

## **LA CIUDAD MULTIDIMENSIONAL. Integrando un entorno multifuncional y sostenible**

**Autor principal:** Carlos Bosch Cantallops

Institución: DRAGADOS

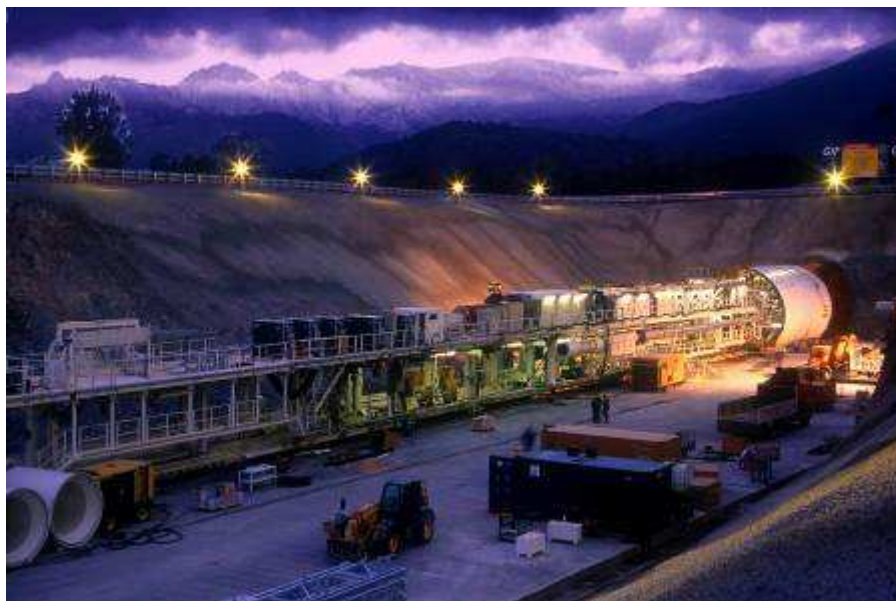
Teléfono: 91 703 86 11

E-mail: BBOSCHC@dragados.com

**Otros autores:**

## Introducción

La creación del espacio subterráneo tiene, hoy en día, un impacto importante sobre la calidad de vida, las condiciones de trabajo, el empleo y el medio ambiente. Las políticas de las distintas administraciones españolas y de la Unión Europea incluyen una revalorización de los túneles y de los espacios bajo tierra. Un indicativo de esta revalorización, es la previsión de construir en Europa más de 2.100 Km de túneles durante los próximos años.



Túneles de Guadarrama (Madrid-Segovia)

La construcción subterránea se desarrolla en España y Europa en un entorno muy competitivo. Por ejemplo, países como Corea y Japón han aprendido, desde hace mucho tiempo, de la experiencia europea y están invirtiendo importantes fondos de investigación en tecnología innovadora, con el fin de desempeñar un papel líder en el mundo. Si la industria española y la europea se cruzan de brazos y no actúan en consecuencia, perderíamos nuestra competitividad y el daño económico sería considerable. La construcción española sólo tendrá una verdadera oportunidad de ser competitiva si juntamos todos los grupos de investigación disponibles en España y creamos una masa crítica para conseguir unos adelantos decisivos, en lo que se refiere a la aplicación de la tecnología innovadora, en la excavación, diseño, monitorización, explotación, etc, de estas obras.

España puede llegar a ser el líder tecnológico en Europa, en este sector, si aunamos todos los esfuerzos, ya que disponemos de una industria madura y tecnológicamente avanzada, con empresas competitivas a nivel mundial y presentes en todos los continentes.

La construcción subterránea juega un papel vital en la economía y la sociedad española (ver tablas 1 y 2). Implica a un extenso abanico de industrias y servicios, desde contratistas, ingenierías, fabricantes y suministradores de vehículos hasta proveedores de infraestructuras, comunicaciones, energía y organizaciones de investigación, autoridades públicas, compañías de seguros y alquiler de vehículos y muchos otros.

