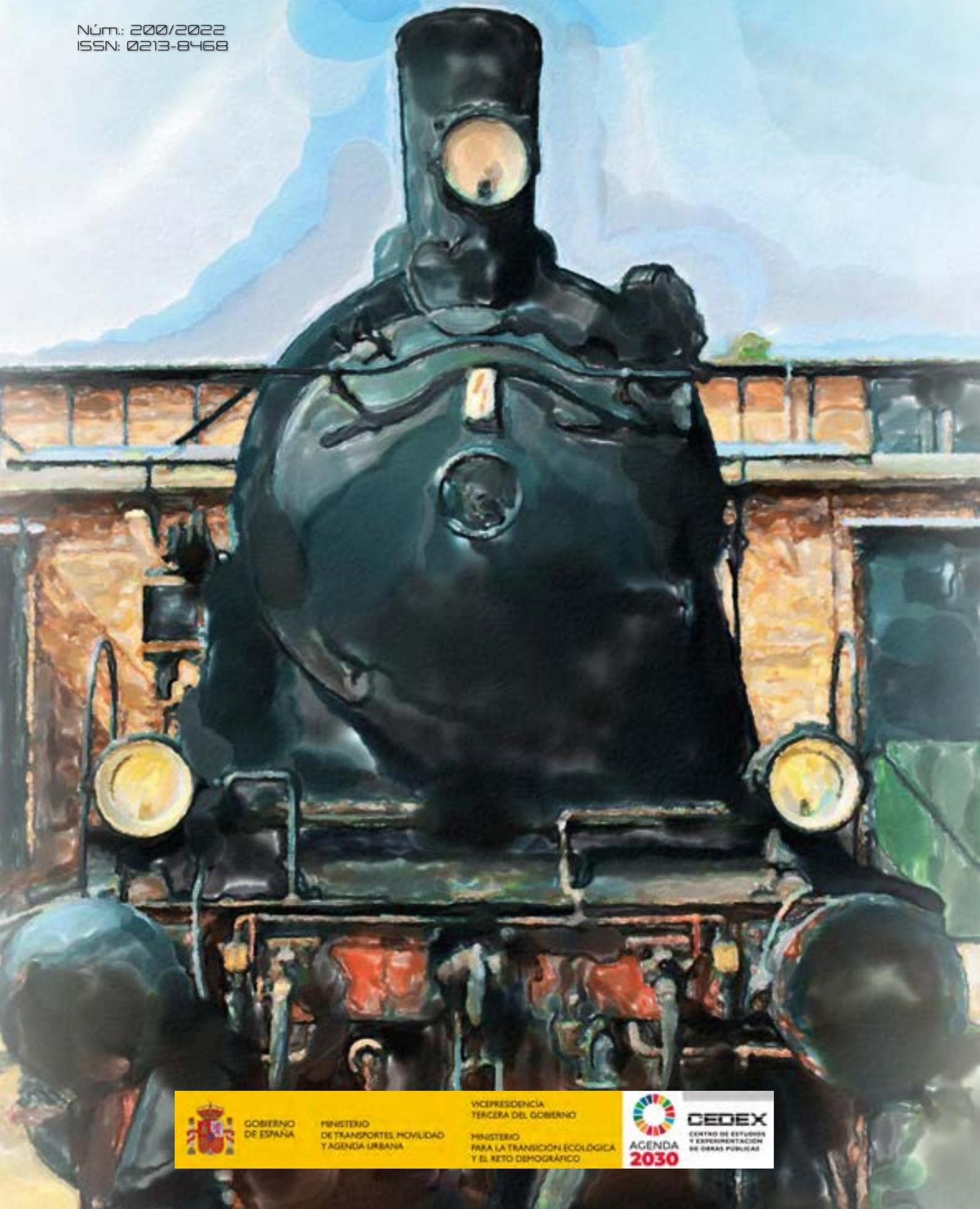


INGENIERÍA CIVIL

Núm.: 200/2022
ISSN: 0213-8468



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



AGENDA
2030

CEDEX

CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

ÁREAS TEMÁTICAS Y TECNOLÓGICAS DE ACTIVIDAD

Aguas

Estructuras y Materiales

Puertos y Costas

Transporte y Movilidad

Carreteras

Sostenibilidad

Transición Ecológica

Geotecnia

Interoperabilidad Ferroviaria

**Patrimonio Histórico de
Obras Públicas**

Economía Circular

**Transferencia de
Conocimiento**





Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas

Publicación incluida en el Programa Editorial para 2022



COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Francisco Javier Cachón de Mesa

Vocales

Paula Pascual Bernaldez
José Manuel de la Peña Olivares
Pablo Mira McWilliams
Luis Pujol Terés
Rafael Jiménez Sáez
M^a Asunción Morales Hortelano
José Bueno Pérez
Dolores Romero Muñoz

Comisión Asesora

Luis Pujol Terés
José-Carlos Pacheco Díaz

Secretaría

Elena Pérez Zabaleta
M^a José de la Fuente Arenas
José-Carlos Pacheco Díaz

Colaboradores

Javier Plasencia Jiménez (Fotografía)

REDACCIÓN

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
(CEDEX)

C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telfs.: (+34) 91 335 75 47 / 72 85/ 73 10
E-mail: ingcivil@cedex.es

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) no se hace responsable de las opiniones, teorías o datos publicados en los artículos de *Ingeniería Civil*, siendo ello responsabilidad exclusiva de sus autores.

COORDINACIÓN DE PUBLICIDAD

Inserver E-Learning Factory
Telf.: (+34) 622 57 03 78 | dani@inserver.es

PVP: 12,25 euros

ISSN: 0213-8468 - NIPO papel: 797-20-005-3

ISSN: 2659-7039 - NIPO línea: 797-20-006-9

NIPO html: 797-20-007-4

Depósito legal: M-28150-1971

NUESTRA PORTADA:

Close-up of a historic steam locomotive
(Fuente: Shutterstock)

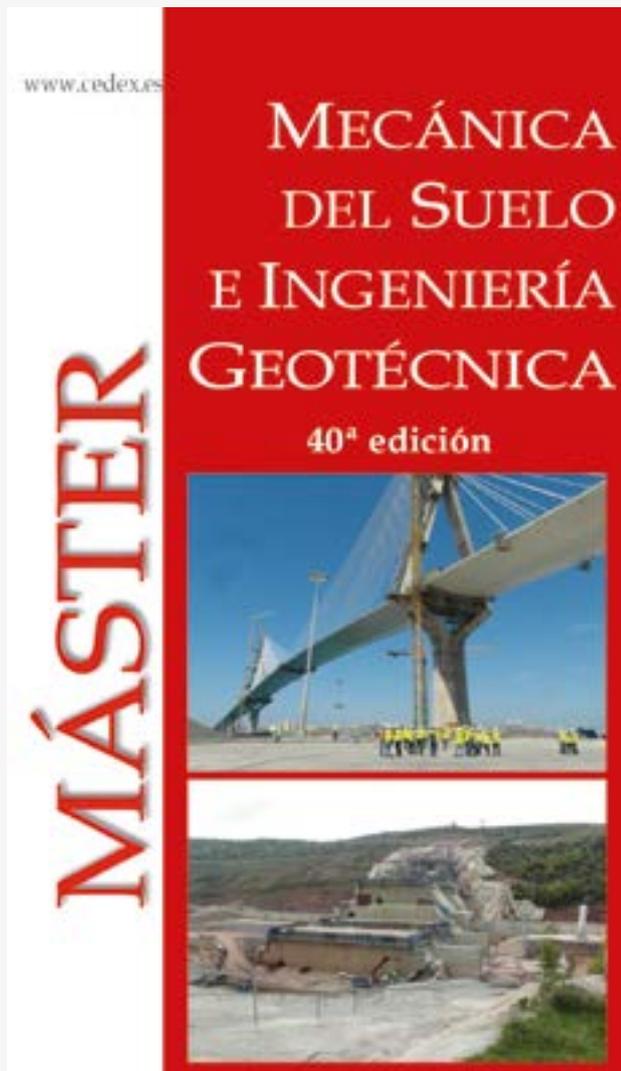


Sumario

Editorial	5
Experimentación ERTMS basada en satélite: el proyecto GATE4Rail <i>ERTMS Experimentation with Satellite: The Gate4Rail Project</i> Ricardo Campo Cascallana, Daniel Molina Marinas, José Bueno Pérez, Susana Herranz de Andrés, Ignacio Jorge Iglesias Díaz	7
ERTMS: despliegue, innovación y futuro <i>ERTMS: Deployment, Innovation and Future</i> Silvia Domínguez Fernández	23
Hacia un ferrocarril aún más sostenible <i>Towards an Even More Sustainable Railway</i> Imanol Iturrioz Villalba	31
Caminos hacia el tren Talgo del futuro. El aligeramiento y la innovación como herramientas para la sostenibilidad <i>Pathways to the Talgo Train of the Future. Lightweighting and Innovation as Tools for Sustainability</i> Eduardo de la Guerra Ochoa, Francisco José García Piñero, Víctor Meroño Domínguez, Javier Fernández Valverde, Marta Cerdeira Peinado	39
Actuaciones del Laboratorio de Geotecnia-CEDEX en Ingeniería Geotécnica Ferroviaria <i>Activities of the Laboratorio de Geotecnia-CEDEX Related to Railway Geotechnical Engineering</i> José Estaire, Javier Moreno, Fernando Pardo de Santayana, María Santana	49
La tecnología satelital en el ferrocarril <i>The Satellite Technology for Railways</i> Álvaro Herrero Porteros, Antonio Águila Martínez-Casariago, Juan Gabriel Arroyo Parras, Francisco Javier Carvajal Pérez, José Conrado Martínez Acevedo, Ramiro Valdés Álvarez de Palencia, Jaime Pereira Ballesteros, Ricardo Campo Cascallana, José Bueno Pérez, Pedro Agudo Madurga	73
Modelos de gobernanza portuaria en América: análisis Cluster <i>Port Governance Models in the Americas: Cluster Analysis</i> Alberto Camarero Orive, José Ignacio Parra Santiago, Leticia Espinosa, José Manuel Vasallo Magro	87
El hidrógeno como futuro de los combustibles en automoción <i>Hydrogen as the Future of Automotive Fuels</i> Alejandro Marín Soler	101
El sistema VIGÍA: control de pandemias a través del análisis del agua residual <i>The VIGÍA System: Pandemic Control Through Wastewater Analysis</i> Antonio Lastra de la Rubia, Jaime Botello Herranz, Alejandro Pinilla Riveiro, Juan Sánchez García, Pascual Fernández Martínez	109
Ensayos reológicos y empíricos de un betún recuperado de testigos y utilizado en la fabricación de una mezcla bituminosa semicaliente con tensoactivos <i>Rheological and Empirical Tests of Bitumen Recovered from Cores and Used to Produce a Warm Mix Asphalt with Surfactants</i> Belén Enciso Ramos, María Sánchez Pallarés, Rafael Jiménez Sáez	119
Caminos de Innovación en Ingeniería Civil Agua regenerada para luchar contra los incendios forestales Javier Anguiano Aranzubia, Mario Ruiz, Ferrán Dalmau-Rovira	128
Semblanzas José Entrecanales Ibarra: vida y semblanza de "El ingeniero-profesor" Gloria Quiroga Valle	133
Ediciones del CEDEX	140
Exposiciones	144
Normas de redacción También disponibles en la página web del CEDEX: http://cedex.es	146

La revista en formato digital está disponible en:
<http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil>

MÁSTER EN MECÁNICA DEL SUELO E INGENIERÍA GEOTÉCNICA



RESEÑA HISTÓRICA

Este máster fue ideado **en los años 80** por **D. José Antonio Jiménez Salas**, pionero de la Mecánica del Suelo en España, catedrático en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid y director del Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Originariamente se planteó como un curso de especialización para titulados iberoamericanos. Desde entonces, el CEDEX lo ha organizado **anualmente**, con apoyo de diversas entidades.

Aquel curso internacional obtuvo categoría de **Máster en el 2000** y desde **2009** es **Máster Universitario de Título Propio** (de la Universidad Politécnica de Madrid, UPM, hasta 2011 y de la UNED desde 2012), siendo una **referencia absoluta** en España e Iberoamérica como formación de profesionales en geotecnia. La evolución histórica del máster está publicada en un artículo del Congreso Internacional "Geotechnical Engineering Education 2020", auspiciado por la ISSMGE.

DIRECCIÓN: CEDEX Y UNED

La UNED y el CEDEX organizarán de nuevo en **2022** de forma conjunta la **40ª edición** del Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica. Será la 2ª edición impartida en modalidad telemática.

El **CEDEX** es el **organismo** de la **Administración General del Estado** Español de referencia en **I+D+i** en las **obras públicas y en el medio ambiente**, con funciones de asistencia técnica y de difusión del conocimiento. Está adscrito orgánicamente al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y, funcionalmente, también al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

La Universidad Nacional de Educación a Distancia (**UNED**) es una **universidad** de ámbito **estatal**, tutelada directamente por el **Ministerio de Universidades**. Ocupa el primer lugar de todas las universidades españolas y el segundo en Europa por número de alumnos.

El **máster**, actualmente Título Propio de la **UNED**, tiene una **equivalencia de 60 créditos ECTS**.

FECHAS

31 enero-28 octubre, 2022

Periodo lectivo, febrero-junio: clases telemáticas 4h. diarias.

Periodo de tesina, julio-septiembre: tutela telemática.

Periodo de prácticas, octubre: presencial: laboratorio, campo, talleres y viaje a obras.

COSTE

El Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica tiene un coste de 6.000 euros.

EDITORIAL

Ingeniería Civil está de cumpleaños con la publicación de su número 200

La revista técnico-científica *Ingeniería Civil*, del CEDEX (MITMA), está de especial celebración en estos días. Ha publicado su número 200 después de más de tres décadas llegando a sus lectores y, por extensión, a la comunidad científica y a la sociedad.

Así pues, la revista desea congratularse y aprovechar esta ocasión para renovar su compromiso de seguir siendo un vehículo activo al servicio de la innovación y la transferencia de conocimiento.

Fiel a este espíritu, que le ha permitido cimentar y apuntalar una trayectoria de constante búsqueda de la excelencia, la revista quiere así hacerse eco de uno de los propósitos iniciales que inspiraron el editorial del primer número de la misma –tras varias décadas de trabajo orientado a la consolidación y divulgación de un acervo técnico y científico–, publicado allá en un no tan lejano invierno de 1987. A saber: “[...] Una revista técnica ha de ser el cauce que permita la difusión del conocimiento científico y técnico entre la comunidad profesional a la que se dirige [...]”.

Por ello, es precisamente ahora, cuando doscientos números de la revista nos contemplan, el momento de hacer un alto en el camino para, por un lado, mirar hacia atrás para saber de dónde venimos y, por otro, para intentar vislumbrar el futuro a fin de saber adónde queremos llegar. Entretanto, y en medio de este voraginoso vendaval que es el distópico tiempo presente, marcado por la incertidumbre, la disrupción tecnológica y la hiperconectividad radical, y donde coinciden lo importante y lo urgente, podemos afirmar que lo único que no ha variado en todos estos años es la vocación de presentar una revista atractiva, versátil y, sobre todo, con contenidos de calidad, y de conectar con las inquietudes de los lectores.

A lo largo de los años, las cambiantes necesidades sociales han ido prefigurando, desde la idiosincrasia institucional y eminentemente técnica del CEDEX, el misceláneo carácter temático de sus números, tal y como apreciará el lector por el ejemplar que tiene ahora entre las manos. Aunque dedicando un bloque importante al futuro del ferrocarril y la geotécnica ferroviaria, pues 2021 fue, como es sabido, **Año Europeo del Ferrocarril**, hemos querido también incluir en este número otras aportaciones relacionadas directamente con otros ámbitos de especialización de la ingeniería civil: el futuro del hidrógeno como fuente alternativa de combustible; la presencia y dinámica del ARN del SARS-CoV-2 en el sistema de saneamiento de aguas residuales de la Comunidad de Madrid; el comportamiento de los betunes utilizados en la fabricación de mezclas semicalientes con tensoactivos; los diferentes modelos de gobernanza portuaria en América; el uso de agua regenerada para luchar contra los incendios forestales; o, en un plano más divulgativo, la semblanza del ‘ingeniero-profesor’ y empresario José Entrecanales Ibarra (1899-1990).

Si finalmente se han publicado 200 números de la revista es porque, a qué dudarlo, hay al menos 200 razones para seguir apostando por esta aventura intelectual, mezcla de pasión e inteligencia, que es sin duda *Ingeniería Civil*, una herramienta para la reflexión, el estudio y la difusión del conocimiento.

Interoperabilidad Ferroviaria

Líneas de Actividad

Verificación ETCS (European Train Control System) a nivel de componente, subsistema y sistema

Introducción de nuevas tecnologías de comunicaciones y posicionamiento por satélite en el ERTMS

Desarrollo y automatización de herramientas de laboratorio

.....

Fields of Activity

ETCS (European Train Control System) Verification at component, subsystem and system level

New communications and satellite positioning technologies in ERTMS

Development and automation of laboratory tools



Más información en
<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas

Experimentación ERTMS basada en satélite: el proyecto GATE4Rail

ERTMS Experimentation with Satellite: The Gate4Rail Project

Ricardo Campo Cascallana^{1*}, Daniel Molina Marinas², José Bueno Pérez³, Susana Herranz de Andrés⁴, Ignacio Jorge Iglesias Díaz⁵

Resumen

El impulso de la Unión Europea para la aplicación de la infraestructura europea de satélites de navegación GALILEO en áreas específicas, como el transporte, se ha visto reflejado en el creciente desarrollo de productos y proyectos de cobertura mundial que se benefician de sus prestaciones, calidad de los servicios y, al tratarse de la única opción GNSS en el mundo bajo control civil, de su fiabilidad y disponibilidad. El Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF) del CEDEX, consciente del potencial de estos nuevos desarrollos en la señalización ferroviaria europea ERTMS, participa activamente en los proyectos EGNSS europeos, y prepara su laboratorio para afrontar los nuevos desafíos. En este artículo se describe la experimentación realizada en el laboratorio ERTMS-GNSS del CEDEX dentro del proyecto GATE4Rail, destacando el papel que los laboratorios ERTMS tienen actualmente en la puesta en servicio de las líneas ERTMS y señalando el camino para las líneas futuras donde el uso de satélites será cada vez más relevante.

Palabras clave: Sistema Europeo de Señalización Ferroviaria (ERTMS), Sistema de Navegación por Satélite (GNSS), señalización ferroviaria, Galileo, baliza virtual, mapa digital.

Abstract

The European Union's drive for the application of the European GALILEO navigation satellite infrastructure in specific areas, such as transport, has been reflected in the growing development of products and projects with worldwide coverage that benefit from its performance, quality of services and, as the only GNSS option in the world under civilian control, its reliability and availability. The Railway Interoperability Laboratory (LIF) of CEDEX, aware of the potential of these new developments in European ERTMS railway signalling, is actively participating in European EGNSS projects, and is preparing its Laboratory to meet the new challenges. This article describes the experimentation carried out in the ERTMS-GNSS laboratory of CEDEX within the GATE4Rail project, highlighting the role that ERTMS laboratories currently play in the commissioning of ERTMS lines and pointing the way for future lines where the use of satellites will be increasingly relevant.

Keywords: European Rail Traffic Management System (ERTMS), Global Navigation Satellite System (GNSS), railway signalling, Galileo, virtual balise, digital map.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto GATE4Rail (*GNSS Automated Virtualized Test Environment for Rail*), con una duración de 2 años y finalizado en febrero de 2021, se engloba dentro del desafío europeo de “Transporte inteligente, ecológico e integrado”. Ha sido financiado por el programa Shift2Rail, en el marco del Programa de Innovación 2 (IP2) sobre señalización, posicionamiento seguro y sistemas avanzados de control y gestión de tráfico (Grant Agreement 826324).

El proyecto cuenta con la participación de socios de distintos países: RadioLabs, RFI y Bureau Veritas (Italia), Universidad Gustav Eiffel y GUIDE (Francia), UNIFE y M3S (Bélgica), INECO y CEDEX (España).

Como se muestra en el presente artículo, GATE4Rail es un proyecto eminentemente experimental, teniendo por

objetivo la definición de una estructura de interconexión entre centros de referencia europeos de GNSS y el Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX, especializado en señalización ERTMS, permitiendo ensayar y analizar el impacto de la tecnología GNSS en el sistema ERTMS.

Más concretamente, el proyecto se ha centrado en evaluar la incorporación en el sistema ETCS embarcado de un nuevo módulo de posicionamiento basado en el uso de balizas virtuales, tal y como puede verse en la figura 1.1. De esta manera es posible reducir el equipamiento de vía y, por tanto, el coste de implementación del ERTMS.

En todo caso, el entorno de pruebas diseñado permite evaluar no solo el uso de balizas virtuales, sino cualquier otra implementación que fusione ERTMS con GNSS, como por ejemplo la función de odometría mejorada, entre otras.

Las herramientas desarrolladas dentro del proyecto permiten generar y simular una serie de efectos globales y locales de GNSS en determinadas zonas y combinarlas con diferentes disposiciones de balizas virtuales, para observar y analizar el efecto en las circulaciones de los trenes. Por otro lado, es posible realizar ensayos simulando diferentes fechas y horarios y, por tanto, con diferentes posiciones de los satélites GPS y Galileo en sus orbitas, con el fin de

* Autor de contacto: ricardo.campo@cedex.es

¹ Ingeniero industrial. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

² Doctor en Ciencias Físicas. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

³ Doctor ingeniero naval. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

⁴ Ingeniera de telecomunicaciones. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

⁵ Doctor ingeniero naval. Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria (LIF), del CEDEX.

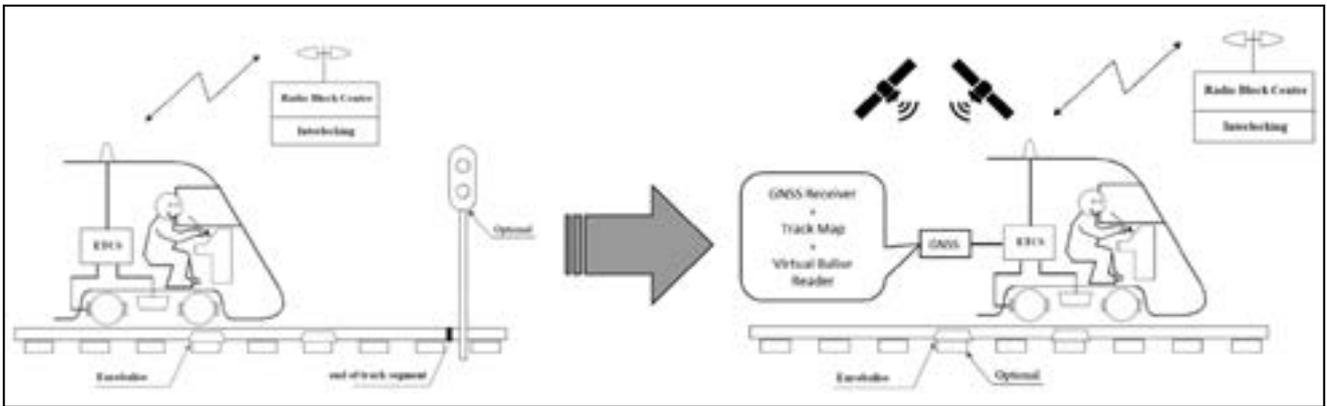


Figura. 1.1. ETCS con módulo GNSS embarcado.

evaluar otros aspectos como la fiabilidad o la disponibilidad de la solución implementada.

Una premisa fundamental en todos los ensayos en laboratorio es la exactitud de la posición del tren en la vía, tanto desde un punto de vista estático como dinámico. La definición de este perfil dinámico, compuesto por una marca de tiempo (fecha y hora), junto con la posición precisa del punto de referencia del tren, en coordenadas geográficas y a lo largo de la vía (punto kilométrico), permite evaluar la bondad de la solución GNSS implementada y, por tanto, su idoneidad para el uso. Esta evaluación se basa en la comparación entre la posición teórica en un momento dado, con la posición obtenida por los módulos GNSS. Este mecanismo tan simple puede usarse para una evaluación a nivel de componente, de subsistema o incluso de sistema, por lo que se destaca como un elemento fundamental para el desarrollo y validación de la integración de esta tecnología GNSS en el ERTMS.

Este artículo se centra en una descripción de los desarrollos del CEDEX en las diferentes secciones del proceso,

desde la creación de una base de datos para las líneas que incluyan las coordenadas geográficas, hasta los desarrollos que permiten la carga, ejecución y análisis automático de las circulaciones bajo diferentes condiciones de pruebas sobre la ruta seleccionada, mostrando las capacidades y posibilidades que el LIF puede ofrecer.

Finalmente cabe destacar que en la página web del proyecto [1] hay disponible información adicional sobre el proyecto y la plataforma desarrollada.

2. ARQUITECTURA DE LA INFRAESTRUCTURA DE LOS LABORATORIOS Y DESARROLLO DEL PROCESO

Una tarea crucial del proyecto ha sido la definición de la arquitectura de la plataforma de ensayos geo-distribuida entre los laboratorios de los diferentes socios. La interconexión entre los laboratorios se define creando unos módulos y unas interfaces que permiten el flujo de datos entre ellos tal y como se observa en la figura 2.1.

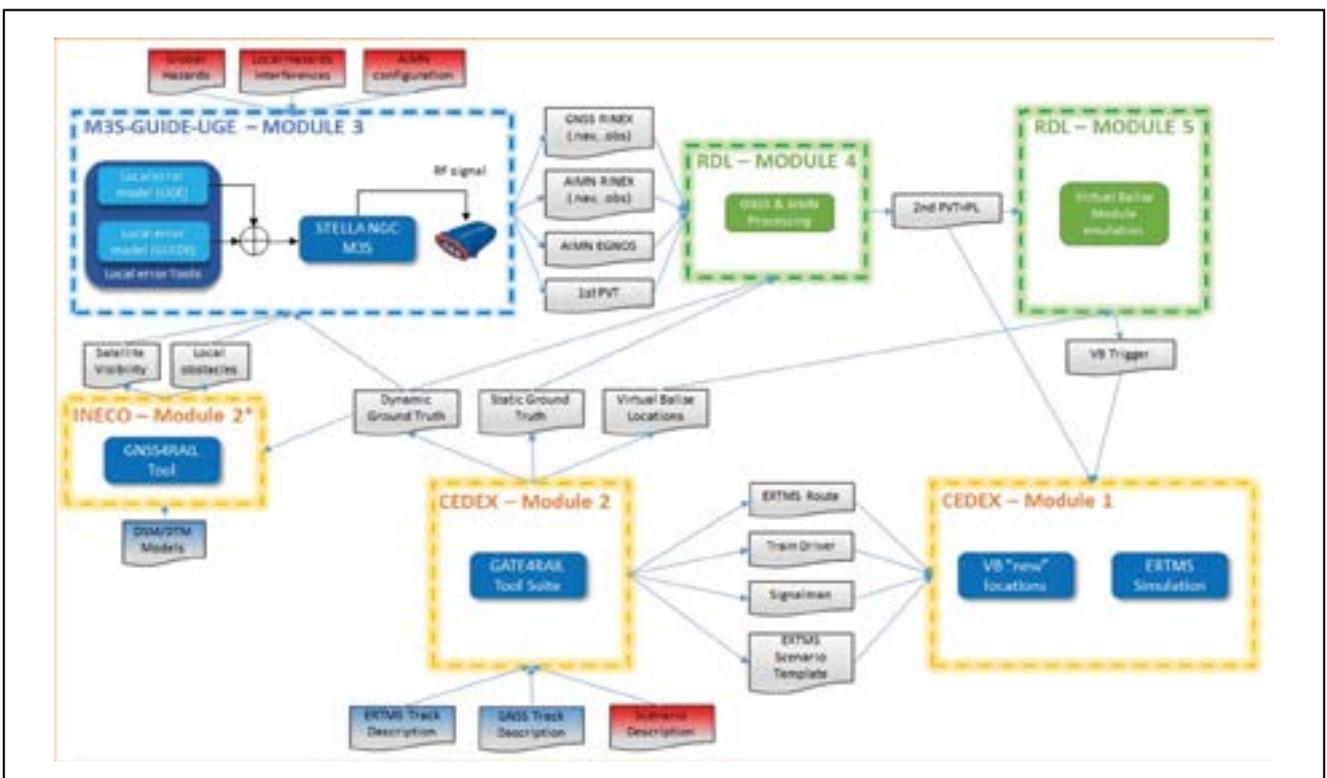


Figura. 2.1. Arquitectura de la infraestructura de laboratorios [1].

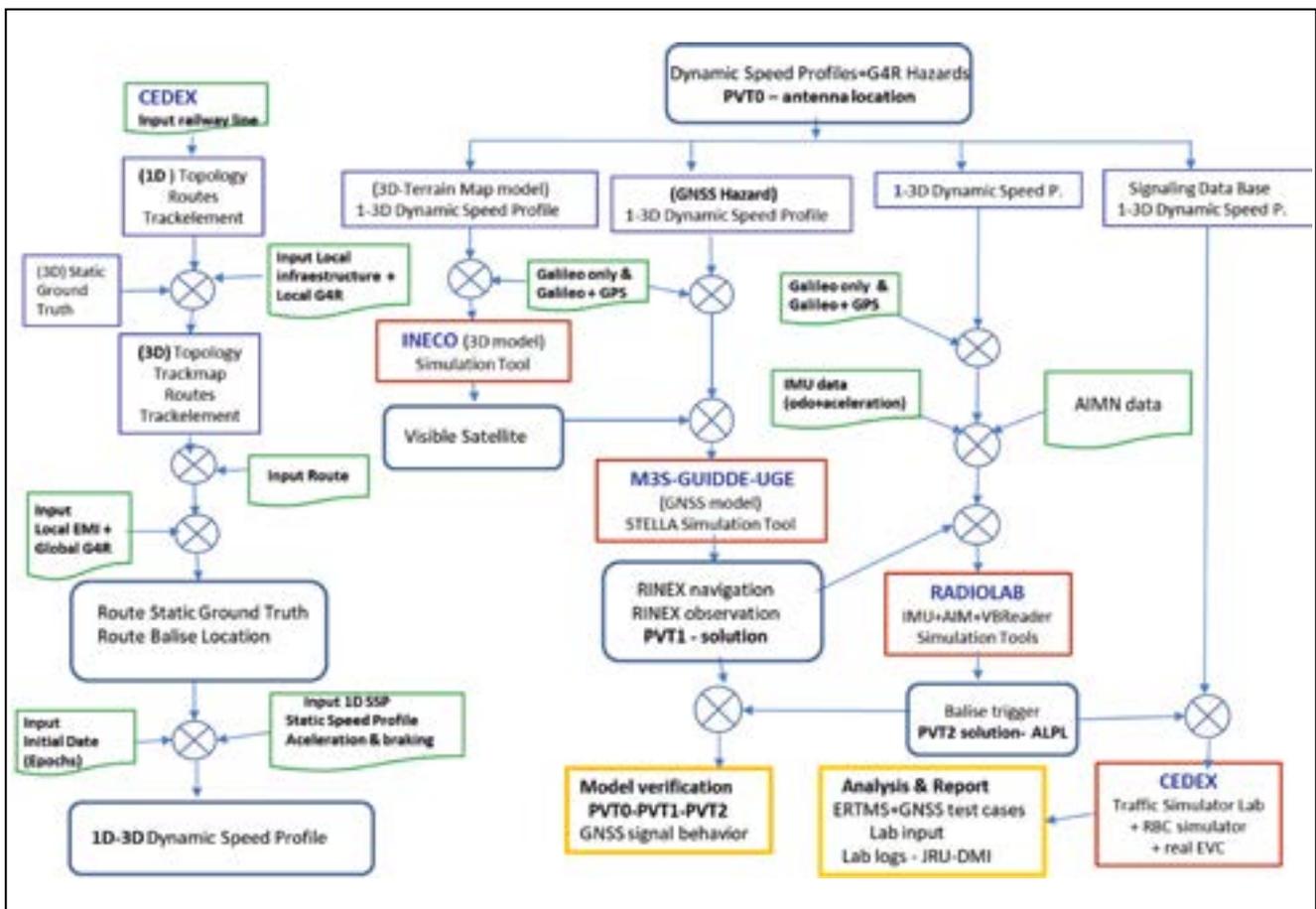


Figura. 2.2. Diagrama de flujo del proceso.

El proceso de simulación comienza en el **módulo#2-CEDEX** mediante la creación de los datos correspondiente a la ruta que se va a ensayar conteniendo la trayectoria, el perfil de velocidades, las condiciones de ensayo de GNSS y el diseño de vía con balizas virtuales. De este modo se crea la base de datos en 1D-3D de la línea y el perfil dinámico de velocidad, generando la localización geodésica de la antena del tren (PVT0) en cada coordenada temporal y espacial a lo largo de la vía.

En sentido de las agujas de reloj, el **módulo#2-INECO** genera para cada coordenada los datos correspondientes a la visibilidad de satélites considerando las características del terreno de los modelos del Instituto Geográfico Nacional teniendo en cuenta la fecha y hora elegida de circulación y los obstáculos locales (arboleda, pasos elevados, túneles, trinchera...) a lo largo de la trayectoria.

El **módulo#3-UGE-GUIDE-M3S** recibe el perfil dinámico de velocidad, los obstáculos locales, la visibilidad de satélites y las condiciones de ensayo GNSS. A continuación, evalúa la distorsión debida a los obstáculos que encontrará el tren en su trayectoria y finalmente, genera los datos de navegación que recibiría una antena GNSS situada en el techo del tren al recorrer esa ruta a dicha velocidad y en esa fecha. Por otro lado, se pueden introducir otros efectos locales (EMI, *jamming* y/o *spoofing*) y globales GNSS (fenómenos en la ionosfera, fallo de reloj en los satélites, etc.), así como medidas correctivas basadas en los diversos sistemas de aumentación susceptibles de emplearse en dicha trayectoria. De forma adicional, una vez finalizada la generación de los datos de navegación, es posible calcular una primera solución PVT1

(posición-velocidad-tiempo) para un receptor GNSS tipo para la localización del tren.

El **módulo#4-Radiolabs** recibe por una parte los datos de navegación de satélite GNSS del módulo#3, y por otra parte las coordenadas geográficas referencia de la vía del módulo#2-CEDEX. Con esta información, el módulo#4 restringe el movimiento a la vía, y calcula una segunda estimación de la posición del tren (segunda solución PVT2) y su incertidumbre asociada en la vía (*Protection Level*).

El **módulo#5-Radiolabs**, con la información recibida del módulo#2 CEDEX del listado de balizas virtuales en vía con su localización geográfica, y con la posición de la antena junto con su incertidumbre en cada instante, obtenida del módulo#4 de navegación, calcula el instante de disparo al paso por las balizas virtuales, y define la incertidumbre asociada.

El proceso termina en el **módulo#1-CEDEX**. En este módulo se generan de forma automática los ficheros de datos a cargar en los simuladores del LIF, esto es, la ruta, el perfil de velocidad, los disparos de balizas y su incertidumbre (acorde a la información recibida del módulo#5). Tras la ejecución del escenario, se almacenan de forma ordenada los registros de laboratorio (velocidad, eventos en el interfaz con el tren, disparos de balizas, etc.), la grabación del DMI (*Driver Machine Interface*) con la información que ve en cabina el maquinista y el registro de JRU (*Juridical Recorder Unit*) de la Eurocabina. Los desarrollos de análisis automático permiten generar el resultado en un informe final de la prueba. El diagrama de flujo de la figura 2.2 resume el proceso.

3. GENERACIÓN DE DATOS DE LA LÍNEA ESPAÑOLA

La base de datos utiliza una estructura creada a partir del Subset-112 (*UNISIG Basics for Interoperability Test Scenario Specifications*), que consiste en:

- Topología de la línea: basada en listas de toperas, conectores, desvíos y segmentos de vía.
- Elementos de vía: basada en una lista de balizas y de señales.
- Rutas posibles: con la lista de segmentos y sentido, la lista de balizas y señales con los telegramas y aspectos específicos para cada ruta.

Sobre esta estructura de datos, con una localización basada en puntos kilométricos, se ha añadido una capa de información con las coordenadas geodésicas (latitud, longitud, altura):

- Mapa de segmentos: basada en una lista de coordenadas geográficas de todos los puntos dentro de un segmento con una resolución de un metro, indicando la distancia relativa al origen del segmento y su PK asociado, junto con información adicional de elementos de la infraestructura.

Con el fin de garantizar un solapamiento correcto entre la estructura de datos inicial (basada en longitudes a lo

largo de la vía) y el esquema basado en coordenadas geográficas (basado en longitud, latitud y altura), se hizo especial hincapié en preservar las distancias recorridas en las dos representaciones. De esta manera, se partió de las medidas recogidas en el terreno sobre las que se aplicó un algoritmo propio para obtener un promedio de los recorridos por cada sección de la línea, promedio que se tomó como mejor valor representativo de las coordenadas, como puede observarse en la figura 3.2, y que se ajusta a la tira de vía de la figura 3.3.

En relación a los parámetros de posicionamiento de las antenas con respecto al resto de elementos se considera en las pruebas que, la posición de las antenas BTM (*Balise Transmission Module*) y GNSS con respecto a los ejes transversal y longitudinal del tren es la misma, siendo su altura con respecto al rail la que varía.

En cuanto al tramo en estudio, el presente artículo se centra en la línea de Almorchón-Mirabueno, sobre la que se aplicó una ingeniería de vía ERTMS definida íntegramente por el CEDEX y que contempla: funcionalidades ERTMS, requisitos de infraestructura para la localización de señales luminosas/virtuales y localización de balizas físicas/virtuales.

El diseño de la ingeniería de vía se ha realizado ad-hoc para los fines específicos del proyecto. De hecho, en otros tramos de la línea española se han planteado ingenierías dispares con el fin de estudiar otras casuísticas de la integración GNSS-ERTMS, tal y como se indica en el apartado 4.

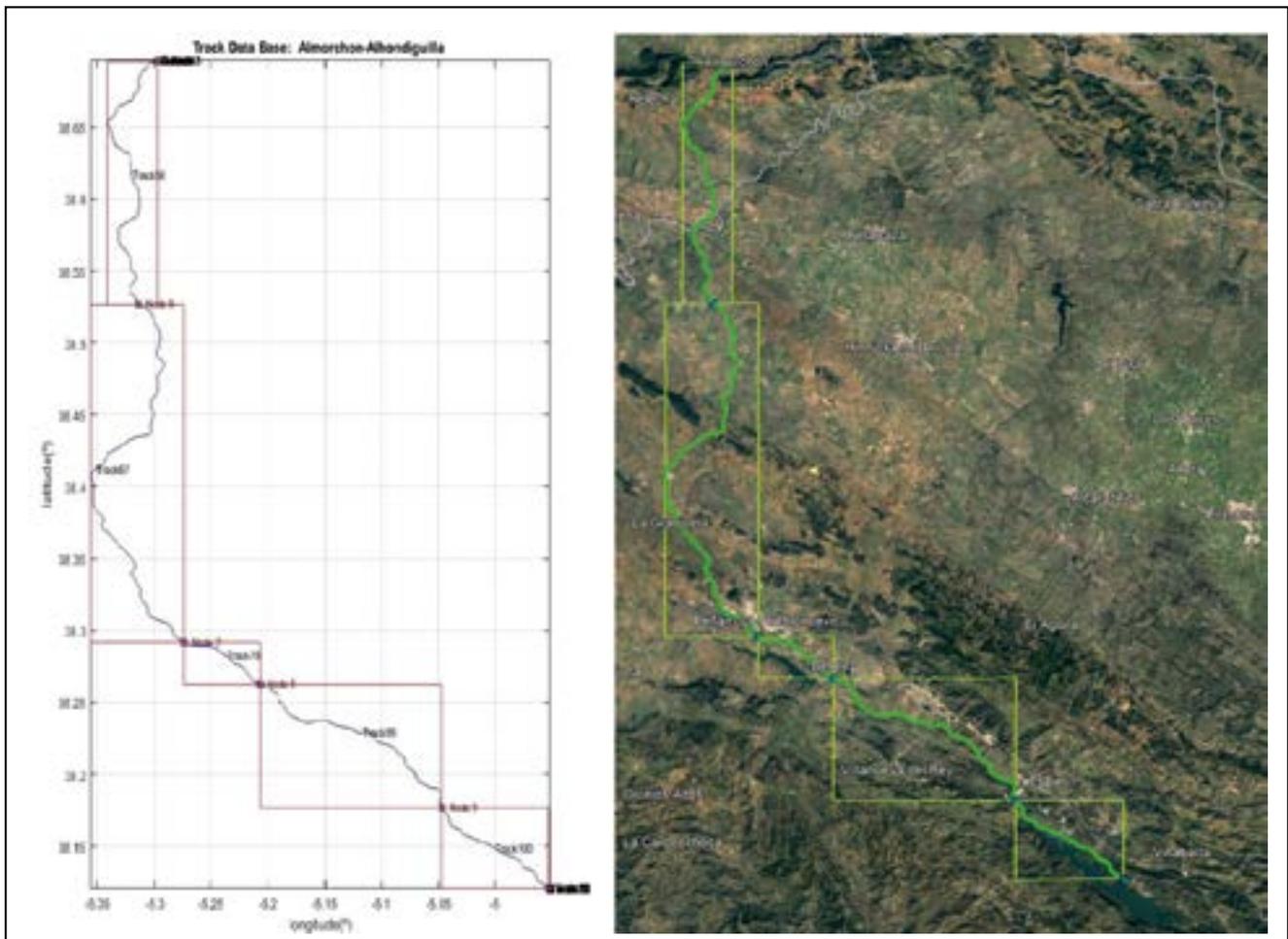


Figura 3.1. Línea de Almorchón-Alhondiguilla, mapa de segmentos en coordenadas geodésicas (imagen de la derecha visualizada en Google Maps).

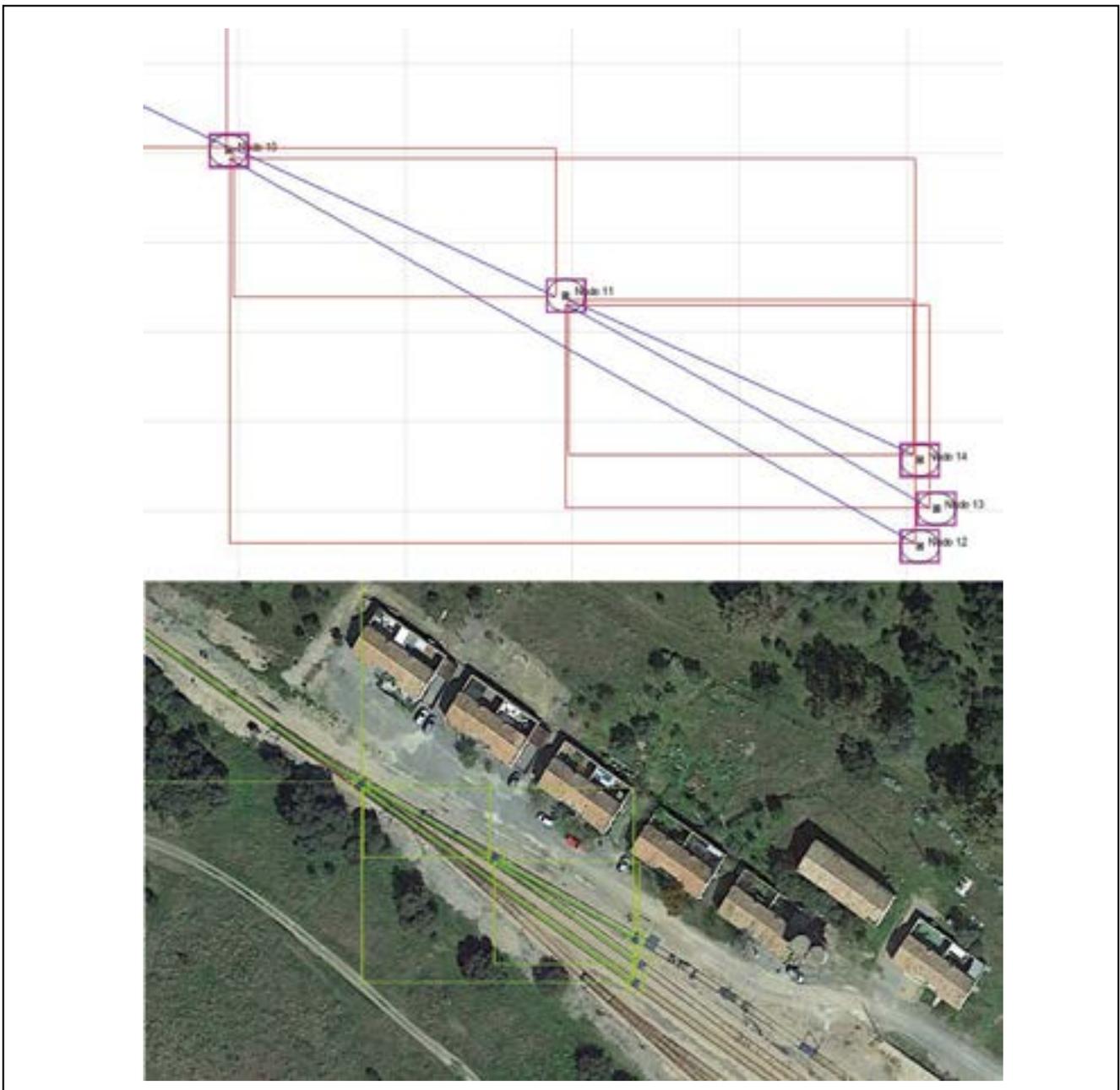


Figura. 3.2. Estación de Almorchón (Fuente: Google Maps).

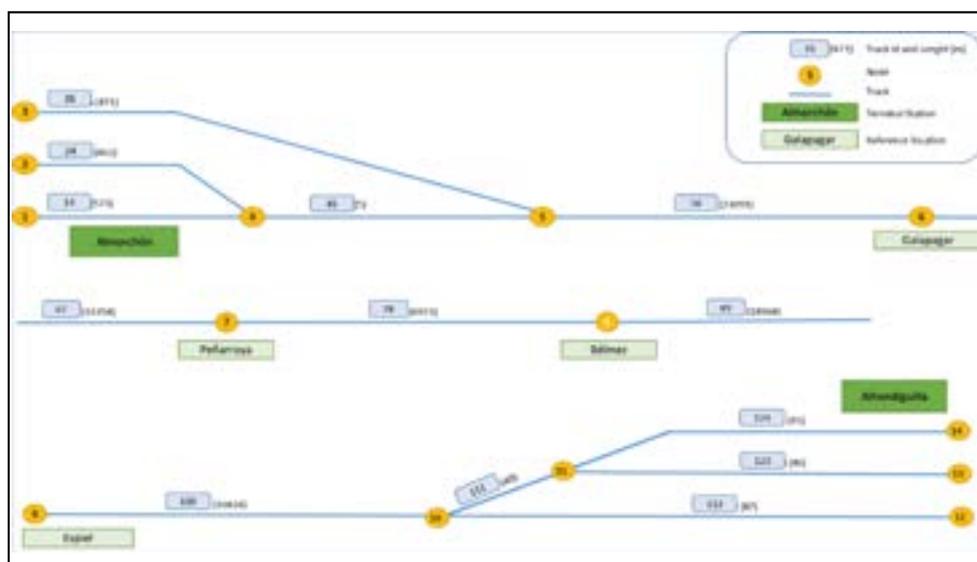


Figura. 3.3. Plano esquemático de la línea en una dimensión [1].

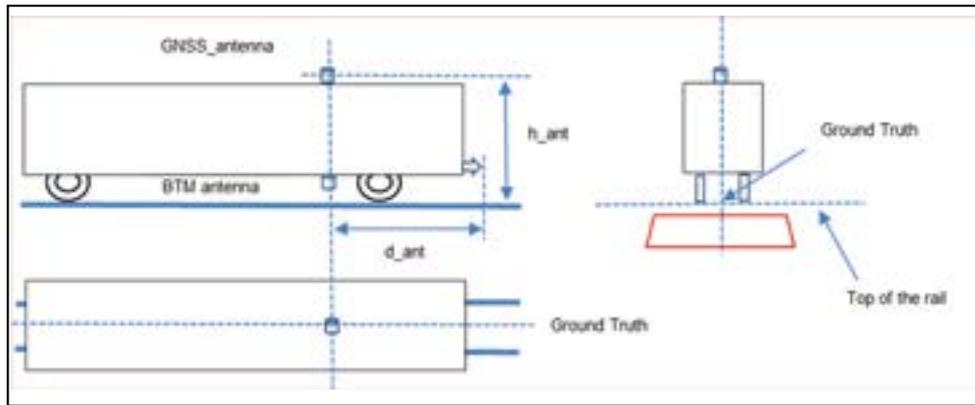


Figura. 3.4. Referencia relativa al morro del tren.

