. También es útil en la prevención y respuesta a emergencias: se pueden hacer simulaciones de posibles de inundaciones o incendios y actuar con antelación ante estos escenarios.

3.4. Beneficios en reducción de emisiones y mejora de eficiencia energética

Gracias a la capacidad que tienen los Digital Twins de

simular y analizar datos en tiempo real, son capaces de optimizar la movilidad urbana y reducir a grande escala las emisiones contaminantes. Por ejemplo si ajustamos los flujos de tráfico en horas de alta congestión, lograremos reducir la cantidad de vehículos parados o circulando lentamente, lo que reduce también las emisiones de CO₂. Todo esto facilita un modelo de ciudad menos dependiente del coche y más orientado al transporte sostenible. Un buen ejemplo es Copenhague, donde ya se están usando Digital Twins para diseñar estrategias concretas de descarbonización urbana.

4. Casos de estudio y aplicaciones reales

En este capítulo, veremos casos de principales encuestas de algunas ciudades al implementar esta tecnología, evaluando sus beneficios y efectividad.

4.1 Singapur: Virtual Singapore

Contexto y objetivos del proyecto

Singapur hoy día, es un referente mundial cuando hablamos de ciudades inteligentes. La ciudad está presente en uno de los proyectos más ambiciosos en este ámbito, que es Virtual Singapore, una plataforma que está desarrollada por el Instituto A*STAR y colabora con las autoridades de tierras y el Comité de Desarrollo Urbano del país. La meta de este proyecto es la creación de una réplica digital tridimensional de la ciudad que pueda integrar datos en tiempo real y apoyar la toma de decisiones urbanas. Esta, trata de dar a los gestores urbanos una herramienta compleja y desarrollada para planificar mejor, optimizar recursos y construir una ciudad más sostenible y preparada para el futuro.

Aplicaciones y beneficios

Entre sus usos puedo destacar la simulación del consumo energético en edificios de la ciudad, lo que ha permitido mejorar la eficiencia y reducir el gasto. En el ámbito de la movilidad, permite modelar el tráfico en tiempo real, anticiparse a posibles congestiones y tomar decisiones que faciliten el tráfico. También, ha servido para estudiar la calidad del aire y diseñar estrategias concretas para reducir la contaminación urbana. Con esto, podemos decir que Virtual Singapore ayuda a planificar nuevas infraestructuras con una mejor distribución del espacio y un uso más racional del suelo.

Impacto

Los resultados en la ciudad de Singapur han sido buenos, ya que, no solo se han reducido costes en la planificación, sino que se ha conseguido una gestión más eficiente de los recursos. Además, podemos decir que los Digital Twins han abierto la puerta a una mayor participación ciudadana, debido a que, gracias a esta tecnología, los residentes pueden visualizar cómo quedarán nuevos proyectos urbanos antes de ejecutarlos, obteniendo más confianza en las decisiones urbanísticas.

4.2 Londres: Digital Twin en infraestructura y movilidad

Contexto y objetivos del proyecto

Otra de las capitales importantes europeas que ha apostado fuerte por los Digital Twins es Londres. El enfoque de la ciudad con más de 8 millones de habitantes, se ha centrado principalmente dos retos: la gestión de las infraestructuras urbanas y la mejora de la movilidad. El proyecto lo lidera el Centre for Digital Built Britain (CDBB) con el Ayuntamiento de Londres y su meta principal es introducir en una misma plataforma digital una enorme cantidad de datos que vienen de distintos servicios públicos.

Aplicaciones y beneficios

El Digital Twin es capaz de anticiparse a problemas en el transporte mediante el análisis de flujos de pasajeros y vehículos, optimizando así las rutas del transporte público. Se hacen simulaciones de respuestas ante posibles emergencias previstas, mejorando la capacidad de reacción del gobierno local. También, se ha utilizado para ver el impacto de nuevas políticas medioambientales y el efecto que tienen sobre las emisiones contaminantes.

Impacto

Gracias a los Digital Twins, Londres ha conseguido mejorar mucho la eficiencia del transporte, reducir los tiempos de llegada y gestionar de manera más inteligente su infraestructura de Londres.

4.3 Barcelona: Digital Twin para la gestión urbana

Contexto y objetivos del proyecto

Barcelona, que se conoce en el territorio internacional por apostar pronto por la innovación de las ciudades, se ha convertido en una de las ciudades pioneras en introducir un modelo de Digital Twin con foco en la gestión integral de los servicios públicos y de la sostenibilidad. Este modelo capta datos en tiempo real sobre consumo energético, movilidad, calidad del aire y gestión de residuos. La meta principal es aumentar la eficiencia de los servicios municipales y llevar a cabo decisiones en las ciudades basadas en evidencias.

Aplicaciones y beneficios

El Digital Twin puede ajustar el alumbrado público de Barcelona de forma dinámica según la densidad de tránsito o la actividad que haya en cada zona, lo que hace disminuir el gasto energético sin poner en compromiso la seguridad. Por lo que hace la gestión de residuos, los sensores instalados en los contenedores trazan rutas más eficientes de recogida, reduciendo también costes y emisiones. También, se monitoriza constantemente la calidad del aire, ayudando a las autoridades a anticiparse a episodios de contaminación y evaluar de manera precisa el

efecto de nuevas políticas medioambientales. Además, el modelo se utiliza para proyectar el impacto de futuras obras urbanísticas, como poner nuevos parques o pasos de peatones.

Impacto

Esta tecnología ha echo de Barcelona, un referente europeo en la gestión urbana inteligente, enseñando que la digitalización puede traducirse en mejoras tangibles para la vida diaria de los ciudadanos de la capital de Catalunya.