Túneles ferroviarios o	Longitud	Observaciones
Guadarrama para el AVE	2x28 Km = 56 Km	En ejecución
Pajares para el AVE	2x24 Km = 48 Km	En ejecución
Le Perthus para el AVE	2x8 Km = 16 Km	Iniciándose
Abdalajis para el AVE	7x2 Km = 14 Km	En ejecución
Túneles de la M-30 (Madrid)	15 Km	Iniciándose
Túnel Atocha – Plaza Castilla	8 Km	En ejecución
Túnel de San Pedro para el AVE	2x8 Km= 16 Km	En ejecución
Cierre M-50 (Madrid)	Probablemente 20 Km	En estudio
Túnel del Estrecho de Gibraltar	Probablemente más de 35 Km	En estudio
Además existen otros 200 km en estudio o en proyecto ligados a diversos trasvases ( por ejemplo el trasvase Jucar – Vinalopó de 25 km), líneas de RENFE, AVE, Carreteras.		

Tabla 1: Obras subterráneas en España en estudio o ejecución (I)



TBM del túnel de Abdalajis (Málaga)

Obras subterráneas urbanas	Volumen obra	Observaciones
Metro Madrid (Plan 2004-2007)	60 Km	En ejecución
Metro Barcelona	26 Km	En ejecución
Metro Sevilla	6 Km	En ejecución
Metro Málaga	10 Km	En ejecución
Metro Gijón	4 Km	En ejecución
También existe en estudio de viabilidad el Proyecto REUS Madrid, que incluye además de la interconexión subterránea entre radiales la creación de grandes espacios subterráneos de aparcamiento.		

Tabla 2: Obras subterráneas en España en estudio o ejecución (II)



Estación de la Línea 8 del Metro de Madrid

Muchas de nuestras actividades cotidianas se pueden localizar en el subsuelo, con la ventaja de liberar espacio en la superficie, limitando el impacto sobre el medio ambiente (afectando solamente a los puntos de contacto).

Debido a la importancia del Sector, dentro de la Plataforma Tecnológica Española de la Construcción, se ha creado una Línea Estratégica de Construcción Subterránea, denominada Grupo Español de Obras Subterráneas, **GEOST**, que en la actualidad agrupa a 34 organizaciones del sector, entre las que se incluyen industria, universidades, centros tecnológicos y organismos públicos de investigación.

El GEOST es una organización abierta a todos los entes involucrados dentro del Sector de la Construcción Subterránea (ver figura 1), cuya estructura general puede verse en la figura 2.



Figura 1

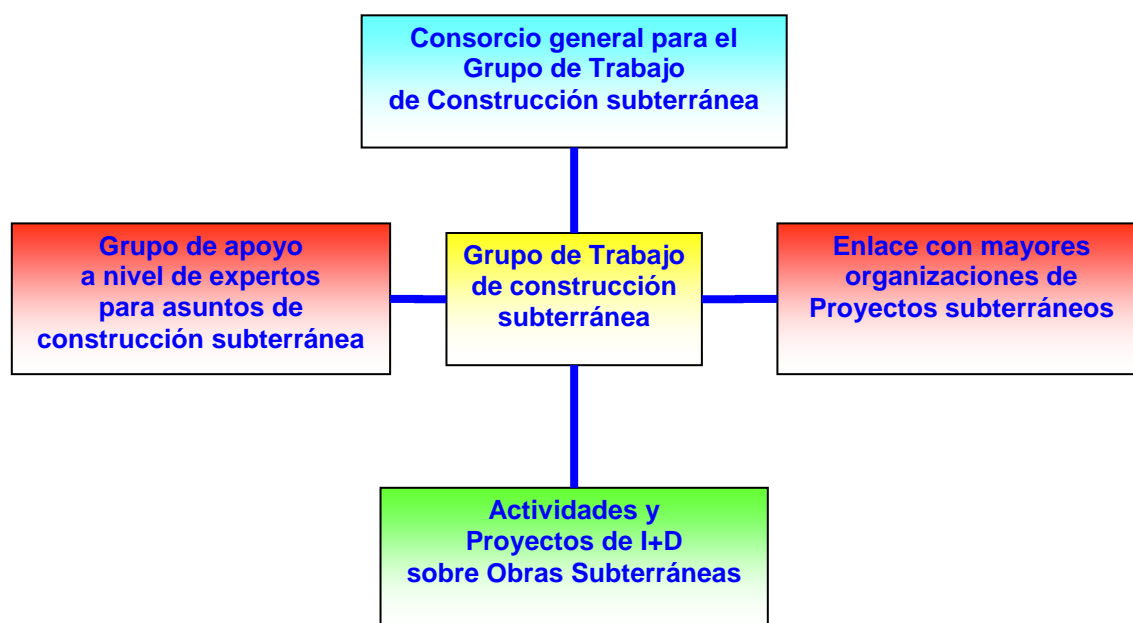


Figura 2. Estructura del grupo de trabajo.