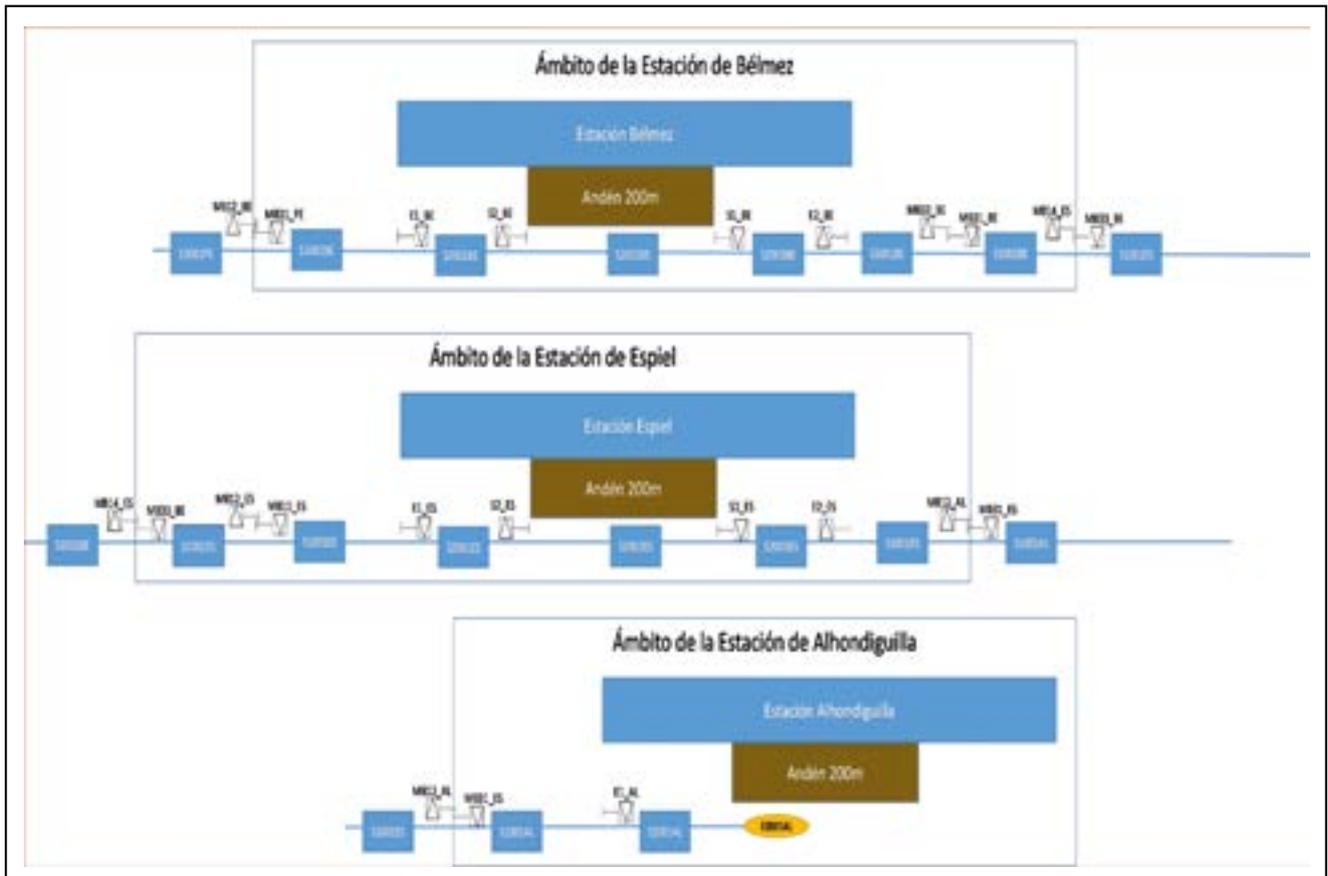


Figura. 3.5. Plano de señalización.

Además, aparte de la señalización, sobre cada punto de la vía con resolución de un metro se indican la coordenada y la característica que aplique de la infraestructura de la propia vía o del entorno que tenga impacto en la recepción de señales GNSS, por ejemplo, una estación techada, una trinchera, una zona arbolada o el caso de un puente con estructura metálica. Para clasificar los distintos efectos locales en la señal GNSS se ha definido una tabla con los identificadores asociados a cada una de las características que pueden encontrarse en la vía.

LOCAL	DETAIL
0	Open sky
1	Tree Canopy area
2	Tunnel
3	Road overpass
4	Lateral trees
5	Full trench
6	Half trench
7	Urban Canyon
8	Metallic structures
9	Bridge
10	Station
11	Drain
12	Level crossing

Figura. 3.6. Clasificación de interés de tramos de la vía realizada por el CEDEX.

Nota: cabe destacar que en el apartado de simulación de GATE4RAIL se han considerado únicamente en aquellos fenómenos con afectación en la señal GNSS.



Figura. 3.7. Marcado de la infraestructura, puente 'Juana la Mala' en la línea de Almorchón (Fuente: Google Maps).

Con esta información previa se completan las siguientes estructuras que forman parte de las bases de datos:

Topología:

- *Segments* (*id, lineid, connector1, connector2, length, latmax, latmin, lonmax, Lonmin, hmax, hmin*)
- *Connectors* (*id, lineid, connection1, connection2, kp1, kp2, latitude, longitude, height, mileage*)
- *Points* (*id, lineid, connection1, connection2, connection3*)
- *Ends* (*id, lineid, connection*)

Elementos de vía:

- *Balises* (*id, direction, segment, offset, idtel, coded telegram, latitude, longitude, height*)
- *Signals* (*id, direction, segment, offset, description, code, latitude, longitude, height*)

Mapas de la vía (*Trackmaps*):

- *Segments* (*id, distance, latitude, longitude, height, mileage, local, detail*)

Rutas:

- *Routes* (*id, description, direction, list of segments, list of balises, list of signals*)

4. CASOS DE PRUEBAS

Una vez generada y estructurada la información del apartado anterior, es necesario distribuir los diversos casos de prueba a lo largo de la vía, allí donde apliquen o se quiera estudiar alguna interacción especial entre la aplicación ERTMS de posicionamiento basado en balizas virtuales y la localización GNSS.

En la primera fase del proyecto se han definido un conjunto de casos de prueba genéricos¹ de GNSS y de

ERTMS que aplican al uso de balizas virtuales (VB) y su detección por un *Virtual Balise Reader* a bordo (VBR). En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de lista de casos de pruebas [1].

ERTMS	
G4R_ERTMS_GTC_1	Single VB Group Detection by VBR
G4R_ERTMS_GTC_2	Multiple VB Group Detection by VBR
G4R_ERTMS_GTC_3	Multiple VB Group Detection by VBR (Max. Dist. Within Group)
G4R_ERTMS_GTC_4	Multiple VB Group Detection by VBR (Min. Dist. Within the Group)
G4R_ERTMS_GTC_5	Multiple VB Group Detection by VBR (Min. Dist. Between Groups)
G4R_ERTMS_GTC_6	Cross-Talk Analysis VB Group Detection by VBR at Low Speed
G4R_ERTMS_GTC_7	Cross-Talk Analysis VB Group Detection by VBR at High Speed

GNSS	
Open Sky	
G4R_GNSS_GTC_1	Nominal
G4R_GNSS_GTC_2	Change During Day
G4R_GNSS_GTC_3	Spoofing
G4R_GNSS_GTC_4	EMI
G4R_GNSS_GTC_5	Jamming
G4R_GNSS_GTC_6	SIS Failure, Ephemeris Fault
G4R_GNSS_GTC_7	SIS Failure, Clock Fault
G4R_GNSS_GTC_8	SIS Multiple Failure
G4R_GNSS_GTC_9	Severe Ionospheric Anomalies
Restricted Environment	
G4R_GNSS_GTC_10	Severe NLOS
G4R_GNSS_GTC_11	EMI
G4R_GNSS_GTC_12	Jamming
G4R_GNSS_GTC_13	SIS Failure, Ephemeris Fault
G4R_GNSS_GTC_14	SIS Failure, Clock Fault
G4R_GNSS_GTC_15	SIS Multiple Failure
G4R_GNSS_GTC_16	Severe Ionospheric Effects
G4R_GNSS_GTC_17	Presence of Trees Area
Local And Urban Area	
G4R_GNSS_GTC_18	Severe Multipath

Figura. 4.1. Conjunto de casos de pruebas ERTMS y GNSS.

Estos casos de prueba se aplicarán de manera distinta dependiendo del caso de uso específico. En el proyecto GATE4Rail, la campaña de ensayos se ha centrado en dos tipos de líneas donde la implementación de la baliza virtual tiene mayor proyección:

- Línea de Cercanías en operación en Cerdeña (Italia), utilizada como línea piloto en Italia y sobre la que se han realizado pruebas con balizas virtuales. En este caso, los ensayos realizados corresponderían al caso de uso de la validación de una línea real en funcionamiento con balizas virtuales.

¹ El caso de prueba genérico recoge de forma detallada la funcionalidad ERTMS o fenómeno GNSS sin especificar su localización exacta en la vía.

- Línea regional de bajo tráfico en Almorchón (España), en el que se ha diseñado en el marco del proyecto una ingeniería de vía ERTMS con balizas virtuales. Este sería el caso de uso para el diseño de una nueva línea con ERTMS y balizas virtuales.

Sobre estas líneas se han creado diferentes escenarios, combinando diferentes casos de pruebas de ERTMS con casos de pruebas de GNSS. Con el objetivo de simplificar, de entre los casos de pruebas definidos en el proyecto se han utilizado los siguientes:

- Casos de prueba ERTMS: grupos de balizas simples y múltiples.
- Casos de prueba GNSS: cielo abierto, fallo del reloj de satélite, efectos en la ionosfera, interferencias electromagnéticas y áreas restringidas por efectos locales (arboleda, zona urbana, túnel y pasos elevados).

En el artículo se elige un escenario de la línea española de los ejecutados en la campaña de pruebas para mostrar todo el proceso.

5. CONCEPTO DE ESCENARIO Y SIMULACIÓN

Los datos de las líneas y los casos de prueba son sólo una parte preliminar del proceso de ensayo. Hay una serie de pasos adicionales que es necesario dar antes de proceder a la distribución de datos entre los distintos módulos de la arquitectura y ejecutar los distintos cálculos de forma ordenada, siguiendo el proceso descrito en el apartado 2. Estos pasos adicionales son la construcción de escenarios y la definición de simulaciones.

Así, el escenario queda definido como una selección de casos de prueba específicos (tanto GNSS como ERTMS) localizados en puntos concretos del tramo de vía a estudiar. La localización de los casos de prueba es un punto clave ya que para evaluar la interacción entre la casuística GNSS y la ERTMS es necesaria una coincidencia espacio-temporal. Así, para estudiar el efecto de determinados obstáculos en la localización satelital en escenarios con una nueva ingeniería de vía, se han posicionado balizas virtuales en las cercanías de dicho obstáculo.

Por otro lado, desde el punto de vista operacional, todo ensayo ERTMS debe constar de un punto de arranque del tren, de un inicio de misión ERTMS, de una circulación por un tramo de vía significativo en un modo ERTMS en el que se supervise el paso por las balizas virtuales y, finalmente, de una parada del tren. Además, en estos escenarios

existe una comunicación tren-vía constante a lo largo de la simulación.

Conjugando los dos conceptos anteriores se llega a una nueva entidad que, dentro del proyecto GATE4Rail, se ha denominado simulación y que viene a ser un ensayo operacional ERTMS completo en el que la dinámica del tren a lo largo de la simulación queda prefijada en cuanto a fecha, hora, posición y velocidad del tren. En este punto cabe destacar que el concepto de simulación incluye cualquier perturbación GNSS (real o intencionada) que se quiera introducir en el ensayo.

Como puede verse en la figura 5.1, dada la diversidad de situaciones que pueden aparecer durante una simulación, es posible evaluar varios escenarios distintos en un solo ensayo, lo que finalmente redundará en una mayor eficiencia de las pruebas. En el proyecto GATE4Rail se definieron siete simulaciones dentro del grupo de trabajo WP4, dedicado a la demostración de la funcionalidad de la arquitectura. En este artículo se muestra la simulación #3, con las siguientes características:

- Recorrido BA_R5: tramo de la línea española, entre Espiel y Alhondiguilla de unos 5.500 metros.
- Ingeniería de vía ERTMS nominal, diseñada por CEDEX, con una distribución de grupos de balizas virtuales simples y dobles.
- Perfil de velocidad con unas aceleraciones para la tracción y freno, junto con la fecha y hora de arranque y un retardo para iniciar el movimiento.
- Condiciones nominales de satélites de posicionamiento (cielo abierto) hasta el segundo 240 (a partir de 3.600 metros, aproximadamente), en el que se introduce un fallo de reloj en los satélites GPS hasta el final de la simulación.
- La zona de perturbación GNSS afecta a cuatro grupos simples de balizas virtuales y a dos grupos dobles. De esta manera, es posible cubrir cuatro escenarios:
 - Dos escenarios en condiciones GNSS nominales (caso de prueba GNSS G4R_GNSS_GTC_1) con grupos de balizas simples (caso de prueba ERTMS G4R_ERTMS_GTC_1) y dobles (caso de prueba G4R_ERTMS_GTC_2) en condiciones de cielo.
 - Dos escenarios en condiciones de fallo de reloj de satélite (caso de prueba GNSS G4R_GNSS_GTC_7) con grupos de balizas simples (caso de prueba ERTMS G4R_ERTMS_GTC_1) y dobles (caso de prueba G4R_ERTMS_GTC_2) en condiciones de cielo.

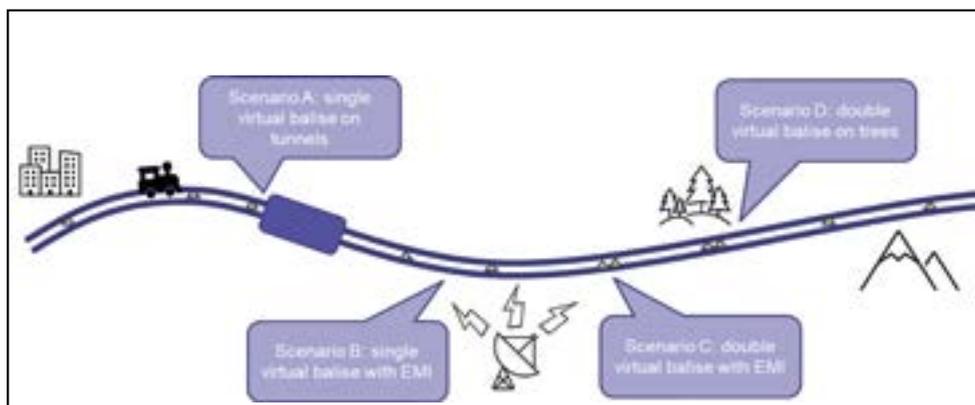


Figura. 5.1. Concepto de escenario [1].

6. COMIENZO DEL PROCESO (MÓDULO#2-CEDEX)

Con la información definida en el apartado anterior, se generan los siguientes datos requeridos por los otros laboratorios externos al CEDEX (**módulo#2-INECO, módulo#3-UGE-GUIDE-M3S, módulo#4-RDL, módulo#5-RDL**):

- El *Static Ground Truth* corresponde a los datos del recorrido de la vía (con precisión de metro) con una correspondencia entre la distancia al origen de partida, el PK y las coordenadas geodésicas referidas a tope del rail y centradas en la traviesa.
- El *Route Balise Location* es un listado de las balizas del recorrido, con su identificador, localización en

la sección de la vía, coordenadas geodésicas, información transmitida y un código indicando si es virtual o real.

- El *Dynamic Ground Truth* corresponde al movimiento del tren con referencia al morro, esto es, referido al tiempo con una resolución de 0.1 segundos. Se proporcionan las coordenadas geodésicas, la distancia al origen y la velocidad. Adicionalmente se genera la información en los formatos requeridos por otros módulos referidos a la posición de la antena GNSS en el tren.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de estas operaciones.

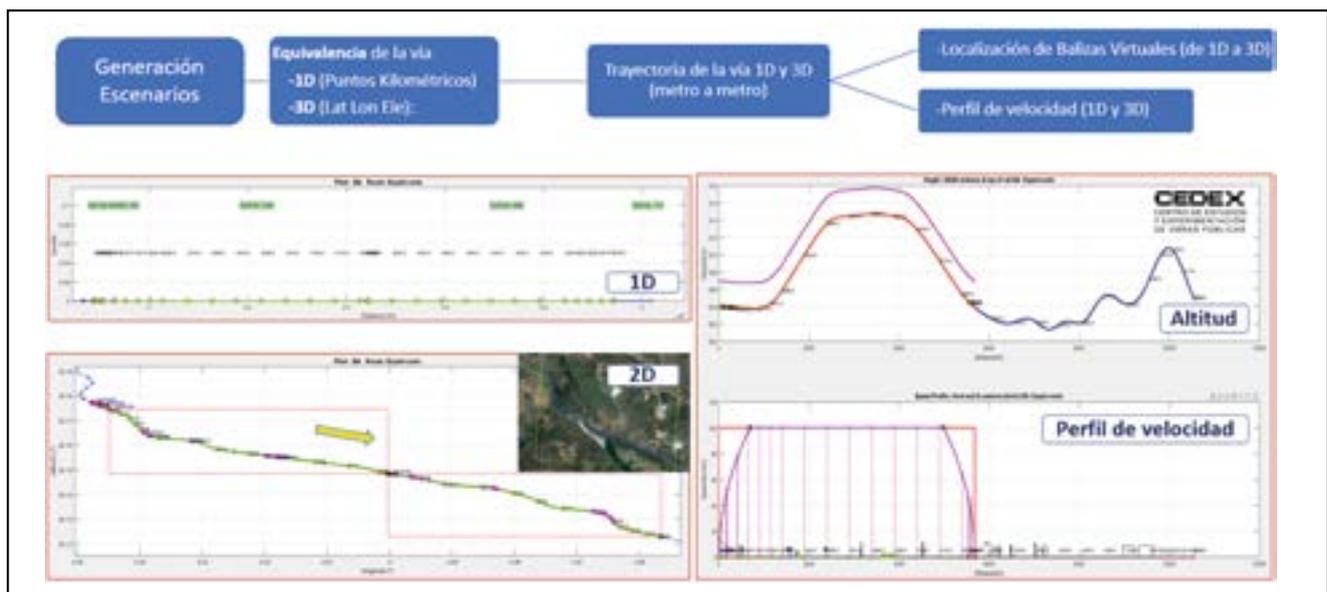


Figura. 6.1. *Static Ground Truth*, balizas del escenario, perfil de alturas y de velocidad en función de la distancia [1].

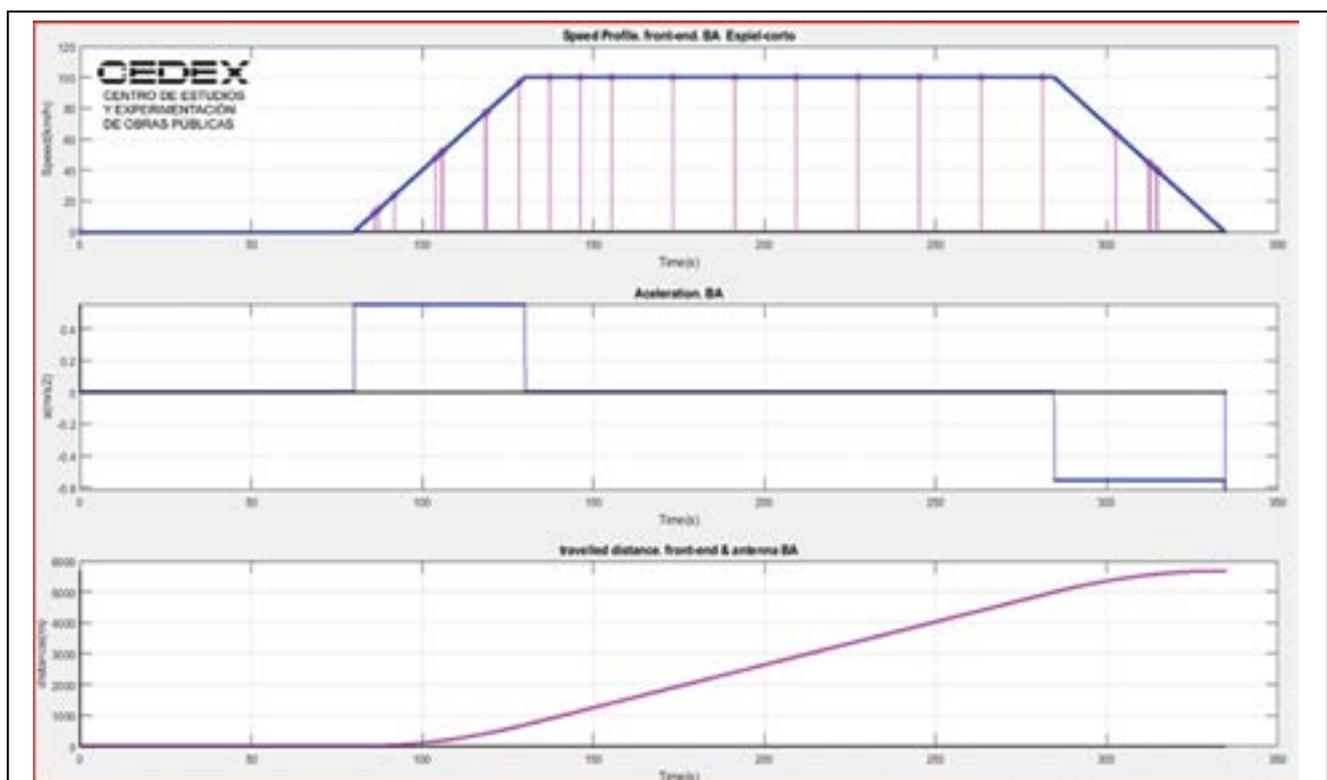


Figura. 6.2. *Dynamic Ground Truth*, perfiles de velocidad, aceleración y distancia recorrida en función del tiempo [1].

Cada archivo del **módulo#2-CEDEX** incluye una plantilla de datos referencia con el objetivo de garantizar la

trazabilidad íntegra a lo largo de todo el proceso de simulación, tal y como se observa en la figura 6.3:

Reference Data		Description
File Name	BA_RS_ERTMS1_SGT1_T1_20200925-080000_SP1_DGT.xlsx	Dynamic Ground Truth
Laboratory	LIF - CEDEX	Author
script	b_dgt	Program name
version	v4	Program version
date&time	2020-11-27 11:54:55	File creation date&time
Test Operator	RC-SH-DM-JB	Operator name
Test Data		
Line ID	BA	Belmez-Alhondiguilla
Route & ERTMS trackelement	RS_ERTMS1	Espiell-corto
Speed Profile	SP1	Internally generated
Date/Time- Epoch	2020-09-25T08:00:00Z	Scenario Start Date&time
Delay	80	seconds to stand still
Source Data		
SGT_VB Location File Name	BA_RS_ERTMS1_SGT1_VB.xlsx	SGT & Virtual Balise location
Speed Profile File Name	NA	Speed profile file name if any
Parameter Data		
Traction acceleration (m/s ²)	0,556	traction
Braking acceleration (m/s ²)	0,557	brake
Train length (m)	186,000	train length
Antenna x_ant (m)	0,000	distance to train front-end
Antenna y_ant (m)	0,000	distance to center of sleeper
Antenna z_ant (m)	3,000	height to top of rail
Sampling time (s)	0,100	time resolution
Speed profile Data		
travel distance (m)	5682.09	length of scenario
travel time (hh:mm:ss)	00:05:34	Duration of scenario
Start mileage (m)	52060.00	Start IP
End mileage (m)	46377.91	End IP

Figura. 6.3. Cabecera de datos de referencia del *Dynamic Ground Truth*.

7. ÚLTIMA ETAPA DEL PROCESO (MÓDULO#1-CEDEX), EJECUCIÓN DE LAS SIMULACIONES ERTMS

Una vez realizada la simulación en los laboratorios de GNSS, acorde a lo descrito en el apartado 2, se procede a describir los desarrollos y acciones en el **módulo#1-CEDEX** para llevar a cabo la fase de simulación ERTMS.

En los casos que nos ocupan, se evalúa la función ERTMS de posicionamiento del tren y comprobación de la información de enlace. Mediante esta función, el equipo ETCS verifica que pasa por una serie de balizas que previamente le han notificado y que la distancia recorrida entre esos grupos de balizas está dentro de unos márgenes respecto a las separaciones teóricas indicadas en la información de enlace entre balizas. Este mecanismo ERTMS permite al tren conocer el camino a recorrer, su longitud y reaccionar de forma segura ante cualquier desviación que pueda suceder. La novedad del proyecto GATE4Rail consiste en sustituir las eurobalizas instaladas en las vías por balizas virtuales, cuyas posiciones se fijan sobre un mapa. La localización de las mismas a bordo depende de los sistemas de posicionamiento por satélite y, por tanto, puede variar dependiendo de las circunstancias. Para evaluar la bondad de esta aproximación, se comprueba si la variación en la localización de las balizas virtuales entra dentro de los márgenes permitidos por la función ERTMS de comprobación de la información de enlace y, por tanto, no produce ninguna reacción de seguridad por parte del tren.

Dado que en la actualidad no existen equipos industriales embarcados de localización de balizas virtuales (denominado Virtual Balise Reader), dentro del proyecto GATE4Rail se ha ideado un método, analizado por un desarrollo de simulación off-line, para poder verificar el

impacto de las balizas virtuales en las funciones de posicionamiento ERTMS implementadas en una eurocabina industrial. Los pasos son los siguientes:

- Las balizas virtuales se sustituyen por balizas reales.
- Estas balizas se disparan en el tiempo y la posición indicados por el **módulo#5-RDL**.
- La eurocabina es informada previamente de las posiciones teóricas de las balizas.
- La eurocabina es informada previamente del margen de precisión en la localización de dichas balizas, extraído del intervalo de confianza calculado por el propio **módulo#5-RDL**.
- Se deshabilita la reacción de frenado en caso de fallo en la localización de las balizas para que no haya distorsión en la velocidad del tren, aunque los errores quedan registrados para su posterior evaluación.

Este proceso debe integrarse en la definición del ensayo, que, como ya se ha indicado anteriormente, debe tener significancia operacional. Por ello, todos los ensayos (o simulaciones, siguiendo la nomenclatura introducida en secciones anteriores) consisten en un encendido del tren, en parado, en un momento y localización determinados. El maquinista hace un procedimiento ETCS de Inicio de Misión, que consiste en la introducción de ciertos datos y en el establecimiento de comunicaciones con los equipos de vía (en este caso, simulados). Una vez finalizado el proceso, transcurrido un tiempo pre-programado, el tren empieza a moverse y lee dos de balizas para localizarse. En ese momento, se informa a la vía, que contesta a su vez con una descripción detallada del recorrido por delante del tren, incluida la información de enlace. Al recibir esa información, el tren entra en un modo denominado Supervisión Total, que activa la

función ERTMS mencionada anteriormente de localización del tren y comprobación de la información de enlace de baliza. A partir de este momento, el tren continúa su recorrido, leyendo las balizas en las posiciones calculadas por el **módulo#5-RDL**. Dicho recorrido se realiza a velocidad constante. Finalmente, el tren desacelera y se detiene.

Previamente a la ejecución sistemática de las simulaciones se ha preparado el laboratorio, caracterizando la línea, el tren y las conexiones necesarias, abordando los siguientes puntos:

- Datos de la línea:
 - Posición del tren y recorrido, gradiente, electrificación.
 - Localización de disparo teórico de balizas con sus telegramas.
 - Perfil de velocidad.
- Datos del tren:
 - Masa, longitud, distancia antena BTM al morro y comportamiento dinámico.
- Datos del RBC simulado:
 - Mensajes de comunicaciones de radio vía-tren.
- Conexión de una Eurocabina real.
 - Mensajes de balizas.
 - Conexión de las señales de TIU (*Train Interface Unit*).
 - Conexión de la odometría.

Posteriormente se genera la base de datos requerida para la carga y ejecución en los propios simuladores ERTMS del LIF (**módulo#1-CEDEX**). De cara a la ejecución del ensayo se han tenido en cuenta no solo los datos del **módulos#2-CEDEX** sino los proporcionados por el **módulo#5-RDL**, esto es, los instantes de disparo de las balizas virtuales y su incertidumbre, disparos que dependerán de la respuesta a las entradas generadas en los laboratorios GNSS incluyendo los efectos globales y locales según los casos de prueba GNSS seleccionados.

El LIF desarrolló en el marco del proyecto una herramienta que establece la relación directa entre los instantes de disparo del **módulo#5-RDL** y la distancia recorrida, de modo que las plantillas de balizas ERTMS se actualizan automáticamente a las nuevas posiciones dadas por el generador de balizas virtuales (módulo#5). Cabe destacar que la información de enlace almacenada en los telegramas de balizas que dan la autorización de movimiento mantiene el valor de distancia teórica entre grupos de balizas y actualiza la nueva incertidumbre en la variable Q_LOCACC .

Por parte del Laboratorio de Eurocabina, éste dispone de herramientas de visualización de las bases de datos con toda la información programada para la ejecución de un escenario.

En el apartado de visualización y análisis de escenarios, se han desarrollado herramientas para la automatización de todo el proceso, desde la visualización en 3D, pasando por el almacenamiento de datos (grabación de DMI, registros de JRU y módulos del laboratorio), hasta el análisis y obtención de la hoja de resultados finales.

De esta forma, durante la ejecución de un ensayo, además del comportamiento del tren y los disparos de balizas en el plano 1D y el DMI, se visualiza también en el plano 3D (a través del visualizador Google Earth) la información del campo en tiempo real: esto incluye la información *estática* del plano de vías con la localización teórica de las balizas, la posición real del tren, las posiciones de disparo de las balizas (módulo#5-RDL), la solución de posición de un receptor GNSS comercial (módulo#3-M3S-GUIDE-UGE) y la proyección de esta última posición sobre la vía (módulo#4-RDL). Más en detalle:

- Posición geográfica de la antena del tren en la vía (pvt0).
- Ejemplo de posición geográfica calculada por un receptor GNSS (pvt1).
 - Nota: teniendo en cuenta la afectación de fenómenos locales y globales.

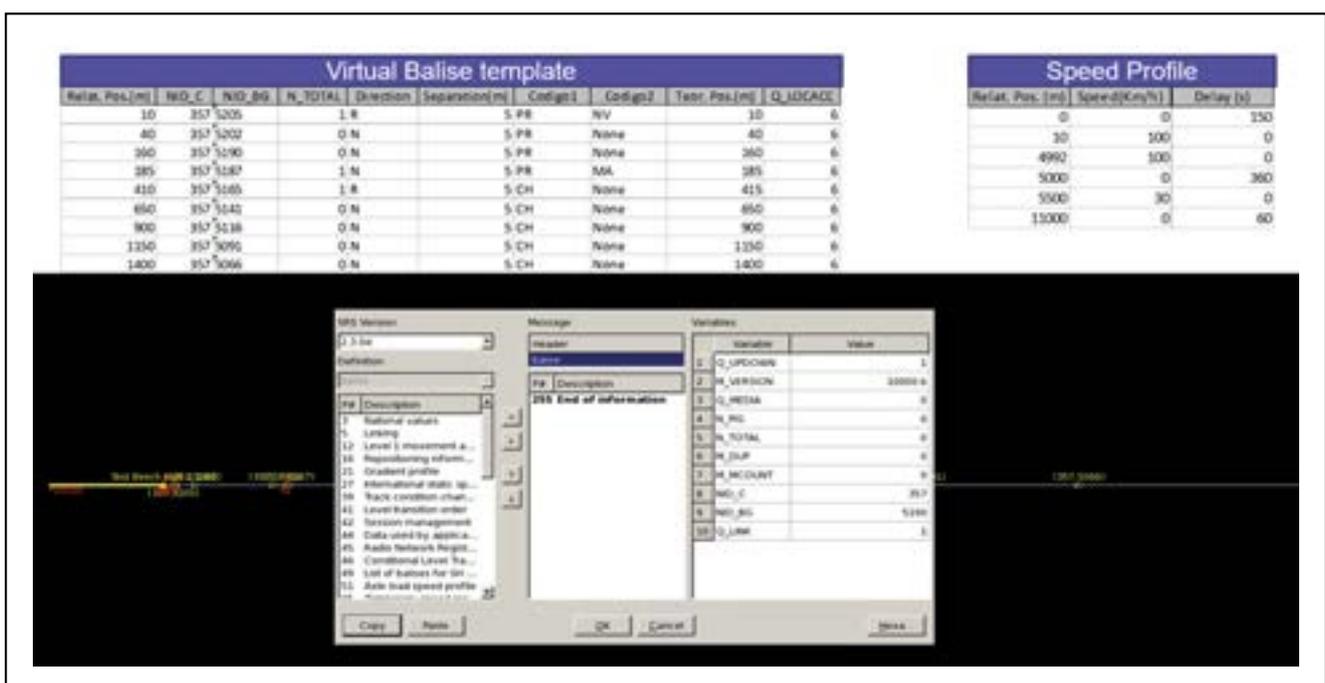


Figura. 7.1. Programación de secuencias de ensayo en los simuladores del CEDEX [1].

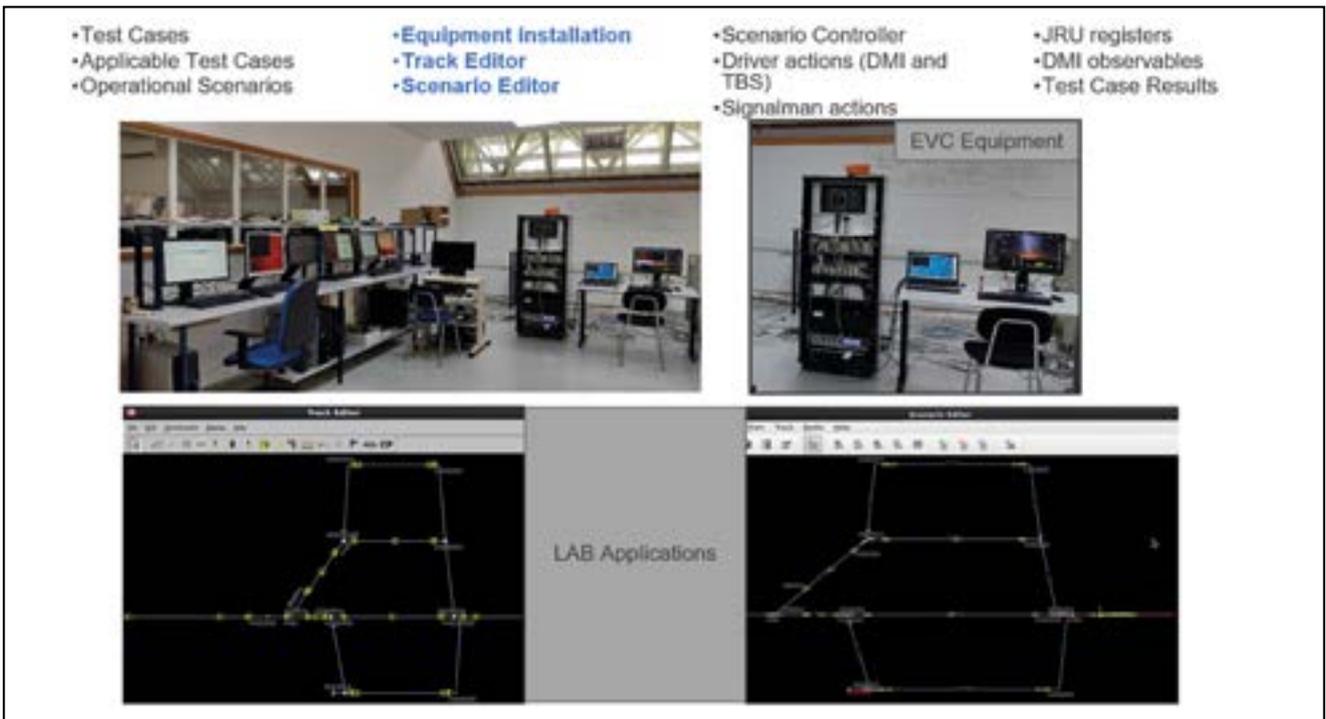


Figura. 7.2. Laboratorio de ensayos con la Eurocabina integrada [1].

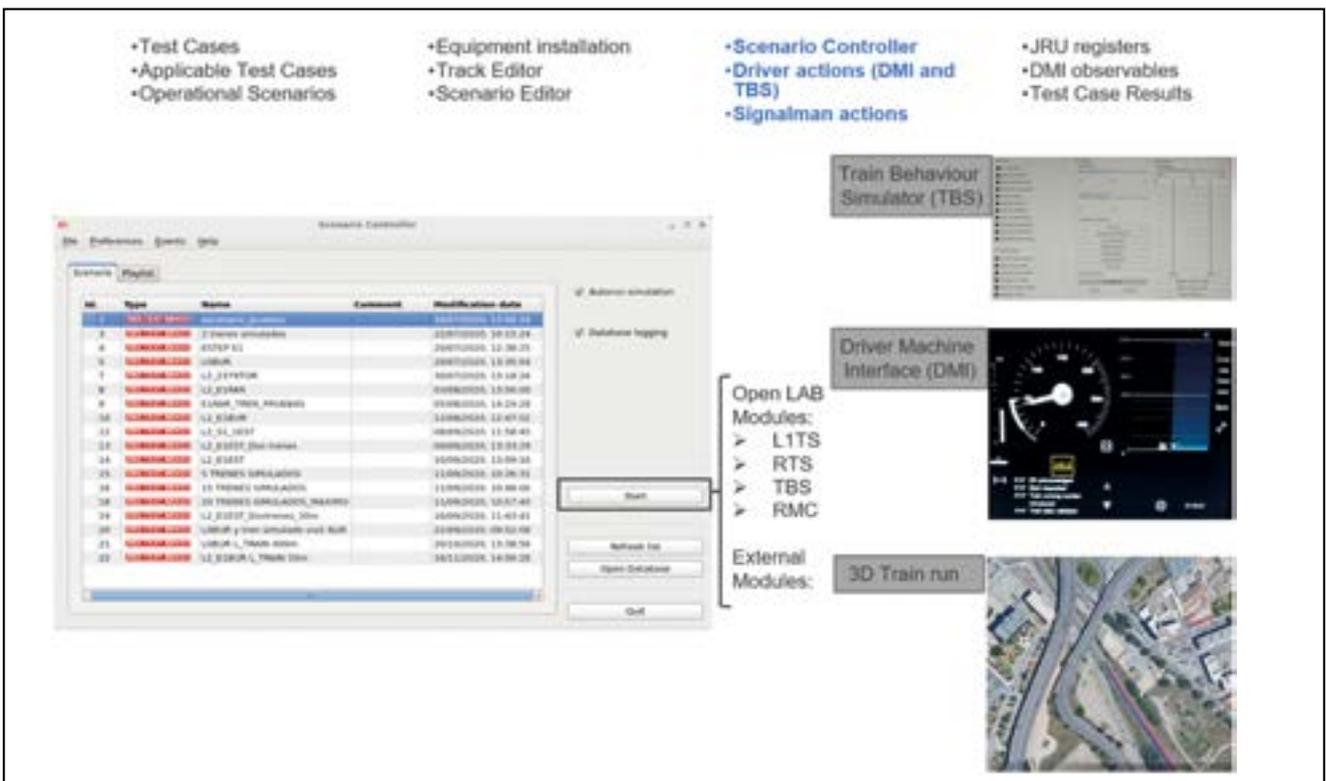


Figura. 7.3. Módulos en la ejecución de un escenario [1].

- Ejemplo de posición geográfica dada por el Virtual Balise Reader (pvt2) para la posición pvt1.
- Diferencia entre la posición de referencia de la baliza y de disparo de la baliza (valor de la variable dl al paso por la baliza).

En la figura 7.5 se pueden observar un ejemplo real de las posiciones anteriormente descritas en una sección de vía donde se ha simulado una perturbación por fallo de reloj en los satélites GPS: posición antena del tren

(pvt0-negro), cálculo receptor GNSS (pvt1-azul), y cálculo Virtual Balise Reader (pvt2-rojo).

En la imagen se observa que entrando en esta zona de perturbación la posición dada por el Virtual Balise Reader (pvt2), que va retrasada respecto a la posición real del tren (pvt0), aumenta su distancia relativa con respecto a la incertidumbre (círculos rojos). Para el caso concreto de la baliza virtual 4766, el disparo de baliza se produce a una cierta distancia una vez pasada la localización teórica baliza virtual.

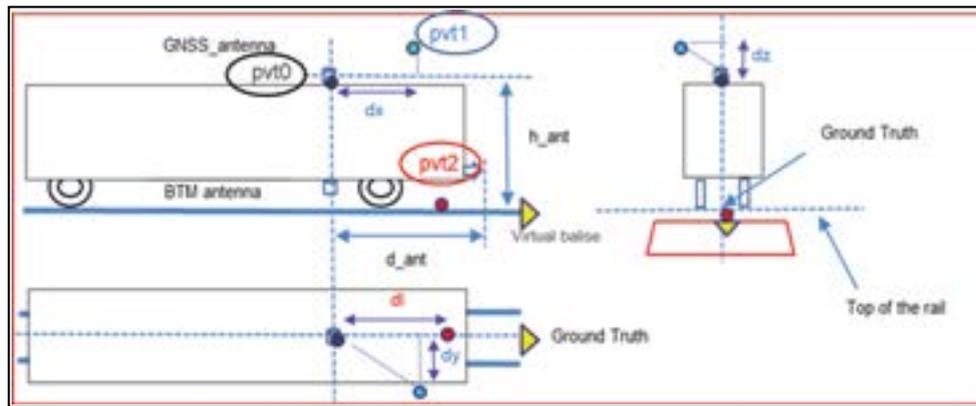


Figura 7.4. Referencias de posición GNSS.

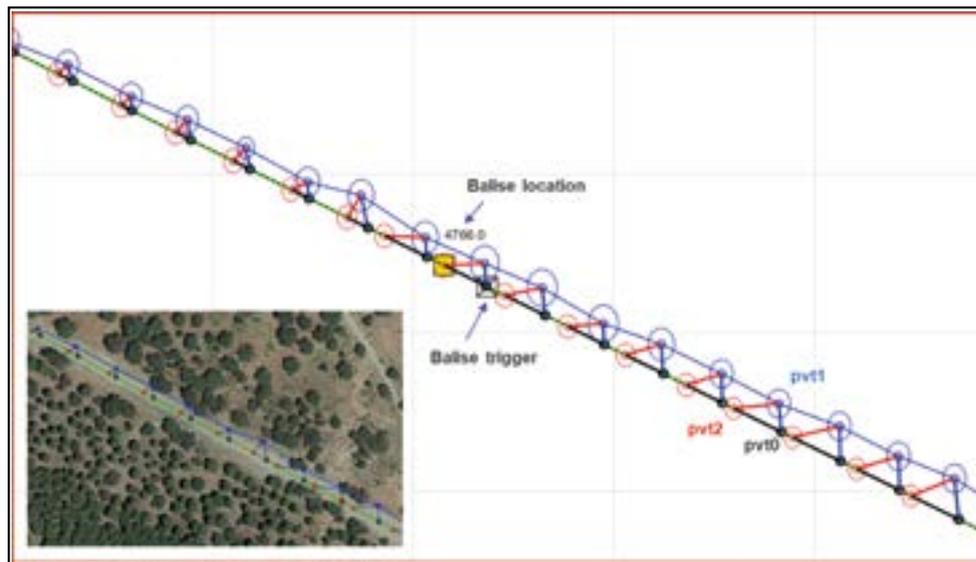


Figura 7.5. Referencias de posición GNSS del tren, del receptor, del Virtual balise Reader. Disparo de baliza [1] (imagen de la izquierda visualizada en Google Maps).

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados se han desarrollado en el laboratorio del CEDEX, diferentes herramientas con los siguientes objetivos: visualización de las variables de interés, chequeo de los datos generados en el *Virtual Balise Reader*, simulación del comportamiento teórico de un equipo ETCS embarcado y, por último, comparación con los registros de la Eurocabina durante el ensayo.

Volviendo al caso concreto de la Simulación #3, con la condición de perturbación GNSS generada por un fallo de reloj en los satélites (*Clock Failure*) en el intervalo en distancias [3753-5624] metros del recorrido, el análisis nos revela que al entrar en dicha zona las distancias relativas de disparo de balizas (negro) respecto a la incertidumbre (fucsia) aumentan (figura 8.1).

El diagrama de disparos de balizas es muy significativo (figura 8.2) y corresponde a la incertidumbre de los

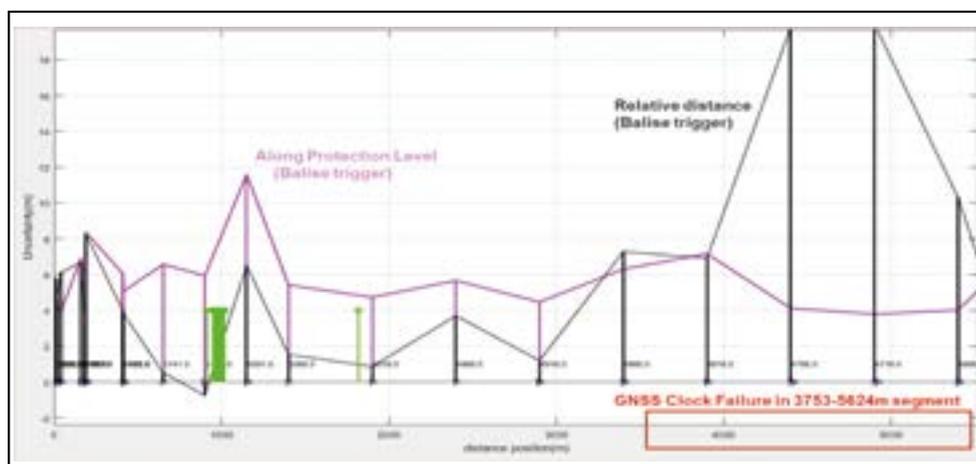


Figura 8.1. Incertidumbre frente a distancia relativa de disparo en las posiciones de las balizas.

disparos de balizas frente a la distancia relativa a la posición de referencia de las balizas virtuales. La zona de la perturbación se corresponde a los disparos marcados en rojo, donde la incertidumbre GNSS en metros para cada baliza virtual (definida por la variable *Along-Track Protection Level*) es menor que la distancia relativa de disparo. También se observa que al paso por las balizas la posición GNSS va retrasada respecto a la posición real del tren (distancias relativas positivas) excepto en una baliza que iba adelantada.

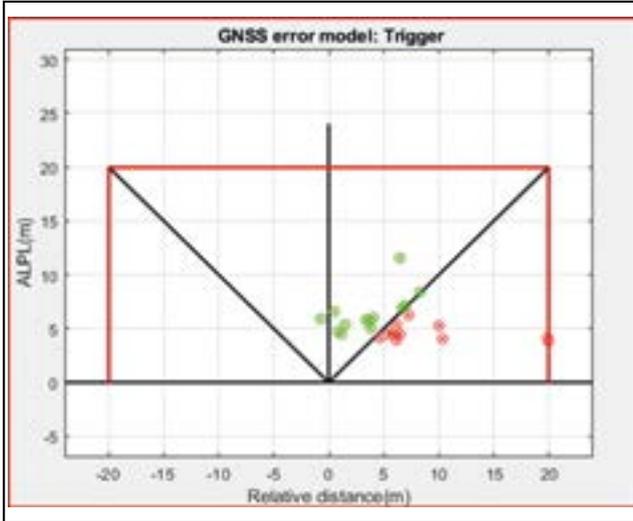


Figura. 8.2. Diagrama de disparos de balizas en el ensayo de perturbación GNSS (*Clock Failure*) [1].

El análisis realizado con la herramienta off-line del CEDEX con los datos obtenidos para una Eurocabin simulada de referencia anuncia la pérdida de balizas en esta zona, tal como se verifica con el resultado de la JRU (en verde) del ensayo ejecutado en el laboratorio con una Eurocabin comercial. El análisis off-line permite chequear y detectar errores de enlace, por detectarse el disparo de baliza fuera de la ventana de expectación ERTMS, errores temporales en el orden de detección de las balizas, errores por no respetar las distancias mínimas y máximas dentro de un mismo grupo de balizas, y errores por superar el intervalo de confianza máximo permitido.

En la figura 8.3 se representa la velocidad programada, el perfil de velocidades seguido en el escenario y la evolución de los intervalos de confianza, con un ajuste de un error odométrico del 1 % obtenido de la experimentación. También se representa en azul el intervalo de confianza simulado, y en verde el registrado en la JRU por la Eurocabin.

En la última fase de la evaluación de resultados, se realiza un análisis automático de los registros de laboratorio, lo que permite realizar una evaluación completa de los ensayos cargados y ejecutados en el laboratorio y completar la hoja de resultados finales en base a los siguientes registros:

- Registros de laboratorio
 - BTM/VBT (Módulo de transmisión de telegramas de balizas).
 - RTM (Módulo de Nivel 2 de transmisión de radio).