5. Impacto en la gobernanza y participación ciudadana

Los Digital Twins hacen mucho más que favorecer la planificación urbana y la gestión de recursos; también transforman la gobernanza y la participación de los ciudadanos. Al ofrecer modelos digitales realistas y en tiempo real de las ciudades, estos instrumentos permiten a los gobiernos argumentar sus decisiones, aumentar la transparencia y facilitar la participación de los ciudadanos en el desarrollo de las ciudades.

5.1 Transparencia y accesibilidad de la información para ciudadanos

Los Digital Twins tienen la capacidad de transformarse en plataformas abiertas en las cuales los ciudadanos, empresas y las organizaciones pueden ver en tiempo real, mucha información sobre su ciudad. Esto provoca una gran transparencia en el gobierno y fomenta en gran parte la confianza en las administraciones públicas.

Uno de los beneficios más importantes de un Digital Twin en las ciudades urbanas es permitir acercar los datos a los ciudadanos y hace que se genere transparencia. Gracias a esto, cada dia más ciudades habilitan portales públicos donde cualquier residente de la ciudad puede ver esa información en tiempo real en aspectos como la calidad del aire, el trafico o el consumo energético en diferentes zonas de un mismo municipio. Esto empodera tanto a la población con datos útiles como ayuda a concienciar en la sostenibilidad urbana.

También, los gobiernos que se lanzan a los Digital Twins pueden justificar su toma de decisión basándose en datos demostrables, y de esa manera dejando poco margen a decisiones arbitrarias. Por ello, esto favorece una gestión que se orienta cada vez más al bien común.

Un ejemplo que tomo como referencia es el de la ciudad de Helsinki, donde se han desarrollado un portal digital al alcance de todos los ciudadanos, donde estos pueden ver en 3D la planificación de desarrollo urbano y consultar todos los datos relacionados con los ámbitos que he nombrado anteriormente. Con esto, se demuestra que los Digital Twins no son solo sirven para planificar, sino que también están activamente involucrados quienes viven en la ciudad.

5.2 Digital Twins como herramienta para la resiliencia urbana

Los Digital Twins cada vez más se están convirtiendo en una herramienta essencial para que las ciudades puedan reaccionar y anticiparse de manera eficaz a emergencias.

Un ejemplo que puedo destacar es Nueva York, que ha implementado los Digital Twins para anticiparse a inundaciones y así reforzando sus planes de actuación en caso de huracanes, mejorando de ese modo su velocidad de respuesta.

5.3 Fomento de la participación ciudadana en el diseño urbano

Los Digital Twins pueden dar lugar a una planificación urbana más participativa ya que gracias a la visualización en 3D, los ciudadanos pueden ver cómo se verán nuevas edificaciones antes de que la construcción de estas, opinar sobre ellas y proponer cosas a mejorar.

Un buen ejemplo que puedo poner es Barcelona, donde ya se está utilizando un Digital Twin con el fin de que los vecinos de la ciudad puedan ver obras urbanas y aportar ideas que se les ocurren antes de que las estas se pongan en marcha.

6. Limitaciones y desafíos

Pese a las ventajas que ofrecen los Digital Twins, su implementación en las ciudades también se enfrenta a algunas limitaciones.

Entre estas se encuentran los de tipo tecnológico, económico, social y regulatorios lo que provoca que la integración de los Digital Twins en todas las ciudades no pueda ser posible.

En este capítulo analizaré las principales limitaciones y obstáculos que hay que superar para aprovechar al cien por cien el potencial de los Digital Twins con el objetivo de fomentar la sostenibilidad de las ciudades.

6.1 Retos tecnológicos y computacionales

A pesar de que los Digital Twins ofrecen enormes alternativas y posibilidades en la gestión urbana, también cuentan con desafíos técnicos relevantes. Para que funcionen correctamente, los Digital Twins tienen que tener una infraestructura tecnológica sólida con mucha capacidad de cómputo, almacenamiento en masa, conexión constante entre sistemas y sobre todo, una gestión eficiente de todos los datos en tiempo real.

Uno de los retos más ambiciosos es el manejo de los datos. Un Digital Twin de una ciudad es capaz de recibir información continuamente de infinidad de sensores repartidos por toda una misma ciudad, como cámaras de tráfico, estaciones meteorológicas, sensores de calidad del aire o contadores de energía. Todos estos datos necesitan procesarse y analizarse casi al momento, lo que exige servidores superpotentes y algoritmos superdesarrollados

y avanzados de IA.

Aparte, no todas las ciudades cuentan con sistemas digitales bien integrados, debido a que, muchas infraestructuras digitales de muchos municipios son antiguas o no están coordinadas entre sí, lo que hace difícil crear una única plataforma común. También hay otro reto en el ámbito de la ciberseguridad por qué, cuanto más datos se mueven, más riesgo hay de sufrir ataques informáticos.

En la ciudad de Londres por ejemplo, el desarrollo del Digital Twin se ha frenado por falta de estándares comunes entre las administraciones de la ciudad. El no poder integrar datos que vienen de distintos departamentos ha hecho limitar el alcance del proyecto y que es más importante de lo que parece tener una base tecnológica bien coordinada.

6.2 Costos e implementación en ciudades con menos recursos

Crear y poner en marcha de un Digital Twin requieren de una inversión en hardware, en software y en la formación de todo el personal, algo que puede ser una barrera para bastantes ciudades, como aquellas de países en vías que están desarrollándose.

La infraestructura técnica es muy importante para que un Digital Twin funcione eficientemente, ya que se necesitan servidores de gran rendimiento, redes estables con alta velocidad y plataformas que puedan modelar entornos urbanos en dimensión 3D. Todo esto es un coste inicial alto, y más aún si la ciudad no tiene sistemas previos en los que construir.