Aunando esfuerzos para el desarrollo de nuevas tecnologías, estas 34 organizaciones han presentado a la convocatoria de Proyectos Científico Tecnológicos Singulares y de Carácter Estratégico del Ministerio de Educación y Ciencia, el proyecto **La Ciudad Multidimensional**.

### Descripción del proyecto La Ciudad Multidimensional

El objetivo general del mismo es liberar espacio, por encima del nivel del suelo, para el uso de los ciudadanos, trasladando las infraestructuras debajo del mismo. Para conseguir este fin, la Construcción Subterránea deberá ser segura, no tener ningún impacto apreciable sobre el medio ambiente, y económica. Esto permitirá el desarrollo de nuevos espacios habitables bajo el nivel del suelo, con un grado de confort y calidad similar al de los situados a la cota de la calle.



El fin último de esta iniciativa es acometer el reto que se plantea en nuestra sociedad para obtener unas ciudades más confortables, sostenibles y puestas al día con espacios para las personas, eliminando la mayor parte de las molestias del tráfico y promoviendo los transportes colectivos y sociales.





Paso inferior Glorieta de Cuatro Caminos (Madrid)

Se promueve el desarrollo de un entorno innovador y sostenible, que permita la seguridad de las personas durante las fases de construcción y de uso de los servicios e infraestructuras, generando espacios libres para el disfrute de los ciudadanos, y transformando nuestro entorno urbano, congestionado, ruidoso y contaminado, en zonas agradables donde las personas sean el centro de nuestro diseño y la ciudad contribuya al desarrollo integral del ser humano.



Depósito subterráneo Plaza de Castilla (Madrid)

Esta iniciativa estratégica se orienta al acercamiento de los servicios a todos los ciudadanos, prestando especial atención a los discapacitados, gente con movilidad reducida, ancianos y niños, teniendo además presente la multiculturalidad de nuestro entorno.

Uno de los objetivos de este proyecto, es converger hacia el cumplimiento de los objetivos del protocolo de Kyoto, para la sostenibilidad de nuestro entorno y los compromisos expresados por la Unión Europea y el Gobierno Español en las reuniones de la Agenda de Lisboa y los compromisos de Barcelona, garantizando una mejor vida a los ciudadanos, un aumento de la competitividad del sector tecnológico español, y el cumplimiento de alcanzar una inversión del 3% del PIB en Investigación, Desarrollo e Innovación para el año 2010.

Este Proyecto estratégico también tiene como objetivo la mejora de nuestras ciudades, protegiendo el patrimonio cultural, y haciendo posible que se adapte, sin daños, a las necesidades del Siglo XXI, a través de las tecnologías que se desarrollarán en esta iniciativa y que permitirán dotar a nuestros centros históricos de medios modernos, con actuaciones dirigidas, específicamente, a implementar servicios y espacios sin merma de las construcciones actuales y preservando los restos históricos existentes.



Aparcamiento subterráneo y remodelación de la Plaza de Santa Teresa (Avila)

El conocimiento del terreno, mediante actuaciones subterráneas de precisión, en cualquier terreno y circunstancia, va a permitir implantar servicios a los ciudadanos sin molestias para la sociedad, sin apenas impacto sobre el medio ambiente y de forma eficaz y competitiva.

El conjunto de objetivos de este proyecto se piensa alcanzar por los siguientes caminos y medios:

- Investigando cómo se pueden colocar en diversas niveles las distintas infraestructuras y servicios, situando, en primer lugar, a las personas en el nivel "0", integrando la vida con el entorno y el medio ambiente.