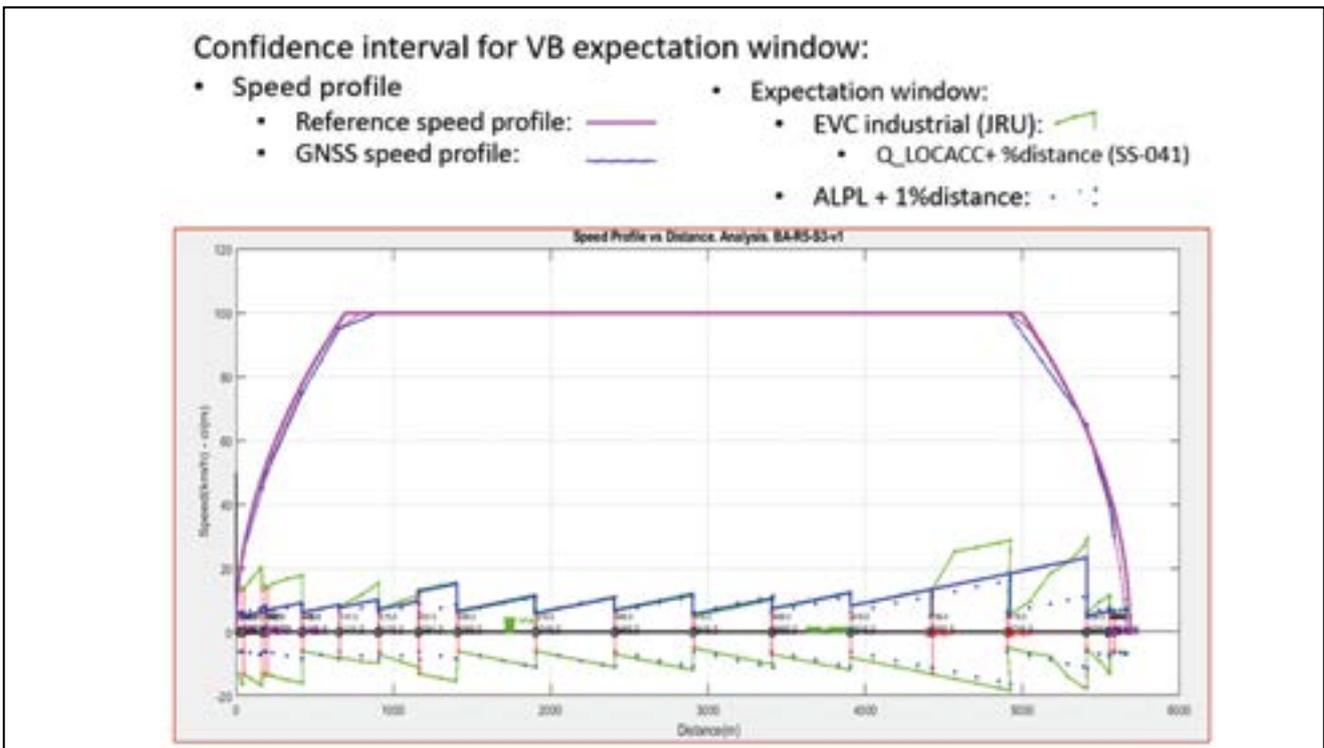


Figura. 8.3. Reinicio del error odométrico al paso por balizas al intervalo de confianza de disparo de baliza.

- TIU (Unidad de interfaz con el tren).
- ODO (Sistema de generación de odometría).
- Registros del equipo de una Eurocabin
 - DMI.
 - JRU (Unidad de Registrador Jurídico).

Una vez almacenada toda la información registrada en el ensayo, la automatización permite evaluar y registrar tanto en tiempo como en distancia los observables de los casos de prueba incluidos en la simulación. Un esquema del proceso se muestra en la figura 8.4.

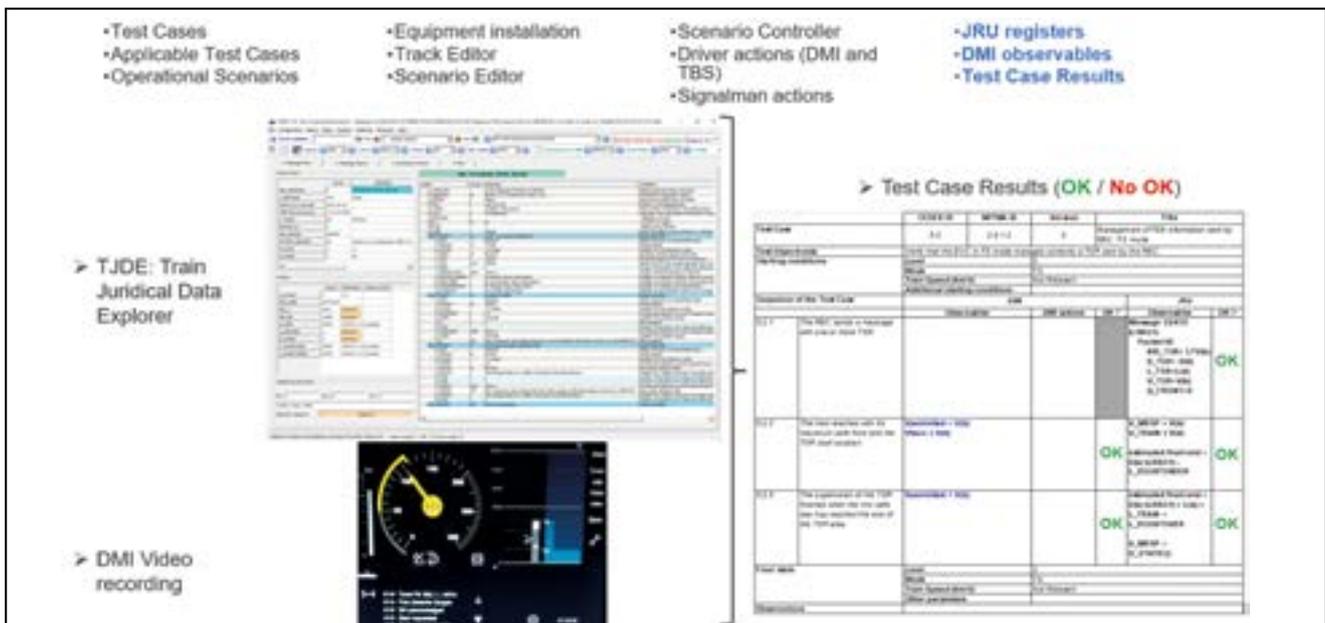


Figura 8.4. Herramientas de automatización de análisis de escenarios [1].

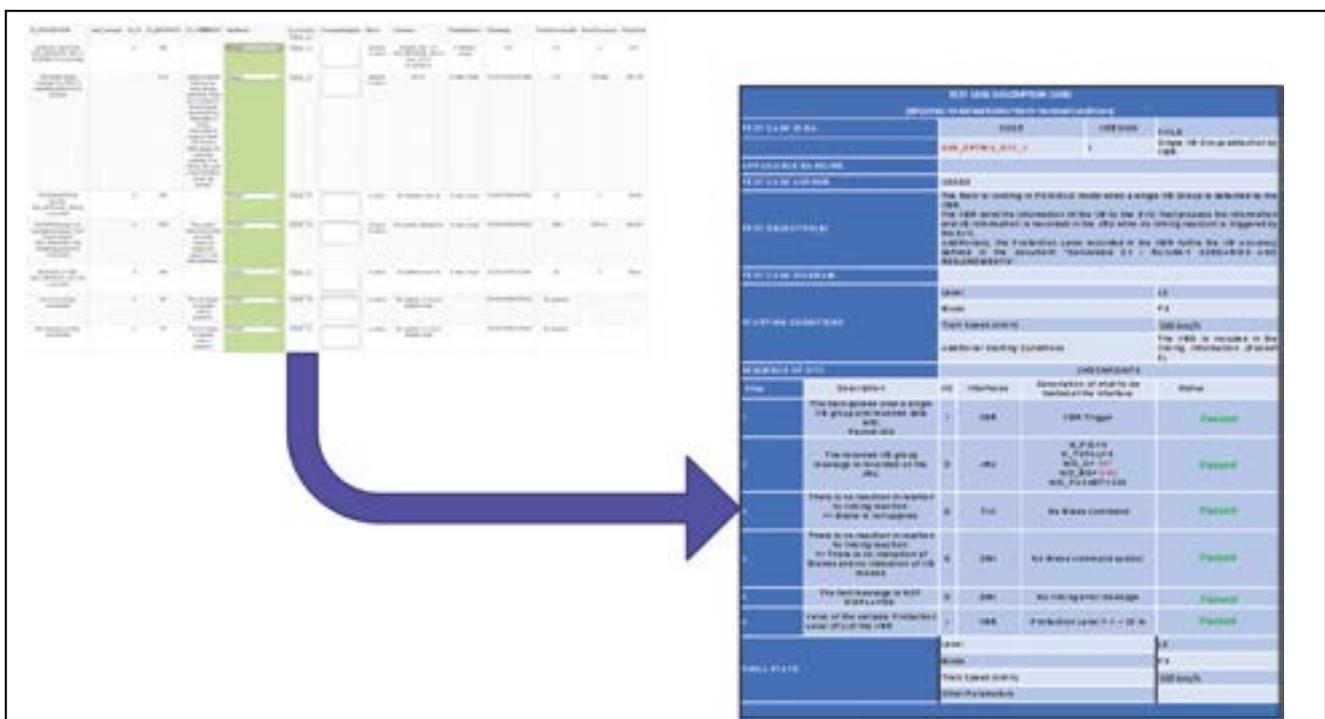


Figura 8.5. Informe de resultados [1].

De este modo, el resultado del proceso automático de evaluación de cada secuencia incluye la creación del informe final.

Finalmente, cabe destacar que el proyecto GATE4RAIL ha permitido al LIF su desarrollo en los siguientes ámbitos:

- Definición de una arquitectura de ensayos ERTMS/ GNSS como solución *zero-on-site-testing* para acometer Plan Europeo de Despliegue ERTMS [5].
- Evolución de los ensayos y escenarios operacionales de prueba elaborados, bancos de herramientas y los procedimientos de evaluación para el desarrollo y certificación de los futuros sistemas de seguridad.
- Integración de registros de ensayo procedente de diferentes ámbitos y subsistemas.

- Automatización en la evaluación de resultados de cada simulación.
- Generación de mapas de despliegue de la vía con localización geográfica y representaciones en tiempo real del movimiento del tren medido y estimado con identificación de errores en tiempo real.
- Colaboración con instituciones europeas y laboratorios de referencia GNSS del mayor prestigio.

9. CONCLUSIONES

El proyecto europeo GATE4Rail (*GNSS Automated Virtualised Test Environment for Rail*) finalizó en febrero de 2021 con una demostración final en tiempo real dirigida desde el LIF.

En los experimentos desarrollados en el LIF se integran los cálculos realizados por los simuladores del resto de laboratorios, permitiendo estudiar el posicionamiento por satélite GNSS en la circulación de un tren con una Eurocabin (EVC) en una línea italiana (Cagliari-San Gavino) y otra española (Amorchón-Ahondiguilla).

El diseño de la arquitectura e interfaces entre los socios europeos del consorcio permite ensayar tanto en condiciones nominales de GNSS, como en presencia de efectos locales y globales que afecten a la señal GNSS, así como estudiar el impacto sobre diferentes configuraciones de balizas virtuales en las circulaciones ERTMS.

El hecho de que en el laboratorio se registre con precisión la posición real del tren permite analizar las desviaciones en comparación con la estimada a bordo, y lo convierte en una herramienta fundamental tanto para la experimentación como para la verificación de líneas ERTMS con tecnologías GNSS, tal como se ha demostrado en este proyecto. A continuación se muestra un breve resumen de los logros del proyecto GATE4RAIL:

- La integración de módulos diferentes tanto de ERTMS como de GNSS repartidos en Centros de Investigación Europeos ha posibilitado la creación de una plataforma *zero-on-site-testing*.
- Los resultados obtenidos soportan favorablemente el concepto de baliza virtual como medio de reducir los costes de ERTMS.
- La arquitectura de ensayo del GATE4Rail se considera una plataforma útil para:
 - Evaluar el nuevo concepto de baliza virtual en los proyectos ERTMS.
 - Validar las líneas ERTMS con ingenierías basadas en balizas virtuales y como herramienta de diseño para la creación de nuevas líneas.
 - Certificar los equipos *Virtual Balise Reader* bajo condiciones GNSS nominales, reales y degradadas.
 - Evaluar el uso de GNSS para la localización del tren.
- Integración de GNSS y en ERTMS:
 - La localización segura del tren es de vital importancia en los sistemas de control y protección del tren.
 - Se requiere introducir nuevas especificaciones europeas que sean obligatorias para la integración de la tecnología GNSS en el ferrocarril, manteniendo la interoperabilidad del ERTMS.
- Por todo ello, se considera que la arquitectura diseñada en el proyecto GATE4Rail es un punto de arranque prometedor para conseguir estos objetivos.

El uso del GNSS se encuentra en pleno proceso de integración en aplicaciones ferroviarias comerciales. El CEDEX a través de varios proyectos de innovación europeos (VITE, ERSAT-GGC y GATE4RAIL) ha trabajado en el uso del GNSS en el ERTMS desde el 2015 y es esta madurez la que ha permitido embarcar al CEDEX, junto con INECO y ADIF, en un consorcio internacional de 12 empresas en el proyecto europeo RAILGAP (**RAILway Ground truth and digital mAP**) [6] dentro del programa Horizon 2020 con una duración hasta enero de 2023.

El proyecto RAILGAP supone un paso más en la integración del GNSS en el ERTMS y en la digitalización del ferrocarril mediante el estudio de nuevos sensores

(receptores GNSS, sensores inerciales, cámaras estereoscópicas y LIDAR) embarcados en trenes comerciales o de mantenimiento con el objetivo de registrar y evaluar datos de la vía dando lugar a la creación de mapas digitales precisos y su mantenimiento.

La combinación de fusionar los datos obtenidos por diferentes sensores y memorizar estos mapas a bordo nos permitirá conocer en todo momento nuestra posición y dirección, y así llegar de una forma segura a nuestro destino además de la creación de gemelos digitales en laboratorio para su análisis y evaluación. De este modo, la experimentación en laboratorio y en vía nos permitirá establecer las estrategias de navegación que mejor se adapten a nuestro sistema de control y protección del tren y a las circunstancias que lo rodean.

El desarrollo de la movilidad y del transporte en nuestra sociedad nos ha llevado a diseñar y crear sofisticados sensores, algoritmos, herramientas, equipos, sistemas [4] tales como los sistemas de posicionamiento por satélite [3] (o antiguamente el sextante, la brújula, el astrolabio o el mecanismo de Anticitera) sin dejar de lado el estudio de las diferentes técnicas de navegación desarrolladas a lo largo de años de evolución por los animales en su estrategia de una mayor supervivencia en la Tierra, utilizando diferentes métodos a través de la vista, el olfato, el tacto, el campo magnético, mapas del territorio y del cielo estrellado, mapas sensoriales que usan en sus migraciones o vuelta a casa [8].

10. AGRADECIMIENTOS

A Shift2Rail y a todos los socios que han participado en el proyecto. Es de destacar la buena sintonía y colaboración entre todos los participantes durante los dos años de duración del proyecto, lo que ha permitido crear un ambiente creativo, de trabajo y de colaboración, y a obtener unos resultados más que satisfactorios.

El proyecto GATE4Rail ha sido financiado por Shift2Rail (Grant Agreement 826324).

11. REFERENCIAS

- [1] Web proyecto GATE4Rail: <http://gate4rail.eu/>
- [2] Web proyecto ERSAT-GGC: <http://www.ersat-ggc.eu/>
- [3] Herranz, S., Campo, R., Molina, D., y Bueno, J. (2020). La tecnología GNSS en el sistema de señalización ERTMS. GNSS Technology in the ERTMS Signalling System. *Ingeniería Civil*, nº 197, pp. 74-89.
- [4] Iglesias, I.J., Campo, R., y Estaire, J. (2020). La digitalización del ferrocarril. The Railway Digitalization. *Ingeniería Civil*, nº 197, pp. 62-73.
- [5] Iglesias, J.I., Bueno, J., Molina, D., Herranz, S., Cáceres, R., Fernández, M., y López, M. (2019). El papel del laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX en el proceso de puesta en servicio de líneas y trenes ERTMS. The Role of CEDEX Rail Interoperability Lab in the Process of Placing in Service ERTMS Lines and Trains. *Ingeniería Civil*, nº 194, pp. 20-24.
- [6] Web proyecto RAILGAP: <http://www.railgap.eu/>
- [7] Web Proyecto UseGalileo: <https://www.usegalileo.eu/>
- [8] Hill, R.W., Wyse, G.A., y Anderson, M. (2016). Integration Systems at Work: Animal Navigation. En Richard W. Hill, Gordon A. Wyse y Margaret Anderson, *Animal Physiology*, 4th edition. Sunderland, MA/USA: Sinauer Associates Inc.

ERTMS: despliegue, innovación y futuro

ERTMS: Deployment, Innovation and Future

Silvia Domínguez Fernández^{1*}

Resumen

El sistema ERTMS es el elemento esencial en la modernización interoperable de los ferrocarriles dadas sus características técnicas y de despliegue. Además, ERTMS será el sistema en el que se basarán los siguientes pasos de la Comisión Europea y EU-Rail para ampliar el alcance como interoperables de otros sistemas de control mando y señalización.

Palabras clave: ERTMS, interoperabilidad, sistemas de control mando y señalización, armonización.

Abstract

The ERTMS system is the essential element in the interoperable modernization of railways given its technical and deployment characteristics. In addition, ERTMS is the system on which the European Commission and EU-Rail will base their next steps towards extending the scope as interoperable of other control command and signalling systems.

Keywords: ERTMS, interoperability, control command and signalling systems, harmonisation.

1. LA SEÑALIZACIÓN FERROVIARIA COMO COLUMNA VERTEBRAL DE LA MODERNIZACIÓN INTEROPERABLE DEL FERROCARRIL

Los sistemas de control mando y señalización se componen de todos aquellos equipos a bordo del tren y en la infraestructura necesarios para garantizar la operación segura de los vehículos que circulan por la red. Son, por tanto, la clave para el funcionamiento de un servicio ferroviario seguro, eficiente, interoperable, robusto y fiable en Europa.

Históricamente, la responsabilidad de seguir las señales recaía sobre el maquinista, pero con el incremento de las velocidades en el ferrocarril por encima de los 160 km/h, la señalización lateral no es suficiente y nace la necesidad de la señalización en cabina (figura 1). Desde ese momento, los sistemas de señalización se han convertido en un punto clave de la modernización del ferrocarril hacia el despliegue de sistemas digitales automáticos que monitorizan el movimiento del tren, llegando incluso a una conducción automática.

En los años 70 y 80 del siglo pasado, estos sistemas de control mando y señalización se desarrollaron de forma independiente en los distintos países y siguen siendo sustancialmente diferentes en cada red ferroviaria nacional. Esto constituye una barrera importante para la consecución de la red ferroviaria europea única. Por ello, en los años 90, la Comisión Europea lanzó las especificaciones y despliegue del sistema de señalización Europeo ERTMS. El sistema ERTMS en Europa es actualmente un importante programa industrial para armonizar el control automático de trenes y el sistema de comunicación, y respaldar la

interoperabilidad en todo el sistema ferroviario en Europa. El despliegue de ERTMS constituye la columna vertebral de un sistema ferroviario conectado, único y digital.

Como hemos dicho, el sistema ERTMS constituye la columna vertebral de la modernización del ferrocarril y como tal permite soportar la nueva definición de los sistemas de control mando y señalización aumentando el alcance técnico de estos sistemas que se consideran como interoperables.

De esta forma, se busca maximizar que el futuro del ferrocarril sea conectado pero también buscando resolver las principales necesidades del sector que se centran en conseguir un ferrocarril sostenible de altas prestaciones que favorece la innovación armonizada, su mantenimiento y un despliegue eficiente en cuanto a tiempo y coste.

En este artículo se describe esta ampliación en el alcance de la componente interoperable en los sistemas de control mando y señalización. Este artículo también describe en sus primeras secciones el estado actual de despliegue del sistema ERTMS y las características del sistema ERTMS que permiten que este sistema sea la



Figura 1. Ejemplo de señalización en cabina.

* Mail: silvia.dominguez@ineco.com

¹ Ingeniera de telecomunicaciones. INECO.

columna vertebral para estos desarrollos tecnológicos, teniendo en cuenta las lecciones aprendidas de su despliegue desde sus inicios.

Ineco ha estado siempre presente en los proyectos y grupos de trabajo europeos que definen el sistema ERTMS, trabajando en colaboración con la industria, los usuarios, los organismos legisladores y las agencias de seguridad. Actualmente lideramos la gestión de la implementación del ERTMS en Europa, estando presentes en los grupos de trabajo encargados de definir el futuro del control mando y señalización en Europa. Nuestra compañía basa la gestión de los distintos proyectos ERTMS en el profundo conocimiento técnico del sistema y en la amplia experiencia adquirida en grandes proyectos

1.1. ¿Qué es el ERTMS?

ERTMS es el estándar de señalización impulsado por la Comisión Europea. Este estándar define el sistema automático de protección de los trenes mediante el intercambio de información entre los sistemas ERTMS instalados en el material rodante y los instalados en la infraestructura (figura 2).

La señalización en cabina y la supervisión continua de la velocidad son las bases del sistema ERTMS, que puede desplegarse en distintos niveles de aplicación. Los principales niveles del sistema actualmente desplegado se diferencian en la transmisión puntual de información entre la vía y el tren para nivel 1 ERTMS, frente a la transmisión continua y bidireccional de esta información en nivel 2 ERTMS.

La implantación del sistema ERTMS permite una serie de mejoras en la explotación ferroviaria, como son la **interoperabilidad** de circulación de diferentes tipos de tren en

distintas infraestructuras, mejora de los niveles de **seguridad** y el impacto en la **capacidad** de circulación en las líneas ferroviarias.

La capacidad de una línea ferroviaria se define como el número de trenes de unas características establecidas que pueden circular por dicha línea dentro de un periodo de tiempo determinado.

La Comisión promueve el despliegue en toda la red europea del sistema ERTMS. Este despliegue se deberá cumplir en todos los países de la Unión, en los plazos marcados por la Comisión dentro del Plan Europeo de Despliegue ERTMS.

Además, queda demostrado el interés del ERTMS dentro de los programas de digitalización ferroviaria por su despliegue en los procesos de modernización de numerosas redes ferroviarias a nivel internacional. Los estudios técnicos ERTMS son la base para el despliegue del sistema de una forma coherente y exitosa.

2. DESPLIEGUE DEL SISTEMA ERTMS

En los Estados miembros de la Unión Europea existen más de veinte sistemas de señalización y control ferroviario nacionales diferentes, lo que la Comisión denomina “sistemas de clase B”. Para el transporte ferroviario de larga distancia, esto significa que cuando un tren cruza de un país a otro puede tener que cambiar de locomotora, de maquinista o incluso la composición entera.

Con el objetivo de revertir esta situación, en 1989 nació el ERTMS (*European Rail Traffic Management System*), el Sistema Europeo de Gestión de Tráfico Ferroviario, y la Comisión Europea apoyó su implantación como sistema armonizado. Este sistema armonizado es la solución común que permite a los trenes operar con el mismo “lenguaje” ferroviario en cualquier red (figura 3).

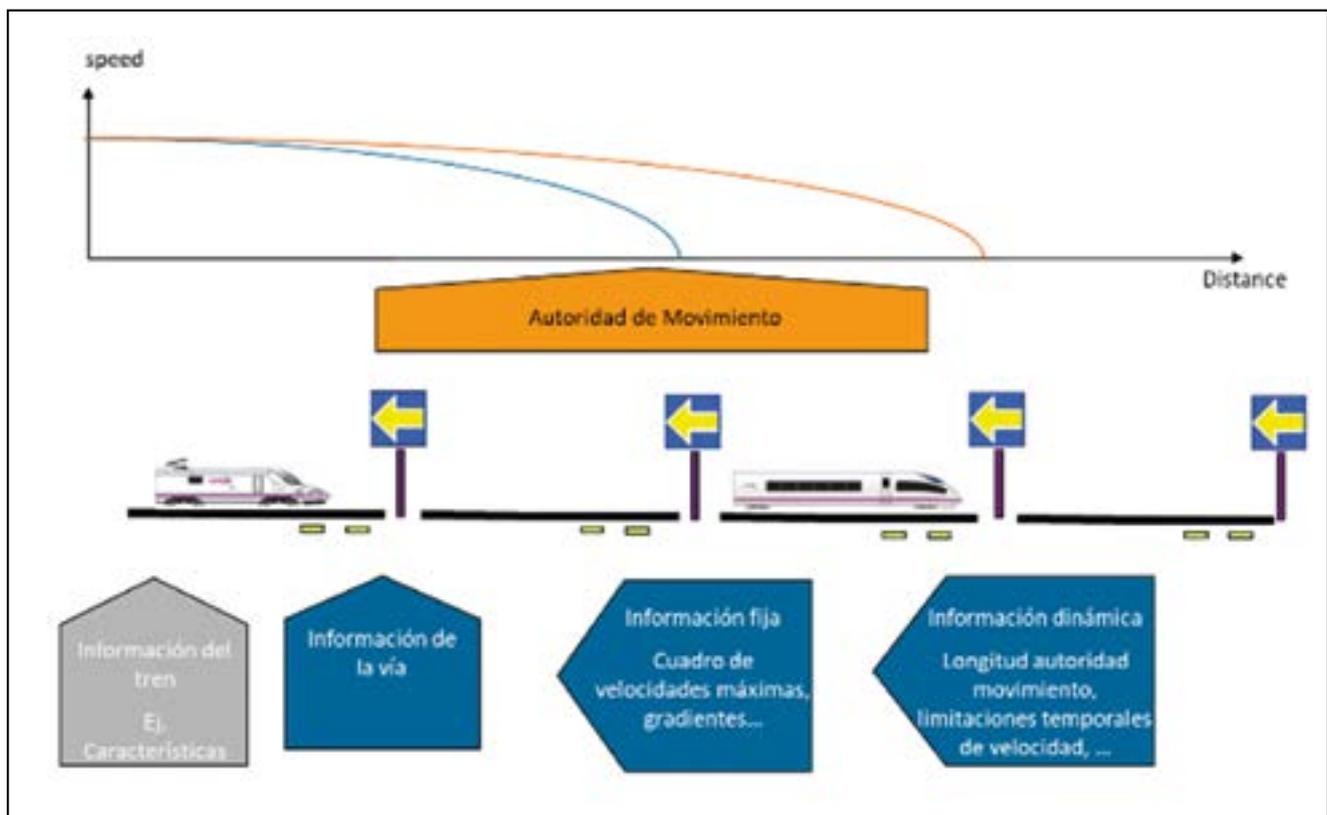


Figura 2. Intercambio de información entre la vía y el tren.

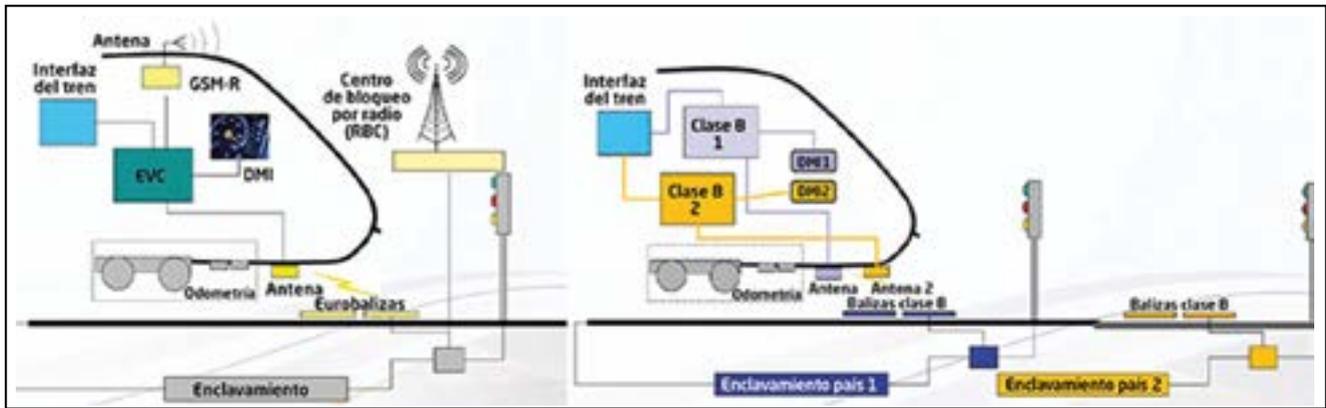


Figura 3. Comparativa de la arquitectura del ERTMS completo y los sistemas de clase B.

La Comisión Europea, apoyada por estudios específicos que contemplan los aspectos técnicos y económicos del sistema, concluyen que el ERTMS es la clave para alcanzar la meta de un “espacio ferroviario único europeo” similar al “cielo único” del transporte aéreo. Pero no basta sólo con adaptar la infraestructura, también han de hacerlo las flotas para que el sistema sea eficaz.

La implantación del sistema ERTMS es muy considerable. Destacan los casos de las redes de alta velocidad italianas y españolas, supervisadas y protegidas por ERTMS casi en su totalidad; del mismo modo están equipadas extensas partes en las redes holandesa, checa y belga y, fuera de la UE, la red suiza. Otros proyectos que presentan auténticos hitos en el despliegue del ERTMS son: el túnel alpino de San Gotardo, en Suiza, siendo el más largo de Europa (57 km) y con ERTMS nivel 2; conexión al puerto de Róterdam, el más grande de Europa; a nivel local, el sistema también está en servicio desde hace ya algunos años en líneas de cercanías, como las de Madrid.

Además, en base a los estudios realizados se estima que el grado de despliegue del sistema ERTMS en la infraestructura se acelere en los próximos años. Esto va a tener un impacto en los operadores ferroviarios para el equipamiento de sus flotas. Esto es, la implantación de ERTMS en las flotas europeas les permitiría acceder a un mayor número de rutas. Además, permitirá simplificar la instalación en cabina pasando de varios sistemas a un único sistema interoperable. [1]. En este sentido, actualmente las principales conclusiones en cuanto al despliegue de ERTMS son:

- Desde la perspectiva de la implementación de ERTMS, se confirma que en los próximos años se logrará operar de forma significativa con ERTMS. Por ejemplo en relación al tráfico de mercancías, en la red asociada al corredor que une el puerto de Róterdam con el norte de Italia, el número de kilómetros no equipados con ERTMS disminuirá del 70 % en 2020 a solo el 15 % en 2025. En general, en 2040 las redes de Bélgica, Chequia, Estonia, Finlandia, Alemania, Italia, Luxemburgo, Noruega, Suecia y Suiza estarán totalmente equipadas con ERTMS y en redes como la danesa, griega, búlgara o eslovena, trenes equipados solo con ERTMS podrán acceder a la red completa (figura 4).
- Desde la perspectiva de los administradores de infraestructuras, la priorización de algunas seccio-



Figura 4. Mapa despliegue ERTMS en Europa 2040.

nes concretas tendría un impacto muy significativo en la modernización completa de los corredores. A modo de ejemplo, en 2025 una locomotora equipada solo con ERTMS será capaz de recorrer los más de 1.000 km entre el puerto de Rotterdam y el norte de Italia, si el despliegue de ERTMS se acelera en solo 75 km de recorrido.

- Desde la perspectiva de las empresas ferroviarias, se confirma que, en los próximos años, el sistema ERTMS puede reemplazar sistemas de clase B obteniendo así un papel más relevante. Además, para cubrir el tráfico internacional de mercancías, el análisis concluye que todas las locomotoras nuevas deberán estar equipadas con ERTMS, aconsejando que se evalúe también su instalación en la flota existente. Este factor de conectividad es común en todas las redes evaluadas, aunque su magnitud varía de una a otra. La falta de locomotoras equipadas con ERTMS supondría perder en 2030 un alto porcentaje de las rutas internacionales.

3. VENTAJAS DEL ERTMS

La Comisión Europea presenta las siguientes ventajas del sistema ERTMS (https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-are-benefits_en):

Mayor seguridad

La supervisión continua de la velocidad de los trenes hace que el ERTMS esté dentro del grupo de ATP con mayor nivel de seguridad.

Mayor capacidad

ERTMS permite la reducción de la distancia o el tiempo mínimo entre trenes, lo que aumenta la capacidad del tren. El impacto de este beneficio depende de varios aspectos, como las características de la vía y los sistemas de protección de trenes existentes antes de la instalación del ERTMS.

Mayor rendimiento

En las especificaciones se incluyen altos estándares de componentes y subsistemas ERTMS. Gracias a los altos estándares de los componentes ERTMS, en principio es menos probable que se produzcan fallos y aumenta la puntualidad.

Creación de un mercado uniforme para el transporte ferroviario

Los sistemas nacionales o los denominados “Clase B” están limitando la competitividad del transporte ferroviario frente a la carretera en Europa. Una vez desplegado por completo, ERTMS facilitará el desarrollo de servicios ferroviarios transfronterizos.

Reducción potencial de los costes de mantenimiento

La reducción de costes se debe a un menor número de componentes en tierra, en particular con ERTMS nivel 2 (porque las señales luminosas ya no son necesarias) e incluso más con ERTMS nivel 3, que puede funcionar sin la mayoría de los sistemas de detección de trenes en tierra.

Recursos Humanos

La mayoría de las empresas ferroviarias se enfrentan al desafío del envejecimiento del personal y, al mismo tiempo, luchan por encontrar reemplazos. La implementación de ERTMS, incluida la digitalización del enclavamiento y la operación automática de trenes (ATO), ayudará a abordar este problema.

Digitalización

ERTMS, y su próximo subsistema de transmisión de radio *Future Railway Mobile Communication System* (FR-MCS) en particular, es un facilitador de la digitalización en el sistema ferroviario, lo que permite, entre otras cosas, el despliegue de ATO.

Otros beneficios

ERTMS puede hacer que el sector ferroviario sea más competitivo con un mercado de suministro abierto. Además, el uso de un sistema probado y armonizado puede ayudar a reducir los costes de producción.

En concreto, por ejemplo, en relación al impacto del sistema ERTMS en la capacidad ferroviaria, es cierto que existe la idea generalmente aceptada de que los niveles de operación del sistema de señalización ERTMS mejoran la capacidad, es decir, nivel 2 ERTMS permite mayor capacidad que nivel 1 y éste, mayor que una línea con sistema de señalización tradicional como ASFA (sistema nacional clase B desplegado en la red española). Dentro del Plan Nacional de Despliegue ERTMS español, se incluye un análisis del impacto concreto que tiene el sistema ERTMS en cuanto a la capacidad y las prestaciones ferroviarias en los distintos tipos de líneas que componen la red española.

El estudio incluido en el Plan se ha centrado en evaluar:

- La capacidad teórica, que permite cuantificar e identificar si las líneas objeto de este plan podrán asumir toda la demanda de pasajeros en el periodo temporal aplicable al plan sin necesidad de construir líneas adicionales paralelas o derivando ese aumento de demanda a otros medios de transporte.
- Tiempo de recorrido en situación nominal y en situación de líneas de alta demanda, que permite cuantificar cuánto tiempo es necesario invertir en los distintos servicios (tanto de pasajeros como para mercancías).

Con los datos obtenidos, se puede concluir que para líneas del tipo alta velocidad o mixto con infraestructura similar a la de alta velocidad, existe una clara mejora tanto de la capacidad como del tiempo de recorrido con la instalación del sistema ERTMS, tanto nivel 1 como, aún en mayor medida, de nivel 2. Para las líneas de tipo convencional, destaca que el despliegue del sistema ERTMS nivel 1 no mejora tan sustancialmente la capacidad como en líneas de tipo alta velocidad, aunque sí tiene un impacto muy relevante en la regularidad de líneas saturadas mejorando en este caso considerablemente los tiempos de recorrido en hora punta. En líneas de estas características convencionales, destacar que, si es necesario absorber un gran crecimiento de la demanda sin construir líneas en paralelo, se considera conveniente el despliegue del sistema ERTMS nivel 2.

4. EL FUTURO DEL FERROCARRIL CONECTADO A TRAVÉS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MANDO Y SEÑALIZACIÓN

Si bien, el sistema ERTMS es la columna vertebral de la modernización del ferrocarril, una de las ventajas que tiene es la posibilidad de evolución e innovación con un impacto económico limitado y en el despliegue al tratarse de un sistema digital. La oportunidad de esta siguiente evolución del sistema consiste en incorporar nuevas tecnologías y obtener una visión del sistema que tiene un alcance técnico mayor al que puramente tiene el sistema ERTMS actualmente, esto es, un alcance ampliado en la parte interoperable de los sistemas de control mando y señalización.



Figura 5. Las interfaces de ERTMS entre tren y vía permiten la interoperabilidad.

De esta forma, las iniciativas de innovación de los sistemas de control, mando y señalización europeas se centran actualmente en un mayor número de capas funcionales dentro de la arquitectura global del ferrocarril. En concreto, se espera que el alcance de los sistemas de control mando y señalización se extiendan a capas funcionales como las de señalización tradicional, operación de tráfico, toma de decisiones estratégicas e implementación de regulación, gestión de terminales ferroviarias y sistemas de operación del vehículo. Además, se tendrán en cuenta la necesidad de los interfaces de estas funciones con los sistemas de energía, el material rodante, la gestión TI y física de la infraestructura y la gestión de activos.

Se trata, por tanto, de una oportunidad excelente para definir unos sistemas únicos europeos, con unas interfaces funcionales comunes y unos conceptos operativos que permitan construir el futuro del ferrocarril único en Europa (figura 5).

Las nuevas tecnologías están listas para su uso en el ferrocarril con un enorme potencial para mejorar los servicios de pasajeros y mercancías. La digitalización, junto con la automatización, es la forma más eficaz de aumentar el rendimiento y la capacidad con menos inversiones en nuevas infraestructuras.

No solo están listas las tecnologías, sino que actualmente estamos en un momento único para que se desplieguen estos sistemas interoperables de control mando y señalización de alcance ampliado en paralelo con el despliegue del sistema ERTMS, que como se señaló anteriormente va a acelerarse en los próximos años. Esto es, a medida que las redes y los Estados miembros migran a sistemas clase B a ERTMS, se aprovecha la oportunidad de hacerlo de forma armonizada estableciendo una base común que permitirá evolucionar todos los sistemas de control mando y señalización a sistemas interoperables y eficientes al ritmo de la evolución tecnológica. Será un cambio importante de las

“cajas negras” a los entornos informáticos de “soluciones de software”, dentro de una arquitectura común funcional.

Teniendo en cuenta la naturaleza intrínseca del ferrocarril como un sistema complejo integrado de sistemas, una arquitectura funcional y técnica armonizada de CCS a nivel de sistemas es un requisito previo para dominar la complejidad y garantizar una coherencia duradera. Esto además permitirá una clara separación de las funciones relacionadas y no relacionadas con la seguridad.

Esta construcción del sistema ferroviario europeo moderno, armonizado, robusto y fiable, interoperable es el principal objetivo del pilar del sistema en la futura iniciativa EURail (sucesor de S2R), en consonancia con la Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente de la Unión Europea [2]. De esta forma se pretende también dar respuesta a las necesidades de los clientes, mantener la seguridad y la protección digital, mejorar la eficiencia y el rendimiento de las operaciones, reducir los costes, apoyar la competitividad de la industria ferroviaria europea y aumentar la velocidad de adopción de las soluciones innovadoras.

4.1. Oportunidades de la interoperabilidad y modularidad ferroviaria

Se define interoperabilidad como la capacidad de un sistema ferroviario para permitir la circulación segura e ininterrumpida de trenes que cumplan las prestaciones requeridas.

Para ello, la Directiva sobre interoperabilidad sostiene que la consecución de la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Unión debe llevar a la determinación de un nivel óptimo de armonización técnica y a hacer posible la facilitación, mejora y desarrollo de los servicios de transporte internacional por ferrocarril en la Unión y con terceros países, así como la creación progresiva de un mercado interno de los equipos y los servicios destinados a la construcción, renovación, rehabilitación y explotación del sistema ferroviario de la Unión.

Por tanto, respecto a los sistemas de control mando y señalización destaca su característica de necesidad de interoperabilidad ferroviaria, elemento indispensable para hacer frente a la multiplicidad de sistemas de señalización. Para que la integración e interoperabilidad de los sistemas ferroviarios europeos sea una realidad, será necesario migrar de forma coherente hacia un sistema armonizado de gestión de tráfico y de control de trenes que reemplace a los diferentes sistemas nacionales que operan en cada país.

Este sistema de control mando y señalización integrada, permitirá, por un lado, la circulación sin restricciones de los trenes y, por otro, la creación de un mercado único de componentes ferroviarios europeos. Estas características mejorarán la experiencia del cliente (tanto pasajeros como mercancías) a la vez que reduce complejidad y coste en el despliegue del sistema, su mantenimiento y su futura evoluciones que permitirían incorporar nuevas tecnologías para una mejora continua del ferrocarril.

Por ejemplo, la ampliación del alcance a los futuros sistemas de control mando y señalización respecto al aspecto de interoperabilidad permitirán alcanzar realmente una operación de tráfico que construya un área ferroviaria única europea. Este desarrollo permitirá definir las interfaces

y estructuras de datos que facilitarán el tráfico internacional tanto en situaciones nominales como degradadas. También, está búsqueda de estandarización e interoperabilidad en los sistemas de operación de tráfico, mientras que se incorporan nuevas soluciones tecnológicas (como por ejemplo la aplicación de análisis de datos matemáticos o conceptos de inteligencia artificial) permitirán incrementar las prestaciones del sector ferroviario para el cliente. Una de estas funcionalidades que está marcada como objetivo en los trabajos europeos de desarrollo del ferrocarril futuro incluye la posibilidad de realizar una operación de tráfico en tiempo real, que permita adaptar las mallas y horarios en base a la demanda o a las situaciones de degradación de la red.

Un aspecto crítico dentro de la interoperabilidad ferroviaria será el concepto de modularidad, que es un elemento clave clásico de una arquitectura funcional por capas. Esto es, los sistemas de control mando y señalización se descompondrán de forma armonizada según una arquitectura funcional y lógica única en una serie de módulos con funciones, interfaces y prestaciones estándar. Esto es clave para garantizar la interoperabilidad, la capacidad de integración del sistema y el dominio de la evolución del sistema de control y mando ferroviario.

5. TECNOLOGÍAS INNOVADORAS

La innovación es la mejor respuesta a este reto competitivo para construir el ferrocarril futuro para mejorar la calidad y la fiabilidad del producto desde el primer día, reduciendo los costes del ciclo de vida, combinada con un enfoque de sistema ferroviario. Además, esta modernización tendrá un cambio sustancial para el usuario (tanto pasajero como mercancías) ya que transformará el ferrocarril en un sector competitivo y atractivo con altas prestaciones y capacidad, contribuyendo así a la reducción de la congestión del tráfico y de las emisiones de CO₂.

A continuación, se introducen una serie de soluciones tecnológicas que son actualmente de prioridad para la Comisión Europea y el sector ferroviario en Europa [3]. Cada una de estas soluciones tecnológicas puede ser contemplada de forma independiente a las demás, pero el ferrocarril futuro real debería contemplar la combinación entre ellas que proporcione una digitalización y evolución suficiente para cubrir las necesidades de mejora que presenta en cada red y flotas ferroviarias.

Estas soluciones tecnológicas están principalmente basadas en las necesidades funcionales del sistema, si bien en cada una de ellas está asociado uno o varios facilitadores técnicos que deberán ser desarrollados para la implementación de la solución tecnológica innovadora.

Para un despliegue eficiente, es esencial identificar con claridad qué interfaces son relevantes para la interoperabilidad o modularidad necesarias para mantener los objetivos de despliegue, mantenimiento y evolución. Por ello, en algunos ejemplos, es necesario detallar la tecnología en la que se basa una solución tecnológica, pero en otras ocasiones no. Se dan ejemplos concretos en el siguiente listado de las futuras soluciones innovadoras del ferrocarril.

De entre las principales palancas innovadoras, son especialmente relevantes las siguientes:

Sistema ATO, de las siglas en inglés de Operación Automática del Tren

El objetivo es conseguir que el ATO de a bordo sea capaz de conducir el tren automáticamente, basándose en la información sobre el horario procedente de las vías. Con ello se pretende cumplir los horarios y, en la medida de lo posible, hacerlo de forma eficiente desde el punto de vista energético. El sistema ATO de a bordo tiene una interfaz con el ETCS de a bordo, de manera que toda la información de ATO se muestre en el DMI del ETCS y el ETCS siga protegiendo los movimientos del tren aun en conducción automática.

Las especificaciones de ATO cubrirán progresivamente los siguientes Grados de Automatización (GoA):

- GoA2 - conducción automática aunque el conductor sigue presente en la cabina, para retomar el control del tren cuando sea necesario.
- GoA3 - conducción automática sin conductor, pero con otro personal presente en el tren, para retomar el control del tren cuando sea necesario.
- GoA4 - conducción automática sin personal en el tren.

En todos los grados de automatización, es necesario el desarrollo tecnológico adicional al existente en la actualidad. Por ejemplo, para una implementación eficiente del GoA2, es necesario una arquitectura de datos entre el puesto de mando y los sistemas ATO de infraestructura que permita obtener para cada tren su perfil de operación incluyendo las paradas necesarias tanto en situaciones nominales como en situaciones degradadas de perturbación en la red. También será necesario una arquitectura de datos en el vehículo que permita al sistema ATO embarcado realizar un cálculo de la velocidad para conseguir una conducción que minimice el consumo energético manteniendo el control horario.

Especialmente significativos serán los sistemas de detección de obstáculos que se prevén necesarios para el futuro despliegue de un sistema ATO GoA 4. Es de destacar que si bien existen ya trenes urbanos en los que hay una conducción automática sin maquinista, todos estos trenes se encuentran en entornos totalmente controlados, normalmente túneles. Por tanto, para el despliegue de un sistema ATO GoA 4 en cualquier entorno ferroviario, será necesario el desarrollo tecnológico que permita de forma segura cualquier detección de obstáculos en el camino del tren.

La interoperabilidad técnica y operacional de los distintos grados de automatización es clave para el tráfico internacional de trenes con conducción automática. Optimizar el grado de modularidad necesario de los sistemas ATO es crítico para un despliegue más eficiente del sistema o incluso para simplificar su puesta en marcha ya que, aunque el sistema ATO vaya a ser estandarizado para funcionar siempre junto con ERTMS, su autorización no debe seguir los mismos criterios de seguridad.

Cantón móvil

En la señalización ferroviaria tradicional, un cantón es parte o tramo de vía en la que en condiciones normales

solo puede haber un tren. Están protegidos por señales fijas y sistemas de detección de trenes, que informan al maquinista del estado de ocupación de dicho cantón.

Un cantón móvil es una zona segura alrededor de cada tren definidos en tiempo real por ordenadores. Esto requiere tanto el conocimiento de la ubicación exacta y la velocidad de todos los trenes en un momento dado, como la comunicación continua entre el sistema de señalización central y el sistema de señalización de la cabina del tren.

La longitud de un cantón tradicional es de orden de magnitud genérico, mayor a 6 km para líneas de alta velocidad y menor de 3 km para líneas convencionales. El cantón móvil tiene una longitud igual a la longitud del tren y una distancia de frenado. Esto hace que el cantón móvil permita que los trenes circulen más cerca unos de otros, manteniendo los márgenes de seguridad necesarios, lo que aumenta la capacidad global de la línea.

Además del aumento de capacidad, el cantón móvil permite reducir costes ya que las señales luminosas y los sistemas de detección en vía son sustituidos respectivamente por la señalización en cabina (a través de ETCS) y la localización continua del tren y su integridad que es comunicada a los sistemas centrales de la vía a través de la comunicación digital entre el vehículo y los sistemas en tierra.

Los facilitadores tecnológicos clave para conseguir el despliegue del cantón móvil son aquellos que permiten al tren reportar su integridad a la vía. Esto es, para que el cantón móvil sea seguro, este debe cubrir la longitud total del tren cuando está íntegro, pero también en condiciones degradadas de falta de integridad.

Desde el punto de vista de señalización ferroviaria, es necesario regular y estandarizar la forma de la información en la que el vehículo confirma a la vía de su integridad. También se deben acordar unos criterios de prestaciones y seguridad que tendrá esta información. Sin embargo, cómo esta información es detectada por el vehículo, podría ser totalmente independiente. Por ejemplo, para trenes de pasajeros en composición fija, este parámetro de integridad es inmediato pues el vehículo en composición simple será siempre íntegro. Para trenes de mercancías, conseguir esta información es más compleja y se analizan desde sistemas que usan el posicionamiento por satélite tanto de la cabeza como de la cola del tren hasta sistemas en los que el acoplamiento del tren se realiza de forma automática y existe un acoplamiento tanto mecánico como de datos (*digital automated coupling*).

Comunicaciones del futuro ferrocarril. FRMCS

El sector de telecomunicaciones por su naturaleza tiene un ritmo de evolución tecnológica mucho mayor que los sistemas ferroviarios. Esto por un lado tiene un efecto positivo que permite en telecomunicaciones la evolución e incorporación de nuevas tecnologías y funcionalidades. Por otro lado impone unos requisitos estrictos en cuanto a la obsolescencia de sus componentes. En el sector de las telecomunicaciones, esta migración se gestiona de forma casi transparente al usuario final, principalmente gracias al uso de la arquitectura funcional por capas y la consecución de una mayor independencia tecnológica a través de los principios de capas tipo protocolos OSI.