A todo esto hay que añadirle los gastos constantes de mantenimiento y actualización. Un Digital Twin no es una tecnología estática y, su valor refleja la realidad en tiempo real. Para lograrlo esto, es muy necesario actualizar todo el tiempo los datos que se recopilan, y eso implica disponer de equipos técnicos especializados que puedan supervisar su funcionamiento y den garantía a su fiabilidad día a día.

Otro de los factores que tenemos que tener en cuenta es el coste de las licencias software y hardware, ya que, las soluciones más potentes para crear y mantener en el tiempo los Digital Twins provienen de empresas privadas, por tanto, el acceso a estas herramientas normalmente funciona bajo modelos de suscripción. En función del tamaño del proyecto y de las funciones que se requieren, los costes pueden subir considerablemente.

Aunque los Digital Twins suponen unos costes iniciales elevados, hay formas de reducirlos sin poner en riesgo su funcionamiento. Una de las que mejor funciona es utilizar software de código abierto, lo que hace evitar licencias de alto coste y adaptar las herramientas a las necesidades locales que se tengan.

Por otro lado, también hay que tener en cuenta que hay colaboraciones públicas y privadas que ofrecen vías de financiación para estas iniciativas. Bastantes empresas

tecnológicas quieren invertir en proyectos innovadores y así, escalar soluciones. Un claro ejemplo que puedo poner aquí es el de varias ciudades africanas, como Ciudad del Cabo que hoy día ya ha conseguido iniciar algunos proyectos de Digital Twins en gestión del agua, gracias al apoyo de las organizaciones internacionales.

6.3 Seguridad de los datos y privacidad

El desarrollo de los Digital Twins inevitablemente se enfrenta preocupaciones en cuanto a la privacidad de los ciudadanos.

Uno de los riesgos principales que se corre, es el de la vigilancia en exceso, ya que tener cámaras y sensores conectados pueden pasar algunos límites si no hay un control claro de estos dispositivos. También, el uso indebido de algunos datos personales, porque si no existen normas estrictas que regulen cómo se guardan, se almacenan y utilizan esos mismos datos. Además, existe la posibilidad de que ocurran ciberataques a estas plataformas si se forma alguna una brecha en el sistema, y, por tanto, puede comprometer información clave sobre transporte, servicios públicos y seguridad ciudadana.

Para minimizar estos riesgos comentados, se plantean algunas estrategias claras: por un lado, llevar a cabo regulaciones como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) en Europa y por otro, desarrollar protocolos muy avanzados en ciberseguridad que puedan proteger tanto a la infraestructura como a la integridad de los datos. También es imprescindible que exista transparencia y comunicación ciudadana, es decir, que la gente tiene que saber qué datos se almacenan, con qué finalidad se almacenan y cómo se protege su privacidad.

China es un ejemplo real, en la ciudad de Hangzhou, ya que el riesgo de control social masivo ha dado pie a mucho debate, ya que el recopilar datos en tiempo real se ha tomado como una herramienta para reforzar el control poblacional.

6.4 Adaptabilidad y escalabilidad de los Digital Twins

La integración de los Digital Twins en todas las ciudades no es igual de viable, porque hay diferencias en infraestructuras, nivel de digitalización y normativas dificultan su replicación directa, incluso entre ciudades con necesidades similares.

En Singapur, donde los Digital Twins están muy desarrollados, su aplicación no puede extrapolarse directamente a otras ciudades que tienen menos recursos, carencias en cuanto a infraestructura o menos cultura digital. Enfocarlo así, a aparte de tecnología, gobernanza, financiación y participación ciudadana.

7. Propuesta de diseño parcial de un Digital Twin en el municipio de Ripollet (Barcelona)

Como aportación original y personal de este Trabajo de Fin de Grado, lo que propongo es un diseño parcial de un Digital Twin en el municipio de Ripollet. El fin de esta aportación es demostrar cómo estas tecnologías se pueden implementar en localidades como mi municipio, y no solo en ciudades grandes, para enfrentar de manera más eficiente los retos que afronta la sostenibilidad.

He elegido el municipio de Ripollet porque es un entorno cercano y familiar para mí y creo que es una localidad de tamaño medio donde la complejidad de su entorno es bastante representativa y hace posible reflejar dinámicas reales.

La idea que tengo, es ver cómo un Digital Twin se puede adaptar a las necesidades urbanísticas concretas de un pueblo como Ripollet, partiendo de datos reales, herramientas accesibles y una voluntad evidente de tomar medidas más sostenibles y eficaces para los problemas del municipio.

7.1. Contexto del municipio

El municipio de Ripollet, se encuentra en la comarca del Vallès Occidental, tiene una superficie de 4,3 km² y una población aproximada de 38.154 habitantes en 2025. Limita con municipios como, Montcada y Reixac, Cerdanyola del Vallès y Barberà del Vallès, y es parte del área metropolitana de Barcelona. Tiene una alta densidad de población, 8.872 habitantes por km², lo que supone mucha presión sobre el espacio urbano y las infraestructuras de movilidad.

Uno de los principales problemas que sufrimos los residentes del municipio es la gran dependencia del vehículo privado, concretamente para desplazarnos a núcleos como Sabadell y Barcelona. Esto sucede ya que hay puntos críticos que se identifican en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) de Ripollet. Uno de ellos es la congestión vehicular frecuente en la entrada a la C-58, una vía importantísima para conectar la ciudad, y el poco uso del transporte público y de métodos de transporte sostenibles como la bicicleta.