- Considerando al ciudadano y la integración de los servicios y las infraestructuras en el punto de mira de una CIUDAD MULTIDIMENSIONAL, no pensando sólo en un espacio en dos dimensiones sino en tres e incluso en cuatro, considerando la evolución a través del tiempo.
- Definiendo una posición prioritaria de actuación tecnológica en nuestros proyectos, para las personas, incrementando el grado de sostenibilidad de este entorno, y de protección al mismo a través de la definición y actuaciones en las capas subyacentes.
- Colocando en capas sucesivas las infraestructuras que se puedan trasladar a ellas, sin impacto sobre el medio ambiente, con todos los servicios posibles, desarrollando incluso nuevos canales para usos futuros.
- Buscando la mayor eficacia, y acercamiento al ciudadano de los servicios necesarios para el desarrollo de las personas y de la actividad económica.



Paso inferior María de Molina (Madrid)

- Disminuyendo todo lo posible los tiempos empleados en el transporte de las personas, en el intercambio y trasbordo entre los distintos medios de transporte, eliminando esperas en el acceso a los medios de transporte colectivo y ubicando al automóvil, y a otros vehículos privados en lugares sin impacto para el ciudadano.
- Actualizando las redes de servicio para acercarlas a nuestros centros históricos y a zonas de difícil acceso, garantizando a todos los ciudadanos servicios de calidad acordes con los tiempos actuales.



Remodelación de la Plaza de Oriente (Madrid)

- Reciclando los desechos y residuos de la actividad humana, social y económica, cerca del lugar de generación de los mismos, evitando transportes innecesarios y buscando usos inmediatos, disminuyendo el consumo de recursos en la fabricación de nuevos productos, obteniendo usos alternativos, rehabilitando espacios obsoletos, creando nuevos productos y estableciendo nuevas utilidades y servicios.



Extracción de material de excavación por cinta. Túnel del colector de Avilés

- Creando nuevos espacios en cualquier terreno, circunstancia y dimensión, desarrollando las tecnologías precisas para la investigación de los suelos y el control y monitorización del entorno que rodea nuestra posible actuación, con seguridad y garantías tecnológicas.
- Produciendo equipos de bajo consumo, aprovechando las energías residuales de las diversas actuaciones y obteniéndola de los procesos de baja entalpía presentes en nuestras obras y planes de actuación.
- Tratando de llegar, de forma casi exponencial, a un balance energético cero en nuestras actuaciones.

### ***Las principales líneas de investigación incluidas en el proyecto***

Dentro de esta iniciativa estratégica se desarrollará la tecnología necesaria para poder abrir nuevos espacios subterráneos donde colocar las infraestructuras y servicios con todas las seguridades y de forma sostenible en:

- Cualquier tipo de terreno
- En cualquier sitio
- En diferentes circunstancias
- Con dimensiones variables
- Con un mínimo consumo de recursos
- En el menor plazo posible
- De forma competitiva con las mejores tecnologías disponibles y a desarrollar dentro de esta iniciativa
- Con materiales hechos a medida, e inteligentes.
- De forma controlada, monitorizada durante todo el ciclo de vida útil
- Garantizando la seguridad
- Utilizando los últimos avances y tecnologías para la automatización y robotización de los procesos en donde esto sea factible
- Aumentando el nivel tecnológico de nuestros trabajadores y técnicos

Se desarrollará la tecnología necesaria para que los servicios e infraestructuras (que ahora afectan al medio ambiente y ocupan espacio en la superficie) puedan ser trasladados a capas inferiores donde su impacto y consumo energético es menor.

Desarrollaremos las tecnologías necesarias para conocer con exactitud el entorno de forma completa y a gran distancia, desarrollando el conocimiento de un “suelo transparente” donde poder diseñar y construir con seguridad en el medio ambiente subterráneo.



Túnel de Barbate. Sondeo

Se investigará en nuevos procesos de bajo consumo energético y de recursos, reutilizando todo aquello que sea factible, incluyendo los materiales marginales y los residuos producidos en los procesos de construcción, incrementando la eficiencia de los procesos haciéndolos más limpios y ecológicos.

Desarrollaremos materiales a medida y elementos de sostenimiento inteligentes adecuados a su función, teniendo en cuenta el ciclo de vida de las infraestructuras y servicios.