En el ferrocarril, actualmente se encuentra desplegado la tecnología de comunicaciones GSM-R y los proveedores involucrados han indicado que apoyarán la tecnología GSM-R y los productos GSM-R al menos hasta 2030. Dada la necesidad de largos procesos de migración en el ferrocarril, la Agencia Europea del Ferrocarril y la Comisión Europea lanzaron el proyecto de FRMCS.

Las comunicaciones futuras permitirán ampliar de forma muy significativa la capacidad de las comunicaciones en el ferrocarril, lo que permitirá una evolución del sistema ferroviario que no solo incorpore los sistemas que actualmente precisan de telecomunicaciones como son la comunicación de voz entre el maquinista y el puesto de mando o la transmisión de los datos para el sistema ERTMS, sino nuevas aplicaciones como por ejemplo los datos necesarios para la conducción automática.

En cuanto a tecnología, la conclusión de los trabajos de grupos europeos es la de continuar con el uso de sistemas de radio como se especifica en las hojas de ruta 3GPP para beneficiarse de desarrollos y estándares globales, economías de escala y productos maduros. Por tanto, la solución preferida al comienzo de la introducción de FRMCS en ferrocarril, se basará en una plataforma 5G. Sin embargo, dados los ciclos distintos de obsolescencia de los componentes ferroviarios y de telecomunicaciones, se considera crítico que esta evolución del sistema ferroviario consiga independizar las aplicaciones y componentes que usen este sistema de comunicación con la tecnología implementada por lo que la tendencia es clara a que esta plataforma también admita radio que no sea tecnologías 3GPP.

Para conseguir esta independencia tecnológica, clave en cuanto al nivel de modularidad exigido para esta solución tecnológica, es indispensable conseguir una estandarización e interoperabilidad de los requisitos de arquitectura e interfaces que lo permitan.

Otro factor crítico a tener en cuenta para un despliegue económicamente eficiente es por ejemplo la necesidad de considerar el espectro disponible para estas tecnologías ferroviarias, que impactará directamente en los componentes a instalar tanto en vía como en los vehículos.

GNSS

Existen diversas aplicaciones del satélite para ferrocarril, a destacar la aplicación en el sistema de señalización ERTMS declarada por ERA como 'game changer' del sistema.

Esta aplicación de tecnología satelital como innovación y evolución al sistema ERTMS actual permite perseguir 2 de los objetivos marcados por el sector en los sistemas control mando y señalización ampliados que son:

- La reducción de coste del sistema, puesto que, a través de la tecnología satelital, en algunos puntos de las redes se podría minimizar el uso de componentes de señalización en el suelo como son las balizas convirtiendo estas en balizas virtuales.
- Mejora de las prestaciones, ya que con esta tecnología se mejora la capacidad técnica de proporcionar información de posición y velocidad del tren, siendo los sistemas de odometría un punto débil para el sistema ERTMS.

Para incorporar esta evolución al sistema en los despliegues globales a los que nos referíamos al inicio del artículo, se trabaja en la identificación de las limitaciones que esta tecnología tiene en la aplicación en el entorno ferroviario, debido por ejemplo a efectos globales (efemérides, fallos de reloj satelital, divergencia ionosférica) o efectos locales (como multitrayectoria e interferencias).

Los trabajos actuales se centran también en conseguir una arquitectura funcional y lógica que permita llegar a una modularización y requisitos de interoperabilidad suficientes que construyan en conjunto con las otras soluciones tecnológicas el sistema ferroviario futuro interoperable.

Para ello y al igual que con las otras soluciones tecnológicas, esta también requiere el desarrollo de algún facilitador tecnológico para su incorporación a los sistemas de control mando y señalización. En concreto, se consideran necesarios la construcción y estandarización de un mapa digital, la incorporación de tecnologías de aumentación que mejoren la señal satelital y la construcción de una arquitectura común para localización mejorada a bordo.

6. OTROS RETOS

Algunos de los otros retos que debe afrontar el sistema de control mando y señalización interoperable del ferrocarril del futuro están relacionados con las características de las nuevas tecnologías que se incorporan al mismo y que permitirán aprovechar las oportunidades que ellas presentan.

Los nuevos sistemas que compondrán el control mando y señalización tendrán una componente SW mucho más relevante que los sistemas ferroviarios actuales. Esta característica debe servir para que el mantenimiento y evolución de los sistemas sean mucho más dinámicos y simples, llegando incluso a situaciones en las que estas actuaciones se podrían realizar en remoto, tanto para los sistemas instalados en vía como en los vehículos.

Para conseguir este reto, será necesario tener en cuenta las características de sistema de seguridad que es intrínseca en cualquier sistema de control mando y señalización. Mitigación para esta complejidad es la modularización de los sistemas e incluso su SW en distintos componentes, dependiendo de si tienen impacto en la seguridad o no.

El futuro del transporte y por ejemplo para la optimización de la gestión de los activos pasa en gran medida por impulsar el uso de los datos que se generan en el sector. Para ello, es necesario optimizar la obtención y procesado de esos datos, para obtener información de valor añadido con aplicación directa para los agentes ferroviarios y los usuarios finales.

En el sector ferroviario, al igual que en otros sectores económicos, la captación y procesamientos de datos permiten la optimización de numerosos procesos incluyendo la operación y el mantenimiento, disponiendo de más información que avale la toma de decisiones estratégicas. El sistema de control mando y señalización interoperable es uno de los principales productores y usuarios de estos datos que se generarán en el sistema ferroviario completo.

Al tratarse también de sistemas altamente basados en SW, la definición de pruebas para su validación es un elemento crítico y de alta complejidad. Se trata de un aspecto crítico para el despliegue del sistema desde el punto de vista técnico; por su relevancia, pues es la etapa en la que se validan las prestaciones, capacidad, seguridad e interoperabilidad del sistema, y desde el punto de vista económico; puesto que supone una de las fases en las que tanto gestores de infraestructura como operadores invierten mayor presupuesto.

Existen numerosas campañas de pruebas que se ejecutan a lo largo del ciclo de vida de los sistemas ERTMS, desde su aplicación genérica hasta las pruebas finales de integración de subsistemas. Son estas últimas las que requieren de un mayor esfuerzo por parte de los usuarios finales que son las autoridades ferroviarias, los gestores de infraestructura y los operadores ferroviarios. Explotar el análisis matemático de datos existentes de validaciones previas puede servir para optimizar el diseño de las campañas de pruebas.

Conseguir un sistema realmente interoperable, con un despliegue eficiente que mejore las prestaciones del ferrocarril, será solo posible si se resuelve este reto del mantenimiento y evolución eficiente del SW, así como de conseguir un modelo de datos estandarizado del sector ferroviario que permita obtener estos datos de forma completa y con unas estructuras comunes para su uso por diversas aplicaciones.

7. REFERENCIAS

[1] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport (2020). *Deployment of ERTMS on core and comprehensive networks: on-board and infrastructure deployment strategies: final report*, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/71625>

[2] European Commission, Directorate-General for Transport and Mobility (2022). *Europe's Rail Joint Undertaking. Report on preparation of the System Pillar*.

[3] European Railway Agency (2015). *ERTMS Longer Term Perspective*.

Hacia un ferrocarril aún más sostenible

Towards an Even More Sustainable Railway

Imanol Iturrioz Villalba^{1*}

Resumen

Si bien el ferrocarril en general es el medio de transporte colectivo más limpio, todavía un porcentaje sustancial de las líneas no están electrificadas y por ellas circulan trenes diésel donde existe todavía margen de descarbonización.

La evolución en los últimos años tanto de las tecnologías de acumulación eléctrica como de pilas de combustible ha permitido tener una alternativa a la electrificación de estas líneas, que debido a su alto coste ha sido un freno a la descarbonización.

El artículo profundiza en estas tecnologías para ver como de cerca están de ser una alternativa sólida.

Palabras clave: ferrocarril sostenible, hidrógeno, baterías de combustible, nuevos sistemas de tracción ferroviarios.

Abstract

Although railways in general are the cleanest means of public transport, a substantial percentage of lines are not yet electrified and diesel trains run on them, thus leaving ample room for decarbonisation.

Developments in recent years in both electric storage and fuel cell technologies have provided an alternative to the electrification of these lines, whose high cost has been an obstacle to decarbonisation.

The article takes a closer look at these technologies to see how close they are to being a solid alternative.

Keywords: Sustainable railways, hydrogen, fuel batteries, new rail traction systems.

1. INTRODUCCION

En los últimos años, el cambio climático ha pasado a ser una prioridad a nivel mundial. El Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) ha establecido el objetivo de alcanzar la neutralidad climática europea para 2050 y esto supone reducir drásticamente las emisiones, de manera que sólo se emita lo que la tierra es capaz de absorber.

Con este objetivo, además de fomentar la descarbonización de la economía, se quiere generar una nueva economía verde que permita reducir las emisiones a la vez que se generan nuevos puestos de trabajo. Esta estrategia de crecimiento se ha erigido en Europa como una de los pilares para reparar los daños provocados por la crisis del coronavirus y para propiciar un futuro mejor para la próxima generación.

El transporte también se suma a esta lucha por el medio ambiente, y en ese contexto la Comisión Europea publicó en diciembre de 2020 la *Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente* que establece un objetivo de reducción de emisiones del 90 % para 2050.

Dentro de la movilidad, el ferrocarril parte de una posición muy favorable. El transporte representa una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión Europea: el transporte por carretera supone el 71,8 % de las emisiones y el transporte por ferrocarril únicamente el 0,4 %. Este bajo nivel de emisiones se deriva de la alta

eficiencia del ferrocarril (tanto en rendimientos como en resistencia al avance) y de un alto grado de electrificación.

Pero esta posición favorable no le exime de seguir contribuyendo en la reducción de emisiones.

Los vehículos eléctricos alimentados por catenaria son ya potencialmente verdes, ya que el nivel de emisiones depende únicamente de las emisiones generadas al producir la electricidad, por lo que si son alimentados con energía renovable son un transporte cero-emisiones. Los esfuerzos en la reducción de las emisiones deben por lo tanto centrarse en los vehículos diésel que circulan por líneas no electrificadas.

Actualmente, aproximadamente el 50 % de las vías europeas están sin electrificar. Este porcentaje es menor en España (37 %, 5.600 km) y en los países vecinos (Portugal y Francia), pero supone en todo caso un porcentaje elevado.

Varios programas de electrificación están en marcha, pero requieren de altas inversiones y largos plazos para materializarse. Además, si bien las líneas no electrificadas suponen un porcentaje elevado, estas soportan un tráfico reducido que no justifica, en muchos de los casos, el elevado coste asociado a la electrificación y su mantenimiento. En el caso de España, aunque el porcentaje en km de líneas no electrificadas es del 37 %, solamente circulan por ellas el 13 % de los vehículos de pasajeros.

Por lo tanto, las líneas de trabajo en materia de sostenibilidad se centran en las alternativas a los trenes diésel que no requieran la electrificación de las líneas.

Las baterías y el hidrógeno se han erigido como las alternativas cero emisiones a los trenes diésel. A continuación

* Mail: iiturrioz@caf.net

¹ Ingeniero industrial y arquitecto. R&D Department. CAF.

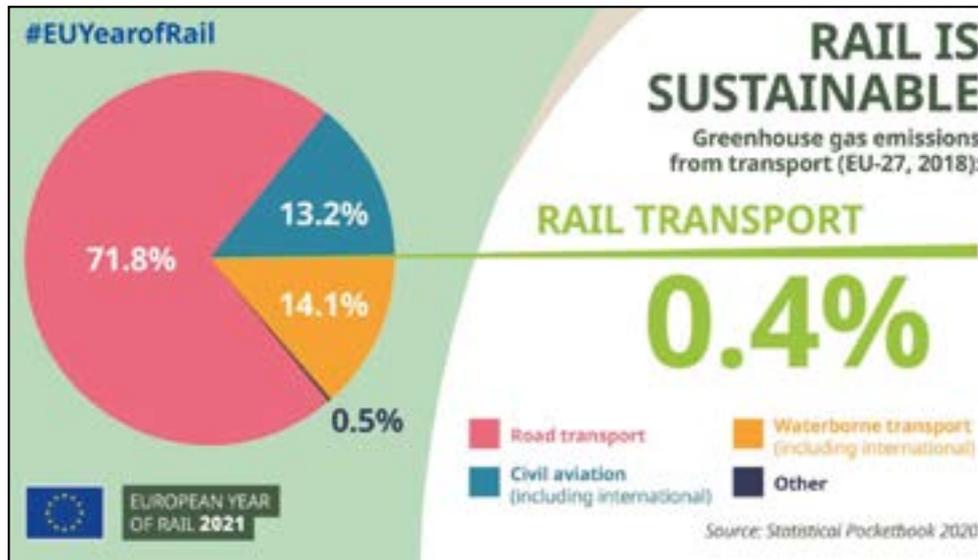


Figura 1. Porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero generadas por el ferrocarril.

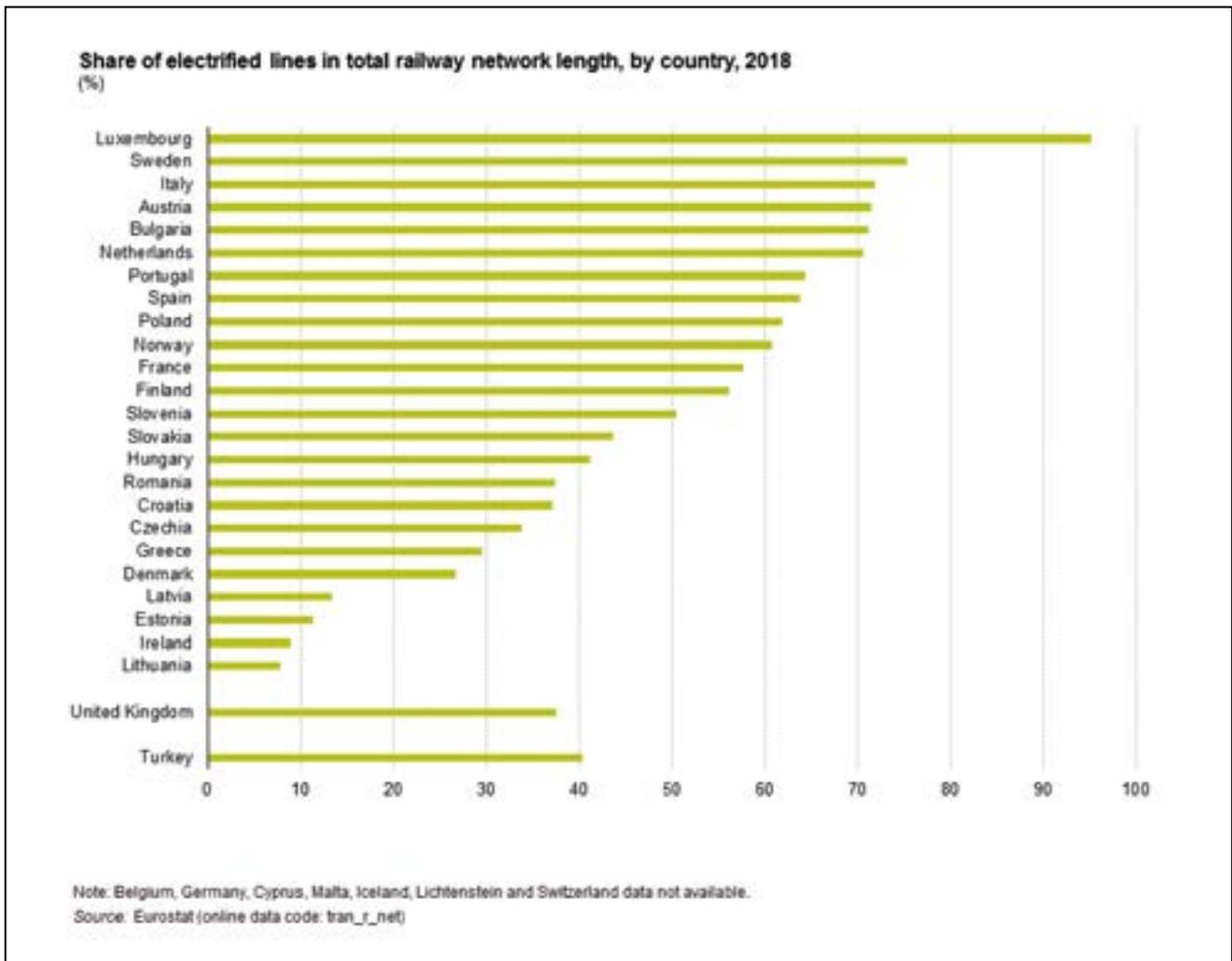


Figura 2. Porcentaje de kilómetros electrificados en las líneas europeas.

se hace una valoración de cada una de las tecnologías en su aplicación ferroviaria.

2. BATERÍAS

En este caso la energía principal para impulsar el tren y alimentar las cargas auxiliares proviene de las baterías.

Las baterías son dispositivos electroquímicos en los que la energía se puede almacenar y descargar a través de una reacción química reversible.

El origen de las baterías se remonta a principios del siglo XIX. A mediados del siglo XIX se desarrolló la batería de plomo-ácido que a día de hoy sigue teniendo un uso muy extendido. A finales del siglo XIX se desarrolló

la batería de Niquel-Cadmio (NiCd) y a finales del siglo XX, la batería de Niquel Metalhidruro (NiMh). Este último tipo de batería fue utilizado en los primeros coches eléctricos híbridos como el Toyota Prius. La batería de Litio es la tecnología utilizada mayoritariamente en la actualidad en numerosas aplicaciones, entre ellas la movilidad eléctrica.

CAF fue precursor en el suministro de vehículos con almacenamiento de energía embarcada, inicialmente con prototipos para tranvías capaces de operar sin catenaria (2008), y actualmente cuenta con más de 10 proyectos basados en este tipo de tecnología en todo el mundo, como por ejemplo, Sevilla, Zaragoza, Luxemburgo, Edimburgo o Kaohsiung (Taiwán).

Recientemente CAF ha sido seleccionado por las autoridades de transporte de Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR) y Nahverkehr Westfalen-Lippe (NWL) de las regiones alemanas de Rhein-Ruhr (la metrópoli más grande de Alemania) y Westphalia, respectivamente, para suministrar más de 60 trenes regionales propulsados por baterías, lo que representa en la actualidad la adjudicación de BEMUs (*Battery Electric Multiple Unit*) más grande del mundo.

Dentro de la familia de las baterías de Litio, las celdas empleadas pueden tener diferentes químicas, donde la clasificación se realiza en función de la composición de los

electrodos positivo y negativo que forman parte de la reacción química reversible citada anteriormente. Para la aplicación ferroviaria distinguimos principalmente 3 tipos de baterías:

Tabla 1. Tipos de baterías en función de su química

	Cátodo (+)	Ánodo (-)
NMC	Nickel Manganeso Cobalto	Grafito
LFP	Litio Hierro Fosfato	Grafito
LTO	Nickel Manganeso Cobalto o Litio Hierro Fosfato	Litio Titanato Oxido

Cada tipo de batería presenta unas características diferenciadas, y la elección se realiza en función de las necesidades de cada aplicación.

El estado del arte de la tecnología predominante en la tracción ferroviaria es la LTO, debido a que la mayoría de los vehículos operan en tramos sin catenaria de manera parcial, permitiendo una disponibilidad de energía muy rápida en los tramos con catenaria para afrontar tramos sucesivos sin electrificar.

Las celdas de baterías se integran para conformar los Sistemas de Acumulación de Energía Embarcados (OESS, *On-Board Energy Storage Systems*).

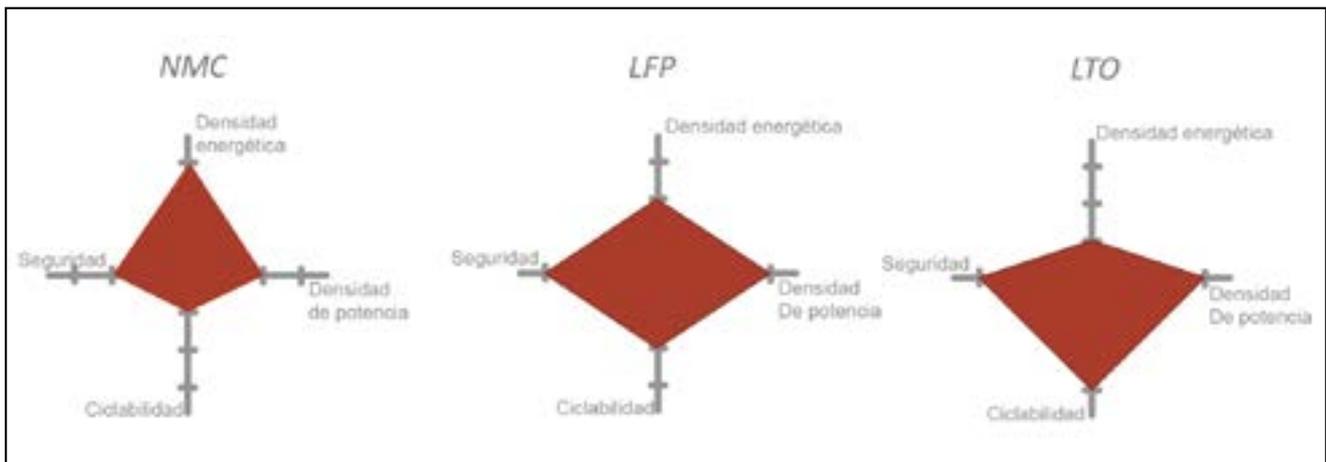


Figura 3. Características de los diferentes tipos de baterías.



Figura 4. Ejemplo de un OESS con un DCDC, tres paquetes de baterías y un BTMS.

Estos son los subsistemas más importantes que conforman el OESS:

1. Paquetes de baterías (ESU, *Energy Storage Units*).

Consiste en la integración de varios módulos de baterías con las interfaces mecánicas, eléctricas, hidráulicas y de comunicación adecuadas. La tensión y la potencia resultante del paquete de baterías pueden llegar a varios cientos de voltios y kilowatios. También se añaden elementos de gestión de batería (BMS, *Battery Management System*) y diversos elementos de protección como contactores y fusibles.

- Módulos de baterías: es la integración de varias celdas en configuraciones serie-paralelo donde cada celda es monitorizada en temperatura y tensión para su equilibrado con una tarjeta electrónica dedicada. El módulo, a su vez, puede disponer de un sistema de refrigeración de las celdas.
- Celdas: es la unidad de almacenamiento mínima. Pueden ser de diferente amperaje, y el formato mecánico difiere en 3 opciones: prismática, *pouch* o cilíndrica.

2. Sistema de gestión térmica de las baterías (BTMS, *Battery Thermal Management System*).

Este equipo es quien proporciona el caudal y la temperatura adecuada al refrigerante (normalmente líquido) que se usa en los módulos de baterías. La temperatura del refrigerante suele controlarse entorno a los 20 °C para que las celdas no sufran de degradación prematura, refrigerando las celdas en uso normal, y precalentándolas al inicio de la operación, si fuese necesario.

3. Convertidor de potencia DC/DC.

La función de este sistema es la conversión de la potencia que fluye entre las baterías y el inversor de tracción. Los voltajes de ambos equipos suelen diferir en valor y van variando, por lo que el convertidor se encarga de adecuar la potencia de carga y descarga de las baterías en base a la potencia demandada por el inversor de tracción. El convertidor puede tener diferentes arquitecturas, pero el núcleo del mismo está compuesto por semiconductores de conmutación rápida, algunos componentes inductivos y otros elementos de control y protección.

A la hora de valorar la idoneidad de la tecnología para la aplicación ferroviaria, las siguientes características son esenciales y permiten además comparar diferentes tecnologías.

Vida de las baterías

Su elevada ciclabilidad (más de 20.000 ciclos antes de terminar su vida útil) hace que la tecnología LTO sea muy ventajosa en términos de Coste Total de Propiedad (TCO, *Total Cost of Ownership*), ya que los vehículos ferroviarios pueden superar los 30 años en operación. Es habitual diseñar los trenes para que la vida útil de las baterías alcance los 15 años, planteando únicamente una sustitución a lo largo de la vida del tren (30 años).

Eficiencia

La eficiencia de una batería de Ion Litio es muy alta, pudiendo superar el 90 %. Además, las baterías permiten recuperar la energía de la frenada del vehículo ayudando a la reducción del consumo total en la operación.

Madurez

Las baterías de Ion Litio son hoy en día una tecnología madura con más de 30 años en el mercado, pero aun así en constante evolución y mejora en lo que se refiere a sus prestaciones y coste.

Seguridad

Las baterías LTO ofrecen una elevadísima seguridad intrínseca a su composición que se combina con barreras térmicas frente al fuego que añaden al producto integrado una seguridad adicional ante posibles incidencias.

Autonomía

La densidad energética de las baterías se ha visto también incrementada de forma significativa en los últimos años lo que ha permitido integrar baterías con mayor capacidad. Hoy en día es posible superar el umbral de los 100 km de autonomía en uso nominal, logrando así dar cobertura a la sustitución de trenes regionales diésel en determinados servicios.

El rango superior a los 100 km se obtiene gracias al uso de 700 kWh de baterías de Ion Litio de última generación, que además de ofrecen unas características muy adecuadas para la aplicación ferroviaria por la potencia de carga ultra-rápida (<15min), la elevadísima ciclabilidad y la máxima seguridad –prioridad absoluta en un vehículo de pasajeros.

Coste

En términos generales, el coste de las baterías de Ion Litio se ha reducido en un 97 % en 30 años, y sigue en continuo descenso con una velocidad que equivale a reducir el coste a la mitad cada 4 años sin que se vea todavía una disminución en este ritmo.

Líneas futuras

En la siguiente década las baterías van a acelerar su evolución en cuanto a prestaciones y coste. Sectores como la automoción, donde varios fabricantes han anunciado el abandono de la fabricación de vehículos de combustión, están impulsando fuertemente el desarrollo de nuevas baterías de mayor rango, mayor durabilidad y menor peso y coste. A modo de ejemplo, se espera que, antes de que termine la década, la densidad de las baterías sea el doble con la introducción de la tecnología del electrolito sólido, actualmente en desarrollo, pero con grandes expectativas para lograr productos competitivos en el medio plazo.

Sin embargo, sería mucho simplificar que los únicos desarrollos futuros vengan de la mejora de la química de

las celdas, pues también el resto de los componentes como los módulos y packs, los sistemas de refrigeración, las electrónicas de control, así como los semiconductores también están avanzando más que nunca debido a la explosión de la descarbonización o la robotización.

Finalmente, la integración conjunta de estas tecnologías en el vehículo, junto con la infraestructura eléctrica y la operación, serán la clave para realizar una propuesta de valor diferenciadora, y no parece descabellado proyectar que la autonomía de los trenes regionales de baterías pase del umbral de los 100 km actuales a 500 km en unos pocos años.

En definitiva, próximamente veremos como un sector tradicionalmente conservador como el ferrocarril avanzará a alta velocidad en nuevos sistemas de propulsión para trenes de pasajeros que después evolucionarán para vehículos más pesados como las locomotoras.

3. HIDRÓGENO

Los trenes propulsados por hidrógeno emplean pilas de combustible (*Hydrogen Fuel Cells*) para generar energía eléctrica a partir del hidrógeno embarcado en depósitos de alta presión. Esta electricidad alimenta a los equipos de tracción y los equipos auxiliares del vehículo como la catenaria alimenta a un tren eléctrico.

Las pilas de combustible son elementos electroquímicos que transforman el hidrógeno (H_2) almacenado y el oxígeno (O_2) que se capta del aire en electricidad y como producto residual generan agua (H_2O). Por lo tanto, los vehículos de hidrógeno sólo emiten vapor de agua a la atmósfera.

Cuando se habla de un tren de hidrógeno realmente se trata de un sistema híbrido compuesto por pilas de combustible y baterías que funcionan conjuntamente. Las baterías complementan a las pilas de combustible ya que estas no pueden responder a las variaciones rápidas en la demanda de potencia y, además, no pueden absorber la energía regenerada en la fase de frenado. El vehículo de hidrógeno incluye por lo tanto un sistema de baterías como

el descrito en el apartado anterior, pero con una capacidad menor, ya que una gran parte de la energía necesaria la generan las pilas de combustible.

Hay que remontarse hasta el siglo XIX para encontrar las primeras referencias de las pilas de combustible, pero no es hasta la segunda mitad del siglo XX cuando las pilas experimentan un avance tecnológico importante.

En los años 70 y 80 del siglo pasado, la crisis del petróleo vuelve a dar un empujón a la tecnología y, finalmente, es ya en el siglo XXI cuando vemos pilas comerciales para aplicaciones en movilidad.

Al igual que sucede con las baterías de Litio, en el caso de las pilas de combustible, también existen diferentes tecnologías, pero es claramente la llamada PEM (*Proton Exchange Membrane*) la más común sobre todo en el sector de la movilidad debido a su mayor rendimiento y su baja temperatura de trabajo.

CAF lleva años trabajando esta tecnología y ya desde 2014, Solaris, la empresa de Grupo CAF dedicada al sector del autobús, ha obtenido contratos para autobuses de hidrógeno en varias ciudades europeas (Hamburgo, Riga, Bolzano, Colonia, Wuppertal y varias ciudades al sur de Holanda). En junio de 2019, Solaris lanzó al mercado su modelo Urbino 12 Hydrogen propulsado por hidrógeno.

La misma tecnología es la que se está utilizando en el tren. De hecho, las pilas de combustible empleadas en el autobús y en el tren son las mismas y solamente cambia el número de pilas instaladas hasta alcanzar la potencia necesaria.

En el sector del ferrocarril, CAF está diseñando su prototipo de tren de hidrógeno basado en un tren Civia de Renfe. Este proyecto (FCH2Rail), liderado técnicamente por CAF y realizado en consorcio con Renfe, Toyota, Adif, IP, CNH2, Stemann y DLR, ha obtenido una importante subvención de la unión europea.

En este demostrador se instalarán los siguientes componentes de la cadena de tracción de hidrógeno: los depósitos de hidrógeno, las pilas de combustible (*Fuel Cells*) con sus equipos auxiliares, el sistema de baterías con sus



Figura 5. Vehículo demostrador del proyecto FCH2Rail.

equipos auxiliares y el convertidor DC/DC bidireccional y aislado para alimentar el inversor de tracción.

Este proyecto, además de probar el tren en vía tanto en España como en Portugal, busca los siguientes objetivos:

- Alcanzar distintos niveles de homologación en 3 países europeos (España, Portugal y otro país por determinar).
- Proponer un marco normativo para la puesta en servicio de trenes propulsados mediante pilas de combustible, identificando las carencias del marco regulatorio vigente (TSI y EN), y proponiendo modificaciones de las normas actuales para permitir la obtención de autorización para operar este tipo de trenes. Estas propuestas serán presentadas a CEN, CENELEC y la Agencia de Ferrocarriles de la Unión Europea.
- Analizar la competitividad de la tracción de la pila de combustible frente a las soluciones diésel existentes en diferentes líneas del Adif.
- Identificar y comparar soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de tracción híbridos de pila de combustible.

Tras este demostrador, CAF ha establecido el objetivo de poner un tren de hidrógeno en servicio de pasajeros a finales de 2023. Además, el conocimiento adquirido en el demostrador permitirá participar en licitaciones de nuevas flotas de hidrógeno, e incluso en licitaciones de transformaciones de trenes diésel a trenes de hidrógeno, a partir de 2022.

Como se ha explicado anteriormente, el vehículo de hidrógeno incluye, además de las baterías y sus componentes asociados, los siguientes elementos:

1. Pilas de combustible

Agrupación de varias pilas de combustible en paralelo para conseguir la potencia requerida para la aplicación. La potencia de las pilas utilizadas está entre los 70 y los 100 kW y se integran grupos de 4 a 8 pilas por tren en función de las prestaciones requeridas y la longitud del tren.

Las pilas incluyen además ciertos periféricos como son los compresores de aire y las bombas del circuito refrigerante.

2. Sistema de refrigeración

Las pilas de combustible requieren un potente circuito de refrigeración, ya que las pérdidas son del orden del 50 % y se evacúan en forma de calor. La refrigeración se realiza mediante dos circuitos de agua (de alta y baja temperatura) que se refrigera mediante ventilación forzada en radiadores que se instalan en el techo del tren.

3. Depósitos de hidrógeno

Los depósitos del hidrógeno consisten en un conjunto de botellas de alta presión (350 bares) que se agrupan para adaptarse al volumen existente en el vehículo. Así como el peso del hidrógeno embarcado es bajo (alrededor de 200 kg), el peso de las botellas supone varias toneladas, incluso utilizando botellas

de clase IV realizadas en polímeros de alta densidad reforzados con fibra de carbono. Además, el volumen ocupado por el hidrógeno es a día de hoy el parámetro más limitante a la hora de dar autonomía al vehículo, ya que los 200 kg utilizados como referencia pueden llegar a ocupar un volumen de unos 8.000 litros cuando se comprime el gas a 350 bares. El incremento de la presión de almacenamiento a los 700 bares (con su consecuente reducción del volumen) es una línea de trabajo a futuro que tiene que solventar los aspectos relacionados con la seguridad y el consumo adicional que supone comprimir más el gas.

4. Convertidor de potencia DC/DC

Al igual que en el caso de los sistemas de baterías, la función de este sistema es la conversión de la potencia que fluye entre las baterías y el bus DC del equipo de tracción.

A continuación, se describen las características más importantes de esta tecnología en su uso ferroviario.

Vida de las pilas

La vida de las pilas de combustible ha venido incrementándose de forma importante en los últimos años y en la actualidad la vida teórica se encuentra alrededor de las 30.000 horas. Pero la vida real de las pilas depende de muchos factores de operación, y en la actualidad los fabricantes de pilas no garantizan vidas por encima de las 20.000 horas, lo que aplicado al régimen de operación habitual de un tren supone 4-6 años.

Eficiencia

La eficiencia de la pila de hidrógeno depende de su punto de trabajo, pero está alrededor del 50 %. El uso del calor generado por las pilas de combustible para calefactar el tren puede paliar el bajo rendimiento, pero esta mejora sólo puede llevarse a cabo en periodos fríos.

Madurez

Si bien las pilas de combustible llevan muchos años en el mercado, no hay experiencia suficiente de su comportamiento a medio y largo plazo en un entorno tan exigente como el ferroviario. Proyectos como el demostrador descrito permitirán a constructores y suministradores de pilas de combustible avanzar en el conocimiento del comportamiento real de las pilas.

Seguridad

La seguridad de los vehículos de hidrógeno es un tema en el que se está trabajando actualmente. Los riesgos de llevar almacenado el hidrógeno a alta presión y, sobre todo, la posible acumulación de hidrógeno en caso de fuga en espacios cerrados como talleres, túneles y ciertas estaciones siguen siendo, a día de hoy, aspectos no normalizados y que suponen una barrera para la homologación de estos vehículos.

Autonomía

La autonomía de un tren de hidrógeno depende de la cantidad de hidrógeno que se embarque. Debido a la baja densidad del hidrógeno, el volumen que ocupa es mucho mayor que el gasoil. En cualquier caso, se pueden conseguir autonomías del orden de los 800 km que pueden ser suficientes para la mayoría de los servicios operados actualmente con trenes diésel.

Coste

El coste de ciclo de vida de los vehículos de hidrógeno es elevado.

El coste de adquisición se incrementa respecto a un vehículo eléctrico, ya que incluye muchos elementos adicionales, como son las pilas de combustible con sus componentes adicionales (depósitos, refrigeración, convertidores), así como las baterías y sus convertidores asociados.

El coste de operación se ve incrementado por el coste del hidrógeno. En el futuro, el coste del hidrógeno verde irá reduciéndose y el incremento en la eficiencia de las pilas de combustible reducirá también el consumo.

El coste de mantenimiento viene condicionado por la vida de las pilas de combustible y las veces que haya que remplazarlas durante la vida del tren.

Por último, no hay que olvidar que, asociado a los trenes de hidrógeno, está toda la infraestructura de abastecimiento de hidrógeno que obliga como mínimo a la instalación de hidrolineras en los puntos de repostaje de los vehículos.

Líneas futuras de trabajo

Las pilas de combustible han evolucionado de forma importante en los últimos años y la extensión de su uso impulsará, sin duda, mejoras tanto en los aspectos técnicos como en sus costes.

Las líneas de trabajo principales en cuanto a la tecnología de las pilas de combustible son:

- Mejora de su rendimiento. A día de hoy, aproximadamente la mitad de la energía embarcada en forma de hidrógeno se desperdicia en forma de calor. Estas pérdidas son similares a las de un motor diésel pero en este caso, el combustible (el hidrógeno) tiene un coste bastante más elevado, por lo que toda mejora del rendimiento hace que esta tecnología sea más competitiva.
- Mejora de la vida útil. La vida útil de las pilas de combustible y de los depósitos es a día de hoy limitada; en torno a 5 años para las pilas y 13 para los depósitos. Esto requiere que estos componentes se replacen varias veces a lo largo de la vida del tren que puede oscilar entre los 30 y 40 años. Nuevas soluciones en estos componentes pueden reducir la necesidad de reemplazarlos y con ello reducir los costes de ciclo de vida.

Por otro lado, el coste del hidrógeno verde sigue siendo otra barrera importante para su uso. En este caso, también el incremento de su utilización favorecerá las reducciones

en coste, principalmente mediante el desarrollo de nuevas tecnologías de producción que mejoren el rendimiento de las actuales. Los electrolizadores de óxido sólido de altas temperaturas (SOEL, *Solid Oxide Electrolysis*) están alcanzando rendimientos muy elevados, pero todavía se encuentran en una fase experimental y a día de hoy tienen una durabilidad más reducida.

Establecer una red de distribución competitiva también es clave, ya que el suministro hasta los puntos de consumo supone un sobrecoste importante. El desarrollo de una red de distribución de hidrógeno o el emplear sin dañar la red de distribución de gas actual son unos aspectos que se están analizando en la actualidad.

4. CONCLUSIONES

El siguiente cuadro resume de forma cualitativa los parámetros principales que se han tratado en los apartados anteriores. Se incluyen como referencia los trenes eléctricos y diésel. Hay que tener en cuenta que las alternativas de baterías e hidrógeno sustituirán a trenes diésel y no a los eléctricos, pero permite comprobar que, desde el punto de vista del vehículo, los eléctricos son la solución óptima siempre y cuando técnica y económicamente sea viable la electrificación de la línea.

Tabla 2. Comparativa con tecnologías de propulsión

	Baterías	Hidrógeno	Diésel	Eléctrico
Vida de los componentes	+++	+	++++	+++++
Eficiencia	++++	+	+	+++++
Madurez	+++	+	+++++	+++++
Seguridad	+++	+	++++	+++++
Autonomía	+	+++	++++	+++++
Coste	+++	++	+++++	+++++
Emisiones estimadas	++++	+++	+	+++++

En todos los aspectos, la tecnología de las baterías supera al hidrógeno excepto en la autonomía. En el caso del ferrocarril, esta característica puede ser determinante y es por ello que puede inclinar la balanza en favor de la solución de hidrógeno en ciertas aplicaciones.

Tratándose de un parámetro clave, en la medida de cómo evolucionen las baterías en este aspecto irán incrementado su cuota de mercado.

En todo caso, las autonomías que proporciona incluso el hidrógeno están por debajo de las que se han venido especificando para los vehículos diésel, y esto va a suponer una gestión integral de la energía (vehículo, infraestructura y operación) que restará flexibilidad a la operación, pero que sin duda redundará en unas menores emisiones.

En base a la experiencia de haber trabajado con las dos tecnologías durante muchos años, y con varios vehículos ya en servicio, podemos concluir que no existe una tecnología que sea la idónea para todas las aplicaciones. En función de operación y sobre todo de la autonomía requerida se determinará la solución óptima.

Resumidamente, podríamos concluir que para servicios en los que las baterías alcanzan las autonomías requeridas o es viable una electrificación parcial de la línea, esta

tecnología es sin duda la más apropiada por coste, eficiencia y seguridad. En los casos en los que la autonomía necesaria no se pueda alcanzar con las baterías, entonces, los vehículos de hidrógeno son una alternativa válida, pero es necesario todavía despejar ciertas incertidumbres tecnológicas y que se concrete el marco normativo que permita homologar este tipo de vehículos. En la medida en que las baterías mejoren en el futuro sus prestaciones de autonomía, irán restando campo de actuación a las soluciones de hidrógeno.

5. REFERENCIAS

Comisión Europea (2020). Staff Working Document. *Estrategia de Movilidad Sostenible e Inteligente*.

Berger, R. (2018). Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions, Vol. 1. *Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for European*

Regions and Cities. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU). Múnich: Roland Berger GmbH.

Shift2Rail Joint Undertaking (S2R JU) (2019). *Study on use of Fuel Cells and Hydrogen in the Railway Environment*. <https://shift2rail.org/publications/study-on-the-use-of-fuel-cells-and-hydrogen-in-the-railway-environment/>

Caminos hacia el tren Talgo del futuro. El aligeramiento y la innovación como herramientas para la sostenibilidad

Pathways to the Talgo Train of the Future. Lightweighting and Innovation as Tools for Sustainability

Eduardo de la Guerra Ochoa^{1*}, Francisco José García Piñero², Víctor Meroño Domínguez³, Javier Fernández Valverde⁴, Marta Cerdeira Peinado²

Resumen

La industria ferroviaria busca aumentar la capacidad del sistema ferroviario, aportando flexibilidad para alinear la capacidad y la demanda, aumentar la disponibilidad, fiabilidad y eficiencia energética reduciendo el coste del ciclo de vida (LCC), logrando una mejora del confort de los pasajeros y del atractivo del transporte ferroviario.

Una de las líneas de acción para resolver los desafíos anteriores es la introducción de nuevas estructuras más ligeras de caja y/o rodadura, ya que ambos son algunos de los componentes más pesados del tren. El potencial de ahorro de peso (aproximadamente un 30 % y un 50 %, respectivamente) y el uso de nuevos materiales y procesos en las estructuras dará como resultado una reducción del consumo de energía, menores inercias, menor desgaste de vía y un aumento de la capacidad de transportar mayores cargas útiles.

Palabras clave: aligeramiento, eficiencia, capacidad, CFRP, materiales, impacto, estructura, caja, material rodante, procesos, reciclado.

Abstract

The railway industry seeks to increase the capacity of the railway system, providing flexibility to align capacity and demand, increasing availability, reliability and energy efficiency by reducing the life cycle cost (LCC), improving passenger comfort and increasing the attractiveness of rail transport.

One of the lines of action to tackle the aforementioned challenges is the introduction of new lighter bodies and/or running gear structures, as both of these are among the heaviest components of the train. The potential weight savings (approximately 30 % and 50 %, respectively), and the use of new materials and processes in structures will result in reduced energy consumption, lower inertias, reduced track wear, and increased capacity to carry higher payloads.

Keywords: *Lightening, efficiency, capacity, CFRP, materials, impact, structure, box, rolling stock, processes, recycling.*

1. INTRODUCCIÓN

Para seguir siendo competitivo y afrontar el reto proyectado por la Comisión Europea de que el ferrocarril sea la columna vertebral del transporte en Europa, todo el sector ferroviario europeo combina sus esfuerzos con el doble objetivo de estar más cerca de las expectativas de los usuarios finales de los servicios ferroviarios y lograr ese cambio modal al ferrocarril tan buscado.

Esa columna vertebral del transporte está sustentada en tres pilares básicos que se han de mantener y potenciar [1]:

- Es diverso. Las ventajas del tren no son solo para turistas y viajeros. Las empresas y los transportistas de

mercancías pueden cambiar al ferrocarril y beneficiarse de ofertas cada vez más competitivas y de bajo coste para transportar sus mercancías por toda Europa, al mismo tiempo que reducen su huella de carbono.

- Es verde y sostenible. El ferrocarril está electrificado en gran medida y emite mucho menos CO₂ que los viajes equivalentes por carretera o aire. Representa solo el 0,4 % de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte de la UE, mientras que todo el transporte de la UE representa el 25 % de las emisiones totales de la UE. Además, es el único medio de transporte que entre 1990-2017 ha reducido constantemente sus emisiones y consumo de energía, al tiempo que utiliza cada vez más fuentes de energía renovables, es decir, el sector ferroviario es capaz de ofrecer reducciones drásticas de emisiones por dos vías. En la figura 1 se ilustra el cambio modal desde otros sectores más contaminantes y la propia reducción de sus emisiones directas, con la paulatina sustitución de los equipos diésel por otros medios alternativos (baterías, supercondensadores,

* Autor de contacto: edelaguerra@talgo.com

¹ Doctor ingeniero industrial. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo. Calle Las Norias, 92, 28221 Majadahonda (Madrid).

² Ingeniero mecánico. Ingeniero de materiales. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo.

³ Ingeniero mecánico. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo.

⁴ Ingeniero industrial. Departamento de Innovación de Producto. Patentes Talgo.

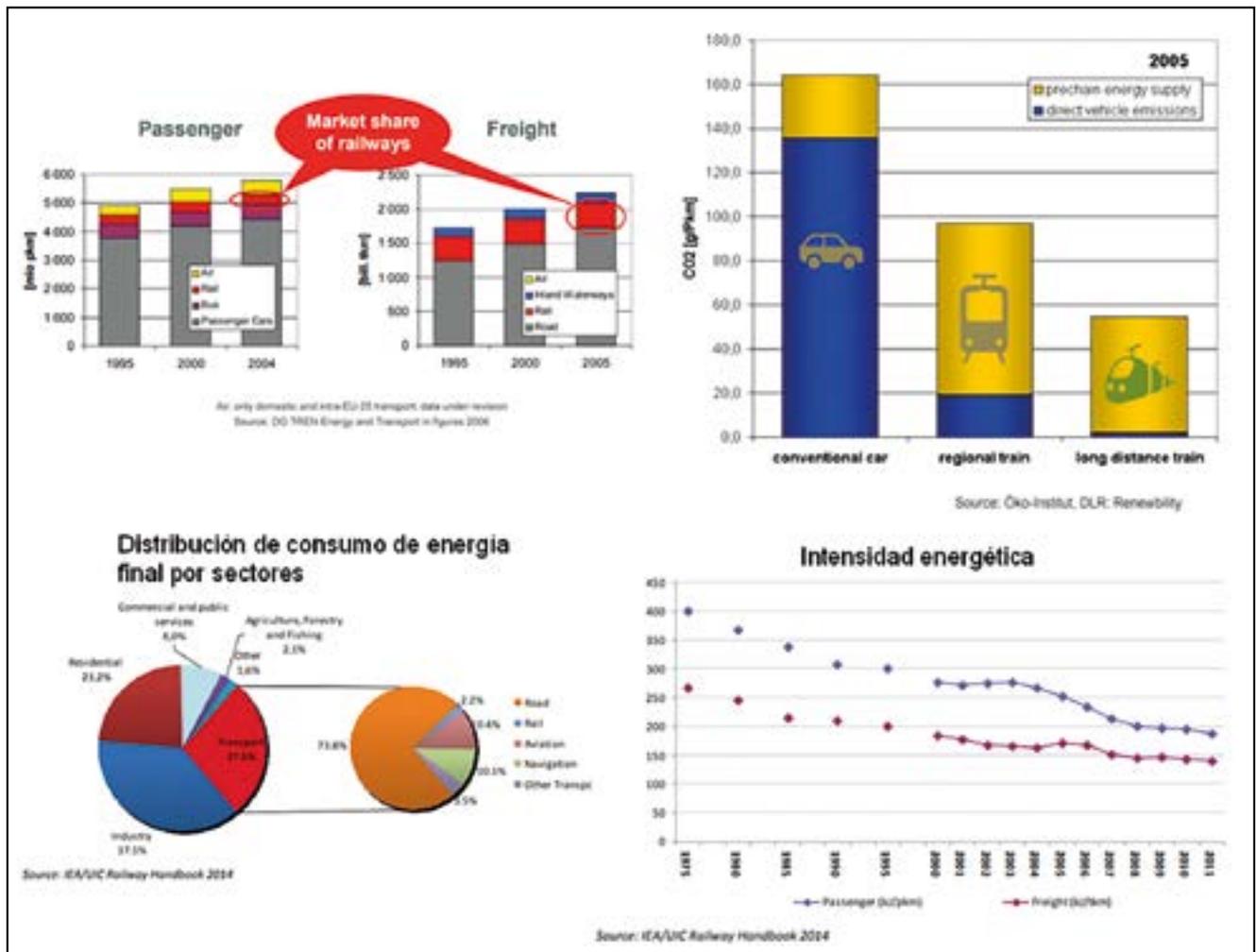


Figura 1. Gráficos sobre emisiones y consumo energético.

hidrógeno, combustibles sintéticos, etc.) y la disminución de la intensidad energética utilizada [2, 3].

- Es asequible, cómodo y seguro. Es el modo de transporte terrestre más seguro con la menor incidencia de accidentes mortales (0.1 muertes por cada mil millones de pasajeros/km entre 2011 y 2015). Todo esto se consigue gracias a un férreo marco normativo enfocado en la seguridad en el que se valida y ensaya casi todo.