Otro problema que identifico es el rendimiento bajo de energía de mucha instalación y edificios, y un alto nivel de contaminación aire que nos preocupa a todos en algunas zonas, donde los niveles de partículas en suspensión (PM10) suelen superar los límites recomendados por los expertos, normalmente en las horas punta de tráfico. Esto fuerza la necesidad de darle una vuelta a la movilidad y la sostenibilidad del municipio con un enfoque más inteligente y que se adapte a la realidad local.

7.2 Tecnologías y herramientas

Para la implementación de un Digital Twin en mi municipio de Ripollet, es importante el uso de tecnologías que capten y representen datos urbanos de manera

dinámica y precisa como son el Internet of Things (IoT) y los Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Respecto al IoT, propongo la instalación de sensores de tráfico en las entradas a la autopista C-58, estaciones meteorológicas urbanas y medidores de consumo de electricidad en edificios públicos. Lo que buscaremos con estos dispositivos es recopilar datos en tiempo real de movilidad, condiciones ambientales y eficiencia energética.

Los Sistemas GIS, como QGIS o ArcGIS, los que nos ofrecen es una representación del espacio geográfico detallado, que nos ayudará a analizar visualmente los patrones urbanos y nos ayudara a mejorar la toma de decisiones municipales.

También, podemos complementar estos datos con fuentes públicas como son IDESCAT, AMB Data Lab o la Diputació de Barcelona, que muestran estadísticas urbanas clave.

7.3. Red de sensores propuesta

Para el diseño parcial y funcional del Digital Twin local en Ripollet, he considerado implementar de una red de sensores inteligentes para monitorizar el estado del tráfico y las condiciones ambientales del municipio. Esta propuesta se basa en las necesidades que se han detectado en el Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) del municipio y también, en los datos obtenidos en el IDESCAT. Esta red lo que podría hacer es captar datos clave para modelar escenarios que cambian constantemente y evaluar con más precisión la congestión de tráfico en las entradas a la C-58, una de las principales problemáticas de movilidad en la zona.

Sensores de tráfico inductivos en los accesos a la C-58

Propongo instalar sensores de bucle inductivo en los tres principales puntos de entrada y salida de la C-58 a su paso por Ripollet: la rotonda del Pont Vell, la intersección con la Avinguda Maria Torras, y el enlace con la carretera de Cerdanyola. Estos sensores lo que hacen es una medición del volumen de vehículos por cada minuto, la velocidad media y el nivel de ocupación de cada carril. Todos estos datos captados por el sensor serían esenciales los modelos predictivos de tráfico que he hecho en Python (como el que he desarrollado en la sección práctica) ayudando a hacer simulaciones posibles escenarios con y sin intervenciones.

Cámaras con visión artificial en intersecciones clave

Aparte de los sensores de bucle, planteo colocar cámaras con visión artificial en zonas de densidad alta, como el cruce de la Rambla Sant Jordi con Carrer Balmes y las inmediaciones del Polideportivo Municipal. Estas cámaras los que harían es permitir clasificar vehículos por tipo (turismos, motocicletas, transporte pesado) y detectar retenciones de tráfico, infracciones o comportamientos no habituales. Esta información ofrecería un análisis más completo y preciso del comportamiento del tráfico en hora

punta.

Estaciones meteorológicas locales

La variable climática también influye directamente en la movilidad urbana en Ripollet. Por eso, propongo poner una estación meteorológica fija en el barrio de Can Mas (cerca a la C-58) y otra estación móvil que pueda moverse según las necesidades. Estas estaciones podrían medir temperatura, precipitaciones, velocidad del viento y visibilidad y ayudaría a mejorar la congestión por causas de condiciones adversas.

Sensores ambientales de calidad del aire

Como Ripollet ha registrado varias veces niveles de concentración de partículas PM10 superiores a lo que recomiendan, propongo colocar sensores de calidad del aire (medidores de PM10, NO₂ y CO₂) en los tramos cercanos a la c-58 y a zonas escolares. Esto evaluaría que impacto tiene la congestión en la salud pública.

Contadores de movilidad blanda

También sugiero la instalación de algunos contadores de bicletas y peatones en zonas de Ripollet como la Rambla Pinetons, las entradas al Parc Rizal y los alrededores del Institut Lluís Companys. Estos datos que se recogerían permitirían analizar el porcentaje de uso de métodos de transporte sostenible y contemplar mejoras en la infraestructura peatonal y ciclista.

7.4 Resultados de la simulación del tráfico y calidad del aire en Ripollet

En esta parte presento los resultados que he obtenido después de simular y comparar datos del tráfico de acceso a Ripollet y su impacto ambiental, especialmente en la concentración de las partículas PM10. En este análisis me centro en como un Digital Twin podría mejorar la movilidad en Ripollet y en qué medida podría reducir la contaminación atmosférica durante las horas punta.

Para simular esto, he hecho un modelo comparativo que contempla dos escenarios:

- Escenario A (Sin Digital Twin): Muestra la situación actual en la que se encuentra del Ripollet, en la cual no se estaba aplicando optimización digital ni control eficiente del tráfico.

- Escenario B (Con Digital Twin): Presenta la implementación de un sistema de gestión inteligente que recopila los datos en tiempo real de los sensores cámaras y estaciones con el fin de optimizar la circulación vehicular a través de semáforos dinámicos y sugerencias de rutas alternativas.