Aprovecharemos al máximo, las fuentes de energía renovables y marginales que hay en nuestros procesos y entorno. Se introducirán, si es posible, la cogeneración y la trigeneración, si con ello se mejora el balance energético de nuestros procesos.

La potenciación de un entorno subterráneo, sostenible y multifuncional, constituye un reto tecnológico y de innovación de las técnicas existentes, aparentemente poco visible a primera vista, pero con consecuencias significativas si se analiza su impacto en la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, las condiciones de trabajo o el medioambiente.



Dicha potenciación también mitiga los actuales problemas sociales y medioambientales, tanto urbanos como de interconexiones entre dichos entornos.

### **Las innovaciones generadas por el proyecto**

Los resultados del proyecto formarán un sistema de innovaciones, que será la solución del objetivo principal.

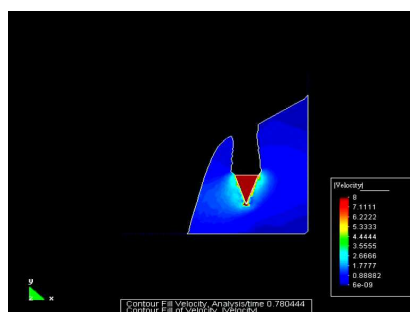
El conjunto de innovaciones y novedades tecnológicas, obtenidas debido a la consecución de los objetivos globales del proyecto, representarán un avance tecnológico importante en el estado del arte actual de las técnicas, así como un gran salto cualitativo en lo referente a la posibilidad de mejora de la calidad de vida de la ciudadanía mediante el empleo del subsuelo urbano.

Algunos de estos desarrollos, novedades y demostradores se resumen a continuación según el ámbito científico-tecnológico en que se integran.

#### ➤ **Modelización y cálculo**

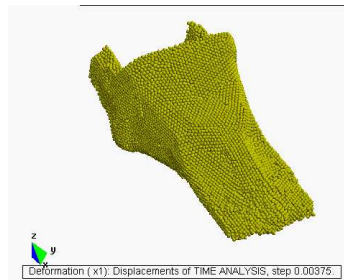
El diseño, construcción y mantenimiento de obras subterráneas competitivas y seguras, requiere un conocimiento exhaustivo y preciso del comportamiento del terreno y de las infraestructuras a construir, durante toda la vida útil de las mismas.

La Ciudad Multidimensional desarrollará **nuevos métodos numéricos** de cálculo y los **modelos** necesarios para modelar el proceso de tunelación: el comportamiento de los suelos, el comportamiento resistente de las estructuras (estudiando la capacidad resistente de las obras subterráneas bajo cargas de servicio y excepcionales, como pueden ser accidentes, explosiones, incendios, etc.) y los fenómenos físicos que se dan en las obras subterráneas.



Modelado del terreno

**Se simulará** y analizará el **desgaste de los elementos mecánicos** en la maquinaria utilizada durante el proceso de construcción de la obra subterránea y se estudiará el impacto medio ambiental de la misma.



Modelado del desgaste de un cortador

Considerando, como uno de los puntos más importantes del proyecto, para alcanzar uno de los principales objetivos del proyecto, el suelo transparente, será necesario desarrollar **nuevas tecnologías para la digitalización 3D de terrenos**.

#### ➤ Automatización y robótica

Las actuales tuneladoras de excavación de túneles son máquinas muy costosas y complejas con un alto grado de sofisticación tecnológica. Sin embargo, es un hecho comprobado que su guiado no está optimizado, utilizando en la mayoría de las aplicaciones conocidas, un sistema monosensor basado en láser telémetro con autoseguimiento.



Túneles de Guadarrama (Madrid-Segovia)

La necesidad de un sistema de seguimiento sin errores, con unas referencias globales y un alto nivel de repetitividad, hace necesario el desarrollo de nuevos **sistemas multi-sensoriales**, que incluirán dispositivos de diversa naturaleza y funcionamiento físico.