En este artículo se van a presentar dos proyectos relacionados con el aligeramiento realizados por el departamento de innovación de producto de Talgo, en el que se ha desarrollado un bastidor de rodal AVRIL con una reducción en peso cercana al 50 % y se está trabajando en el desarrollo de una caja intermedia del Talgo 350 en consorcio junto a Aernnova, Tecnalía y FIDAMC en el que se esperan conseguir reducciones cercanas al 25 %. El objetivo de ambos es estudiar la viabilidad técnica y económica del proceso de aligeramiento, de nuevos materiales, procesos de fabricación y uniones en entornos ferroviarios y aplicaciones estructurales.

¿Por qué es importante el aligeramiento?, o ¿qué relación tiene con todo lo anterior? El aligeramiento, entendido como una herramienta para un fin, es una palanca para afianzar los puntos anteriores. Este camino es similar al seguido en el mundo aeronáutico, marítimo y de automoción con las particularidades propias del entorno

ferroviario en cuanto a volúmenes y cadencias de producción y costes objetivos.

- Reduce el consumo energético si usamos la fórmula de Davis [4], que por sencilla no deja de ser práctica e ilustrativa, $F_{resistencia} = -(A + B \cdot v + C \cdot v^2)$, el término independiente está ligado a la masa y, dependiendo de las condiciones (rampas, tipologías, etc.), la masa puede ser responsable de más del 30 % de la resistencia, a velocidad nominal. Si tenemos en cuenta aceleraciones, la reducción de masa pueden suponer importantes ahorros energéticos y, por ende, económicos. Para el caso estudiado, tren de alta velocidad, 30 años de vida, se traduce en un ahorro entorno a los 5-8 €/kg ahorrado.
- Reducción del coste de accesos a vía, basado en la reducción del daño sobre infraestructura al tener menor masa semi-suspendida y masa suspendida. Basado en el modelo de cálculo del canon británico [5] se estima que se puede reducir el coste de mantenimiento en el entorno de 6-12 €/kg ahorrado.
- Aumento de la capacidad de los trenes, ya sea por aumento de la carga de pago o mejora/introducción de nuevos equipos. Se ha estimado un aumento de la capacidad del 5-10 % y unos 50-100 €/kg ahorrado. Todo se traduce en unos menores costes de operación (decremento de los €/pax/km).

El principal desafío de todo esto es la introducción de nuevos materiales y procesos para el entorno ferroviario, cumpliendo en lo posible con la normativa vigente y detectando las carencias en la misma (tal como se reflejó en el proyecto europeo REFRESCO [6]), así como el desarrollo de las metodologías para diseñar, analizar, ensayar, fabricar y mantener.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se ha dividido en cuatro etapas principales: proceso de diseño y análisis, incluyendo una investigación sobre métodos de validación y estado del arte, ensayos a nivel de subcomponente, fabricación de prototipos (figura 2) y ensayos a escala completa (banco y vía).

La primera premisa de ambos demostradores es que sean totalmente compatibles en términos de interfaces con los trenes existentes para facilitar sus pruebas en vía. El bastidor de rodal se basa en la plataforma Talgo AVRIL y la caja en el Talgo 350. Con estas interfaces claras, se tiene una envolvente dónde desarrollar el diseño.

De origen, el rodal convencional del AVRIL es un bastidor mecano-soldado con acero estructural S355 y la caja del Talgo 350, que es un “tubo” hecho con perfiles de extrusión soldados entre ellos y chapa mecano-soldada en diversas aleaciones de aluminio (AW 6082, AW 6005A, AW 5083).

Conocidos los materiales y procesos de origen se realizaron unos estudios conceptuales sobre diseño y materiales, evaluando alternativas existentes (tabla 1 y figura 3).



Figura 2. Prototipo de rodal ligero.

Tabla 1. Rigidez a tracción específica, rigidez a flexión y resistencia específicas (relativos respecto acero S355 de referencia)

	$(E_t/\rho)_{S355}$	$(E_t^{1/3}/\rho)_{S355}$	$(R_{p,0.2}/\rho)_{S355}$	Promedio
S355 (Ref)	1	1	1	1.00
Apilado CFRP	2.5	4.1	4.8	3.80
Al-Cu-Li	1.1	2.1	5.8	3.00
Ti (near-β)	0.9	1.4	5.2	2.50
Al-Mg-Zn-Cu-Zr	1	1.9	4.3	2.40
Maragin	0.9	0.9	5.2	2.33
Al-Mg-Zn-Cu	1	2	3.8	2.27
Ti (β-metastable)	0.9	1.4	4.5	2.27
Al-Li	1.1	2.2	3.3	2.20
Apilado GFRP	0.75	2.4	3.4	2.18
Ti (α+β)	0.9	1.4	4.1	2.13
Al-Cu	1	2	2.6	1.87
Inox. PH	0.9	1	2.8	1.57
Multifase	1	1	2.3	1.43
HSLA	1	1	1.9	1.30
Aleado + QT	1	1	1.8	1.27
DPLA	1.1	1.1	1.4	1.20
Inox. Duplex	1	1	1.5	1.17

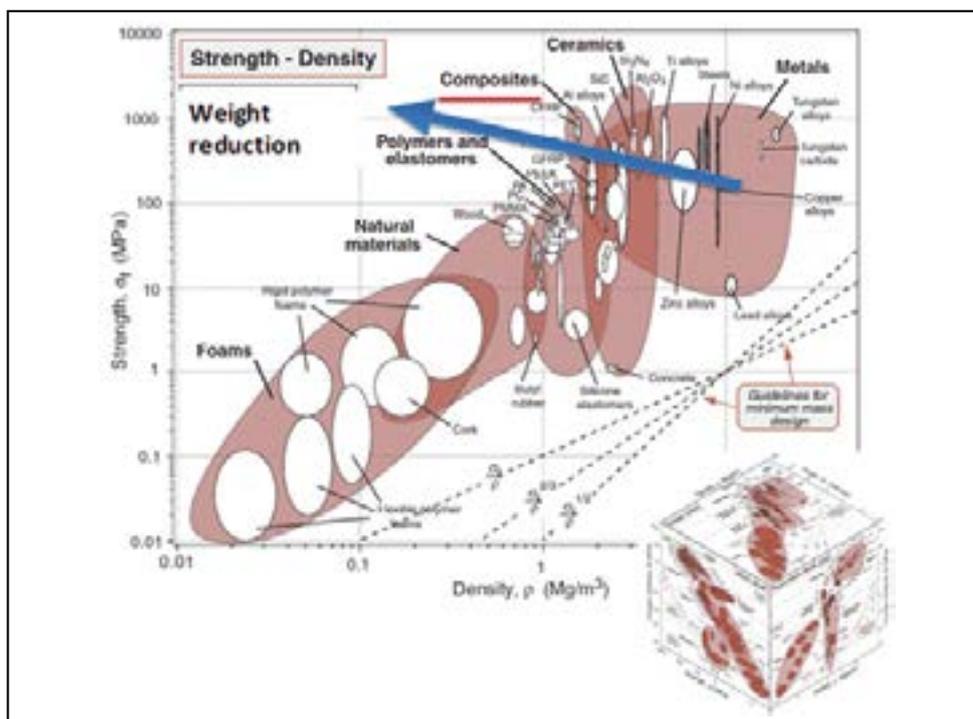


Figura 3. Diagramas de Ashby [7].

De todo lo anterior se concluyó que el material que puede ofrecer una mayor reducción de peso será un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra de carbono, CFRP. Estos materiales, además, ofrecen ventajas adicionales como: propiedades configurables, ofrecen el mejor comportamiento ante cargas variables, buen comportamiento ante agentes ambientales, buena conformabilidad -se consiguen formas complejas sin usar soldaduras-, y buen comportamiento a baja temperatura. Por otro lado, presenta otros inconvenientes: limitado comportamiento ante cargas de fuego, exige control de propiedades, la tipología de material y los métodos de fabricación no son estándar para la industria ferroviaria, así como unos costes directos superiores a los metales convencionales en el sector.

2.1. Experiencias previas

Como tal, los materiales poliméricos reforzados con fibras no son nuevos en el sector, se emplean ampliamente en estructuras secundarias (carenas exteriores e interiores, frontales, trampillas, etc., (ver figura 4), pero su utilización en estructura primaria solo se ha limitado hasta ahora a proyectos de innovación o patentes.



Figura 4. Morro, techo y laterales de cabina del Talgo AVRIL-S106 realizados en CFRP.

Se recogen a continuación algunos de los ejemplos encontrados sobre el aligeramiento de estructuras, que incluyen el empleo de aleaciones de acero no convencionales, aluminio o polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP) o carbono (CFRP):

- 1997 GEC-Alstom presentó una patente para la realización de un bastidor de *bogie* en piezas de aluminio forjado [8].
- Messerschmit Boelkow Blohm (MBB) llegó a fabricar un prototipo en 1986 de bastidor de *bogie* de fibra de vidrio que patentó en 1975.
- Patente [9] solicitada por GEC-Alstom en 1992, para un bastidor fabricado en material compuesto (sin concretar una tipología en particular).
- Eurobogie (dentro del programa Eureka [10]) en estudio por la Universidad de Reading en 2011 de un *bogie* de mercancías con un bastidor con función añadida de suspensión primaria fabricado íntegramente en GFRP con un potencial ahorro de peso de del 30 %, del que se alcanzó a probar el concepto a escala 1:5 en un tren de pasajeros durante cinco años sin daños aparentes.

- En 2014 se puso en pruebas un desarrollo en CFRP de la tradicional viga “lateral” y la suspensión primaria e integrarlo en un solo componente para *bogie* de metro. Se integra el *bogie* denominado “ef-Wing” de Kawasaki [11], en pruebas en los metros de Tokio y Nueva York.
- Septiembre de 2018, la compañía china CRRC, presenta un desarrollo completo, “CETROVO”, de vehículo de metro con caja y bastidor de *bogie* en CFRP [12].
- El instituto británico IRR, junto con Alstom Transport, Magma Structures, ELG Carbon Fibre Ltd., y las universidades de Birmingham y Huddersfield, dentro del marco europeo Run2Rail, propone un bastidor completo de *bogie* de mercancías usando parcialmente un compuesto de fibra reciclada [13].

En breve se esperan también ejemplos de inclusión de piezas de fabricación aditiva en piezas de responsabilidad estructural. Para las cajas, similares ejemplos se pueden encontrar en la bibliografía.

De manera general y fuera de proyectos de innovación, casi todas las estructuras de motrices y locomotoras, vagones de mercancías o bastidores de rodadura se realizan en acero estructural a partir de perfiles o chapas mecano-soldados. Por otro lado, casi todas las estructuras de coches de viajeros de alta velocidad o larga distancia se realizan en aluminio a partir de perfiles de extrusión soldados.

2.2. Diseño y cálculo

Teniendo claro que la base del diseño sería la fibra de carbono, quedaba por resolver uno de los factores limitantes: la resistencia al fuego. Tras unos años de desarrollo, la existencia de pre-impregnados (o pre-preg) de CFRP que cumplen con la EN 45545-2 [14] HL2 R7 ha hecho posible el uso de la fibra de carbono para aplicaciones estructurales manteniendo los requisitos de seguridad exigidos a nivel normativo. La definición del método de fabricación con material compuesto es la decisión más importante que se debe tomar para iniciar el proceso de diseño. En este caso, dada la existencia únicamente de pre-impregnados, se ha optado por el proceso de laminado manual con el pre-preg y curado en horno/autoclave para caja y rodal, respectivamente (figura 5). Además del tema del fuego, otros requisitos no estructurales se han tenido en cuenta durante el diseño: conductividad, compatibilidad electromagnética, impacto, etc. [15-18].

A partir de ahí ya se puede trabajar en el diseño y en cómo realizar los moldes y útiles, teniendo en cuenta el control de la precisión superficial, el sentido del crecimiento de las espesores y radios, el aspecto visual y los montajes con otras piezas, ya que, debido a las limitaciones del proceso de fabricación de los prototipos, no es posible la integración de todas ellas en un “one-shot”.

Basado en la experiencia de diseño en otros sectores (aeronáutico, automóvil), se realizan los estudios de cortes, transiciones y patronaje de laminados, definición de zonas de mecanizado y láminas de sacrificio, ángulos de desmoldeo, radios de curvatura admisibles y todo lo relacionado con uniones (agujeros, pernos remachables, tornillería o zonas de adhesivado) (figura 6).



Figura 5. Representación esquemática del proceso de fabricación.



Figura 6. Zona mecanizada y diseño de una unión con perno remachable.

En el rodal se consigue un conjunto de aproximadamente 15 piezas incluyendo cepos, pasos de rueda, soportes de balancines de guiado, etc. Geometrías tridimensionales realizadas con laminados monolíticos de fibra para conseguir un conjunto que tenga la resistencia necesaria con el mínimo peso.

Para la caja, la integración es mayor debido a la menor complejidad geométrica, quedando 7 grandes subconjuntos para integrar. En este caso, en vez de laminados monolíticos de manera generalizada, se opta por estructuras sándwich de CFRP y núcleo de PET (polietileno tereftalato) para aportar la rigidez necesaria al conjunto junto con unas vigas pultruidas en las esquinas de los paneles (figura 7). Además de la fibra, y a fin de validar otros metales y simplificar el diseño de las interfases, los diseños se complementan con elementos de titanio mecanizados, componentes en acero inoxidable de alta resistencia fundidos y mecanizados y herrajes mecanizados fabricados en acero al carbono de alta resistencia y aluminio.

Todos estos subconjuntos están montados, como se ha comentado, con procesos de unión poco convencionales en este tipo de componentes: pegado y unión mecánica con remache tipo Hi-Lok, un remache de alta resistencia y eficacia usado ampliamente en el mundo aeronáutico.

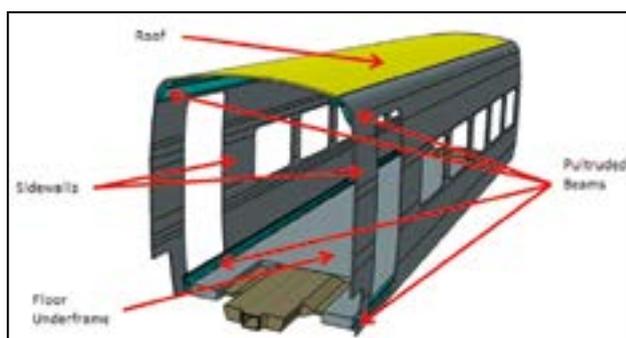


Figura 7. Diseño e integración de la caja ligera.

Una vez que el diseño se ha concretado, se pasa al proceso de análisis estructural. Para ello se han utilizado las cargas de servicio y cargas excepcionales normativas de la EN 13749 [19] y la EN 12663-1 [20] habituales para el diseño de bastidores y cajas respectivamente. La principal diferencia del análisis del compuesto respecto a lo recogido en la normativa, son los criterios de aceptación, ya que éstos quedan restringidos para el cálculo de estructuras metálicas.

Los criterios utilizados durante el análisis para material compuesto han sido: criterio de máxima deformación, criterio de Tsai-Wu y máxima tensión interlaminar [21]. A continuación, se incluye una breve descripción de cada uno de ellos:

- Criterio de máxima deformación (en el plano de la lámina). Es equivalente al criterio de Saint-Venant para materiales isotrópicos. Es un criterio conservador y es relevante en las partes planas de la pieza.

El fallo se produce si no se satisface:

Tracción: $\varepsilon_{11} < X_{et}$ ($\varepsilon_{11} > 0$); $\varepsilon_{22} < Y_{et}$ ($\varepsilon_{22} > 0$)

Compresión: $|\varepsilon_{11}| < X_{ec}$ ($\varepsilon_{11} < 0$); $|\varepsilon_{22}| < Y_{ec}$ ($\varepsilon_{22} < 0$)

Cortadura: $|\gamma_{12}| < S_e$

Siendo:

$X_{et}(X_{ec})$ = Máxima deformación normal de tracción (compresión) admisible en la dirección 1

$Y_{et}(Y_{ec})$ = Máxima deformación normal de tracción (compresión) admisible en la dirección 2

S_e = Máxima deformación tangencial admisible

- Criterio de Tsai-Wu. Es uno de los conocidos como "criterios interactivos" y está basado en el criterio de Tsai-Hill (sigue el criterio de plastificación de Hill, que a su vez se basa en el criterio de Von Mises para materiales isotrópicos). Es de uso muy extendido, (incluido en la mayoría de los softwares de elementos finitos) y predice la rotura mediante una ecuación en la que intervienen todas las componentes de tensión.

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{11}\sigma_{11}\sigma_{22} < 1/sr$$

Siendo F_i, F_{ij} = Resistencia del material en las direcciones específicas

- Máxima tensión interlaminar. Se analizan las tensiones que aparecen a través del espesor. Especialmente relevante en bordes de pieza y/o radios.

$$\tau_{xz}/\gamma_z < ILSS$$

ILSS = Máxima tensión interlaminar admisible

Este análisis se realiza en todas las láminas que componen el laminado, considerando un fallo de la pieza cuando se da el fallo en la primera lámina. Es, por tanto, un proceso más complejo que el análisis que se realiza a los modelos metálicos.

Para la definición de los factores de seguridad, se tiene en cuenta que:

- Se determinan factores de seguridad atendiendo a distintos aspectos relativos al material compuesto (tabla 2 [22]).
- Se distinguen entre caminos de carga “principales no redundados” y caminos de carga “principales redundados y/o secundarios” (diferencia en la exigencia de la caracterización de propiedades exigibles al material).
- sf cargas excepcionales = 3.5-4.
- sf cargas servicio = 6-7.

Tabla 2. Consideraciones para definir el factor de seguridad

Concepto	Factor parcial	Observaciones
Proceso fabricación	1.5	Apilado manual (“Hand lay-up”)
Ambientales	1.1	Envejecimiento (principalmente fluencia)
	1.2	Efectos de Calor-Humedad
Tipo de sollicitación	1	Carga Excepcional
	2	Carga de Servicio
Tipo fallo del material	1.5	Carga última (rotura)
Caracterización propiedades admisibles	1	Obtenido en Base A
	1.1	Obtenido en Base B
	1.21	Obtenido en valor Promedio
Metodología análisis	1.1	Teoría lineal de Laminados por FEA
Base de cargas de Análisis	1	EN 13749 [19]/EN 12663 [20]

Tal como se recoge en la tabla 2, los análisis se han realizado mediante modelo de elementos finitos (software de análisis estructural ANSYS) (figura 8).



Figura 8. Modelo de elementos finitos (FEM) del rodal y de la caja.

Para la realización del análisis es necesaria una caracterización del material más allá de la hoja de características del material. Recordemos que estos tipos de materiales no son algo estandarizado que se pueda comprar, es un material que se fabrica. En la figura 9a se recoge la pirámide de validación empleada en contraposición a la clásica, donde toda la caracterización a nivel del material se supone cubierta al emplearse materiales según norma.

En este apartado se expondrán algunos ejemplos de los tres primeros escalones de la pirámide, dejando para el apartado 2.4 los ensayos a nivel componente.

Se han realizado correlaciones entre probetas de laminados y simulación a partir de ensayos [23-25] donde se pueden observar los bajos errores obtenidos (tabla 3). Estos ensayos también sirvieron para calcular el factor de seguridad parcial “Caracterización propiedades admisibles” de la tabla 2.

De igual manera, se caracterizaron detalles de diseño en laboratorio a nivel probeta para establecer niveles concretos de deformación admisibles en zonas más complejas como pueden ser áreas con agujeros practicados o uniones mecánicas o pegadas (ensayos *open hole*, *bearing pass-by*, *lap-shear*, etc.) (figura 9b).

Cómo último ejemplo, se recogen los estudios de impacto, concretamente impacto de balasto. En base a lo

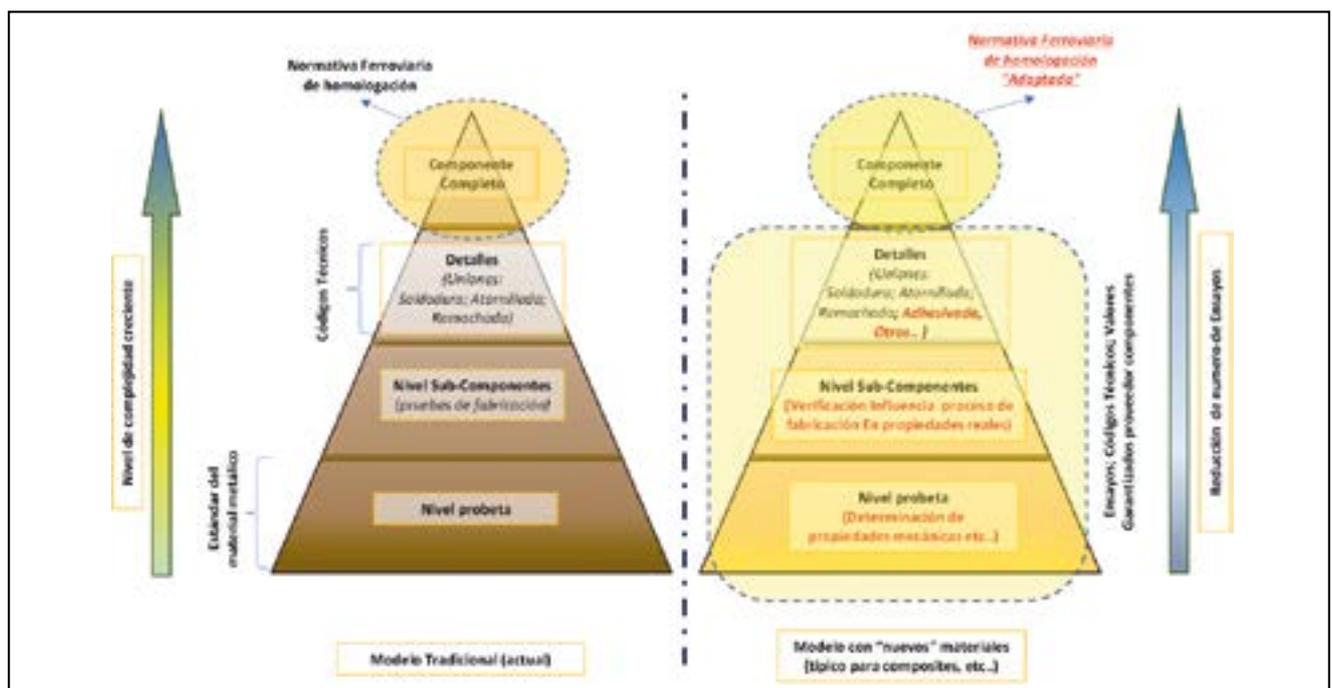
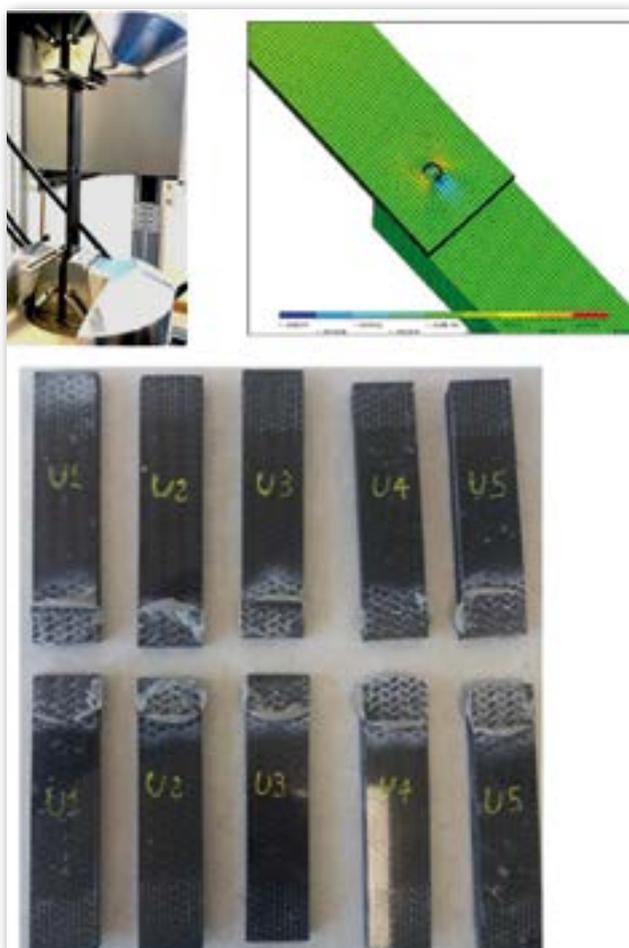


Figura 9a. Pirámide de validación tradicional y la aplicada a nuevos materiales.

Tabla 3. Correlación entre ensayos y FEM

Propiedad Mecánica		Laminado 1		Laminado 2	
		Ensayo	FEM	Ensayo	FEM
Tracción (0°) ASTM D3039 [23]					
Módulo de Young	(GPa)	49.4	49.7	72.1	73.7
Error	(%)	0.61		2.22	
Compresión (0°) ASTM D6641 [24]					
Módulo de Young	(GPa)	48.9	49.6	70.7	73.6
Error	(%)	1.43		4.07	
ILSS ASTM D2344 [25]					
ILSS	(MPa)	46.8	53.0	51.8	53.1
Error	(%)	13.25		2.5	

**Figura 9b.** Caracterización de agujeros y adhesivos, y correlación con FEM.

observado durante la operación comercial en acero y aluminio, los impactos solo suponen una ligera deformación plástica y endurecimiento local. Sin embargo, para otros materiales requiere un estudio específico.

El impacto de balasto es un fenómeno que puede ser significativo a alta velocidad ($v > 200$ km/h), sobre todo si la altura del balasto sobre la vía no está del todo controlada o cuando hay algún fenómeno natural como la nieve o el hielo. Estos impactos pueden provocar picaduras y golpes sobre bastidores de *bogies*, ejes, carenas, ventanas o la propia estructura de las cajas (figura 10).

Para ello, se ha realizado una caracterización siguiendo el procedimiento de ASTM D7136 [26] para el estudio de la resistencia al daño de un compuesto de matriz

**Figura 10.** Daños por abrasión e impacto en un rodal en servicio y en una ventana.

polimérica reforzado con fibra en un evento de caída de un peso utilizando el impactador de punta angulosa procedente de la NF-F-07-101 [16] en vez del impactador hemisférico de la ASTM D7136 [26]. De acuerdo con la NF se establecen niveles de energía desde 12 J (K1) hasta 285 J (K11) y no aporta criterios sobre que niveles de energía son los adecuados para cada caso.

Con el fin de seleccionar la energía de diseño para el compuesto, se han realizado ensayos en torre de caída con probetas metálicas (acero y aluminio en diferentes espesores) y se han comparado con los impactos vistos en los trenes en servicio (figura 10). Los resultados muestran correlaciones entre el daño local en el punto de impacto (profundidad), el área dañada y la energía del impacto (figura 11). Teniendo en cuenta que el daño habitual observado en el tren es de unos 3 o 4 mm de diámetro (7 o 12 mm²), la energía de impacto que aparece en impactos ocurrido en servicio podría corresponderse con un valor inferior a 25 J.

En el compuesto de cierto espesor, el daño local en el punto de impacto es una punción sin penetración total del espesor. La fuerza máxima, el desplazamiento y la energía se incrementan cuando aumenta la energía de impacto. El daño interno es de mayor extensión que el local, y es el responsable principal de la pérdida de resistencia debida al impacto. El tamaño del área interna dañada y el tipo de daño producido es similar independientemente del impactador utilizado, anguloso (NF-F-07-101 [16]) o hemisférico (ASTM D7136 [26]), lo que permite utilizar la experiencia y bibliografía existente en base a este último ensayo en el mundo aeronáutico como aceptable para evaluar daños en material compuesto por impacto de balasto.

Los impactos a bajas energías (de 12 J a 25 J para el espesor más bajo ensayado y de 12 J a 35 J para el espesor más grande) provocan unos daños localizados, lo que conlleva unos daños asumibles y reparables (figura 12).

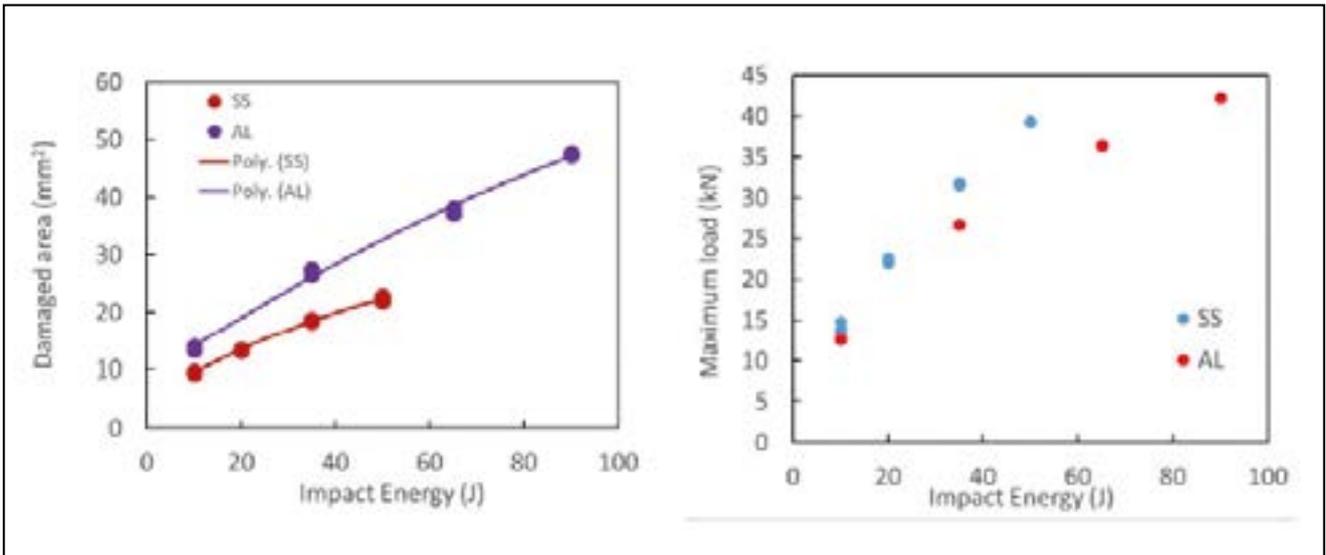


Figura 11. Correlación entre área dañada y carga con la energía de impacto en probeta metálica.

Para energías de impacto mayores, entre los 90 J y 115 J, se produce el fallo en la probeta, por lo que se considera 60 J como el límite de energía que se puede admitir. Por encima de 35 J, en estructura primaria y camino principal de carga, habría que poner una protección frente al impacto para estos materiales. Este requisito podría subir hasta los 60 J para estructura secundaria o donde no sea camino principal de carga.

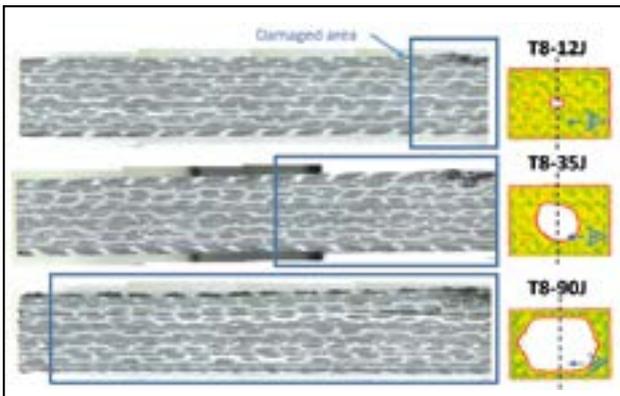


Figura 12. Probetas de CFRP inspeccionadas después del impacto.

Con todos estos ensayos de caracterización y el análisis, se ha cerrado el diseño y se ha pasado a la fase de fabricación en el caso del rodal. En la caja, al ser más compleja la fabricación de útiles y moldes, la fabricación no se finalizará hasta mediados del 2022.

2.3. Fabricación

Este primer prototipo es un compendio de procesos y materiales nuevos para el mundo ferroviario, y se ha colaborado con alrededor de 10 socios repartidos por España y Europa para ir uniendo los diferentes conocimientos y experiencias.

Como se ha comentado, para la parte de compuestos del rodal, se ha empleado un proceso de *hand lay-up* y material pre-impregnado, curado en autoclave, una

tecnología empleada en monocascos de automoción y que se adapta muy bien a la realización de prototipos. Para la parte metálica, distinguimos los cajones metálicos superiores, donde va alojado el conjunto de la estabilizadora, que están fundidos y mecanizados en acero inoxidable de alta resistencia (GX4CrNi13.4), y los herrajes para los que se han empleado acero al carbono de alta resistencia (42CrMo4) y titanio (Ti6Al4V) mecanizados. Como referencia, la parte de compuesto representa el 38 % del peso total y es la que mayor ratio €/kg ahorrado se obtiene.

Se han construido 3 unidades prototipo para diferentes fases de validación (EN 13749 [19] incluida) con las que se pretende validar todo lo visto en las fases de diseño y cálculo.

Resultado: casi 400 kg de reducción de peso sobre el bastidor de acero del AVRIL manteniendo todas las interfaces existentes (figura 13).

Además del proceso de fabricación, se ha trabajado conjuntamente para la definición de un proceso de chequeo de calidad e inspección de defectos internos y externos, que incluye tomografía (figura 14), ultrasonidos y comprobación dimensional.



Figura 13. Prototipo 1 del rodal ligero (posición invertida para montaje). Incluye toda la instrumentación de galgas extensométricas para ensayo estático.

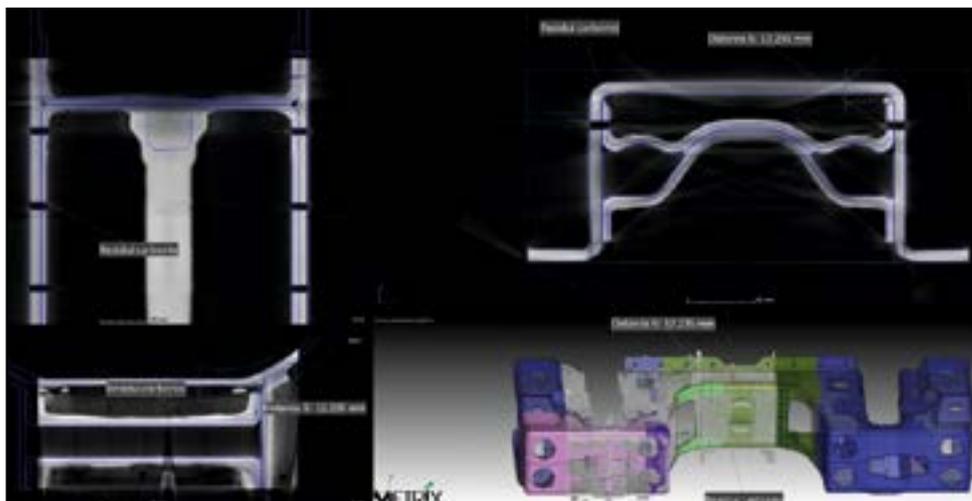


Figura 14. Tomografía del rodal.

2.4. Ensayos en banco

Con la primera unidad se ha realizado el ensayo estático en banco de acuerdo con las cargas definidas en la EN 13749 [19]. Además de los casos normativos se han realizado casos de correlación para ajustar el modelo de elementos finitos a nivel global. En el caso de la fibra es importante

tener una buena correlación con el modelo debido a que, aunque se colocan las galgas en los puntos críticos, el fallo no tiene por qué darse en la lámina exterior donde está colocada la galga, si no que puede darse en alguna lámina interior. Hay que correlacionar los resultados medidos directamente con los resultados en las láminas interiores o puntos críticos.

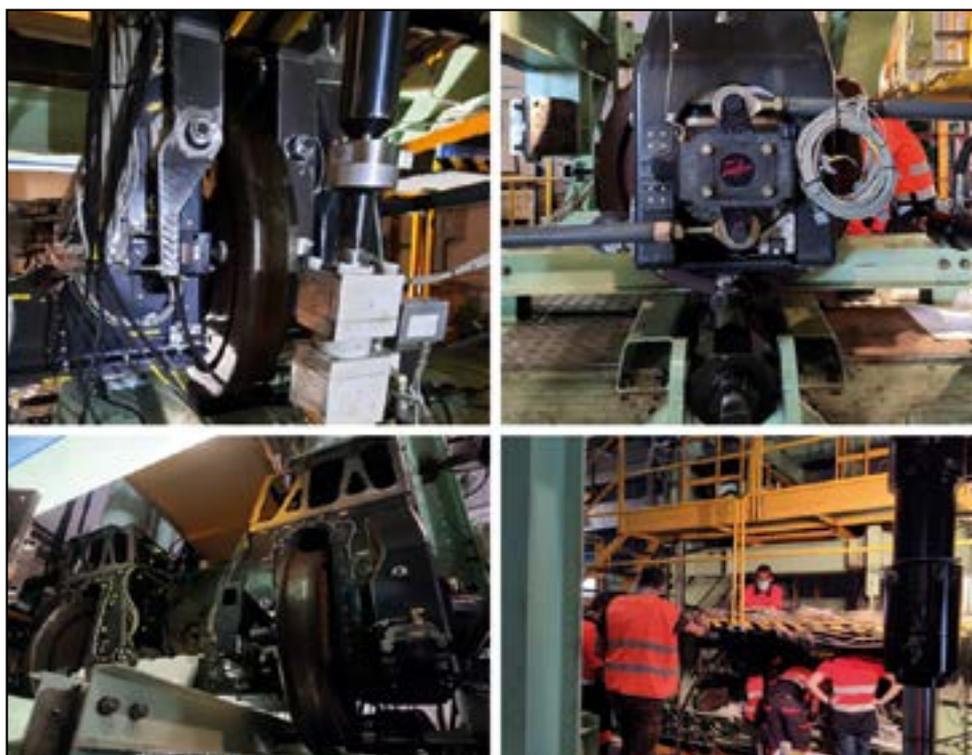


Figura 15. Ensayo en banco del rodal.

Los resultados del ensayo han sido favorables, no han aparecido daños visibles en el componente incluso habiendo llevado al componente a un 25 % más de carga que lo requerido en situación excepcional.

El ensayo de fatiga (10.000.000 de ciclos) está en marcha. Durante el ensayo, además de la monitorización con galgas extensométricas, se van a realizar inspecciones por ultrasonidos a los 0, 6.000.000, 8.000.000 ciclos y final de ensayo para evaluar posibles daños internos y progresión de los mismos.

Para la caja se procederá de manera similar una vez fabricada, ensayo en banco (figura 16) de acuerdo con la EN 12663-1 [20].

3. ESTANDARIZACIÓN Y NORMALIZACIÓN

Todos estos desarrollos, enmarcados dentro la iniciativa Shift2Rail, se acompañan del desarrollo de normativa a nivel europeo para inclusión de nuevos materiales en el sector. Esta falta de estandarización y normalización es una de las



Figura 16. Banco de ensayo de cajas.

principales barreras para la adopción de estas soluciones y una de las razones por las que pocos proyectos, mostrados en el apartado 2.1., se han visto en el mercado.

Actualmente, Talgo en representación de AENOR, participa en el grupo de trabajo CEN TC256/SC2/WG54 *Railway Applications - New Materials - Process Standard for the Introduction of New Materials*. Es el primer paso después de REFRESCO (<http://www.refresco-project.eu/>) y se quiere ir añadiendo información a todas las normas que se autolimitan a materiales metálicos, como las anteriormente mencionadas EN 13749 y EN 12663-1.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha conseguido bajar el peso de un bastidor de rodal cerca de 400 kg habiéndolo validado estáticamente en banco y con el ensayo de fatiga en marcha. Se ha diseñado una caja con una reducción de peso del 25 % (aprox. 1 t) con todas las ventajas que conlleva respecto al ahorro energético, mantenimiento en vía y capacidad de carga. La aplicación de materiales compuestos es la más rentable en términos de €/kg ahorrado. Para el diseño se han tenido en cuenta criterios estructurales y no estructurales, superando los requisitos de la EN 45545 [14] relativos a fuego, humo y toxicidad.

En cuanto a los trabajos futuros se está trabajando en ampliar las posibilidades en cuanto a procesos de fabricación cumpliendo los requisitos de fuego, pensando en procesos de mayor cadencia como infusión, RTM (*Resin Transfer Moulding*) y procesos fuera de autoclave. Además, se está trabajando en nuevos materiales reprocesables, reparables y reciclables, ligeros, resistentes con bajos LCC (*Life Cycle Cost*) y LCA (*Life Cycle Assessment*).

5. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto está dentro de la iniciativa Shift2Rail, específicamente parte del proyecto PIVOT y PIVOT2. Ha recibido financiación del programa Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud de los acuerdos de subvención 777629 y 881807.

6. REFERENCIAS

[1] Comisión Europea (2021). Año Europeo del Ferrocarril. https://europa.eu/year-of-rail/why-rail_en
 [2] UIC-IRRB (2015). A Global Vision for Railway Development. https://uic.org/IMG/pdf/global_vision_for_railway_development.pdf
 [3] UNIFE (2016). UNIFE Position Paper on Digitalisation of Railways. <https://www.unife.org/wp-content/uploads/2021/03/UNIFE-POSITION-PAPER-ON-DIGITALISATION-OF-RAILWAYS.pdf>

[4] García Álvarez, A., y González Franco, I. (2021). Dinámica de los trenes en alta velocidad. *Cinemática Ferroviaria*. https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/2021%2003%2008%20DinamicaTrenes%20y%20Cin%20_V15%20marzo%202021.pdf

[5] Network Rail (2017). Variable Usage Charge (VUC) guidance document. <https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/11/CP5-VUC-Guidance-document.pdf>

[6] De la Guerra, E. (2016). REFRESCO Project. Deliverable D9.2 Technical Recommendations Document.

[7] Ashby, M.F. (2004). *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

[8] Rimbaud, M., et al. (1997). *Bogie Frame* (Patente US5653177A).

[9] Devallez, A., y Guiot, J.L. (1992). *Bogie for a Railway Vehicle Comprising a Chassis Made of Composite Material* (Patente FR2669596A1).

[10] EUREKA (1997). EUREKA project EU-1841 EUROBOGIE. Advanced Rail Suspension Using Fibre-Reinforced Plastics, 1997-2003.

[11] Kawasaki ef-Wing (2015). https://global.kawasaki.com/en/corp/sustainability/green_products/efWING.html

[12] CRRC (2018). CETROVO's demo revealed by CRRC at the Inno Trans 2018 in Berlin. <https://www.youtube.com/watch?v=QNoQd9S0xGI>

[13] ELG Carbon Fibre-University of Huddersfield's Institute for Railway Research (2019). <https://www.hud.ac.uk/news/2019/december/carbon-fibre-rail-bogie-unveiled/>

[14] AENOR (2016). UNE-EN 45545-2:2013+A1:2016. Aplicaciones ferroviarias. Protección contra el fuego de vehículos ferroviarios. Parte 2: Requisitos para el comportamiento frente al fuego de los materiales y componentes.

[15] AENOR (2017). UNE-EN 50121-1:2017. Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Parte 1: Generalidades.

[16] AFNOR (2002). NF F07-101. Applications ferroviaires. Essai de choc par simulation de projection de ballast.

[17] AENOR (2011). UNE-EN 50215:2011. Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Ensayos del material rodante al término de su construcción y antes de su puesta en servicio.

[18] AENOR (2018). UNE-EN 50153:2014/A1:2018. Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Medidas de protección relativas a riesgos eléctricos.

[19] AENOR (2011). UNE-EN 13749:2011. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie (Ratificada por AENOR en junio de 2021).

[20] AENOR (2015). UNE-EN 12663-1:2011+A1:2015. Aplicaciones ferroviarias. Requisitos estructurales de las cajas de los vehículos ferroviarios. Parte 1: Locomotoras y material rodante de viajeros (y método alternativo para vagones de mercancías).

[21] Miravete, A., et al. (2007). *Materiales Compuestos*. Vol. I y II. Barcelona: Editorial Reverté.

[22] De la Guerra, E. (2018). PIVOT Project. D1.2 Demonstrators Specification: Main Characteristics and Requirements of Carbody and Components.

[23] ASTM International. ASTM D 3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

[24] ASTM International. ASTM D 6641, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture.

[25] ASTM International. ASTM D 2344, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates.

[26] ASTM International. ASTM D 7136, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event.

Actuaciones del Laboratorio de Geotecnia-CEDEX en Ingeniería Geotécnica Ferroviaria

Activities of the Laboratorio de Geotecnia-CEDEX Related to Railway Geotechnical Engineering

José Estaire^{1*}, Javier Moreno², Fernando Pardo de Santayana³, María Santana⁴

Resumen

El artículo describe la actividad realizada por el Laboratorio de Geotecnia (LG) en el campo de la Ingeniería Geotécnica Ferroviaria en los últimos 20 años. Esta actividad queda enmarcada en cuatro ámbitos de actuación: ensayos a escala 1:1 en el Cajón Ferroviario del CEDEX, instrumentación *in situ* de secciones ferroviarias, análisis numéricos de secciones ferroviarias y ensayos geotécnicos de laboratorio con materiales ferroviarios. Todas estas actividades generan un conocimiento sobre el comportamiento mecánico de los diferentes elementos que componen la infraestructura ferroviaria que se plasma en diferentes documentos normativos que se han actualizado recientemente.

Palabras clave: Geotecnia Ferroviaria, auscultación, ensayos escala 1:1, modelización numérica.

Abstract

This paper describes the activity carried out by CEDEX's Laboratorio de Geotecnia (LG) in the field of Railway Geotechnical Engineering over the last 20 years. This activity is framed within four areas of action: 1: 1 scale tests at CEDEX Track Box, on-site instrumentation of railway sections, numerical analysis of railway sections, and geotechnical laboratory tests with railway materials. All these activities generate knowledge about the mechanical behavior of the different elements used in the construction of railway infrastructure, which is reflected in different normative documents that have been recently updated.

Keywords: Geotechnical Railway Engineering, instrumentation, 1:1 scale models, numerical analysis.

1. INTRODUCCIÓN: LA GEOTECNIA FERROVIARIA

La Geotecnia Ferroviaria podría ser definida como la rama de la Ingeniería Geotécnica que se ocupa de las características geotécnicas de los materiales que componen la infraestructura de las líneas de ferrocarril. A este respecto, en la figura 1 se muestra la sección transversal esquemática de una línea férrea, tal como se recoge en la “Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto” (2015) y en el documento normativo IRS 70719 (UIC, 2020), compuesta por los siguientes elementos, listados de arriba a abajo:

- Componentes de vía: incluye los carriles, el sistema de sujeción, las suelas bajo carril y las traviesas.
- Capa de balasto, constituida por rocas machacadas de gran resistencia al desgaste, con granulometría uniforme y tamaños que oscilan aproximadamente entre 20 y 60 mm, provenientes de canteras seleccionadas.

- Capa de sub-base, constituida por una capa de sub-balasto que puede complementarse con una capa de protección contra la helada y una capa de filtro. La capa de sub-balasto puede estar formada por material bituminoso o material granular, constituido por grava arenosa de granulometría continua, compactada al 100 % del PM, no deformable al paso de maquinaria de obra y de baja permeabilidad, con el fin de proteger a la plataforma del agua de lluvia.
- Capa de forma de la plataforma: es la capa superior de remate y coronación de la superficie del terraplén o excavación. Su función principal es mejorar la capacidad portante de la plataforma por lo que debe tener mejores características que las de la explanada (detallada posteriormente).
- Terraplén (en caso de que exista).
- Terreno natural subyacente en el que se apoya el terraplén o que forma el desmonte.

Hay que destacar que la explanada ferroviaria, situada bajo la capa de forma, es la cara superior del terreno natural (en secciones en desmonte) o de la capa de coronación del terraplén (en secciones en relleno), mientras que la plataforma ferroviaria es la cara superior de la capa de forma.