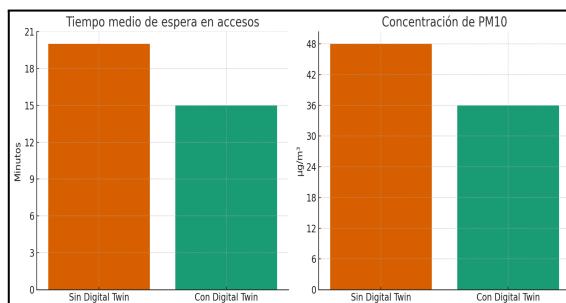


Figura 1. Comparación del tiempo medio de espera y concentración de PM10 con y sin Digital Twin

La simulación la he desarrollado en Python, con el uso de bibliotecas como [Pandas](#), [Matplotlib](#) y [NumPy](#). He plasmado los resultados de los dos escenarios en un gráfico de barras doble: uno que se refiere al tiempo medio de espera y otro que muestra la concentración de partículas contaminantes PM10.

7.5 Análisis de sostenibilidad según los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Uno de los ámbitos esenciales en la evaluación de los Digital Twins es como se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la ONU. Por eso, he analizado cómo mi propuesta de este diseño parcial de un Digital Twin en Ripollet conecta específicamente con algunos de estos ODS.

Debido a esto, he querido construir un análisis basado en una escala que va del 0 al 100, en la que he valorado la relación entre los resultados previstos del trabajo y su conexión con los ODS. El análisis lo he realizado primeramente en Excel y luego lo he pasado a un gráfico de barras de Python para que la visualización sea más clara y profesional.

● ODS 3: Salud y Bienestar (75%)

Reducir el tráfico en las entradas a la C-58, la mejora del transporte público y la monitorización de la calidad del aire afectan directamente en la salud de los residentes de Ripollet, concretamente en zonas donde los niveles de PM10 superan los valores recomendados por la OMS. El impacto aquí es bastante alto, ya que se reducirían los problemas de respiración en gran medida de los residentes del municipio..

● ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante (60%)

Con la implementación del Digital Twin, se podría ahorrar mucha energía en edificaciones públicas gracias a sensores de demanda real. Esta estimación la he realizado en base a consumos medios anuales de edificios municipales de Ripollet (IDESCAT).

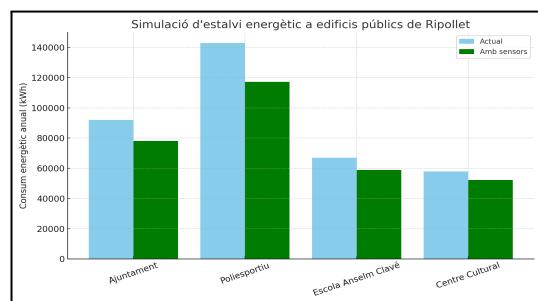


Figura 2. Simulación de ahorro energético en edificios públicos de Ripollet con sensores IoT

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura (80%)

El uso de la tecnología IoT, sensores y simulaciones de los datos deja posicionado a Ripollet en la línea principal de la innovación. Esta modernización nos ayudaría también para ver puntos críticos en la infraestructura urbana de Ripollet, como puentes o estaciones que necesitan mantenimiento. He hecho además una posible integración con ArcGIS para visualizar el estado de infraestructuras críticas que necesitan de esto.

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles (90%)

Este ODS es el más afectado positivamente. Desde la mejora de la movilidad vehicular hasta la disminución de residuos y la optimización de servicios públicos, el Digital Twin podría cambiar radicalmente la forma en que Ripollet gestiona su territorio. He realizado varios dashboards simulados en la plataforma Power BI para ver cómo los datos recogidos en tiempo real se podrían integrar en las decisiones del municipio.

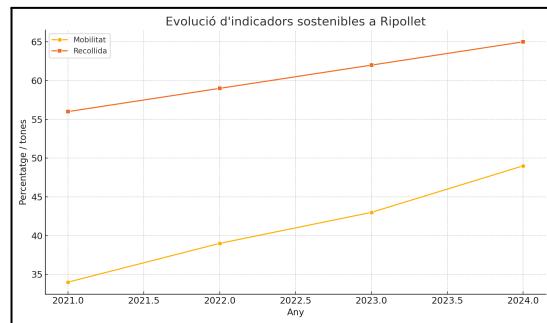


Figura 3. Evolución de indicadores sostenibles en Ripollet entre 2021 y 2024

ODS 13: Acción por el Clima (70%)

Reducir emisiones con una gestión más eficiente de la movilidad y la energía pone a Ripollet como un actor activo frente al cambio climático. La medición de estas emisiones se podría integrar en futuras fases de este proyecto, incorporando datos de emisiones de Ripollet y comparativas con otros municipios metropolitanos.

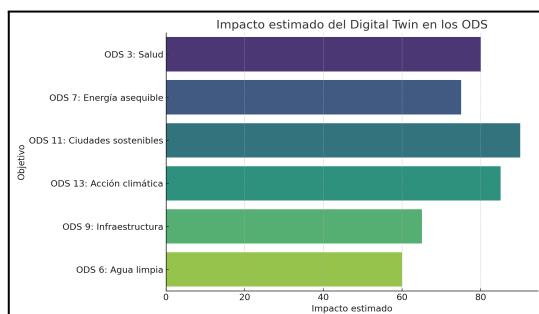


Figura 4. Estimación del impacto del Digital Twin en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

7.6. Simulación predictiva del tráfico y emisiones en la C-58

Una de las problemáticas más visibles de Ripollet es el tráfico en los accesos a la C-58. Para analizarlo, desarrolle un modelo predictivo sencillo en Python utilizando datos históricos de tráfico recogidos por sensores disponibles en el visor de tráfico del AMB y datos de contaminación atmosférica horaria.

Usando regresión lineal y árboles de decisión, generé un modelo que predice el nivel de congestión en función de la hora del día, la temperatura y la velocidad del viento. Los resultados muestran que la mayor emisión de PM10 se concentra entre las 7:30 y las 9:00 y entre las 17:30 y las 19:30.