También se hace necesario el desarrollo de **nuevas técnicas de control inteligente de guiado** de las máquinas, introduciendo un **sistema de control predictivo** que permita, a partir de la información obtenida por la experimentación anterior, prever, con un alto grado de fiabilidad, el comportamiento de la máquina, en diferentes terrenos y

condiciones de funcionamiento, lo que facilitará la mejora de las características de la máquina y el aumento de su productividad.

Por otro lado, es un hecho comprobado que, por lo general, los usuarios no son capaces de saturar las capacidades de estas máquinas, fundamentalmente por un déficit de formación de los operadores y encargados del mantenimiento, lo que conlleva una infrautilización de las mismas. Como consecuencia se desarrollarán nuevas herramientas, que permitan mejorar el nivel de formación de los operarios, basadas en **simuladores inmersivos** con técnicas de realidad virtual, impartiendo una formación en un entorno cuasi-real y ofreciendo la posibilidad de simular situaciones que puedan darse en la práctica.

#### ➤ Suelo transparente

Para reducir costes y esfuerzos en la construcción subterránea, así como para hacerla más segura y eficaz, se necesita una mayor comprensión de todos los factores geológicos. Un detallado conocimiento del terreno permitirá ajustar las actuaciones a llevar a cabo de una forma más segura, eficaz y económica, permitiendo mantener un margen de seguridad adecuado, controlar las diversas operaciones y economizar medios, recursos y esfuerzos.

Para ello se requiere el desarrollo de un **nuevo sistema de registros** de los principales sistemas de perforación que, unido a una correlación con los parámetros geotécnicos del terreno, permitirá la implantación de metodologías para la caracterización integrada del mismo.

Unido al sistema anterior se desarrollará un **nuevo proceso de trabajo en tratamientos**, que facilite la toma de datos, correlacionados con el terreno durante el tratamiento, y la evaluación de resultados, lo que conllevará un mejor conocimiento del mismo.



Máquinas de realización de sondeos

Otro de los grandes problemas, que deben ser resueltos, es el conocimiento del terreno, delante del frente de excavación, con la suficiente antelación para permitir tomar las medidas adecuadas en cada caso. Para ello se desarrollarán nuevos **sistemas de auscultación** desde el frontal de la tuneladora, aumentando las longitudes máximas de perforación, incorporando sistemas de registro de parámetros y mejorando los sistemas de perforación, de cara a su utilización en el tratamiento del terreno.

Todos estos conocimientos obtenidos (**suelo transparente**), se aplicarán a los tratamientos de *deep soil mixing*, compactación dinámica e inyecciones de perforación direccional.

#### ➤ **Materiales de alto rendimiento**

En las infraestructuras subterráneas los materiales juegan un papel fundamental, debido a su carácter multifuncional, satisfaciendo requisitos de resistencia, durabilidad, estanqueidad y estética.



Metro de Madrid. Línea 10

Los condicionantes que inciden en ellas, hacen que las futuras investigaciones se enfoquen hacia el **desarrollo de soluciones a medida (tailored-made-materials)**, que se integren con nuevas tecnologías, procedimientos y materiales, amigables con el medio ambiente, económicos, pero capaces de satisfacer las distintas necesidades que se presentan a lo largo del ciclo de vida de estas estructuras.

Para satisfacer la demanda de nuevos materiales que cumplan con estos condicionantes, en La Ciudad Multidimensional se van a desarrollar **nuevos materiales a medida**, adaptativos y multifuncionales. También se van a investigar nuevos **componentes**



**estructurales de revestimiento inteligentes** o avanzados, capaces de dar respuesta a los requisitos que se presentan en cada fase del proyecto.