La investigación experimental en Geotecnia Ferroviaria comienza normalmente con la realización de ensayos simples y normalizados en laboratorio sobre los elementos individuales que componen la sección transversal, que se

* Autor de contacto: Jose.Estaire@cedex.es

¹ Doctor ingeniero de caminos. Jefe de Área de Infraestructuras Tecnológica, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

² Doctor ingeniero de caminos. Jefe de Área de Auscultación y Ensayos de Campo, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

³ Doctor ingeniero de caminos. Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

⁴ Geóloga. Coordinadora Técnica. Área de Infraestructuras Tecnológica, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

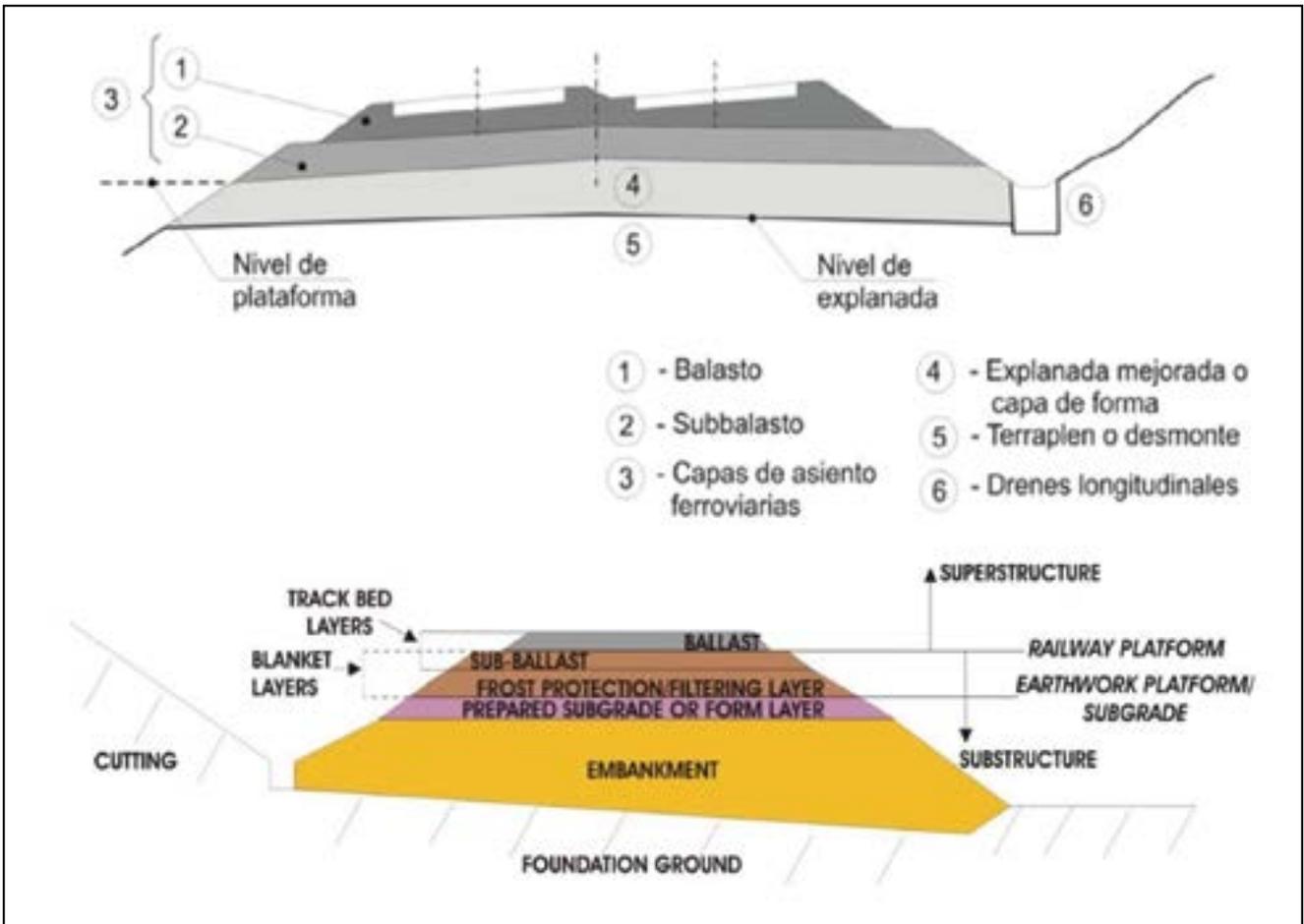


Figura 1. Sección transversal esquemática de una línea férrea en terraplén y desmonte.

pueden complementar con modelos numéricos que reproduzcan el comportamiento real. El último paso suele ser llevar a cabo ensayos en una vía de ferrocarril en construcción o en servicio, con tráfico real, para analizar de forma conjunta todos los elementos, mediante la instalación de instrumentación *in situ*. Sin embargo, para llenar el espacio

experimental entre los ensayos de laboratorio sencillos y las pruebas reales con mediciones en la propia vía, el CEDEX diseñó, construyó y puso en servicio en 2004 el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC).

Estos cuatro campos de actuación en la Ingeniería Geotécnica Ferroviaria, mostrados en la figura 2, son cubiertos

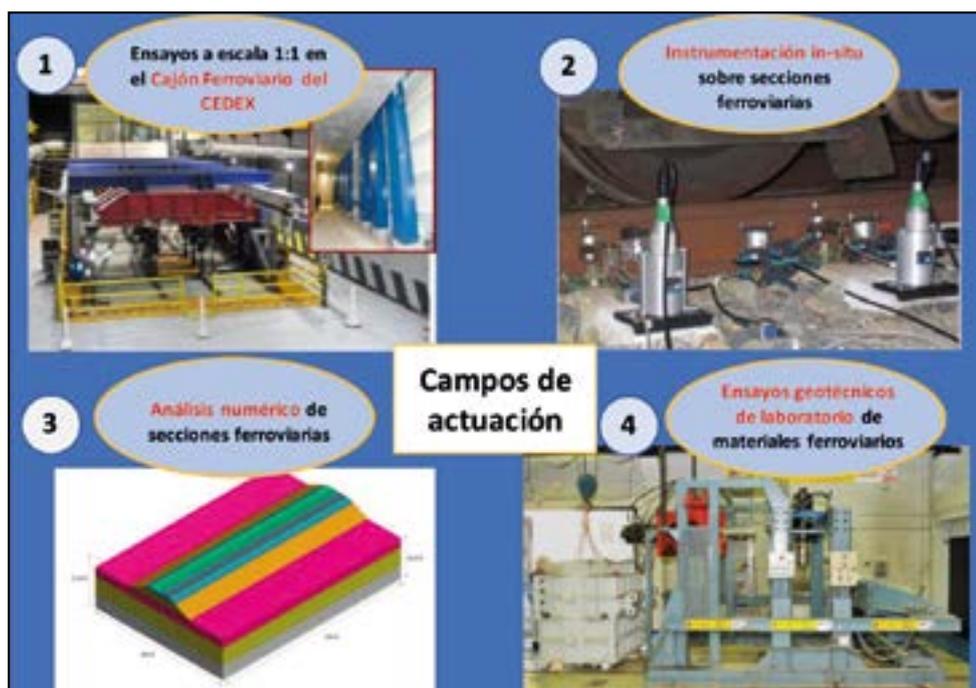


Figura 2. Campos de actuación del LG en Ingeniería Geotécnica Ferroviaria.

por las actividades que lleva a cabo el LG desde comienzos del siglo XXI.

2. CAJÓN FERROVIARIO DEL CEDEX (CFC)

Para llenar el espacio experimental entre los ensayos de laboratorio sencillos y las pruebas reales con mediciones en la propia vía, el CEDEX diseñó, construyó y puso en servicio en 2004 el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC), como parte del proyecto de I+D+i *Supertrack* (“Sustained Performance of Railway Tracks”, 2001-2005) financiado por el 5º Programa Marco de la Unión Europea (Manzanas *et al.*, 2007).

Desde entonces, en esta instalación se han realizado numerosos ensayos para los siguientes proyectos I+D+i, financiados también por la Unión Europea: Innotrack (2005-09), Rivas (2009-13) y Capacity for Rail (2013-17) (Cuéllar, 2016). Actualmente se está desarrollando el proyecto GEOLAB (2021-2024), dentro del marco H2020, bajo el programa “Integrating and Opening Research Infrastructures of European Interest”. El principal objetivo del proyecto GEOLAB es permitir que empresas europeas puedan realizar ensayos, pagados por la Unión Europea, en las grandes instalaciones de ensayo que integran el consorcio del proyecto, entre los que se encuentra el CFC.

2.1. Descripción de la instalación de ensayos

El CFC es una instalación de 21 m de longitud, 5 m de anchura y 4 m de profundidad, cuyo principal objetivo es ensayar, a escala 1:1, secciones completas de vías férreas convencionales y de alta velocidad, sometidas al paso de trenes tanto de pasajeros como de mercancías, con velocidades de hasta 420 km/h. En la figura 3 se muestra una vista general de la instalación.



Figura 3. Vista general de la instalación.

La principal ventaja de su utilización radica en el hecho de que, en tan sólo una semana de trabajo en la instalación, se puede determinar el efecto que tiene el tráfico de trenes en una sección de vía real, a lo largo de un año.

La simulación del efecto de la aproximación, paso y alejamiento de los trenes en la sección de ensayo, como ocurre en secciones reales de vía, se consigue mediante la aplicación de cargas, adecuadamente desfasadas en función de la velocidad del tren que se quiera simular. Las cargas se generan con tres pares de actuadores servohidráulicos alimentados por un sistema hidráulico, activado por tres motores con una potencia de 350 CV cada uno para generar un caudal de 1800 l/min a una presión de 210 bares. Cada uno de los actuadores puede aplicar una carga máxima de 250 kN, con frecuencias asociadas de hasta 50 Hz. Estos actuadores están situados separados 1,5 m en dirección longitudinal, en cada uno de los carriles, como se observa en la figura 4.

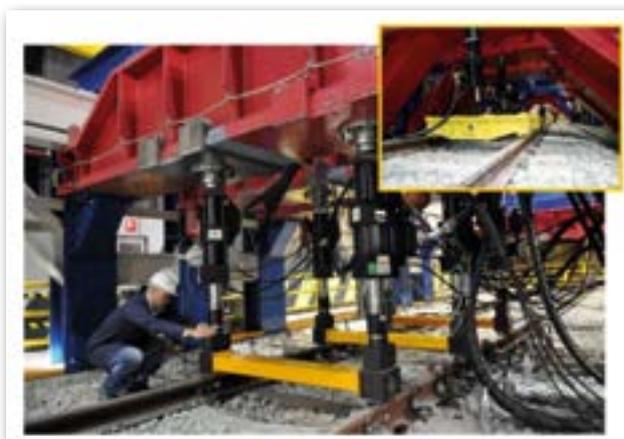


Figura 4. Sistema de cargas compuesto por tres pares de actuadores hidráulicos.

La respuesta mecánica de la sección de vía férrea ensayada se obtiene mediante medidas de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y presiones, realizadas con un gran número de transductores de desplazamiento variable lineal (LVDT), geófonos, acelerómetros y células de presión instaladas tanto en el terraplén como en las capas de la sección ferroviaria (balasto, sub-balasto y capa de forma). En la figura 5 se muestra un esquema de la sección del CFC, que reproduce fielmente la sección transversal de una vía férrea, con la posición de los sensores usados en uno de los ensayos.

Por otra parte, la respuesta de la superestructura ferroviaria se mide con transductores mecánicos de desplazamiento, sensores láser, geófonos y acelerómetros colocados en los diferentes componentes de vía (carriles, suelas bajo carril y traviesas), como puede verse en la figura 6. El sistema de adquisición de datos puede recibir información de 150 sensores de forma simultánea.

Con objeto de reproducir en los modelos de ensayo, lo más fielmente posible, la construcción de las líneas férreas, el CFC cuenta con una bateadora de pequeñas dimensiones, como la que se muestra en la figura 7 que se utiliza en aquellos casos en los que se quieren reproducir tareas de mantenimiento que requieran el bateado de la vía.

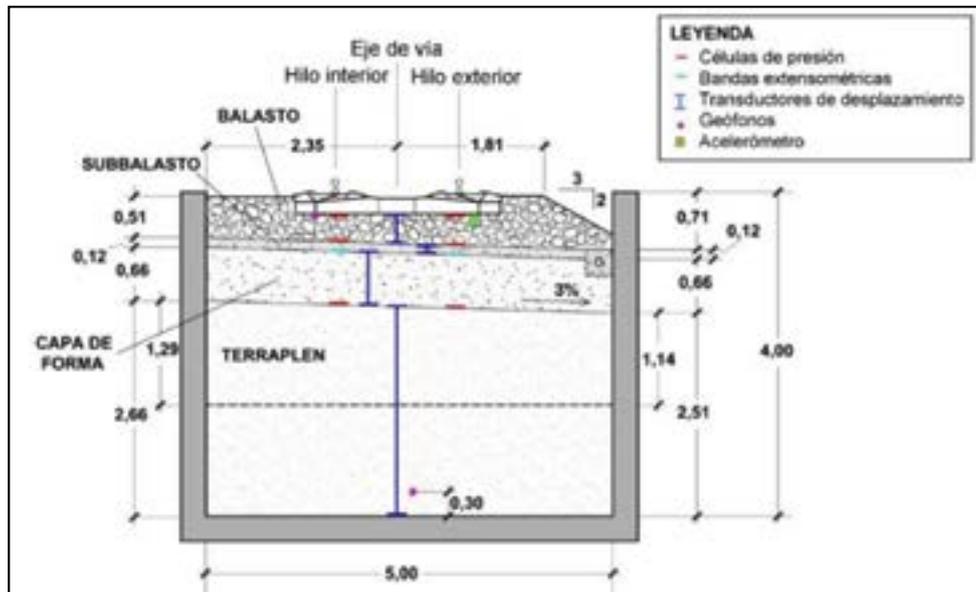


Figura 5. Sección del CFC con parte de los sensores internos colocados en uno de los ensayos.



Figura 6. Instrumentación superficial colocada en uno de los ensayos.



Figura 7. Máquina de bateo adaptada para su uso en el CFC.

2.2. Características de los modelos a ensayar y tipología de ensayos a realizar

Los modelos a escala 1:1 que pueden construirse en el CFC pueden presentar las siguientes características:

- Ensayos sobre secciones de vía en balasto o de vía en placa.
- Ensayos sobre secciones en tramo recto o en curva.
- Ensayos de zonas de transición.
- Ensayos con diferentes tipos y espesores de balasto, sub-balasto (granular o bituminoso), capa de forma o terraplén.
- Ensayos con traviesas estándar, polivalentes o mixtas.
- Ensayos con nuevos materiales: traviesas con suela bajo traviesa (USP), mantas bajo balasto, balasto artificial, sub-balasto bituminoso, sub-balasto ligero, terraplén realizado con suelos reforzados con geotextiles o con suelos tratados con cal o cemento.

Por otra parte, los ensayos a realizar en el CFC pueden realizarse bajo las siguientes condiciones o para alcanzar determinados objetivos:

- Ensayos con trenes de pasajeros, de mercancías o con tráfico mixto.
- Ensayos con cargas estáticas para determinar la rigidez de vía.
- Ensayos con cargas cuasi-estáticas para simular el paso de trenes a velocidades hasta 420 km/h, con los que se puede determinar el comportamiento resistente y deformacional de los elementos de la sección ferroviaria.
- Ensayos con cargas dinámicas para simular el efecto inducido por las irregularidades de la vía.
- Ensayos para determinar el comportamiento de fatiga de cualquier elemento de la sección de línea férrea (normalmente, del sistema de fijación, del balasto o del sub-balasto) mediante la simulación del paso de millones de ejes de trenes.
- Ensayos para reproducir el efecto de las operaciones de bateo en la degradación del balasto, con el equipo que se muestra en la figura 7.
- Ensayos para determinar la propagación de vibraciones por efecto del paso de trenes a diferentes velocidades.
- Ensayos para determinar la resistencia longitudinal y lateral de la vía.

El resultado de los ensayos puede emplearse para:

- Analizar el comportamiento mecánico, a corto y largo plazo, de cualquiera de los elementos que constituyen la sección ferroviaria o de ésta de forma conjunta, una vez sometida a cualquier tipo de tráfico.
- Calibrar modelos numéricos 3D que puedan ser usados en otro tipo de estudios o para validar el resultado de los ensayos.

2.3. Ensayos con cargas estáticas

2.3.1. Determinación de la rigidez vertical de la vía

La determinación de la rigidez vertical de la vía (K), en cualquier situación de vía, se hace imponiendo cargas estáticas mediante los actuadores servohidráulicos, mostrados en la figura 4. La rigidez vertical de vía (K) se define como la razón entre la carga vertical aplicada (Q) y la deflexión vertical de carril (δ) medida en el mismo punto de aplicación de la carga.

La figura 8 muestra las deflexiones de carril medidas a lo largo del tiempo del ensayo y en función de la carga aplicada. Se puede ver que las curvas de deflexión son claramente no-lineales, por lo que la rigidez vertical de la vía siempre debe referirse a la carga utilizada en el ensayo (Estaire et. al, 2018).

En la figura 9 se pueden ver las deflexiones máximas de carril obtenidas en diferentes puntos del carril durante tres ensayos estáticos en los que se impusieron las cargas con los tres actuadores, actuando de forma independiente.

El buen ajuste entre las medidas y la teoría, visto en la figura 11 y en un gran número de otros ensayos estáticos realizados en el CFC, demuestra que las deflexiones del carril debido a una sola carga vertical pueden predecirse con alta precisión suponiendo que la vía del carril tiene un comportamiento de tipo *Winkler*, representado mediante la ecuación [1].

$$\delta(x, t) = \frac{Q}{K} e^{-\frac{|x-vt|}{L}} \left(\cos\left(\frac{|x-vt|}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x-vt|}{L}\right) \right) \quad [1]$$

Además, en los ensayos estáticos realizados, se ha podido determinar la contribución de cada capa de vía a la deflexión total del carril con la ayuda de algunos transductores de desplazamiento colocados en las interfaces de dichas capas, como se refleja en la tabla 1.

Los modelos físicos 1 a 4, indicados en la tabla 1, sólo se diferencian en la capa de sub-balasto, como se indica en la propia tabla, mientras que los otros elementos son comunes: suela bajo carril de 100 kN/mm de rigidez, capa de balasto de 35 cm de espesor, capa de forma de 60 cm de espesor y terraplén de 2,5 m de espesor.

Cabe destacar la consolidación de vía observada tras el paso de 4 millones de ejes de trenes de pasajeros, con una

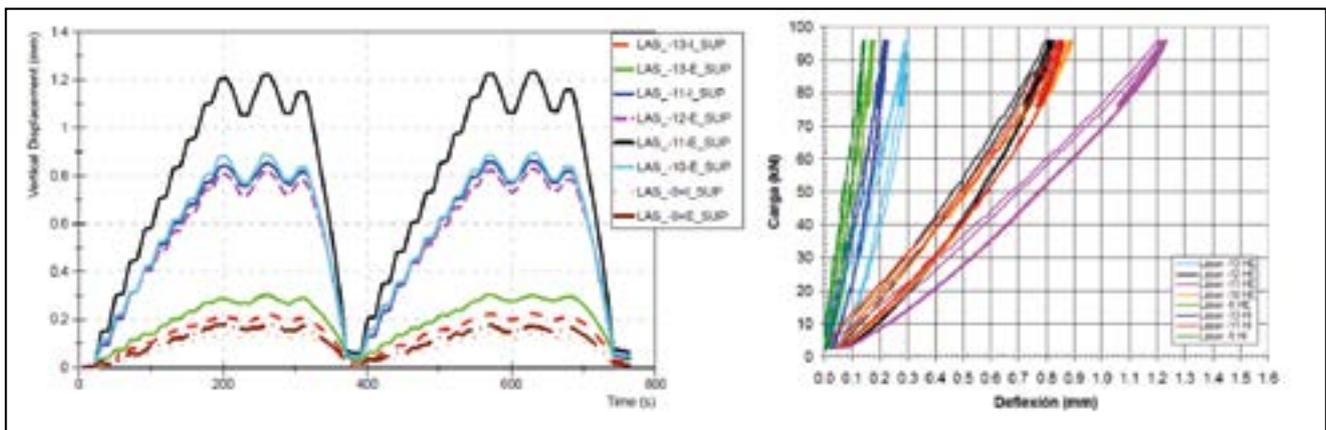


Figura 8. Curva tiempo-desplazamiento y carga-desplazamiento.

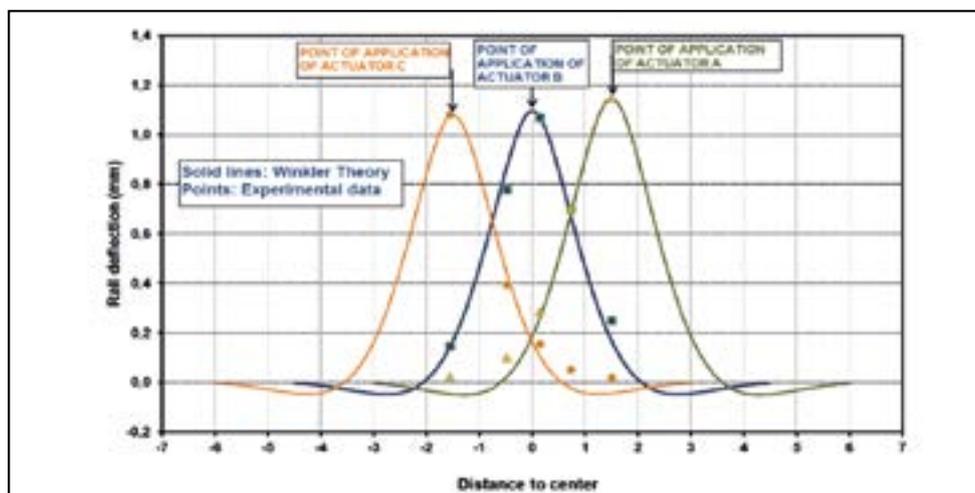


Figura 9. Deflexión del carril en diferentes puntos durante una serie de ensayos estáticos.

Tabla 1. Resumen de resultados de los ensayos estáticos realizados

Características de los trenes	Tipo	Pasajeros				Mercancías	
	Velocidad (km/h)	300				120	
	Carga (kN/eje)	165				220 - 250	
Modelo físico de ensayo ⁽¹⁾		1	2	3	4	2	3
Rigidez vertical de vía K (kN/mm)		100	120	125	118	130	140
Contribución a la deflexión total de carril (%)	Suela bajo carril	25	35	32	34	40	39
	Balasto	45	43	45	41	38	43
	Sub-balasto	15	2	3	4	2	3
	Capa de forma	15	7	20	21	5	15
	Terraplén		13			15	

⁽¹⁾ Capa de sub-balasto en los modelos físicos:

Modelo 1: 30 cm de material granular; Modelo 2: 8 cm de material bituminoso

Modelo 3: 12 cm de material granular; Modelo 4: 16 cm de material bituminoso

carga por eje de 165 kN, a 300 km/h, gracias al aumento de la rigidez de vía, en los modelos físicos 2 (de 120 a 130 kN/mm) y 3 (de 125 a 140 kN/mm).

2.3.2. Determinación de la resistencia lateral de la vía

El estudio de la resistencia lateral de la vía también se puede realizar en el CFC con la ayuda de una herramienta especial, que se muestra en la figura 10, que mueve horizontalmente la traviesa, previamente liberada de las sujeciones de los carriles, mientras se registra su movimiento horizontal (Estaire *et al.*, 2017).

El equipo de medición instalado generalmente consiste en una célula de carga, dos sistemas láser (para medir el movimiento horizontal de la traviesa) y dos potenciómetros (para controlar el desplazamiento relativo entre la traviesa y el carril), como puede verse en la figura 11.

Se han realizado dos ensayos de resistencia lateral de vía diferentes: en uno de ellos la traviesa descansaba sobre una capa de balasto limpio mientras que en el otro, la capa de balasto estaba completamente contaminada con arena seca del desierto.

Los resultados del ensayo mostraron una carga horizontal de pico de 12,5 y 16 kN en los ensayos realizados con balasto limpio y con balasto contaminado, respectivamente, como se muestra en la figura 12. En ambos ensayos, la carga máxima se alcanzó cuando el desplazamiento horizontal de la traviesa fue aproximadamente 1,5 mm.

Los resultados obtenidos en estos ensayos muestran formas y resultados similares a los de los ensayos denominados STPT (*Single Tie Push Test*), realizados en vías reales en condiciones similares (Samavedam *et al.*, 1999).

Los ensayos de resistencia lateral de vía se modelizaron numéricamente teniendo en cuenta los siguientes tres mecanismos: el rozamiento en la base de la traviesa con el balasto, el rozamiento en las caras laterales de la traviesa con el balasto y las resistencias pasivas y activas del balasto en los hombros de la traviesa, tal como se indica en Kish (2011).

Los resultados de dicha modelización han permitido obtener las siguientes conclusiones:

- Los principales factores contribuyentes de la resistencia lateral son el rozamiento en la base y el empuje pasivo en el hombro frontal de la traviesa, cuyas



Figura 10. Fotografía del equipo para la realización de los ensayos de resistencia lateral de vía.

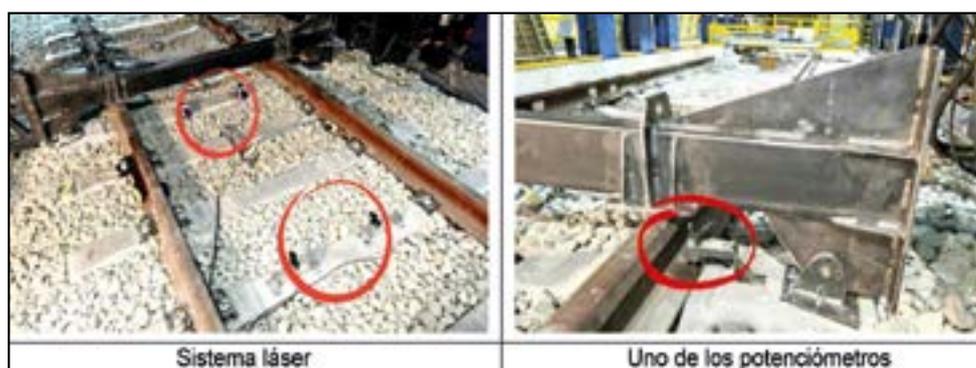


Figura 11. Vista de los elementos del sistema de medición, una vez instalados en la vía de ensayo.

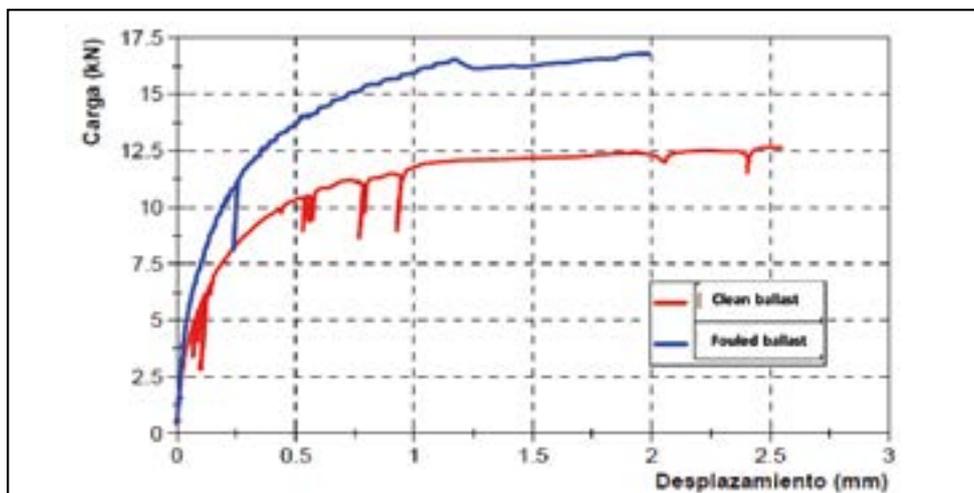


Figura 12. Resultado del ensayo realizado con la traviesa sobre balasto limpio.

contribuciones son entre 65 y 80 % y entre 15 y 30 %, respectivamente, siendo el restante 5 % debido al rozamiento lateral y al empuje activo en el hombro dorsal de la traviesa.

- Los ángulos de rozamiento del balasto utilizados en la modelización numérica están comprendidos entre 66,5° y 73,5°, que pueden considerarse bastante elevados, aunque concuerdan muy bien con los resultados de los ensayos de corte directo de grandes dimensiones realizados en el CEDEX con balasto en diferentes condiciones (Estaire y Santana, 2018).

2.4. Ensayos con cargas cuasi-estáticas

2.4.1. Determinación del asiento permanente de la capa de balasto

Desde que se inauguró la instalación, se han realizado 26 ensayos de fatiga de balasto en el CFC en las siguientes condiciones de ensayo:

- Se utilizaron dos tipos de trenes: trenes de pasajeros (con velocidades entre 300 y 320 km/h y cargas por eje principalmente entre 170 y 190 kN) y trenes de mercancías (con velocidad de 120 km/h y cargas por eje en el rango entre 225 y 250 kN).

- Se simularon dos tipos diferentes de capa de sub-balasto: granular con un espesor de 20 y 30 cm y bituminoso con un espesor de entre 8 y 16 cm.
- Se usaron dos tipos diferentes de sistemas de vía: Tipo A) traviesas GIF AI-99 con un peso de 3,44 kN y suelas bajo carril con una rigidez de 100 kN/mm y Tipo B) traviesas B90.2 con un peso de 6,10 kN, equipadas con suelas bajo traviesas (USP), con 0,1 N/mm³ de módulo de rigidez estática y suelas bajo carril con una rigidez de 450 kN/mm.
- Se ensayaron dos situaciones diferentes en la capa de balasto: limpia y contaminada con arena del desierto en diferentes proporciones entre 0 y 100 %.
- Los elementos de la sección ferroviaria indicados anteriormente hicieron que la vía tuviera diferentes valores de rigidez vertical (K) entre 65 y 125 kN/mm.
- En todos los ensayos, el espesor de la capa de balasto fue de 35 cm, medido bajo la traviesa del carril interno, formada por partículas de andesita.
- En todos los ensayos, se aplicaron, al menos, un millón de ejes.

En estos ensayos, se obtuvieron las curvas de asiento permanente correspondientes a las capas de balasto, sub-balasto y capa de forma. El conjunto de curvas

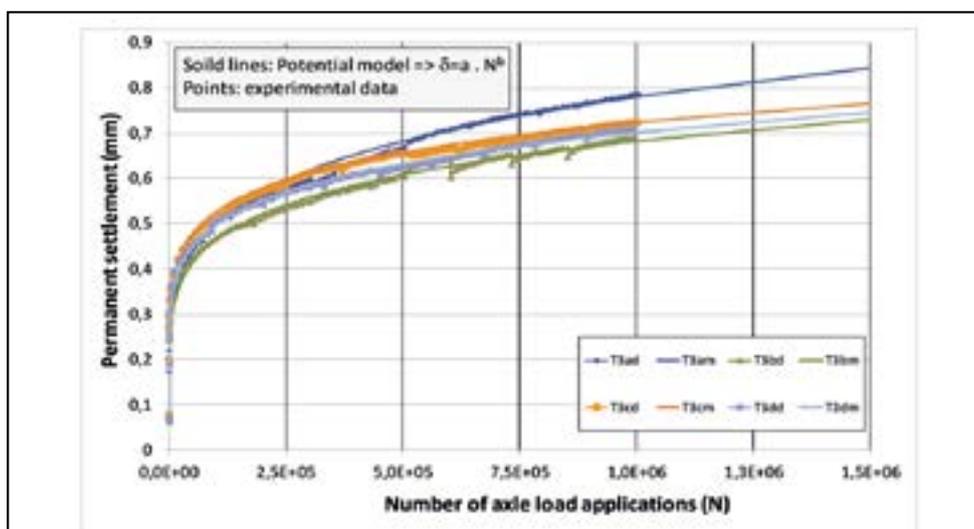


Figura 13. Algunas curvas de asentamiento de balasto y su modelado.

de asiento permanente obtenidas para la capa de balasto, como las que se muestran en la figura 13, se analizó para discriminar los principales factores que tienen influencia en el asiento de la vía y para obtener una expresión matemática que ajustara los resultados (Estaire *et al.*, 2021).

Los principales aspectos que se pueden destacar del análisis de las curvas experimentales y su modelización numérica son:

- Los valores del asiento permanente obtenidos en los ensayos son, en promedio, alrededor de 1 mm en la capa de balasto, 0,03 mm en la capa de sub-balasto bituminoso y 0,02 mm en la capa de forma, una vez aplicados 1 millón de ejes de carga, independientemente de la velocidad de los trenes y de las cargas por eje aplicadas.
- Las curvas de asiento del balasto se modelizaron utilizando una expresión potencial ($\delta = a \cdot N^b$), en la que “a” representa el asiento en el primer ciclo de carga y “b” la tasa de crecimiento del asiento con el número de ejes aplicados. Desde un punto de vista conceptual, el parámetro “a” se puede relacionar con la carga por eje y el parámetro “b” con la velocidad del tren.
- Se obtuvo un buen ajuste de las curvas de ensayo que confirmó la validez de la expresión potencial utilizada en la modelización.
- El resumen del análisis realizado conduce a la siguiente expresión de la ley de asiento permanente de balasto, en función de la carga por eje (Q), de la rigidez de vía (K) y del número de aplicaciones de carga (N), válida para cargas por eje entre 110 y 250 kN y para trenes circulando hasta 320 km/h:

$$\delta [mm] = \frac{Q [kN]}{25 K [kN/mm]} N^{0.165} \quad [2]$$

2.4.2. Comportamiento dinámico de los diferentes elementos de la sección de ferrocarril

Durante los ensayos de fatiga descritos anteriormente, se pudo determinar el comportamiento dinámico de los elementos de la vía. Por un lado, se ha demostrado que la rigidez de vía obtenida en los ensayos cuasi-estáticos coincide prácticamente con los valores recogidos en la tabla 1, mostrada anteriormente, siendo las diferencias encontradas en todos los casos de alrededor de 2-4 %. Por otro lado, la instalación de geófonos y acelerómetros permitió medir velocidades y aceleraciones en diferentes elementos de la vía, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Velocidad y aceleración de pico obtenidos en los ensayos de fatiga

	Velocidad de pico (mm/s)		Aceleración de pico (g)	
	Pasajeros	Mercancías	Pasajeros	Mercancías
Tren ⁽¹⁾				
Carril	40–45	15–20	1–1.5	0.5–0.8
Traviesa	20–30	10–15	0.5–1	0.15–0.3
Balasto	15–20	7–10	< 0.5	< 0.15

⁽¹⁾ Pasajeros: 300 km/h; 165 kN/eje; Mercancías: 120 km/h; 225–250 kN/eje.

Estos valores deben ser considerados como valores de referencia para vías férreas en buenas condiciones mecánicas, por lo que se pueden utilizar para determinar la necesidad de realizar trabajos de mantenimiento o reparación en aquellos casos en los que los valores medidos presenten diferencias apreciables.

2.4.3. Determinación de las deflexiones de carril para diferentes velocidades

Se han realizado ensayos en el CFC simulando el paso de trenes a diferentes velocidades (50-100-150-200-250-300-350-400 km/h), mediante los actuadores servohidráulicos, para analizar el efecto de la velocidad en la respuesta global de la vía. Para ello, se simuló un tren Alstom tipo S-100 (un tren con 13 bogies y casi 200 m de longitud), suponiendo una carga constante por rueda de 79,5 kN en lugar de las cargas reales, que se encuentran en el rango entre 68 y 85 kN, para facilitar la interpretación de los resultados.

Algunos de los resultados de los ensayos realizados con diferentes velocidades, en términos de deflexiones de carril, se muestran en la figura 14. Los resultados medidos de aceleración en traviesas y carril se recogen en Estaire *et al.* (2018).

El análisis de los resultados mostrados anteriormente permite destacar los siguientes aspectos de los ensayos:

- Los ensayos se pueden dividir en tres grupos según la deflexión del carril obtenida, como puede verse en la figura 15 (izda):
 - Velocidades inferiores a 100 km/h: deflexión del carril inferior a 1 mm.
 - Velocidades entre 150 y 300 km/h: deflexión del carril ligeramente superior a 1 mm.
 - Velocidades superiores a 300 km/h: la deflexión del carril aumenta de forma constante hasta 1,15 mm.
- El aumento de la deflexión del carril es de 0,93 a 1,15 mm cuando la velocidad del tren pasa de 0 a 400 km/h. Eso supone un incremento del 25 %, aunque apenas suponga un incremento de 0,2 mm.
- Las deflexiones de carril obtenidas para velocidades superiores a 300 km/h pueden considerarse bastante constantes, mientras que para 350 y 400 km/h las deflexiones de carril máximas son más irregulares y oscilan mucho más que las obtenidas para velocidades menores.
- También se puede observar que la oscilación libre del carril tras el paso del bogie aumenta significativamente con la velocidad.
- Los resultados se pueden utilizar para deducir la velocidad crítica del modelo a escala 1:1 construido en CFC, con la ayuda del gráfico de la figura 15 (dcha) que relaciona el aumento de las deflexiones del carril con el aumento de la velocidad del tren (Estaire y Crespo-Chacón, 2018). Las curvas de dicha figura, para diferentes relaciones de amortiguamiento, aparecen como la solución de la ecuación diferencial cuya solución proporciona la deflexión vertical de una viga infinita sobre una base elástica cuando una carga se mueve sobre ella (Frýba, 1999).

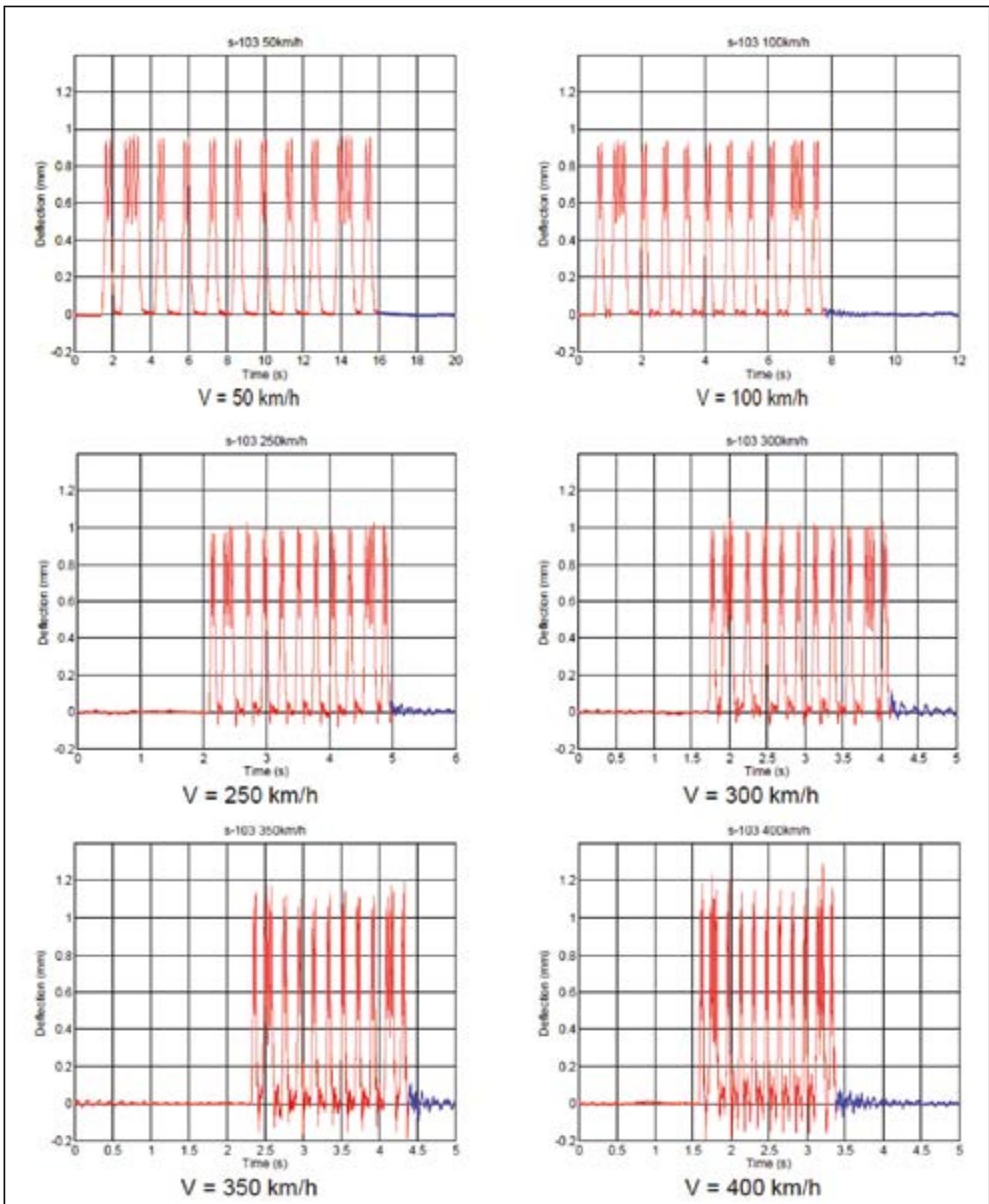


Figura 14. Curvas de deflexión de carril obtenidas para diferentes velocidades de tren en ensayos realizados en el CFC.

- El mejor ajuste de los resultados se obtiene, en este caso, para una velocidad crítica de 640 km/h, valor que se puede considerar suficientemente preciso para una vía de alta velocidad ferroviaria de buenas características.

El concepto de velocidad crítica y sus métodos de determinación han sido objeto de múltiples estudios en los últimos años en el LG, destacándose por su novedad el método basado en el Análisis Espectral de las Ondas Superficiales (Kausel *et al.*, 2020).

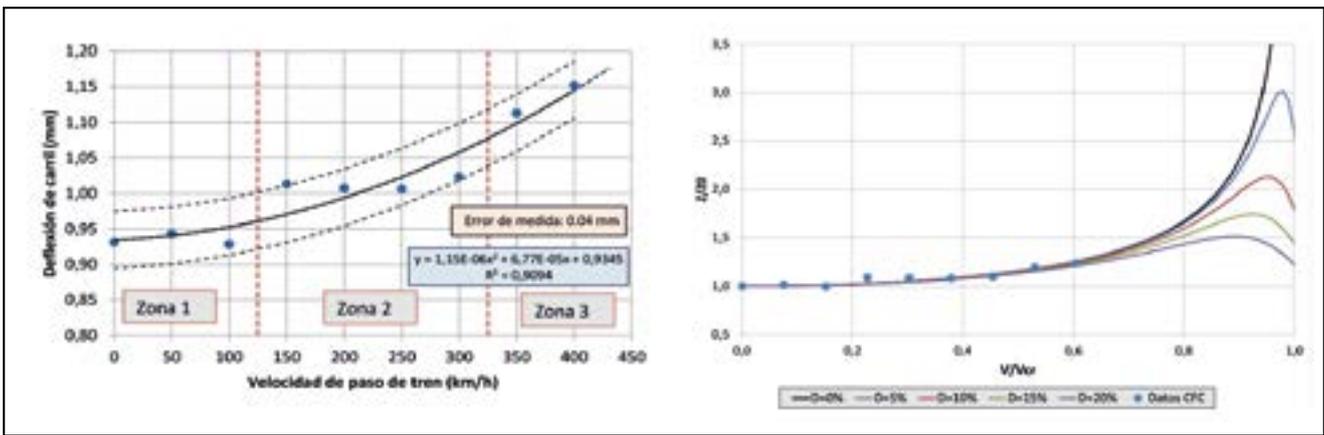


Figura 15. Análisis de los desplazamientos obtenidos para diferentes velocidades del tren para deducir la velocidad crítica del modelo a escala 1: 1 construido en CFC.

3. INSTRUMENTACIÓN DE VÍAS FERROVIARIAS

3.1. Introducción

La actividad llevada a cabo en el ámbito de la infraestructura ferroviaria ha dado lugar a la puesta a punto de una serie de equipos y técnicas de instrumentación y modelización numérica muy diferentes a los utilizados por el LG en el ámbito de las carreteras.

Pueden destacarse los siguientes objetivos básicos de estos trabajos:

- Mejora en el conocimiento del comportamiento de las secciones utilizadas por ADIF.
- Obtención de información destinada a optimizar el diseño, cálculo y mantenimiento de la infraestructura.
- Toma de datos *in situ* para el contraste de los trabajos llevados a cabo en el CFC.
- Calibración de modelos numéricos.
- Evaluación de la colaboración de las distintas capas en la rigidez global de la vía.
- Análisis de patologías y comportamiento de transiciones y secciones singulares.

Las líneas de actividad principales han sido las siguientes:

- Instrumentación general. Datos para calibrado del CFC en secciones con instrumentación superficial y profunda dispuesta en fase de obra.
- Estudio de transiciones terraplén - estructura.
- Estudio de transiciones vía en placa - vía sobre balasto.
- Estudio y contraste del comportamiento de secciones con sub-balasto granular y con sub-balasto bituminoso.
- Estudio de secciones con espesores importantes de balasto.
- Patologías de sujeciones en vía en placa.
- Estudio de la utilización de instrumentación con fibra óptica en líneas de alta velocidad.
- Detección de la evolución de cavidades en túneles en materiales salinos.
- Análisis de diferentes técnicas para el control del grado de compactación del sub-balasto granular.

Con el objetivo de describir las técnicas empleadas, se describen los trabajos realizados en el tramo Fuencaerral-Canto Blanco, de la línea de alta velocidad Madrid-Segovia-Valladolid, descritos en el trabajo de García de la Oliva y Moreno (2019). En la figura 16 se muestran los tramos de líneas de alta velocidad en los que el CEDEX ha trabajado en los últimos años.



Figura 16. Secciones de LAV instrumentadas por el CEDEX.

3.2. Instrumentación de una sección ferroviaria desde la fase de construcción

La instrumentación de una sección ferroviaria se puede dividir en instrumentación interna y externa.

La instrumentación interna incluye los sensores colocados en las distintas partes del terraplén y en las capas de forma, sub-balasto y balasto que se suelen instalar de forma simultánea a la ejecución de la sección. Generalmente se han usado los siguientes equipos (figura 17):

- Micrómetros deslizantes.
- Transductores de desplazamiento con sensor LVDT para medir las deformaciones de las distintas capas.
- Células de presión para definir la transmisión de tensiones en profundidad.

Como instrumentación externa se han empleado los siguientes sensores (figura 18):

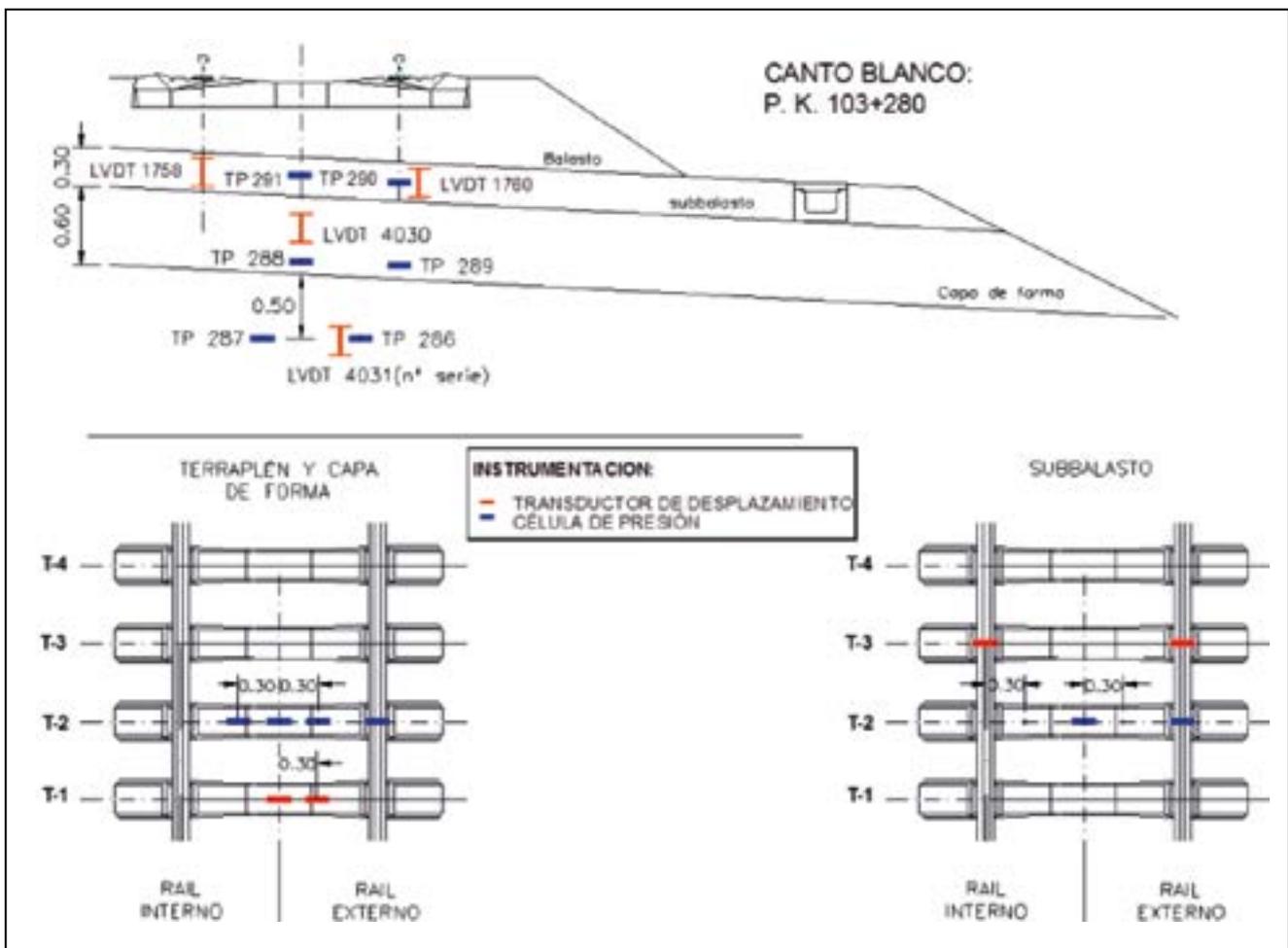


Figura 17. Instrumentación dispuesta en coronación de terraplén y subestructura.