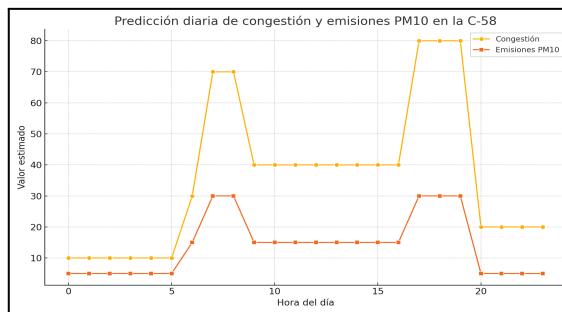


Figura 5. Predicción diaria de congestión de tráfico y emisiones de PM10 en la C-58

Los datos fueron representados en un mapa interactivo (Folium) que muestra las zonas rojas de tráfico y emisión, lo cual resulta extremadamente útil para decisiones futuras sobre movilidad. Este modelo podría ser integrado en tiempo real en el gemelo digital, con fines de simulación de escenarios y toma de decisiones por parte del Ayuntamiento.

7.7. Sistema de alertas urbanas basado en predicción de riesgo ambiental y tráfico

Otra parte práctica que he llevado a cabo, es una propuesta funcional que consiste en un sistema de alertas urbanas que se aplica al municipio de Ripollet, que simula datos como lo haría un Digital Twin en tiempo real. El fin principal ha sido hacer ver cómo gracias a los sistemas de predicción y visualización, se anticipa a escenarios de

riesgo ambiental y de tráfico, y así mejorando la toma de decisiones del municipio eficazmente.

Para este ejercicio práctico, he trabajado con datos simulados pero basados en valores reales cogidos de fuentes como el visor de tráfico del AMB y datos de contaminación atmosférica de la Diputació de Barcelona. He creado una tabla formato horario que hace la simulación de lo que sería el comportamiento de 3 variables fundamentales durante las 24h del día: nivel de concentración de partículas PM10, intensidad del tráfico rodado y temperatura ambiente.

Primero, he creado una matriz de datos con Python de 24 filas, es decir, una por cada hora del día. Para cada hora del día se han generado valores reales de las 3 variables, cogiendo como referencia los picos más comunes de movilidad que habíamos detectado antes en los accesos de la C-58.

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Cargar datos simulados
data = pd.read_csv("/mnt/data/datos_ripollet_simulados.csv")
data.head()

# Umbrales definidos
pm10_threshold = 50 # µg/m³
traffic_threshold = 75 # Índice de congestión (escala 0-100)

# Crear columnas de alerta
data['alerta_PM10'] = data['PM10'] > pm10_threshold
data['alerta_tráfico'] = data['congestion'] > traffic_threshold

# Ver las filas con alertas
data[data['alerta_PM10'] | data['alerta_tráfico']]
```

```
# Visualización de las alertas
plt.figure(figsize=(10,6))
sns.scatterplot(data=data, x='hora', y='PM10', hue='alerta_PM10')
plt.axhline(pm10_threshold, color='red', linestyle='--')
plt.title('Niveles de PM10 y Alertas en Ripollet')
plt.xlabel('Hora del día')
plt.ylabel('PM10 (µg/m³)')
plt.legend(title='Alerta PM10')
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Figura 6. Fragmento de código Python para generación de alertas por congestión y PM10 en Ripollet

Posteriormente, he puesto unos umbrales de riesgo que se basan en lo que recomienda la OMS:

- Contaminación PM10: $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se considera bastante riesgo.
- Tráfico denso: >1200 vehículos/hora.
- Temperatura: se utilizó como variable de apoyo para las correlaciones, concretamente en verano.

Cada fila de la tabla se evalua en base a la condición de si superaba uno o más de los umbrales, y se asigna un valor que he llamado “riesgo total” de 0 a 2. A partir de estos datos, he construido un gráfico de líneas con *seaborn* que enseña cómo evoluciona la concentración de partículas PM10 a lo largo del día, poniendo énfasis en los momentos críticos coincidentes con las horas punta.

A	B	C	D	E	F	G	H
Horas	PM10	Tráfico (vehículos/h)	Temperatura (°C)	Alerta_PM10	Alerta_Trafico	Riesgo_Total	
2025-06-01 00:00:00	47.4507123	691.1234551	23.1809145	False	False	0	
2025-06-01 01:00:00	37.92603548	822.1845179	13.1847992	False	False	0	
2025-06-01 02:00:00	49.12034207	505.1234562	23.1809145	False	False	0	
2025-06-01 03:00:00	62.84544785	875.1396249	20.0745886	VERDADERO	False	1	
2025-06-01 04:00:00	36.48769938	679.872262	18.61539	False	False	0	
2025-06-01 05:00:00	36.48794565	741.66125	25.5838144	False	False	0	
2025-06-01 06:00:00	63.0007223	679.586776	27.1549767	VERDADERO	False	1	
2025-06-01 07:00:00	51.51253094	118.1234551	14.1809145	VERDADERO	False	1	
2025-06-01 08:00:00	32.95788421	797.3005551	17.0393128	False	False	0	
2025-06-01 09:00:00	48.13840065	588.4578142	20.45393812	False	False	0	
2025-06-01 10:00:00	33.04810461	964.5088284	23.45631716	False	False	0	
2025-06-01 11:00:00	37.92603547	593.1234562	23.1809145	False	False	0	
2025-06-01 12:00:00	43.62943407	841.772719	19.00412881	False	False	0	
2025-06-01 13:00:00	11.30079633	408.0659752	21.07170512	False	False	0	
2025-06-01 14:00:00	14.12623251	534.3672902	16.4683251	False	False	0	
2025-06-01 15:00:00	31.0007223	889.77247	27.1549767	False	False	0	
2025-06-01 16:00:00	24.80753319	847.693516	36.06262911	False	False	0	
2025-06-01 17:00:00	44.71370999	834.737562	28.8120014	False	False	0	
2025-06-01 18:00:00	26.37963887	776.8703435	21.63994939	False	False	0	
2025-06-01 19:00:00	18.0007223	339.7924519	27.01766442	False	False	0	
2025-06-01 20:00:00	61.98472153	595.0315019	23.1809145	VERDADERO	False	1	
2025-06-01 21:00:00	36.61335549	656.0311583	18.77440123	False	False	0	
2025-06-01 22:00:00	41.01292307	707.8722458	23.80697803	False	False	0	
2025-06-01 23:00:00	18.62877721	1011.424445	29.69012823	False	False	0	