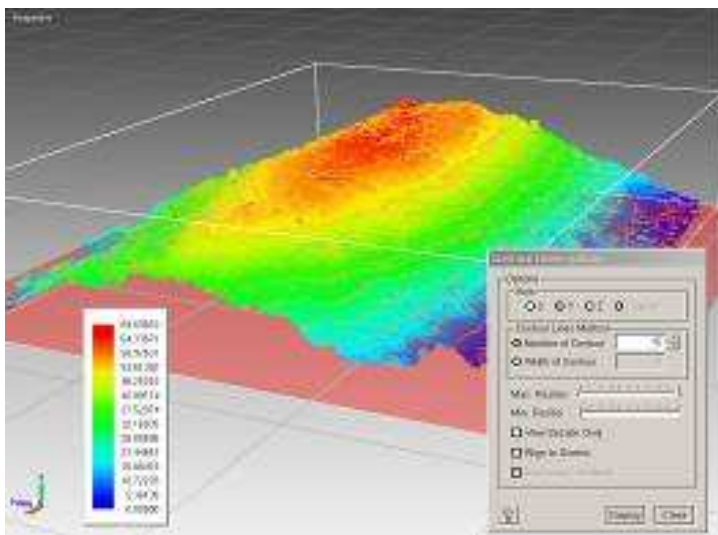
Un tema importante a desarrollar será una **metodología de ensayos no destructivos**, aplicables a escala real, que permita establecer criterios adecuados para el diseño, así como medidas para el control y seguimiento de las obras.

#### ➤ Medio ambiente

Uno de los principales objetivos de La Ciudad Multidimensional es liberar espacio en superficie, trasladando infraestructuras por debajo del suelo. Para que esto sea fácilmente asimilable por los usuarios finales, se debe cuidar especialmente el ambiente de estas infraestructuras. Para ello en este proyecto se investigará en la introducción de espacios que simulen las condiciones de vida en la superficie, con el objetivo de mejorar e incrementar la habitabilidad del subsuelo, se diseñarán **ajardinamientos subterráneos**, y sistemas de **captación y conducción de luz solar** a través de fibra óptica u otros dispositivos.

El impacto ambiental que generan las obras subterráneas, debe ser minimizado en toda la vida útil de las infraestructuras, para ello se desarrollará un **sistema de Gestión Ambiental**, que permitirá evaluar y minimizar los riesgos ambientales de las mismas.

Para reducir un impacto importante generado por las obras subterráneas, como es el almacenamiento de residuos producidos por las mismas, se desarrollarán estrategias de evacuación, selección y **revalorización de los residuos**, y se investigarán nuevos conceptos de **reutilización y reciclado** “in situ” de las **aguas residuales**.



## Resultados

La Ciudad Multidimensional pretende generar una **red de conocimiento**, con los resultados obtenidos de todas las investigaciones y desarrollos del proyecto.

Esta red se plasmará en la realización de un sistema de **gestión activa del conocimiento**, que facilite la transmisión de conocimientos y experiencias para el sector de la Construcción en España.

Para que los resultados de las investigaciones puedan ser trasladados a todos los entes involucrados, se creará una **nueva plataforma para la formación** no presencial, con las mejoras propuestas, basada en la interactividad profesores-alumnos, el control de la calidad, y el empleo de nuevas herramientas multimedia y de conectividad.

Para recoger, en la medida de lo posible, las características previstas para los simuladores del futuro, se construirá un **prototipo de simulador genérico**, configurable, y con una interacción lo más directa con el sistema de proyección

Debido a todos los desarrollos e innovaciones generadas por La Ciudad Multidimensional, se conseguirá **reducir el plazo de ejecución** de las obras, **optimizando costes**, lo que se traducirá en una mayor competitividad de las empresas, y una reducción del impacto social que generan las obras subterráneas.

La **descongestión de las zonas urbanas**, mediante la creación de nuevos espacios, el **traslado al subsuelo de medios contaminantes exteriores** (contaminación acústica y atmosférica debida al tráfico y actividades industriales, contaminación olfatoria de plantas energéticas o de incineración), así como la mejora en la **conservación del patrimonio cultural** e histórico de las ciudades y la **supresión de barreras para la accesibilidad**, se traducirá en una mejora de la calidad de vida de los ciudadanos.

Un aspecto importante, y que debe ser resuelto si pretendemos instalar en el subsuelo nuevas infraestructuras, es la creación de un **modelo de regulación jurídico administrativo del espacio subterráneo**.

La mejora en los procesos de construcción se plasmará en una reducción de plazos y costes y en una mejora de la seguridad de las obras. En la figura 3, puede verse un esquema del sistema **de gestión de procesos constructivos integrados** que será desarrollado en el proyecto.