- Bandas extensométricas a puente completo colocadas en el alma del carril para definir las cargas transmitidas por las ruedas y las reacciones sobre las traviesas. Estos sensores se han utilizado asimismo para determinar las velocidades de los trenes registrados.
- Geófonos de 2 Hz y láser para las medidas de desplazamiento absoluto de carril.
- Geófonos de 1 Hz para medidas del desplazamiento de las traviesas.
- Potenciómetros de medida de desplazamiento relativo entre traviesa y patín de carril.
- Acelerómetros para medir la aceleración de los movimientos de carril y traviesa, fundamentalmente.

3.3. Determinación de movimientos postconstructivos

La cuantificación de los asientos postconstructivos de la plataforma se realiza mediante el micrómetro deslizante vertical que se suele instalar una vez que el terraplén alcanza la cota de capa de forma.

En el caso que se enseña, en los primeros cinco años después de la entrada en servicio, el asiento sufrido por la plataforma fue de 9,5 mm, y según se aprecia en la figura 19, la mayor parte del asiento se desarrolló por deformaciones del material entre 5 y 14 m bajo la cota del sub-balasto (la mitad inferior del terraplén y la zona más superficial del cimentado). El asiento citado (9,5 mm) representa un 0,8 % de la altura del terraplén lo que corresponde a un relleno de buena calidad geotécnica.



Figura 18. Instrumentación externa en sección ferroviaria.

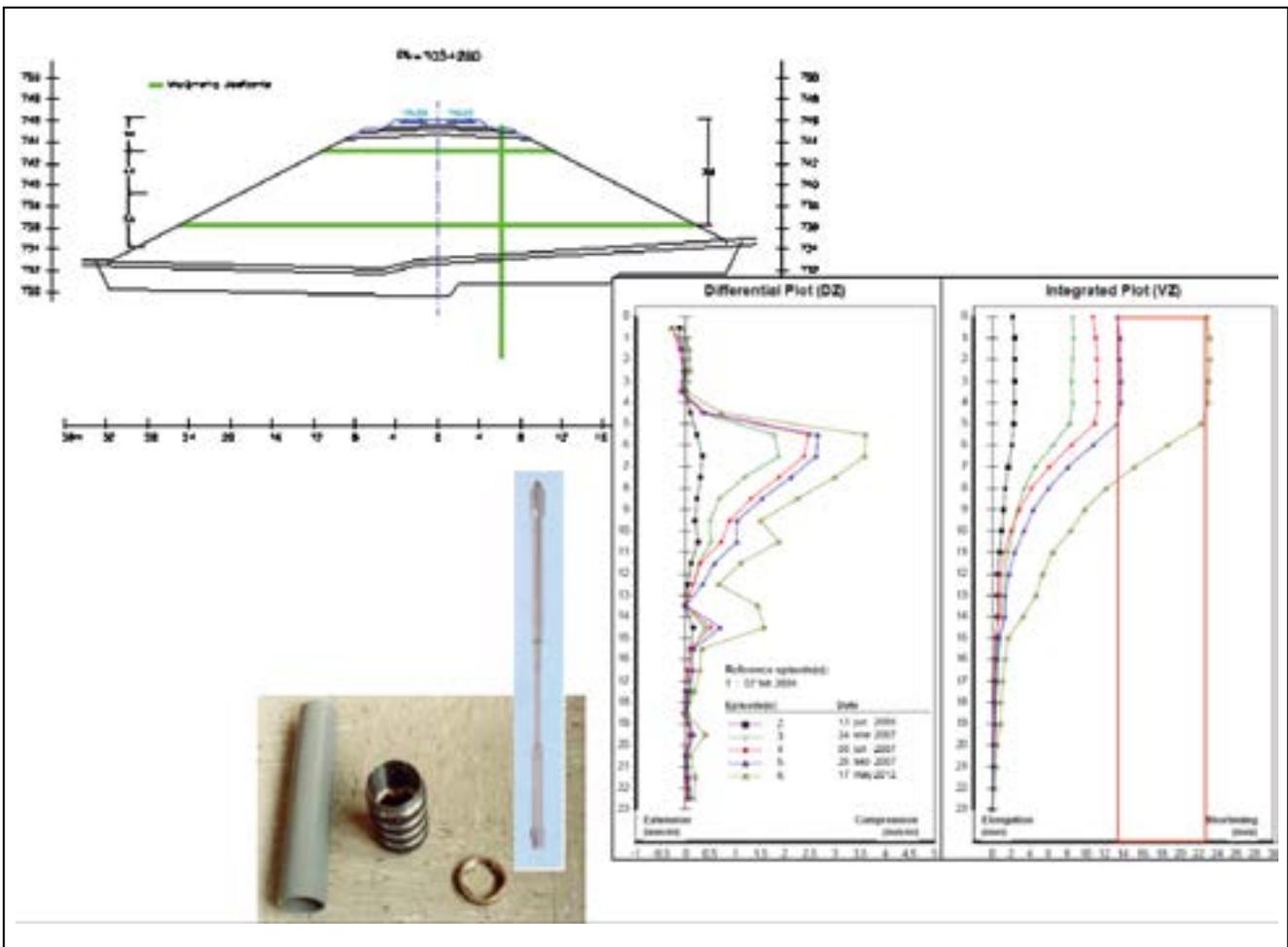


Figura 19. Micrómetro deslizante.

3.4. Obtención de cargas, reacciones y velocidades de paso de tren mediante bandas extensométricas

Las bandas extensométricas se utilizan para la medida del esfuerzo cortante sufrido por el carril al paso de los trenes. En la figura 20 se muestra la colocación de dichas bandas extensométricas en el carril durante la auscultación de un tramo.

Por su parte, en la figura 21 se indica el esquema operativo utilizado para determinar la carga Q inducida en la vía por el paso de una rueda del tren. Se obtiene restando las historias de los esfuerzos cortantes Q_2 , determinadas en



Figura 20. Colocación de bandas extensométricas en el carril.

dos puntos de un vano de vía situado entre dos traviesas consecutivas. Teniendo en cuenta que la longitud de dichos vanos es de 0,60 m, se ha considerado conveniente separar dichos puntos 0,30 m, situándolos a 0,15 m del centro del vano elegido.

Como ejemplo de las historias de cargas que pueden obtenerse en un punto de la vía con esta técnica, en la parte superior de la figura 22 se han representado las historias de esfuerzos cortantes Q_2 y Q_1 inducidas por un tren ALVIA circulando a 200 km/h en un vano de vía, instrumentado según el esquema de la figura 21. En la parte inferior de dicha figura se muestra la historia de las cargas Q producidas en el carril instrumentado por el paso de las ruedas de dicho tren, obtenido restando los valores de Q_2 y Q_1 .

De manera análoga, pero disponiendo de sendas bandas extensométricas a cada lado de una traviesa puede obtenerse la historia de la resultante de las cargas que actúan sobre la misma al paso de un tren y deducirse la historia de reacciones sobre ella (R_1 y R_2 en la figura 21) ya que se conoce, gracias al procedimiento descrito anteriormente, la historia de carga por rueda (Q).

Se han realizado cálculos numéricos tridimensionales con objeto de confirmar la bondad del método de análisis de datos procedentes de la auscultación de cargas empleada en las secciones ferroviarias de campo. El procedimiento empleado en los trabajos de campo consiste en determinar la deformación en el alma del carril con las bandas extensométricas, y a partir de ella, calcular la tensión tangencial y el esfuerzo cortante en la sección.

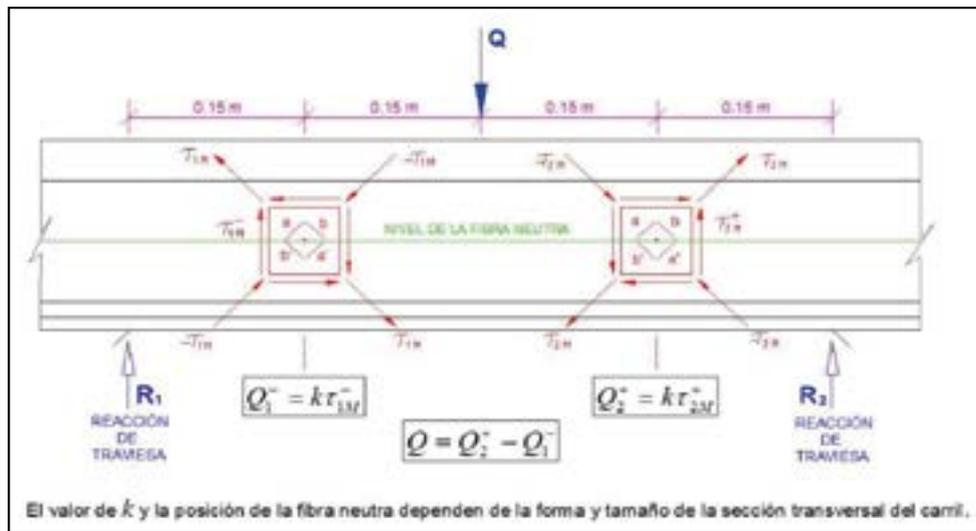


Figura 21. Esquema seguido para el pegado de bandas extensométricas en un vano de vía entre traviesas.

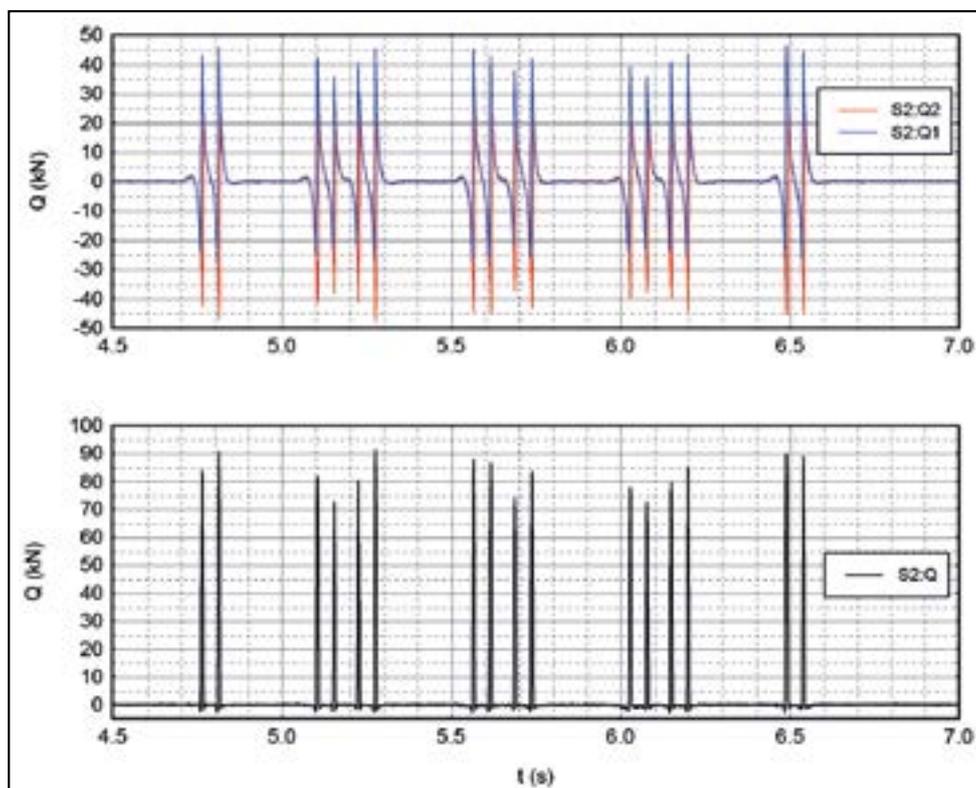


Figura 22. Historia de cargas Q por rueda obtenida restando las historias de esfuerzos cortantes Q_2 y Q_1 , inducidas en un vano de alta velocidad por un tren ALVIA a 200 km/h.

En la figura 23 se recogen los resultados de estos cálculos. Se compara el cortante obtenido integrando las tensiones tangenciales con el obtenido a partir de la formulación que relaciona la tensión tangencial en el alma de una viga con el esfuerzo cortante de la sección.

Se observa que el procedimiento de obtención del esfuerzo cortante a partir de las bandas extensométricas presenta un error inferior a 2 % a partir de una distancia de 10 cm del punto de aplicación de la carga, aunque a 5 cm del punto de aplicación el error sube hasta el 17 %.

La medida de cargas se está realizando con bandas extensométricas separadas 30 cm entre sí, obteniendo la carga cuando ésta está situada a mitad de distancia entre ellas (15 cm) con lo que la precisión debería ser superior al 2 % citado.

Con el fin de comprobar la precisión del conjunto del sistema de medida de cargas se han efectuado ensayos en el CFC en los que se han contrastado las cargas aplicadas por el actuador con los valores registrados empleando la misma tecnología utilizada en la sección instrumentada en Cantoblanco (figura 24).

El error obtenido es del 1 %. Estas medidas se han realizado en un ambiente con menor ruido que el que se observa en el campo por lo que previsiblemente la precisión obtenida en el campo sea ligeramente inferior.

Mediante las bandas extensométricas se ha evaluado la reacción sobre las traviesas denominadas T2 y T3, así como su relación con la carga por rueda. Se observa que hay un diferente comportamiento en las dos traviesas: para T2 se obtienen valores medios de 39 kN para S-130 a los 2 años

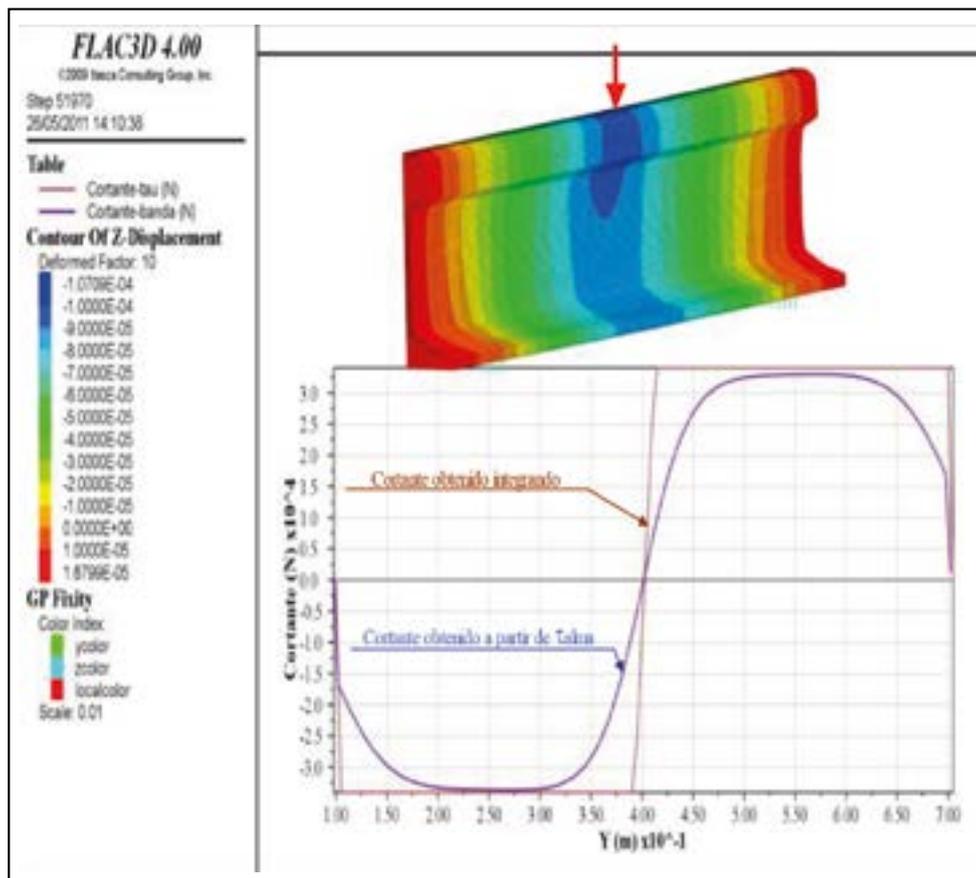


Figura 23. Modelo numérico para estudiar la validez del procedimiento de cálculo del esfuerzo cortante.

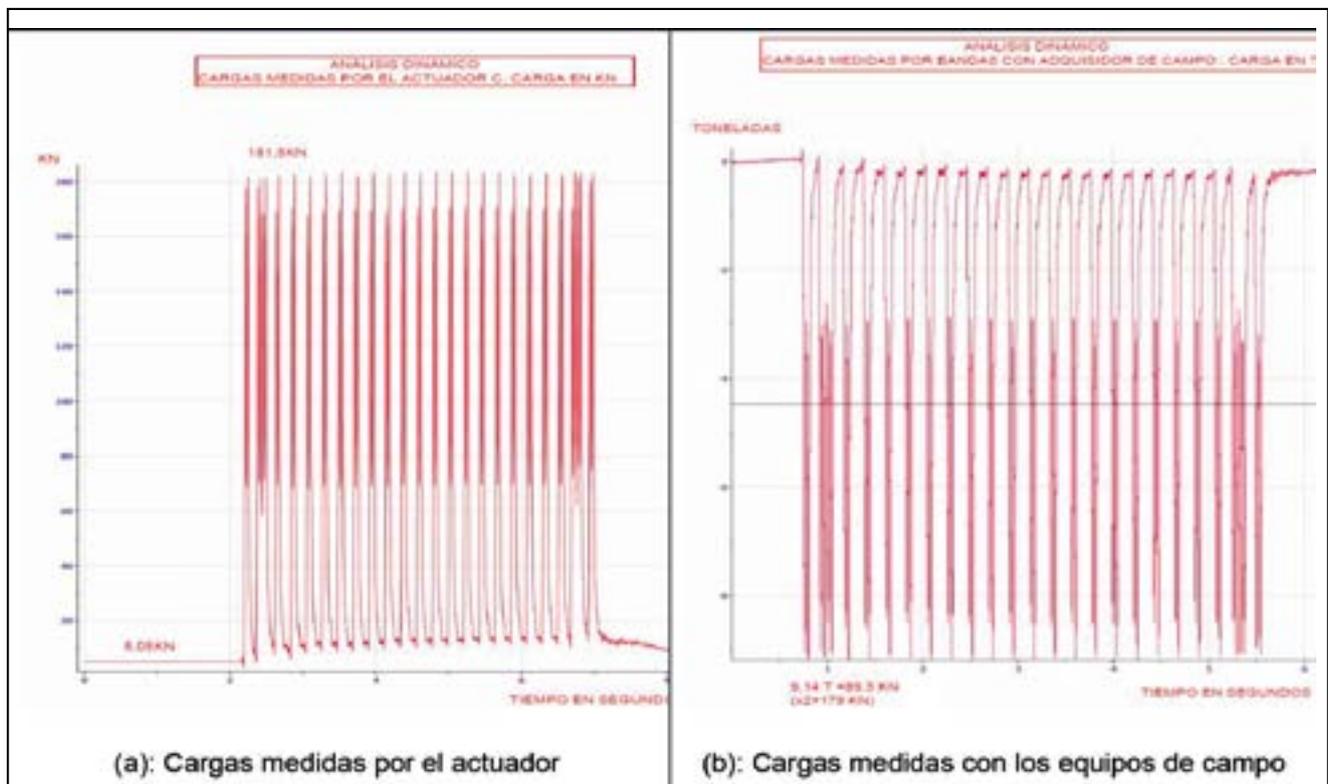


Figura 24. Contraste del procedimiento de medidas de cargas en la Instalación para Ensayos de Infraestructura Ferroviaria del CEDEX.

de 37-38 kN a los 4 años de la puesta en servicio, mientras que para estos mismos trenes en T3 se miden valores medios de 24 kN a los 2 años y 27 kN en a los 4 años. Para el tren tipo S-121 las reacciones medias en ambas traviesas son ligeramente inferiores a las anteriores: 34 kN en T2 y

21 kN en T3 (campana de 2009). Los trenes circularon por esta sección con una velocidad en torno a 105 a 110 km/h.

El cociente entre la reacción en traviesa y la carga por rueda bajo el hilo exterior de la traviesa T2 baja de un valor medio del 54,9 % a los 2 años de la puesta en servicio al

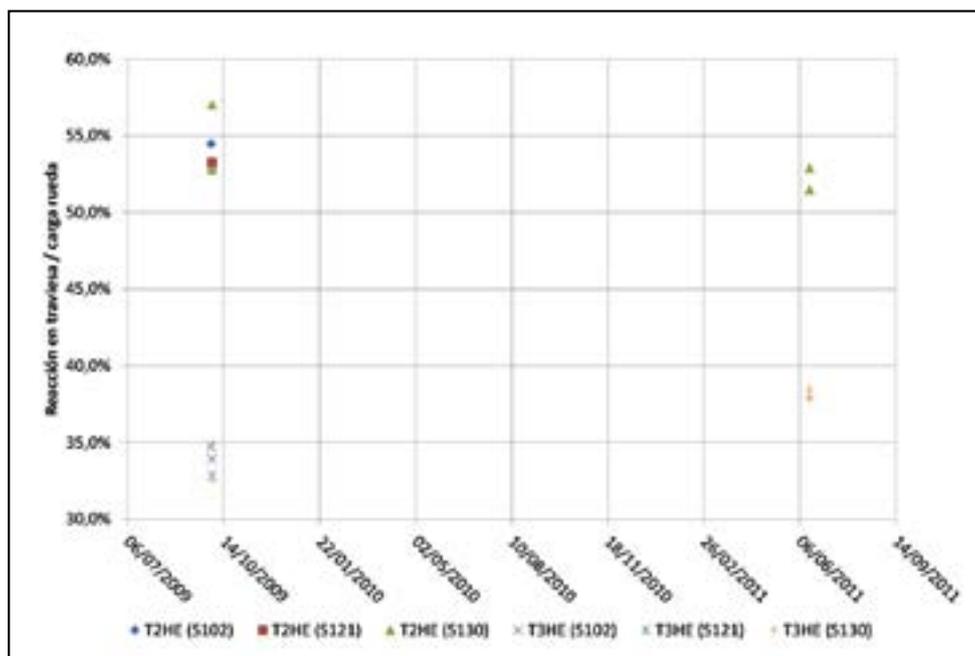


Figura 25. Razón entre reacciones medias en traviesa y carga por rueda.

52,2 % a los 4 años mientras que bajo el hilo exterior de la traviesa T3 sube del 33,8 % al 38,2 % (figura 25). Esto puede deberse a la evolución del comportamiento del apoyo de las travésas o bien a la ejecución de un bateo intermedio, del que se tiene constancia por la información recibida de los técnicos de mantenimiento.

De estas medidas puede resaltarse la diferencia de comportamiento entre travésas contiguas. Las reacciones obtenidas en otros emplazamientos presentan valores intermedios entre los detectados en estas dos travésas.

3.5. Obtención de movimientos del carril y rigidez de vía mediante láser y geófonos

La medida de los desplazamientos absolutos de carril bajo cargas estáticas (tren parado) o dinámicas (tren con velocidad) se realiza mediante dos sistemas de medida sin contacto: el primero basado en un emisor láser y sus sensores de desplazamiento del tipo PSD (*Position Sensitive Device*) y el segundo, mediante la integración de la señal proporcionada por geófonos (figura 26).

Estos sensores láser son una variedad especial de fotodiodos de silicio que proporcionan una señal analógica de

salida directamente proporcional a la posición del punto luminoso procedente del láser de excitación sobre el área activa del sensor.

El sensor láser por su filosofía de medida requiere de un punto fijo en la posición del emisor que emita un rayo horizontal de luz cuya posición constante en el espacio sirve de nivel de referencia de las medidas que se toman en el receptor (figura 26). En campo, este punto fijo no es tal ya que el trípode que se utiliza como soporte del emisor se apoya sobre la capa de sub-balasto junto a la canaleta de vía y, por tanto, se ve afectado por las vibraciones generadas por el propio tren, tanto las que se propagan por el aire como por el terreno. Estas vibraciones pueden explicar la dispersión de las medidas tomadas con el sensor láser en los registros de campo frente a la gran calidad obtenida con el mismo equipo en las medidas efectuadas en el CFC. La obtención de un punto fijo situado junto a la vía necesario por la distancia requerida para medir con el sensor láser es un asunto a considerar. En otros emplazamientos, con el objetivo de intentar solventar este problema, se ha dispuesto el emisor láser en las torres de soporte de la catenaria. Los resultados así obtenidos han sido, sin embargo, más desfavorables por el aumento de la distancia.

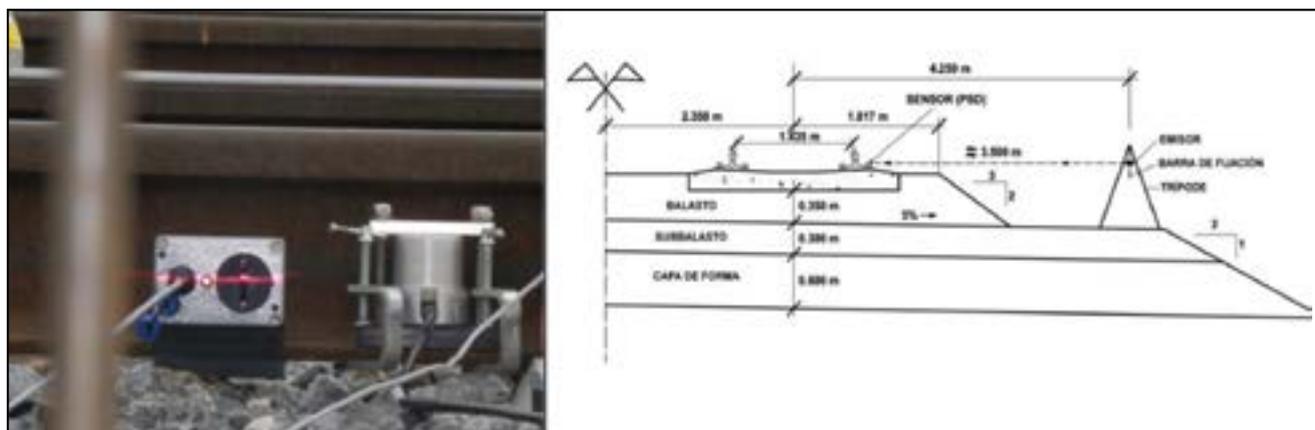


Figura 26. Sensor láser y geófono (izda). Esquema de medida con sensor láser (dcha).

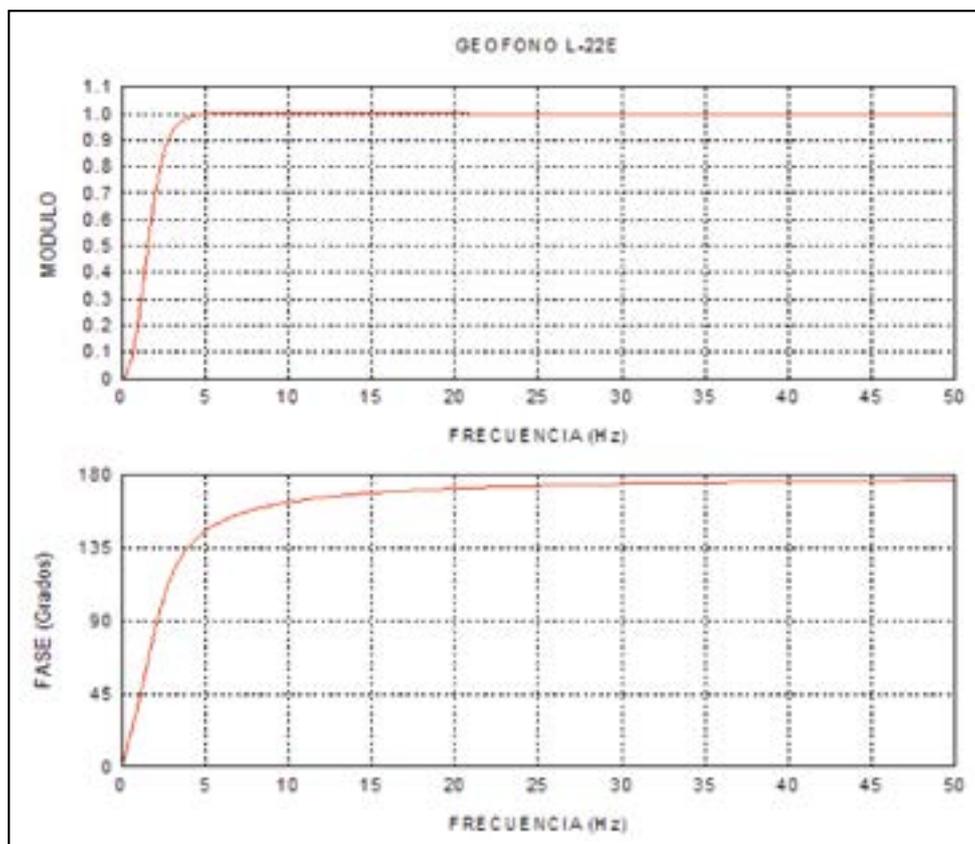


Figura 27. Curvas de respuesta de un geófono de 2 Hz.

Para la medida de desplazamientos se han empleado asimismo geófonos. Son transductores pasivos electrodinámicos de baja frecuencia de resonancia y alta sensibilidad. El registro procedente de estos sensores es en términos de velocidad, por lo que debe integrarse para obtener las deflexiones del carril.

Se han utilizado geófonos de 2 Hz solidarios al carril (figura 26 - izda), cuyas curvas de respuesta se muestran en la figura 27. La posición en la que se instalaron los sensores, con un gálibo reducido, ha impedido utilizar geófonos con menor frecuencia de resonancia para la medida de los movimientos del carril que pudiera mejorar la bondad de los registros obtenidos.

Antes de integrar las señales captadas por el geófono para obtener las deflexiones del carril, es necesario modificar las fases de los armónicos que constituyen dichas señales. Con ello se han conseguido registros de la deflexión de gran calidad para velocidades superiores a 100km/h (figura 28).

Frente a otros tipos de sensores de similares dimensiones, como pueden ser los acelerómetros, los geófonos ofrecen la ventaja de no necesitar alimentación eléctrica externa y de permitir corregir la línea base de las señales integradas de una manera relativamente sencilla.

Según la experiencia del LG, se consideran más precisas las medidas obtenidas a partir de la integración de los registros de los geófonos de 2 Hz que las obtenidas con el láser debido a la dificultad de conseguir un punto fijo para la sujeción del emisor, y por ello son las utilizadas normalmente en este tipo de estudio. Las medidas con los sensores láser sirven por el momento para confirmar el orden de magnitud de las medidas tomadas con los geófonos.

En la campaña de medidas del año 2009 (2 años después de la puesta en servicio), tanto para los trenes tipo S-102 como tipo S-130, se obtiene un valor medio de desplazamiento de carril de aproximadamente 0,66 mm. En 2011, el valor medio de las medidas de desplazamiento de carril asciende a 0,74 mm para los trenes tipo S102 y hasta 0,78 mm para los trenes tipo S-130. Nótese que estas medidas son las obtenidas a partir de los geófonos de 2 Hz. Las deflexiones medidas son generalmente similares en los dos hilos de cada vano.

Al comparar los registros 2 y 4 años después de la puesta en servicio, y teniendo en cuenta los valores de las cargas medidas en ambos años, se observa que siendo iguales las cargas, la deflexión de carril registrada a los 4 años es de un 10 a un 20 % superior a la medida a los 2 años.

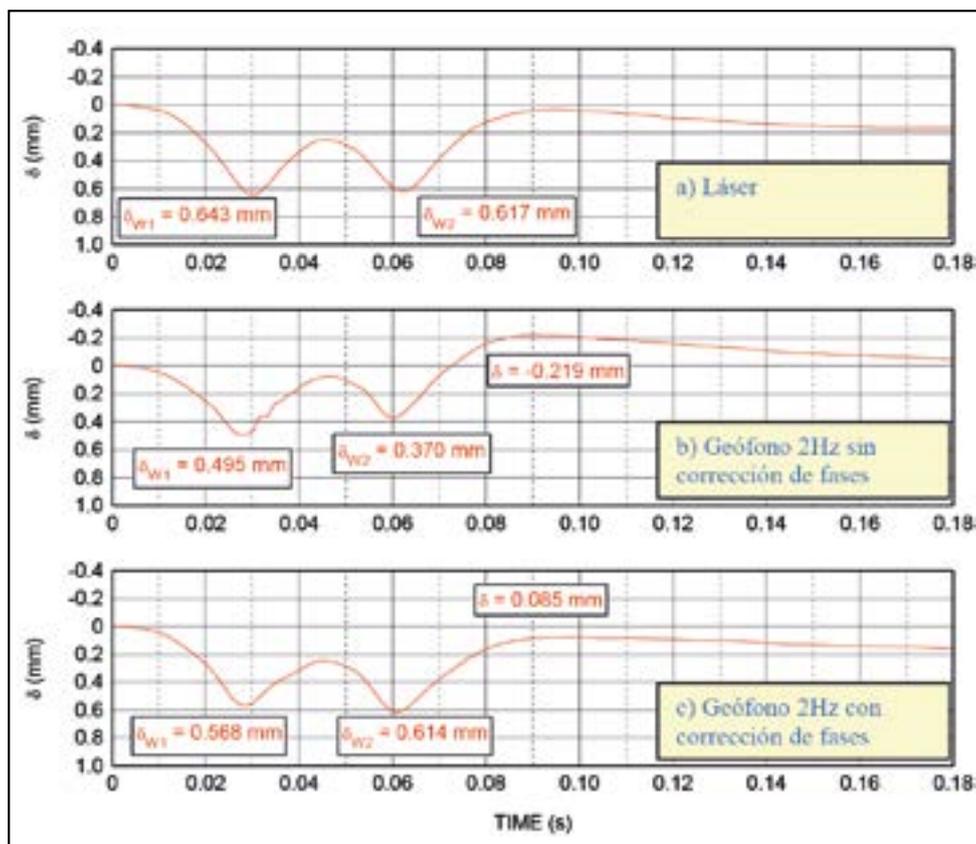


Figura 28. Deflexiones absolutas de la vía obtenidas: a) con un sistema de rayos láser; b) sin corregir las fases de la señal recibida en un geófono de 2Hz; y c), corrigiendo previamente las fases de la señal captada con el geófono.

3.6. Obtención de la rigidez de vía

La rigidez de vía se puede obtener como cociente entre la carga por rueda y la deflexión del carril, una vez que se han medidos en el mismo punto, tal como se comentaba en apartados anteriores.

En el caso de Cantoblanco, la rigidez media de vía obtenida (K) presenta valores entre 109 y 115 kN/mm en 2009 y entre 91 y 96 kN/mm en 2011. A la luz de estos resultados, se concluye que la rigidez de la vía ha bajado en el periodo entre los 2 y 4 años desde la puesta en servicio. Podría esperarse, sin embargo, que los esfuerzos verticales producidos por el paso de las circulaciones produjesen con el tiempo un asiento remanente en la banqueta de balasto y una rigidización de ésta. La pérdida de rigidez detectada podría achacarse a las operaciones de bateo que se han llevado a cabo en parte para alcanzar la rasante inicial perdida por el asiento en la plataforma.

3.7. Obtención de movimientos de suela bajo carril y traviesa mediante potenciómetros y geófonos

Los potenciómetros miden el desplazamiento relativo entre la traviesa y el patín del carril, por lo que son una medida del acortamiento de la suela bajo carril (PAD) al paso de los ejes del tren (figura 29).

En el caso de Cantoblanco, el cociente entre la reacción sobre una traviesa y el desplazamiento de la suela bajo carril fue de unos 180 kN/mm.

Del valor de descenso de las traviesas instrumentadas con geófonos de 1 Hz se deduce que, dentro de una misma



Figura 29. Potenciómetro y geófonos.

campana de medidas, el descenso medio de una traviesa fue de 0,40 a 0,50 mm en el año 2009, y se incrementó aproximadamente en 0,1 mm en el año 2011.

3.8. Obtención de presiones y movimientos en las capas ferroviarias

Las presiones verticales generadas por la circulación de los trenes en las diferentes capas de la infraestructura ferroviaria se miden con células de presión que se colocan en posiciones estratégicas de la sección instrumentada.

Así, por ejemplo, en el caso de Cantoblanco, en la figura 17, mostrada anteriormente, se presenta la situación de la instrumentación empleada en estos trabajos. Las células de presión se colocaron bajo los carriles, justo debajo de cuatro traviesas. Además, se colocaron dos células en la parte central de 2 de ellas.

En la figura 30 se recoge un momento de la instalación de las células de presión bajo una traviesa y en la figura 31



Figura 30. Instalación de células de presión bajo las traviesas.

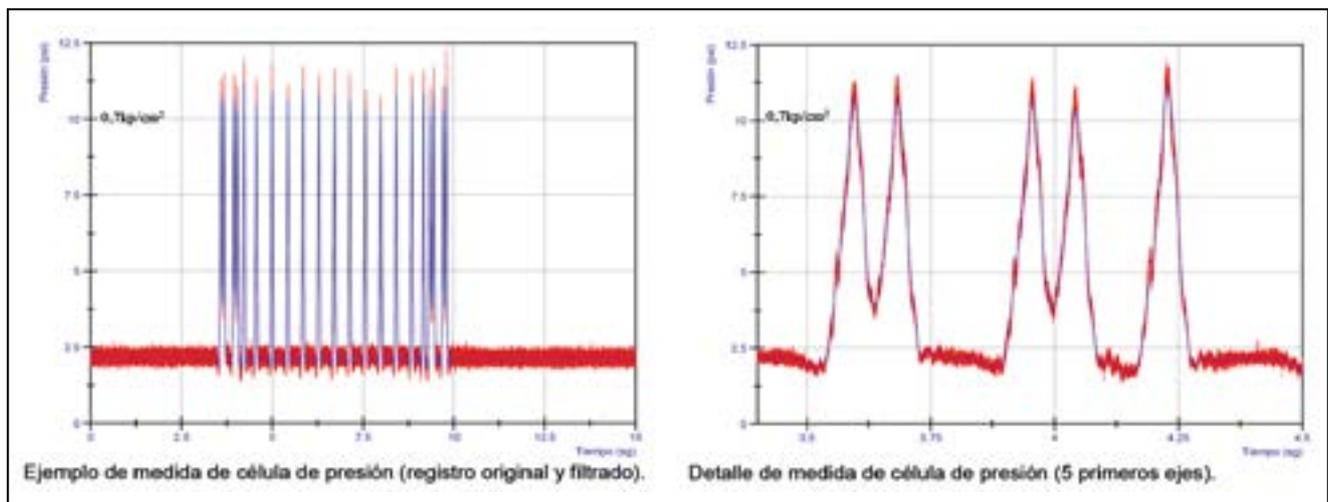


Figura 31. Registros original y filtrado de medidas de célula de presión.

un ejemplo de los registros obtenidos. En rojo se dibuja la señal original y en azul la señal filtrada, ambas en unidades PSI y sin corregir de cero. Se observa que la coincidencia entre ambas señales es buena, puesto que existe poco ruido en la señal original. Este ruido desaparece prácticamente en su totalidad al realizar el filtrado. El análisis espectral de la señal registrada por las células de presión condujo a la aplicación de un filtro tipo pasa-baja (*low-pass filter*) con frecuencia de corte en 40 Hz.

El análisis de estas presiones muestra dispersión de medidas entre los distintos sensores. Los valores medios obtenidos de las 8 células situadas bajo traviesa son de 110 a 120 kPa. Las medidas bajo traviesa tomadas en el punto medio de las mismas son obviamente menores que las obtenidas bajo los carriles, presentando valores de 35 y 10 kPa. Estos valores se han obtenido en otros estudios realizados, por lo que se puede considerar ese rango de valores como representativos para trenes de pasajeros.

Los valores de presión obtenidos en la región de contacto balasto/sub-balasto son más uniformes que los obtenidos en los sensores dispuestos bajo traviesa. Los valores medios resultantes en las células dispuestas bajo carriles en el contacto de las capas de balasto y sub-balasto son de 55 a 70 kPa. Según estos datos la transmisión de la carga dinámica a lo largo de la capa de balasto es bastante vertical, o en otras palabras, el reparto de carga a lo largo de la capa de balasto es pequeño. Por otro lado, en el punto medio de las traviesas, en el contacto balasto-sub-balasto se obtienen valores medios de 20 kPa.

Los transductores de desplazamiento (LVDT) se utilizan para medir el acortamiento de las capas internas (balasto, sub-balasto, capa de forma y coronación de terraplén). En el caso de Cantoblanco, en la capa de balasto se colocaron transductores de desplazamiento bajo el punto medio de las traviesas instrumentadas (figura 32). En la



Figura 32. Sensor LVDT utilizado en la capa de balasto.

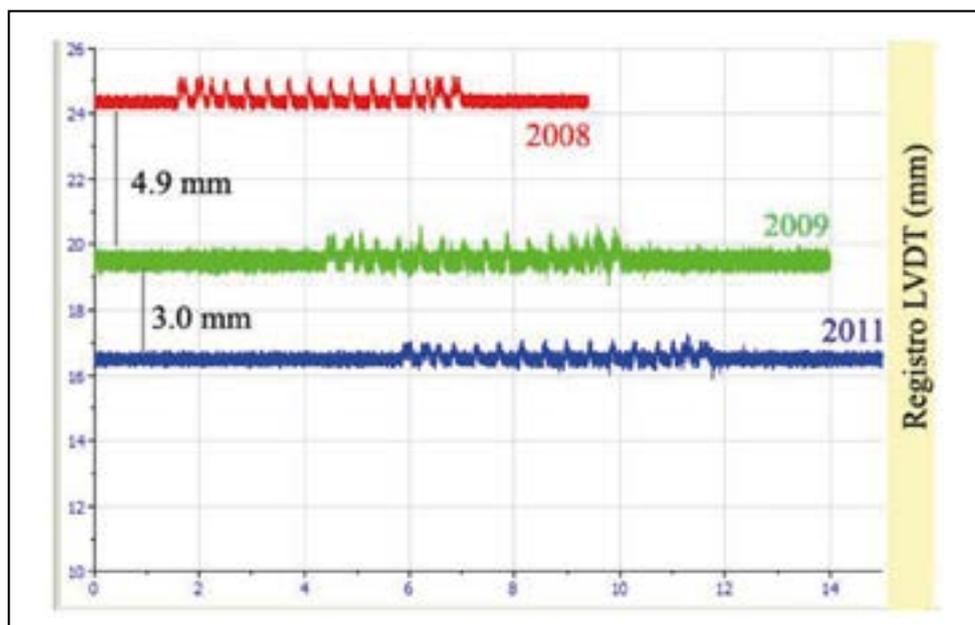


Figura 33. Evolución temporal del nivel basal registrado en los transductores de desplazamiento situados en la capa de balasto en una de las traviesas auscultadas.

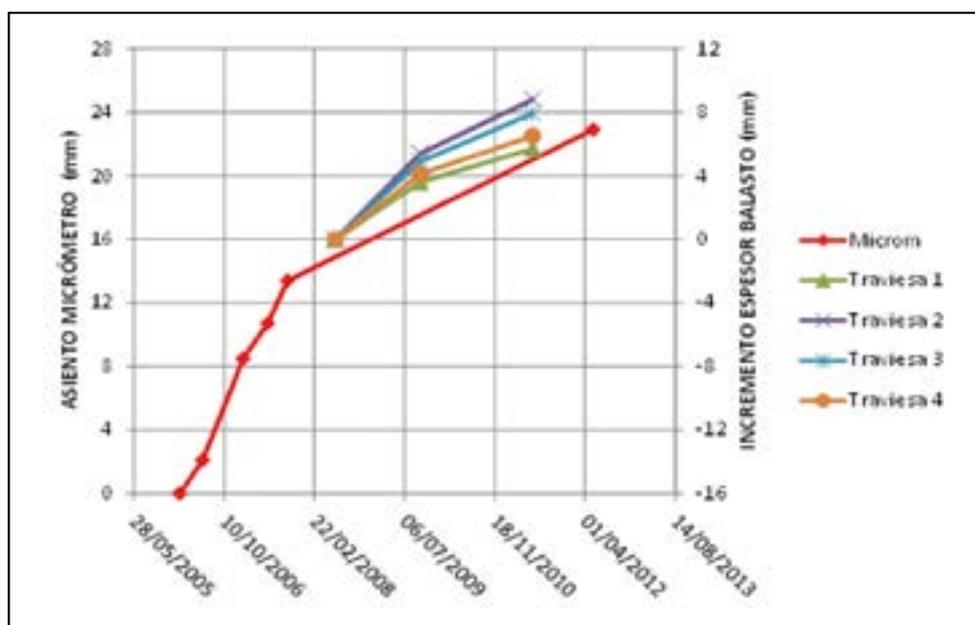


Figura 34. Asiento de la coronación del terraplén frente a la evolución del espesor de balasto.

capa de sub-balasto se dispusieron transductores de desplazamiento, bajo el hilo interior y el hilo exterior. En la capa de forma y coronación de terraplén se situaron sendos transductores de desplazamiento, ambos bajo el punto medio de una traviesa.

Para eliminar el ruido en las señales de los LVDT se suele utilizar un filtro tipo pasa-baja. En este caso, se empleó una frecuencia de corte diferente para cada registro (variando entre 18 y 40 Hz), elegida en función del resultado obtenido al analizar espectralmente cada una de las señales.

En la figura 33 se representa la deformación del balasto al paso de trenes en los años 2008, 2009 y 2011. En cada una de las curvas se aprecia el paso de un tren marcándose los distintos ejes y la deformación de compresión provocada por cada uno de ellos.

Los sensores LVDT registran un incremento del espesor de balasto bajo las traviesas en el periodo de

medidas que concuerda correctamente con los asientos de la plataforma registrados con el micrómetro deslizante (figuras 33 y 34). A la vista de estos resultados parece reflejarse que el asiento de la coronación del terraplén se ha contrarrestado en las operaciones de bateo incrementando el espesor de la capa de balasto para mantener la cota de rasante.

En la capa de sub-balasto se registraron deformaciones al paso de los trenes comprendidas entre 0,05 y 0,15 mm.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE SECCIONES FERROVIARIAS

En los últimos años, el LG ha impulsado la modelización numérica de diversos aspectos singulares de las vías férreas, entendiendo esta metodología de cálculo como una herramienta adecuada para el análisis de detalle del

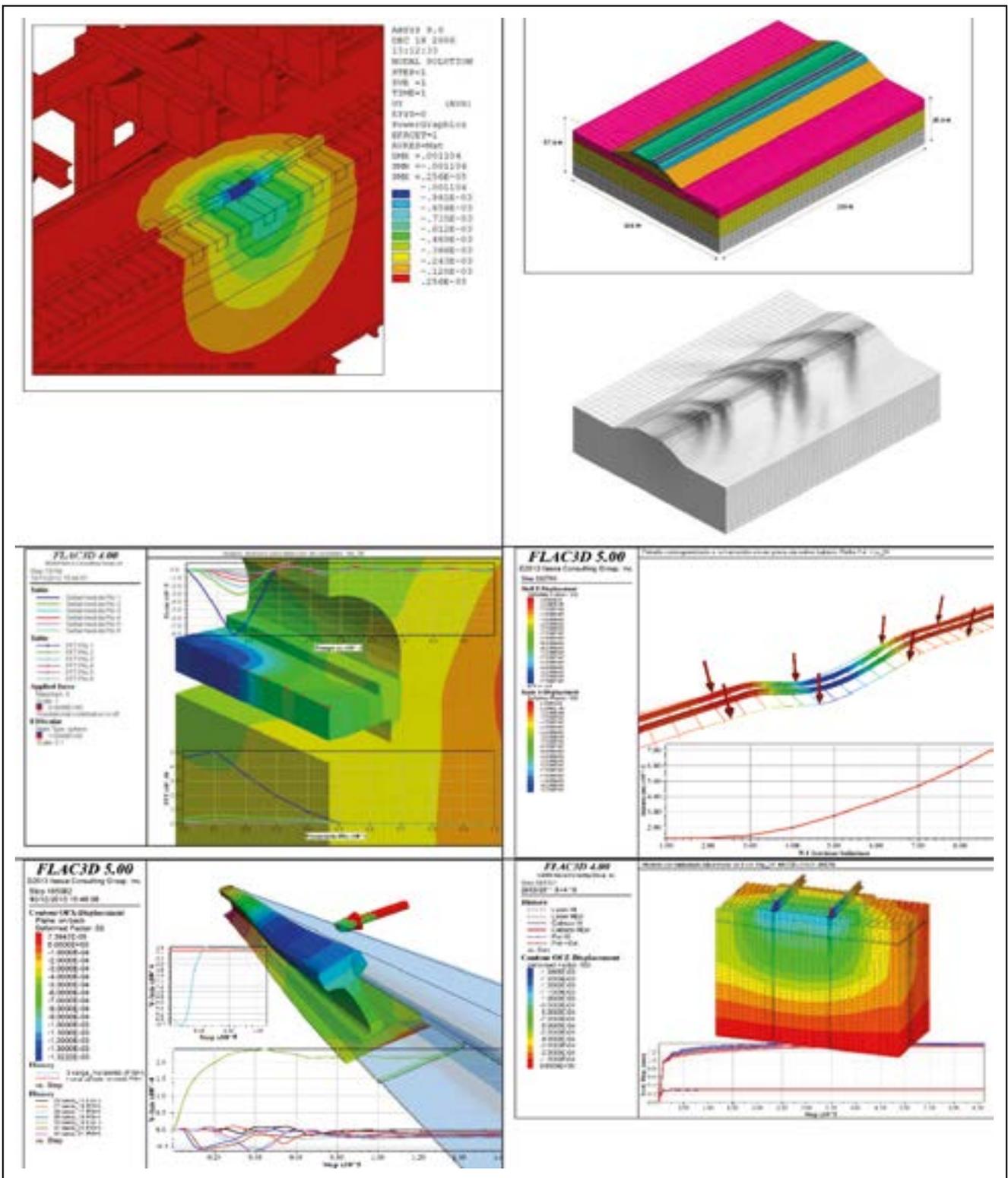


Figura 35. Modelización numérica de la infraestructura ferroviaria.

comportamiento dinámico de la vía al paso de trenes con diferentes velocidades de circulación.