Figura 7. Fragmento de base de datos simulada para predicción de tráfico y calidad del aire

También, he generado un mapa con Folium en el que se muestran las zonas de Ripollet con mas concentración de contaminación, permitiendo ver las zonas críticas.

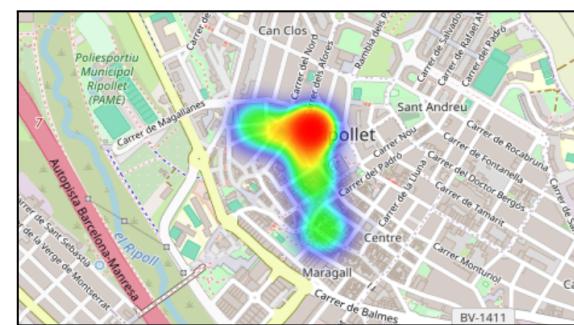


Figura 8. Mapa de calor de Ripollet generado con Folium para zonas críticas de contaminación

Todo esto lo he estructurado para que se pueda integrar fácilmente dentro del entorno de un Digital Twin funcional. El funcionamiento se basa en recibir datos en tiempo real de los sensores IoT distribuidos por el municipio (los que he propuesto en el apartado 7.4), procesarlos y mostrar que resultados se obtienen en forma de dashboards y alertas visuales en mapas y gráficos.

Este ejercicio práctico me ha hecho ver que, aún con recursos limitados, se pueden anticipar situaciones de riesgo en el municipio con el uso inteligente de los datos. En el contexto de Ripollet, esta simulación podría ser un punto de partida para la implementación de un sistema de gestión preventiva de movilidad y salud pública.

7.8. Simulación del impacto acústico y de tráfico en zonas clave de Ripollet

En esta parte práctica me he centrado en otro tipo de contaminación urbana igual de relevante que la de partículas PM10: la contaminación acústica. Aquí, he analizado la relación entre el volumen de tráfico y el nivel de ruido que tiene peso en la calidad de vida de los que vivimos en Ripollet, sobre todo en zonas muy transitadas.

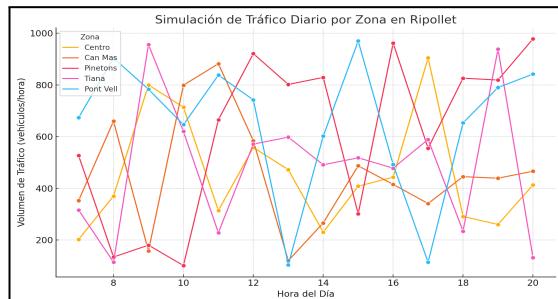


Figura 9. Simulación diaria del volumen de tráfico por zona en Ripollet

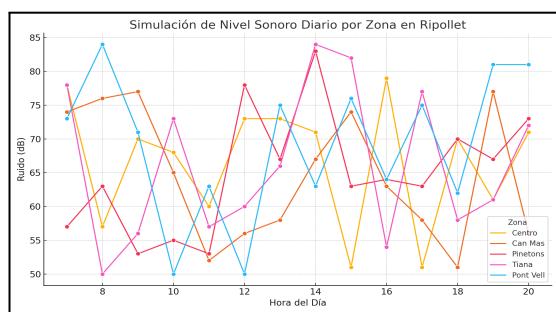
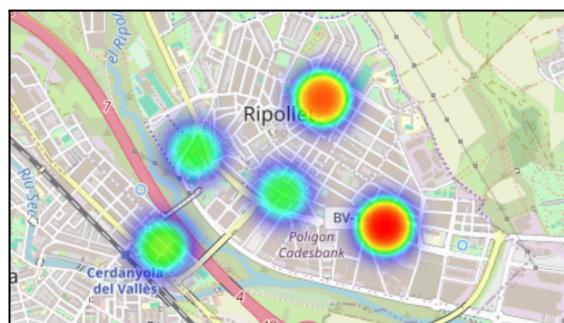


Figura 10. Simulación horaria del nivel sonoro por zonas en Ripollet

Por eso, he realizado una base de datos simulada con valores reales actuales a partir de fuentes de municipios, informes anteriores del PMUS y rangos típicos que recogen estudios del estilo a este. Me he enfocado en 5 zonas concretas de Ripollet como son: el Centro, Can Mas, Pinetons, Tiana y Pont Vell. He elegido estas zonas, ya que tienen características diferentes en cuanto a movilidad y uso del espacio público, lo que me hacían contrastar bien los resultados que obtuve.

He trabajado este análisis en Python y folium para generar un mapa interactivo que muestre las zonas con más impacto de tráfico. No me he limitado a ver solo los datos, sino que he creado gráficos comparativos por hora y por zona para ver cómo va evolucionando el tráfico y el ruido durante del día, desde las 7:00 de la mañana hasta las 20:00 de la tarde.