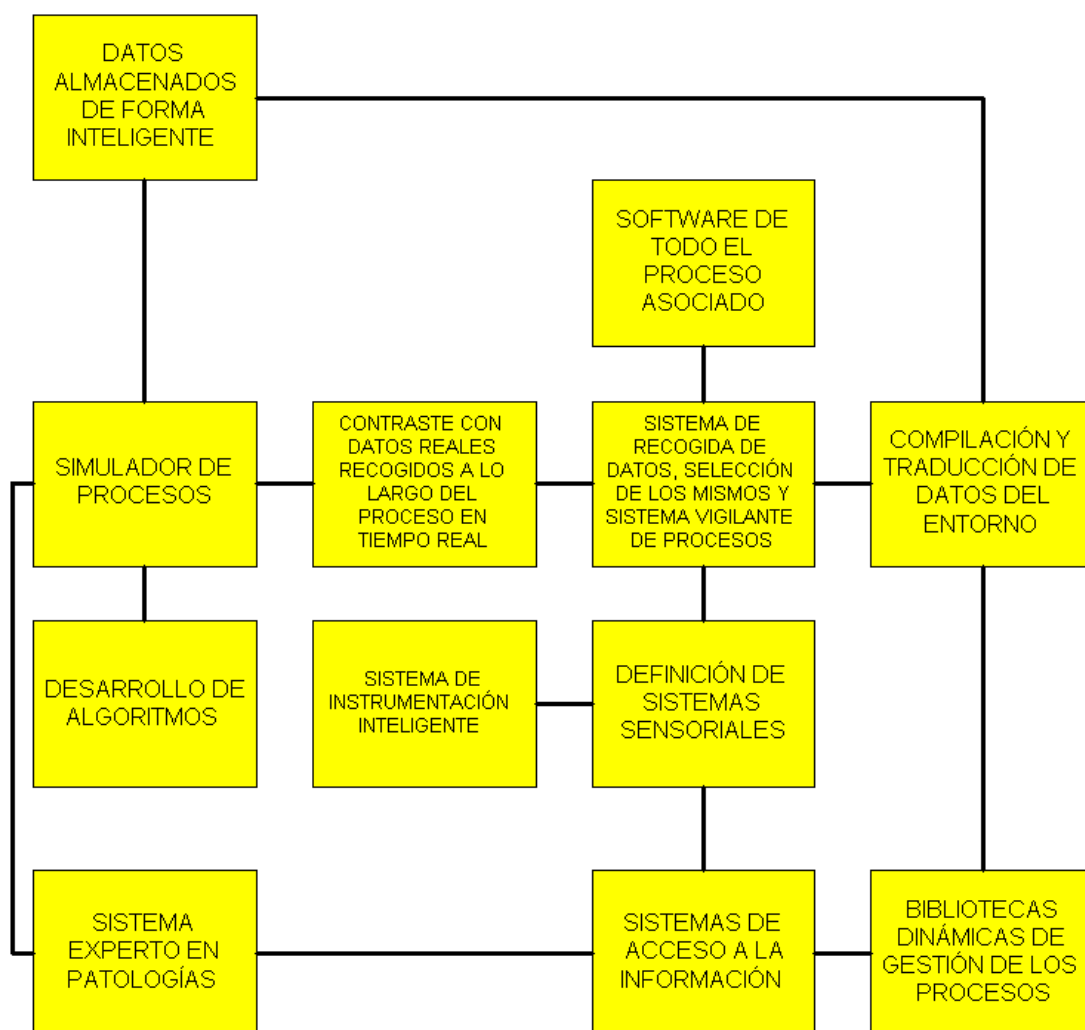


Figura 3. Sistema de gestión de procesos.



El proyecto pretende alcanzar un desarrollo en los medios mecánicos de excavación y en los métodos de voladura, orientados a la habilitación de grandes espacios subterráneos,. El resultado fundamental de la investigación en maquinaria y en geotecnia será crear la “**tuneladora universal**”, para la construcción de grandes secciones en diversos tipos de terreno y con geometrías distintas.

La necesidad de ejecutar obras en entornos urbanos dará lugar al desarrollo de **explosivos de nueva generación**, más seguros, con prestaciones para realizar cavernas en entornos urbanos con geometrías “a medida”. También propiciará la evolución y **desarrollo de materiales, espumas y aditivos** para la mejora del terreno y los procesos constructivos.