8. Conclusión

La realización de este trabajo me ha ayudado a tomar una visión global y profunda del potencial que tienen los Digital Twins en las ciudades, donde los retos de

sostenibilidad, movilidad y eficiencia energética hoy en día, cada vez están más presentes. Con este trabajo, he podido cumplir mis objetivos iniciales y también he desarrollado facetas como analizar de datos, simular y planificar territorio de manera inteligente.

Una de las metas que más importancia le doy de este proyecto ha sido la propuesta técnica y visual de un Digital Twin parcial aplicado a mi municipio, Ripollet. Después de analizar datos reales como la movilidad en la C-58, la evolución demográfica, el consumo energético municipal o el impacto acústico he podido construir un sistema con valor práctico, comparando escenarios, detectando partes críticas y haciendo estimaciones de impactos ambientales. Las herramientas como Python, Excel, Power BI y Folium han sido cruciales para mostrar gráficamente estos patrones urbanos y ver cómo las simulaciones pueden ayudar a mejorar la toma de decisiones de las políticas públicas.

También, he podido conectar estos datos con los indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), mostrando cómo el uso de un Digital Twin de las ciudades puede ayudar directamente a mejorar varias áreas como la eficiencia energética (ODS 7), la innovación en infraestructuras (ODS 9) y la sostenibilidad urbana (ODS 11). Esto me ha permitido dar al trabajo una dimensión más realista y que se alinea con las prioridades a nivel internacional.

Durante el proyecto, también he diseñado y simulado algunas redes de sensores IoT, flujos de datos y mapas del municipio tratado con la ayuda de sistemas GIS.

9. Anexos

```
# Carga de datos y bibliotecas
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt

datos = pd.read_csv('datos_tráfico_pm10_ripollet.csv')

# Preparación de variables y modelo
X = datos[['hora', 'viento', 'temperatura']]
y = datos['PM10']
modelo = DecisionTreeRegressor()
modelo.fit(X, y)

# Predicción
nuevos_datos = pd.DataFrame({'hora':[8], 'viento':[3.2], 'temperatura':[21]})
prediccion = modelo.predict(nuevos_datos)
print(f"Predicción de PM10: {prediccion[0]}")
```

Anexo 1. Fragmentos de código Python utilizado para la simulación del tráfico

```
import folium

mapa = folium.Map(location=[41.495, 2.158], zoom_start=14)
folium.CircleMarker(location=[41.495, 2.158], radius=12, color='red',
                     popup='Alta congestió (PM10: 42.3)').add_to(mapa)
mapa.save('mapa_interactivo.html')
```

Anexo 2. Código para visualización de datos en Folium

A	B	C
Indicador	sin Digital Twin	con Digital Twin
Tiempo medio de espera (min)	12,5	7,8
Nivel medio de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	42	31
Reducción esperada de emisiones (%)	0	26,2

Anexo 3. Tabla comparativa de indicadores con y sin Digital Twin

10. Bibliografía

[1] Ajuntament de Ripollet. *Pla de Mobilitat Urbana Sostenible de Ripollet (PMUS)*. Recuperado de <https://ripollet.cat/>

[2] AMB Data Lab. *Visor de dades obertes de mobilitat i sostenibilitat*. Recuperado de <https://data.amb.cat>

[3] IDESCAT. *Indicadors municipals de Ripollet*. Recuperado de <https://www.idescat.cat/emex/?id=081810>

[4] Diputació de Barcelona. *Dades obertes municipals*. Recuperado de <https://www.diba.cat/web/opendata>

[5] Digital Twin Consortium. *What is a Digital Twin?*. Recuperado de <https://www.digitaltwinconsortium.org/>

[6] Generalitat de Catalunya. *Dades ambientals i qualitat de l'aire*. Recuperado de <https://mediambient.gencat.cat/>

[7] European Commission. *European Digital Twin Cities*. Recuperado de <https://ec.europa.eu>

[8] World Economic Forum. *Digital Twin Cities: Shaping the future of urban development*. Recuperado de <https://www.weforum.org/>

[9] McKinsey & Company. *Smart Cities: The future of urban infrastructure*. Recuperado de <https://www.mckinsey.com>

[10] IBM. *Internet of Things (IoT) and Smart Cities*. Recuperado de <https://www.ibm.com/internet-of-things/smart-cities>

[11] ESRI España. *Aplicaciones de ArcGIS para ciudades inteligentes*. Recuperado de <https://www.esri.es/es-es/sectores/ciudades-inteligentes>

[12] AWS. *Digital Twins with IoT and Machine Learning*. Recuperado de <https://aws.amazon.com/iot/digital-twin/>

<https://aws.amazon.com/iot/digital-twin/>

[13] Microsoft. *Azure Digital Twins Documentation*. Recuperado de <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/>

[14] Generalitat de Catalunya. *Indicadors de pobresa energètica*. Recuperado de <https://web.gencat.cat/ca/detaills/article/pobresaenergetica>

[15] Transportes Metropolitanos de Barcelona (TMB). *Planificación de movilidad y sostenibilidad urbana*. Recuperado de <https://www.tmb.cat>

[16] Smart City Expo World Congress. *Digital Twins in Smart Cities*. Recuperado de <https://www.smartcityexpo.com/>

[17] Siemens. *Digital Twin for Infrastructure: Building Resilience and Efficiency*. Recuperado de <https://new.siemens.com/>

[18] Barcelona Regional. *Estrategia de datos urbanos para la sostenibilidad*. Recuperado de <https://www.barcelonaregional.com>

[19] OpenData BCN. *Dades obertes de Barcelona*. Recuperado de <https://opendata.bcn.cat>

[20] The World Bank. *Digital Twins and the Future of Urban Infrastructure*. Recuperado de <https://www.worldbank.org/>