A modo de ejemplo, y sin ánimo de exhaustividad, se enumeran los modelos más relevantes que se han realizado, indicando el programa utilizado en cada caso:

- Validación de las tres zonas de ensayo disponible en el CFC (realizado con ANSYS).
- Modificación de la estructura metálica del CFC para permitir simulaciones de circulaciones a velocidades superiores a 300 km/h (realizado con ANSYS).
- Estudio del efecto del espesor de sub-balasto bituminoso (8, 12 y 16 cm) en el comportamiento del resto de los elementos de la vía (asientos, tensiones y deformaciones). Modelización no lineal de los materiales (realizado con ANSYS y Flac3D).
- Validación de la medida de cargas verticales con bandas extensométricas (realizado con Flac3D).
- Validación y optimización de la medida de cargas horizontales con bandas extensométricas (realizado con Flac3D).
- Desarrollo de procedimiento para la determinación de la aparición de cavidades bajo el sostenimiento

to-revestimiento de los túneles ejecutados en macizos evaporíticos (realizado con Flac3D).

- Estudio estructural de la rotura mecánica de los elementos de fijación carril-traviesa (realizado con Flac3D).
- Análisis de la patología de las secciones de transición vía en balasto-vía en placa debido a la variación de deformabilidad de los apoyos. Estudio de diferentes soluciones estructurales para corrección de la patología (realizado con Flac3D).
- Determinación de la velocidad crítica de circulación ferroviaria para corroborar los resultados obtenidos con un modelo basado en el Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW) desarrollado en el LG en colaboración con el MIT (Massachusetts Institute of Technology). A este respecto, la velocidad crítica es la velocidad de circulación del tren que produce un fenómeno de amplificación del movimiento vertical de los componentes de la vía y del terreno, que pueden comprometer la estabilidad de la vía y la seguridad de los pasajeros (realizado con MIDAS GTS NX).

Tal y como se puede colegir de la anterior enumeración de trabajos, la complejidad de los modelos es elevada ya que combinan los elementos estructurales de geometría compleja, los modelos constitutivos del terreno con formulación no lineal y los cálculos dinámicos en el dominio del tiempo.

En todos los casos se han empleado programas comerciales basados en las técnicas de los elementos finitos (MEF) o de diferencias finitas (MDF).

En la figura 35 se muestran algunos de los resultados de dicha modelización.

5. ENSAYOS DE LABORATORIO SOBRE BALASTO

5.1. Ensayos en la caja de corte de grandes dimensiones con balasto

El balasto es un material granular triturado, graduado y seleccionado, con tamaños máximos habituales entre 50 y 60 mm. Estas dimensiones dificultan la determinación de sus características resistentes con los equipos habituales que tienen los laboratorios. Para estudiar la resistencia al corte de materiales gruesos como el balasto, el LG cuenta con una caja de corte de grandes dimensiones (plano de corte de 1 x 1 m) que se construyó hace aproximadamente 30 años.

Este equipo permite ensayar muestras con un espesor de hasta 80 cm, ya que la altura de la caja es de 1,20 m.

Con esas dimensiones, el tamaño máximo de partícula que se puede utilizar en los ensayos es de 8,5 cm, por lo que el equipo es adecuado para ensayar partículas de balasto, según la norma ASTM D3080-11 (2011). Este equipo también ha sido ampliamente utilizado para estudiar el relleno de rocas en puertos y presas. La figura 36 muestra una fotografía del equipo.

Las tensiones normales utilizadas en las pruebas cubrieron el rango comprendido de 10 a 400 kPa.



Figura 36. Caja de corte de grandes dimensiones del CEDEX usada para la caracterización del balasto.

El LG ha realizado un importante estudio sobre la resistencia del balasto empleando la caja de corte de grandes dimensiones. Los detalles y resultados obtenidos en los estudios se recopilan en el trabajo publicado por Estaire y Santana (2018), incluyéndose aquí un breve resumen. Se ensayaron más de 20 muestras de balasto, en condiciones secas. Las muestras de balasto se agruparon en cuatro tipos de ensayos en función del material empleado y la preparación de muestra realizada, tal y como se muestra en la tabla 3. Antes de realizar los ensayos, se obtuvieron las propiedades geométricas y físicas de las dos clases de balasto analizadas (milonita y andesita), obteniéndose valores similares en las propiedades geométricas, físicas y resistentes, que permitían clasificar al balasto con la clase de calidad muy alta. Las tensiones normales utilizadas en las pruebas cubrieron el rango comprendido de 10 a 400 kPa.

Algunos de los resultados de los ensayos se muestran en las figuras 37 y 38. En la figura 37 se presentan las curvas de rotura obtenidas para el balasto andesítico, lo que permite comparar el efecto de la preparación de la muestra, por vertido y por compactación.

Los resultados se interpretaron según el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y con un modelo parabólico no lineal. Además, se analizaron los ángulos de rozamiento secantes obtenidos en los ensayos. Algunas conclusiones obtenidas del estudio fueron las siguientes (Estaire y Santana, 2018):

Tabla 3. Ensayos de corte realizados sobre balasto en la caja de corte de grandes dimensiones

Ensayo	Material	Preparación muestra	Tensión normal (kPa)	Peso específico de la muestra (kN/m ³)
1	Milonita	Vertido ¹	48-98-196	13,5-14,2
2	Andesita	Vertido ¹	10-25-49-49-98-147-196-196-294-392	13,0-14,0
3	Milonita	Ligera compactación ²	30-73-147	15,7-15,9
4	Andesita	Ligera compactación ²	48-98-196	14,6-14,9

¹ Muestras preparadas por vertido del material dentro de la caja de corte sin ningún tipo de compactación.

² Muestras preparadas mediante una ligera compactación, en cinco capas, con un compactador manual dinámico.

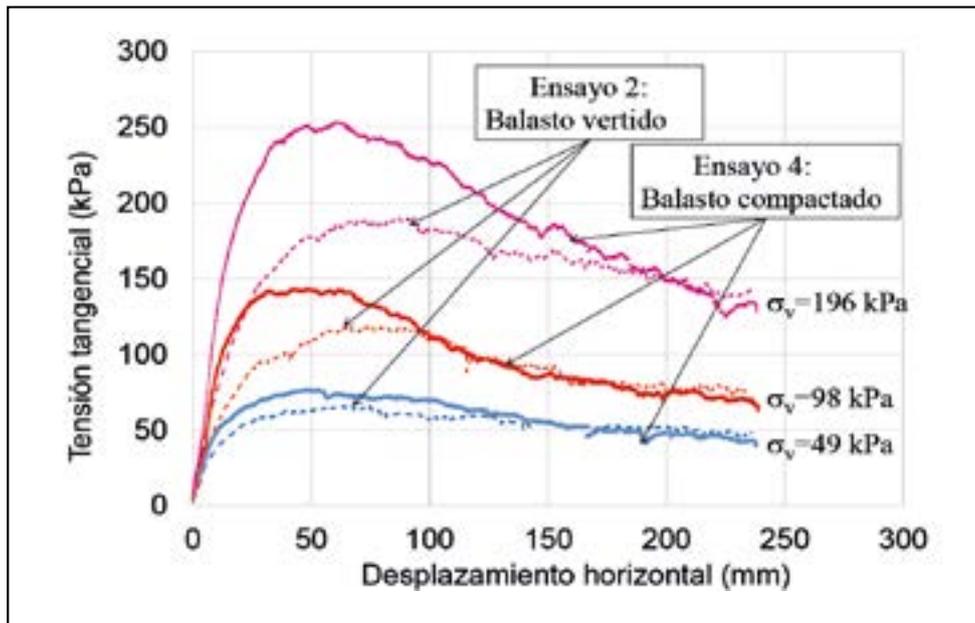


Figura 37. Curvas desplazamiento horizontal – tensión tangencial para el balasto andesítico preparado por vertido y compactado (Estaire y Santana, 2018).

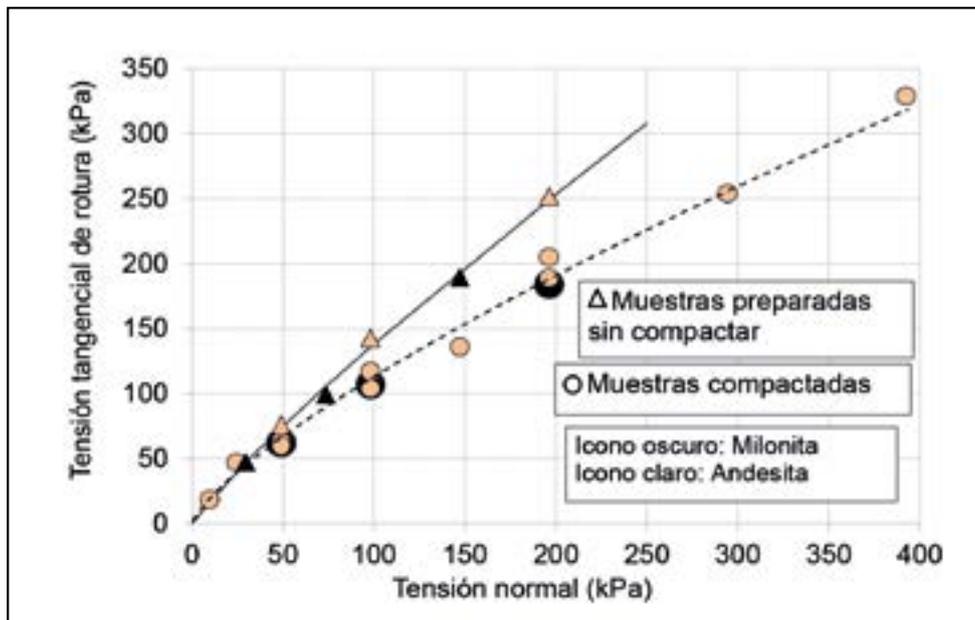


Figura 38. Envolvente de rotura obtenida en la caja de corte de grandes dimensiones para las muestras de balasto (Estaire y Santana, 2018).



Figura 39. Balasto andesítico colocado en la caja de corte de 30 x 30 cm (izda) y en la caja de corte de grandes dimensiones (dcha).

- La envolvente de rotura parabólica (cuya expresión es: $\tau = a + \sigma_v^b$) presentó el mejor ajuste para analizar los resultados de los ensayos, ya que evita considerar la cohesión aparente que se deriva de las interpretaciones lineales de Mohr-Coulomb, teniendo en cuenta la naturaleza claramente granular del balasto.
- Los valores de los parámetros del criterio de rotura de Mohr-Coulomb obtenidos de los ensayos fueron:

- a) para el balasto no compactado, un ángulo de rozamiento de 39° combinado con una cohesión aparente de 25 kPa y b) para el balasto compactado: un ángulo de rozamiento de 50° y cohesión entre 10 y 20 kPa.
- Los valores del ángulo de rozamiento disminuyen con el aumento de la tensión normal, lo que demuestra la naturaleza no lineal de la resistencia al corte del balasto. Los ángulos de rozamiento para baja tensión normal, unos 10 kPa, están entre 65° y 70° , mientras que para grandes tensiones (400 kPa) disminuye a valores en torno a los 40° .

Para analizar el efecto que tiene el tamaño del equipo en la determinación de las propiedades resistente del balasto, se realizaron ensayos de corte directo utilizando la caja convencional de 30 x 30 cm y la caja de 1 x 1 m, en condiciones similares. La figura 39 muestra las fotografías del material dentro de las cajas de corte de 30 x 30 cm y 1x1 m antes de los ensayos, que reflejan el hecho de que el ancho de la muestra solo puede contener de 6 a 7 agregados en la caja de corte de 30 x 30 cm, en comparación con los 20 agregados dentro de la caja de corte de 1 x 1 m. Estas pruebas permitieron analizar el efecto escala. Los resultados mostraron que el uso de cajas de corte directo de 30 x 30 cm produce un aumento en la fuerza de corte de entre el 40 y el 60 %, lo que debe tenerse en cuenta al revisar

muchos de los resultados de las pruebas de corte directo que se encuentran en la literatura.

5.2. Ensayos de caracterización de los materiales elastoméricos

El LG ha realizado ensayos de caracterización de los materiales elastoméricos presentes en la sección ferroviaria, concretamente, sobre la suela bajo carril y la suela bajo traviesa (USP: *Under Sleeper Pad*). Los estudios están enfocados a determinar el módulo de rigidez y el módulo estático de estos elementos, siguiendo las normativas establecidas por ADIF, en las que se calcula:

- la rigidez vertical sobre las placas estáticas de sujeción (ET 03.360.570.0 denominado “Placas elásticas de asiento para sujeción VM”); y
- el módulo estático sobre las mantas antivibratorias (apartado 2.2.1 “PPT para la contratación del suministro y transporte de manta antivibratoria de atenuación alta”).

La obtención de ambos parámetros es similar, pues se aplica una carga vertical al elemento elastomérico y se registran las deformaciones producidas. En la figura 40 se muestran varias fotografías realizadas durante los ensayos,



Figura 40. Ensayo para caracterizar los materiales elásticos. Detalle de los LVDTs (izda) y equipo durante el ensayo (dcha).

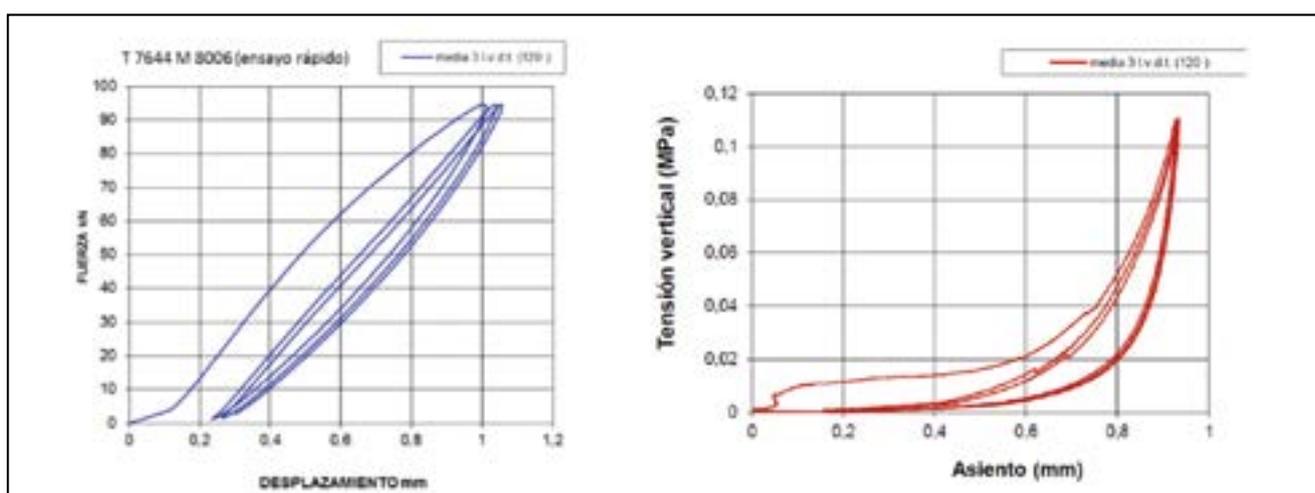


Figura 41. Resultados gráficos obtenidos para el cálculo de la rigidez vertical (izda) y el módulo estático (dcha).

con la colocación del material, detalle de los LVDTs para el registro de deformaciones, y durante la ejecución.

Por su parte, en la figura 41 se muestran ejemplos de los resultados gráficos obtenidos de la rigidez vertical (izda) y el módulo estático (dcha).

6. NORMALIZACIÓN

Dentro de los trabajos realizados por el LG en el ámbito de la Geotecnia Ferroviaria, también hay que destacar la redacción de documentos normativos. Esta labor está

enfocada, principalmente, a la actualización de normativa ferroviaria. Los ejemplos más destacados son:

Actualización del PPT tipo para los proyectos de plataforma de ADIF.

- Actualización de los folletos nº 719 y 722 de la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles).
- Ambos documentos determinan las condiciones de las obras de tierra y capas de forma en las secciones ferroviarias.

7. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Una vez descritos todos los trabajos realizados en el pasado, es conveniente lanzar una mirada hacia el futuro.

A este respecto, durante los próximos años, la intención del LG es retomar la colaboración con ADIF que tan buenos resultados dio en el pasado, a través de la firma de un nuevo encargo. Los principales trabajos en los que se pretende trabajar son los siguientes:

- Realización de campañas de medición de rigidez en vía real en secciones en recta con diferentes rigideces, en secciones en recta en zonas de transición, en secciones en curva y en secciones con traviesas de tres hilos.
- Análisis del comportamiento de la infraestructura de vía para velocidades superiores a 300 km/h, dado que se ha constatado una cierta tendencia al aumento de la velocidad comercial en las líneas de alta velocidad ferroviaria.
- Determinación de un método de cálculo para estimar la velocidad crítica de secciones ferroviarias tipo y de secciones en las que se hayan detectado mayores labores de mantenimiento, fundamentalmente en tramos sobre zonas de suelos blandos, poniendo especial atención en zonas de terraplenes de pequeña altura sobre terrenos de características geotécnicas pobres a medias.
- Determinación cuantitativa de la degradación de la infraestructura de vía al paso de trenes, con objeto de optimizar el modelo que tiene ADIF para la determinación de los costes de mantenimiento y conservación de la infraestructura ferroviaria.

Por otra parte, el LG es socio corporativo del programa europeo GEOLAB, enmarcado en la convocatoria INFRAIA del programa H2020, a través del CFC y junto a otras diez instalaciones singulares de ensayo repartidas en ocho países europeos. El objetivo básico de este proyecto es permitir que organizaciones externas al consorcio puedan realizar ensayos en las instalaciones asociadas a GEOLAB y financiadas por el propio proyecto. En este contexto, está previsto que se realicen tres ensayos en el CFC en el periodo 2022-2024.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores del artículo quieren hacer especial mención a Vicente Cuéllar, que fue la persona que impulsó la construcción y puesta a punto del CFC, siendo responsable de muchos de los ensayos que se describen en este trabajo, y a José Luis García de la Oliva, impulsor de todas las actividades relacionadas con la instrumentación de vías férreas.

Asimismo, se quiere agradecer su esfuerzo y dedicación a todas las personas que han trabajado y trabajan en el CFC

desde su inauguración y en la instrumentación de campo: Francisco Navarro, Miguel Ángel Andreu, Juan Luis Cámara, Sagrario Merino, Ricardo Fernández, Francisco González, Inés Crespo, Raúl Reinoso, Ángel Carballo, Pedro León, Antonio García, Felipe García, José Luis Fernández, José Manuel Cerezo, Fermín Llamas, Rubén Ruiz, Ángel Tijera, Pedro J. García, Antonio Jiménez y José Pintado.

9. REFERENCIAS

Cuéllar, V. (2016). Comportamiento dinámico de líneas férreas con balasto bajo cargas verticales. *Ingeniería Civil*, nº 183, pp. 79-108.

Estaire, J., Cuéllar, V., y Santana, M. (2017). Ensayos de resistencia lateral de vía realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX y su modelización. *Geotecnia*, nº 140, pp. 03-30.

Estaire, J., y Santana, M. (2018). Large direct shear tests performed with fresh ballast. *Proceedings of the ASTM Symposium on Railroad Ballast Testing and Properties, ASTM STP 1605, March 2018*. T.D. Stark, R.H. Swan, Jr., y R. Szecsy, Eds., ASTM Int. pp. 134-151.

Estaire, J., Cuéllar, V., Pardo de Santayana, F., y Santana, M. (2018). Testing railway tracks at 1:1 scale at CEDEX Track Box. *Revista de Alta Velocidad*, nº 5, pp.191-217.

Estaire, J., Crespo-Chacón, I., y Santana, M. (2018). A procedure to determine the critical speed of railway tracks based on the Winkler's hypothesis and static FEM simulations. *Minisymposium on Computational modelling of beams on foundations with application to rail tracks. 6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6) Glasgow (UK), 11-15 June 2018*, pp 1045-1056.

Estaire J., Cuéllar, V., y Cámara, J.L. (2021). Settlement laws of bed layers of a ballast track as determined in 1:1 scale models performed in CEDEX Track Box. *International Conference on Transportation Geotechnics and Geoecology (to be published)*.

Fryba, L. (1999). *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. London: Thomas Telford Limited.

García de la Oliva, J.L., y Moreno, J. (2019). Instrumentación de obras ferroviarias. Patologías y comportamiento de las diferentes capas de asiento. *Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*, nº 198, pp. 3-23.

Kausel, E., Estaire, J., y Crespo-Chacón, I. (2020). Proof of critical speed of high-speed rail underlain by stratified media. *Proceedings of the The Royal Society A*. 476: 20200083. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0083>

Kish, A. (2011). On the Fundamentals of Track Lateral Resistance. *2011AREMA/Railway Interchange Conference, September 18-21, Minneapolis, USA*.

Manzanas, J., Moreno, J., Cuéllar, V., Andreu, M.A., y Navarro, F. (2007). CEDEX's experimental facility for testing railway tracks. *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 4, pp. 2037-2055.

Ministerio de Fomento (2015). Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal. BOE, 4 de agosto de 2015.

Samavedam, G., Sluz, A., y Kish, A. (1999). The effect of realignment on track lateral stability. *Proceedings of the AREMA 1999 Track & Structures Annual Conference, 12-15 September 1999, Chicago, USA*.

UIC (2020). IRS 70719: Railway Application. Track & Structure. *Earthworks and track bed layers for railway lines - Design and construction principles*.

La tecnología satelital en el ferrocarril

The Satellite Technology for Railways

Álvaro Herrero Porteros¹, Antonio Águila Martínez-Casariago², Juan Gabriel Arroyo Parras³, Francisco Javier Carvajal Pérez⁴, José Conrado Martínez Acevedo⁵, Ramiro Valdés Álvarez de Palencia⁶, Jaime Pereira Ballesteros⁷, Ricardo Campo Cascallana⁸, José Bueno Pérez⁹, Pedro Agudo Madurga¹⁰

Resumen

La aplicación de las tecnologías satelitales al ferrocarril abre un horizonte de posibilidades nuevas y muy atractivas que van desde la localización de los trenes hasta el desarrollo de sistema de seguridad de bajo coste para líneas de tráfico débil. Hace tiempo que el sector está trabajando en el desarrollo de balizas virtuales, en mejorar la precisión de la localización evitando las zonas oscuras y en toda una gama de análisis, simulaciones y herramientas para aplicaciones ferroviarias. Numerosos proyectos muestran los esfuerzos europeos para superar las limitaciones de los sistemas actuales con tecnologías de última generación basadas en GNSS. Los avances en las investigaciones y las pruebas de campo realizadas con material rodante en entorno real han probado la idoneidad del sistema europeo Galileo frente al norteamericano GPS y el ruso GLONASS. Sin embargo, las aplicaciones comerciales están todavía lejos, y es necesario seguir avanzando en el desarrollo y la experimentación de nuevas funcionalidades y sobre todo en la resolución de los inconvenientes técnicos, algunos de los cuales están relacionados con la configuración de la infraestructura y su entorno geográfico. En este artículo se exponen los trabajos en tecnologías satelitales para el ferrocarril llevados a cabo por el Cedex, Ineco y Adif con los proyectos ERSAT GGC, GATE4RAIL y RAILGAP, precedidos por una introducción por parte del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).

Palabras clave: tecnología satelital, GNSS, Galileo, ERTMS, baliza virtual, geolocalización, ferrocarril.

Abstract

The application of satellite technologies to railroads opens up a horizon of new and very attractive possibilities, ranging from train location to the development of low-cost security systems for lines with weak traffic. The industry has long been working on the development of virtual balises, on improving location accuracy by avoiding dark areas, and on a whole range of analyses, simulations and tools for railway applications. Numerous projects demonstrate European efforts to overcome the limitations of current systems with state-of-the-art GNSS-based technologies. Advances in research and field tests on rolling stock in real environment have proven the suitability of the European Galileo system against the American GPS and the Russian GLONASS. However, commercial applications are still a long way off and further progress is needed in the development and testing of new functionalities and, above all, in the resolution of technical drawbacks, some of which are related to the configuration of the infrastructure and its geographical environment. This paper presents the work on satellite technologies for railroads carried out by Cedex, Ineco and Adif with the ERSAT GGC, GATE4RAIL and RAILGAP projects, preceded by an introduction by the Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda (MITMA).

Keywords: Satellite technology, GNSS, Galileo, ERTMS, virtual balise, geolocation, railways.

1. INTRODUCCIÓN: LA TECNOLOGÍA SATELITAL EN EL TRANSPORTE

Las prioridades generales de una política de transportes comprenden áreas diversas. Por un lado, la digitalización es la vía por la cual se llega a la necesaria evolución tecnológica del transporte para responder a las necesidades y expectativas de los usuarios y de las administraciones públicas. En este primer grupo hay que tener en cuenta, además, la aplicación de medidas efectivas de sostenibilidad medioambiental para reducir progresivamente la huella de carbono del transporte. Una y otra, finalmente, deben asociarse a seguir mejorando los ya de por sí altos niveles de seguridad del sistema de transporte.

La aplicación de las tecnologías relacionadas con los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) se han revelado de gran utilidad para desarrollar estas prioridades y llevarlas a un estadio que permita implementar acciones concretas que redunden en una eficacia y una eficiencia mayores del sistema de transporte. Así, se abren las vías para optimizar las infraestructuras de transporte con

* Mail: mariano.martinez@adif.es

¹ Ingeniero de caminos, canales y puertos. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).

² Ingeniero técnico de telecomunicaciones. INECO.

³ Ingeniero técnico en Topografía. Máster en Geodesia por satélites y Geofísica aplicadas a la Ingeniería y Geología. INECO.

⁴ Ingeniero informático. INECO.

⁵ Ingeniero Industrial eléctrico y mecánico. Subdirección de Innovación Estratégica ingeniero industrial. ADIF.

⁶ Ingeniero industrial. ADIF.

⁷ Ingeniero industrial. ADIF.

⁸ Ingeniero industrial. LIF/CEDEX.

⁹ Doctor ingeniero naval. LIF/CEDEX.

¹⁰ Doctor en Física de Materiales. Máster en Sistemas Ferroviarios. LIF/CEDEX.

la definición y la aplicación de estrategias de información y de gestión basadas en GNSS. En segundo lugar, estas tecnologías favorecen el desarrollo de la multimodalidad multiplicando las opciones de integración de las redes de transporte. Por último, la seguridad en el transporte de viajeros y mercancías tiene un campo de progresión evidente con la aplicación de sistemas basados en GNSS o apoyados por este.

El origen de los sistemas GNSS en Europa se encuentra en la incapacidad de los sistemas satelitales de entonces para dar una respuesta satisfactoria a las necesidades de evolución tecnológica que viene impuesta por el aumento de la demanda, entre otros factores. La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha puesto de manifiesto las limitaciones de las radioayudas ante el aumento del tráfico aéreo. Esta diversidad tiene inconvenientes técnicos y económicos. Sin embargo, plantearse soluciones basadas en GNSS a partir de los sistemas GPS americano, GLONASS ruso o Beidou chino no es posible, ya que no cumplen con los requisitos exigidos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad. En el plano económico, se producen perturbaciones que impiden generar las economías de escala que se obtendrían con un único sistema. La solución parece saltar a la vista: utilizar en una primera fase un solo sistema basado en EGNOS (sistema de aumentación sobre territorio europeo), desarrollado por la Unión Europea y, en una fase posterior, usar Galileo, es decir, un sistema plenamente soberano europeo. Esto no quiere decir, en ningún caso, que las aplicaciones críticas de transporte no vayan a seguir descansando sobre 2 o 3 capas de seguridad, independientes entre sí, para garantizar los altos estándares de seguridad que se exigen en caso de fallo.

El cuadro siguiente muestra las limitaciones del sistema GPS en el ámbito de los transportes.

Tabla 1. Limitaciones del GPS en los transportes

APLICACIÓN DE TRANSPORTE	INTEGRIDAD	DISPONIBILIDAD	PRECISIÓN
Navegación marítima oceánica	Sí	Sí	Sí
Navegación marítima costera	Sí	Sí	Sí
Entrada en puerto	No	No	No
Navegación interior y fluvial	No	No	No
Navegación terrestre en autopistas	Sí	Sí	Sí
Respuesta de emergencias	Sí	Sí	Sí
Gestión de tránsito de vehículos terrestres	No	No	No
Control de trenes	No	No	No
Ruta aérea oceánica	Sí	Sí	Sí
Ruta aérea continental	No	No	Sí
Aproximación aérea de no precisión	No	No	Sí
Aproximación aérea de precisión	No	No	No

Lo que hace a Galileo diferente de otros sistemas en su aplicación al transporte es que, a diferencia del GPS o el GLONASS que solo disponen de servicio abierto y servicio militar, es el único programa GNSS que ha sido diseñado específicamente para dar respuesta a diferentes grupos de usuarios, teniendo muy en cuenta a los del transporte, ofreciendo distintos servicios (abierto, alta precisión, autenticado, gubernamental, emergencias, *Search and Rescue*, etc.). Además, permite una implicación y participación directa de terceros países tras un proceso de negociación, lo que facilita su aceptación en cualquier parte del mundo.

Por otro lado, en su arquitectura de gestión se ha tenido en cuenta un aspecto fundamental de cara a las autoridades encargadas de certificar, acreditar y autorizar usos críticos en los que la vida humana está en riesgo, como sucede con el transporte: existe compromiso jurídico de calidad de servicio y existen responsabilidades en caso de accidente causado por un fallo del sistema. Esta es una diferencia fundamental con los demás sistemas de posicionamiento militares existentes.

En el plano técnico, dispone de ventajas específicas, tales como sus mayores prestaciones, mejor posicionamiento en interiores (*indoors*), mejor posicionamiento en zonas cercanas al Ecuador que presentan una actividad ionosférica muy fuerte y mejor posicionamiento en zonas de altas latitudes que están llamadas a desempeñar un papel cada vez más importante como consecuencia del derretimiento de los casquetes polares. Además, en cuanto a aplicaciones en áreas metropolitanas, ha demostrado un mejor comportamiento en cañones urbanos.

Los sistemas GNSS tienen un peso económico muy importante. Los sectores que generan el 11,3 % aproximadamente de nuestro PIB dependen de GNSS directamente. Y esta cifra aumentaría considerablemente si añadiésemos la dependencia indirecta de infraestructuras críticas. En 2019 generó movimientos de mercado en el campo de las aplicaciones por valor de 235.000.000 €/año, de los cuales cerca del 60 % corresponden al transporte y una gran parte del 40 % restante a movilidad.

Sus aplicaciones en el transporte alcanzan a la aviación, el transporte por carretera, la navegación y el salvamento marítimo y, por supuesto, al ferrocarril. Con respecto a este último, es especialmente adecuado para optimizar la logística, mejorar la gestión del parque motor y remolcado, y en servicios de información al viajero. Y se ha revelado de gran utilidad para elevar notablemente el nivel de seguridad con un coste muy bajo en líneas modernas y antiguas. En términos generales, las aplicaciones ferroviarias basadas en GNSS se pueden dividir en dos grupos. Por un lado, están aquellas que mejoran el servicio y aumentan la seguridad, como por ejemplo las balizas virtuales de ERTMS, a las que podemos considerar como críticas. Por otro lado, hay aplicaciones no críticas, como la geolocalización de elementos para mantenimiento, trazabilidad de vagones, información al viajero, etc.

El uso de GNSS supone para el sector ferroviario retos transversales y otros de índole técnica. Las aplicaciones relacionadas con la protección, la ciberseguridad, la normativa legislativa y reglamentaria, la estandarización o la agilidad en los procesos de implementación, corresponden al primer grupo. Con el segundo están relacionadas aquellas otras tales como el tratamiento de las interferencias, el

efecto *multipath*, la integridad de la señal de satélite, la resolución de las zonas oscuras para la comunicación, como los túneles y las montañas, las líneas de alta complejidad, con bifurcaciones y cruces, o la precisión en el reconocimiento de líneas paralelas y estaciones.

El futuro de la aplicación de los sistemas GNSS en el ferrocarril tiene hitos reconocibles a corto, medio y largo plazo. Los más próximos son los avances en la localización del tren con la mayor precisión posible, lo cual permitirá aumentar la capacidad de las vías. Otro hito es el desarrollo de la baliza virtual basada en la transmisión continua de datos PVT que redundará en un ahorro de costes. Por último, la detección de movimientos del material rodante mientras el equipo ETCS de a bordo está desconectado, lo que se conoce como *Cold Movement Detection* (CMD). A medio plazo se sitúa el desarrollo del ERTMS nivel 3, cuya característica definitoria es el cantonamiento móvil y que tendrá el efecto de gestionar la capacidad de las líneas en términos mucho más elevados que los actuales. A largo plazo se sitúa el objetivo del tren autónomo, aunque ya hay algunas iniciativas en este campo. Así, el Río Tinto Driverless Cargo Line, cuenta con 1.700 kilómetros de vías y 220 locomotoras monitorizadas, y registra un tráfico de datos de 12 Gb/día con una lógica de detección de trenes automática basada en ERTMS/ETCS nivel 2. Con esta arquitectura, Río Tinto ha desarrollado modelos predictivos para detectar posibles fallos en operaciones próximas y recomienda acciones de mantenimiento cuya aprobación final está en manos del personal técnico, como es lógico.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ERSAT GGC

2.1. Conceptos fundamentales

El posicionamiento mediante satélite funciona triangulando las señales recibidas de varios satélites. Estos sistemas, a partir de una determinada infraestructura (estaciones en tierra, satélites GEO en caso de SBAS [i.e. EGNOS], etc.) son capaces de calcular una serie de correcciones y transmitir las al usuario para así, junto con las observaciones GNSS tradicionales, obtener una solución de posicionamiento con mayor precisión, a la vez que le otorgan un extra de robustez en la confiabilidad (integridad, disponibilidad, continuidad) de la solución.

Una comparación entre el sistema europeo Galileo, el norteamericano GPS y el ruso GLONASS arroja datos interesantes. Galileo funciona con 30 satélites en tres planos orbitales, a una altitud aproximada de 23.000 kilómetros, una inclinación orbital de 56 grados y un margen de error

en la localización inferior a 4 metros. El GPS tiene 24 satélites (32 nominales) en 6 planos orbitales, a una altura de unos 20.000 kilómetros y 55 grados de inclinación orbital. Su margen de error es de entre 5 y 10 metros. GLONASS funciona con el mismo número de satélites que el GPS (29 nominales), a una altura de unos 19.000 kilómetros y 65 grados de inclinación orbital. Es el que ofrece una localización meso precisa, con un margen de error de entre 10 y 15 metros. Así pues, la alternativa para Europa parece ser Galileo, especialmente porque es el sistema que ofrece mayor precisión en el posicionamiento.

La participación de las empresas del Grupo Fomento en los proyectos relacionados con las aplicaciones ferroviarias de Galileo y en concreto en los programas de I+D de la GSA (European Global Navigation Satellite Systems Agency), viene impulsada desde el MITMA. La idea inicial es superar las limitaciones de las tecnologías ERTMS nivel 1 y 2, dada la necesidad de consolidar las inversiones en las líneas de AV. La Unión Europea promueve la sustitución de los sistemas nacionales por un estándar de ERTMS *low cost* para las líneas con menor densidad de tráfico. Hay ya iniciativas europeas, como la que lideran Hitachi (Ansaldo) y RFI con una línea piloto en Cerdeña y otra planteada entre Novara y Rho (Italia).

Los resultados del proyecto ERSAT GGC son múltiples. Entre otras cosas, se ha desarrollado un procedimiento y un conjunto de herramientas de laboratorio que se pueden aplicar en cualquier línea para su caracterización en el despliegue de balizas virtuales. Además, se han hecho campañas de medida en tres países obteniendo muchos datos interesantes. Estas herramientas tienen unas características definidas en tres áreas:

- Conjunto de técnicas de análisis de la señal de satélite registrada por los receptores:
 - Detección de Multi-path
 - Detección de Non Line Of Sight (bloqueo)
 - Detección de interferencias de RF
 - Observación de la relación señal/ruido
 - Observación del control de ganancia automática
 - Análisis de la calidad de la señal
- Técnicas de análisis de métodos complementarios:
 - Detección de interferencias de RF con analizador
 - Visibilidad de cielo abierto con cámara ojo de pez
 - Monitorización de los satélites estado de GPS mediante EGNOS
- Técnicas de análisis de métodos de simulación con modelos 3D del terreno (GNSS4Rail):
 - Digitalización de trazados

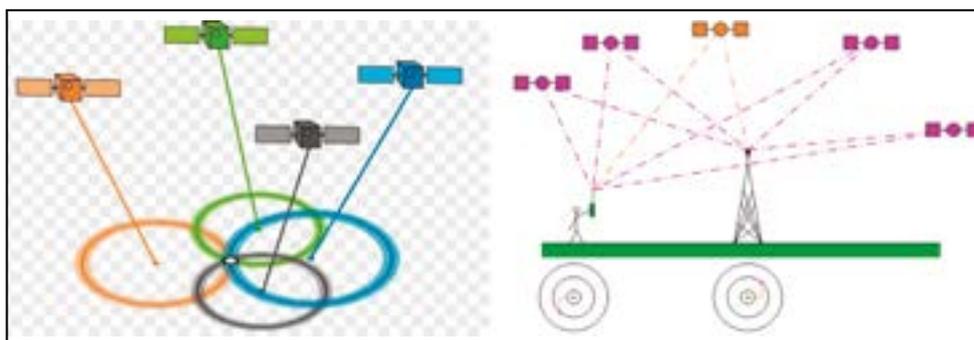


Figura 1. Posicionamiento mediante satélite (izda) y sistema de aumentación de la señal (dcha).



Figura 2. Errores en la localización en puentes metálicos.

- Cálculo de visibilidad de satélites
- Cálculo de la HDOP de los satélites
- Obtención de NLOS (*non-line-of-sight*)
- Utilización de Simulaciones pasadas y futuras (prognosis)

Hasta el momento, resultados similares a los obtenidos en el proyecto ERSAT GGC solo han sido implementados por Hitachi/Ansaldo, aunque hay otros enfoques, por ejemplo, en una línea de mercancías de Australia, fuera de Europa.

En cuanto a su aplicabilidad, se puede utilizar en cualquier línea, permite eliminar las balizas físicas de relocalización y diseñar aplicaciones de ERTMS de bajo coste, con una mejora notable de la odometría. Existen restricciones, sin embargo, que vienen dadas por el alcance del sistema, que no cubre el 100 % de los casos y necesita sistemas de respaldo para la localización, y por el coste de desplegar GSM-R allí donde no lo haya, lo cual podría ser inasumible. Aun así, ERSAT es una opción de futuro para las comunicaciones ferroviarias porque marca el límite de obsolescencia del Tren Terra y del propio GSM-R, que será sustituido por el FMRCs, basado en 5G. Quedan por afrontar los retos que se plantean en el posicionamiento del tren, tales como cubrir todos los casos de uso posibles, integrarse con ERTMS nivel 3, resolver las limitaciones de los circuitos de vía y las mejoras deseables en la odometría.

2.2. Balizas virtuales para los trenes europeos

Un consorcio integrado por 14 empresas de cinco países de la UE ha desarrollado ERSAT GGC, un ambicioso proyecto financiado por la Agencia Europea de Navegación por Satélite (GSA, por sus siglas en inglés) que permitirá implantar la tecnología de satélite en el sistema europeo de gestión del tráfico ferroviario (ERTMS) a través de balizas virtuales. En diciembre de 2017 comenzaba este proyecto europeo dentro del programa H2020 con una duración de 24 meses. Los 14 miembros del consorcio son: RFI (coordinador del proyecto), Hitachi STS (antes Ansaldo, coordinador técnico), RINA, Trenitalia, Radiolabs, Italcertified y Bureau Veritas por Italia; ADIF, CEDEX e INECO por España; IFSTTAR y SNCF por Francia; DLR por Alemania y UNIFE por Bélgica.

El objetivo final era contribuir a la estandarización del proceso de certificación para la adopción de sistemas de navegación mediante satélites (GNSS) en el estándar de los sistemas de gestión del tráfico ferroviario ERTMS (*European Rail Traffic Management System*). El alcance

del proyecto fue muy ambicioso y permitió trabajar en la consolidación de una arquitectura funcional ERTMS mejorada que incluyese GNSS, estudios de seguridad, la definición de un procedimiento para la clasificación de líneas ferroviarias en relación con la *baliza virtual*, el desarrollo de un set de herramientas para ayudar en esa clasificación, campañas de medidas en tres países (Francia, España e Italia), análisis de los datos en los laboratorios, una evaluación de la arquitectura, un procedimiento y herramientas por NoBOs (*Notified Bodies*) independientes y, por último, la difusión de los resultados y actividades del proyecto en diferentes foros nacionales e internacionales.

El concepto de *baliza virtual* se lleva desarrollando desde hace varios años en proyectos previos lanzados por la GSA, ESA y Shift2Rail, y consiste en dar información de posicionamiento del tren por medio de las señales GNSS, en lugar de las balizas físicas que requiere el ERTMS. Para ello, el equipo embarcado constará de un nuevo módulo llamado *Virtual Balise Reader* (VBR), que procesará las señales GNSS y comparará las coordenadas GNSS con la lista de coordenadas a bordo, reportando a la eurocabinas la baliza virtual correspondiente cuando se alcancen las coordenadas almacenadas para ella. De este modo, se podrá reducir el número de balizas físicas instaladas en las vías, con el consiguiente ahorro en tareas de instalación y mantenimiento, evitación de robos, etc., por parte de los administradores de infraestructuras, (Adif en el caso español). En ese sentido, es necesario contar con una recepción adecuada de la señal GNSS en los puntos donde se instalarían las balizas físicas, por lo que se requiere caracterizar las líneas ferroviarias en función de la «calidad» de la señal GNSS recibida en cada tramo.

El procedimiento identificó los tramos y puntos donde es viable desplegar una baliza virtual de manera que las prestaciones de la señal GNSS en términos de disponibilidad y precisión fuesen las requeridas. La participación de las empresas españolas en ERSAT GGC se ha distribuido de manera que CEDEX ha colaborado en la campaña de medidas, integrando las herramientas en su laboratorio y analizando los resultados de las distintas campañas, con lo que ha contribuido de manera notable en la demostración al cliente. Por su parte, Adif ha comprado los equipos necesarios para la campaña y ha proporcionado una línea y un tren laboratorio donde realizar las medidas que luego se analizarían.

Por último, Ineco ha tenido un papel clave al participar en casi todos los paquetes de trabajo, aportando su conocimiento en las áreas de GNSS y ERTMS, dada su

experiencia en proyectos previos como GRAIL, GRAIL 2, NGTC y STARS. En particular, su contribución ha incidido en la consolidación de la arquitectura funcional ERTMS, la definición del procedimiento de clasificación de líneas, el desarrollo de varias herramientas del *toolset*, la participación en la campaña de medidas españolas, el análisis de los datos de las campañas italiana y española, y finalmente, la demostración con el cliente y las actividades de difusión.

2.3. Baliza virtual

El principal concepto desarrollado para las operaciones ferroviarias basadas en el GNSS es el de *baliza virtual*. Actualmente el posicionamiento y la gestión del tráfico ferroviario se basan en cantones y balizas a lo largo de la vía. La baliza virtual mantiene el concepto actual de operaciones e interoperabilidad con los sistemas de control de trenes de trenes basados en balizas heredadas.

Es una cuestión clave para garantizar el rendimiento requerido de los sistemas GNSS en términos de disponibilidad y precisión, analizar las localizaciones posibles de las balizas virtuales a lo largo de la infraestructura. Hay que identificar los factores que contribuyen a la degradación del rendimiento de un sistema de navegación por satélite y los tramos de vía afectados. Aquí juegan un papel relevante dos tipos de factores. Por un lado, los factores globales, como son el estado de los satélites y los errores debidos a la ionosfera, troposfera, errores en los relojes,

efectos relativistas de la constelación. Por otro lado, los factores de índole local: interferencias de radio, multitrayectoria, pérdidas de visibilidad con los satélites (NLOS), ciberataques, etc.

El uso de GNSS para operaciones ferroviarias depende en gran medida de la configuración del entorno. Hay escenarios urbanos, semiurbanos o rurales en los que las condiciones degradadas son altamente probables a lo largo de la infraestructura, incluso cuando esta presenta menos complejidad. De ahí la necesidad de clasificar e identificar los factores que contribuyen al funcionamiento en condiciones degradadas según la probabilidad de ocurrencia y las medidas de mitigación posibles. Así, se ha identificado como factores principales:

- Las posiciones relativas de los satélites utilizadas para calcular la ubicación por un receptor GNSS, que se miden mediante la Dilución Geométrica de Precisión (GDOP).
- Las obstrucciones de terreno u obstáculos (edificios, túneles, árboles, etc.), que limitan el número de satélites visibles por los receptores (NSV).

De aquí se desprende que los principales factores que contribuyen a la degradación del rendimiento están relacionados con: a) el entorno terrestre (principalmente), b) la posición relativa de los satélites con respecto a la infraestructura, y c), el tiempo de operación. El proyecto no tenía por objeto corregir ni mitigar un sistema de

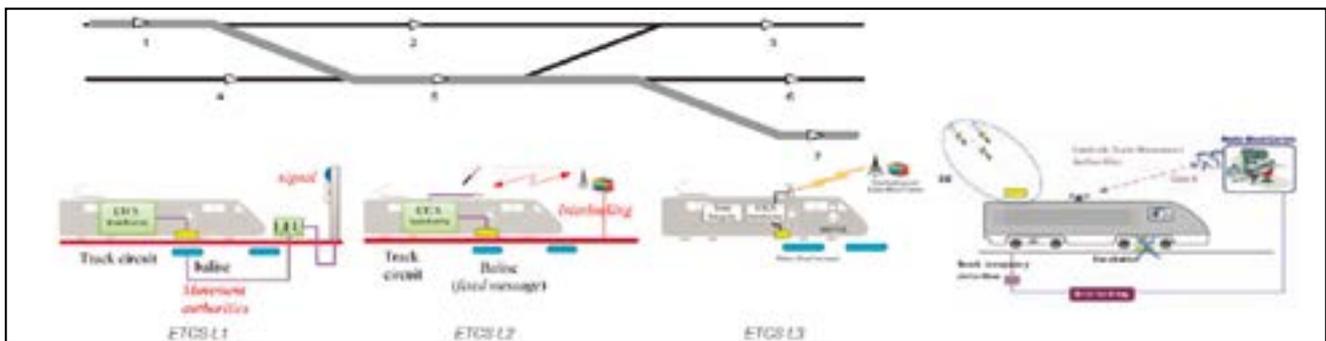


Figura 3. Esquema de funcionamiento de la baliza virtual (Fuente: proyecto STARS, documentos 5.1 y 5.3).



Figura 4. Parámetros y esquema básico de la herramienta GNSS4RAIL.

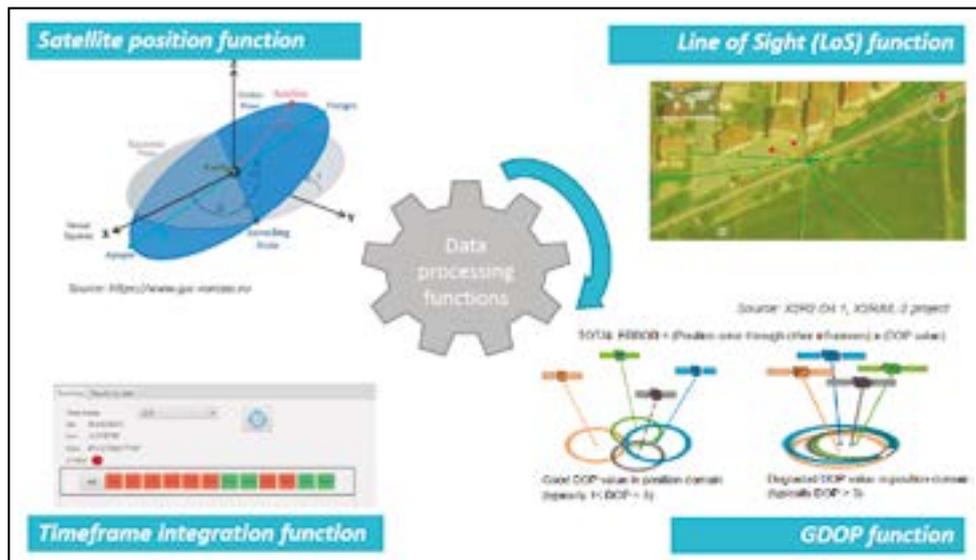


Figura 5. Funciones de la herramienta GNSS4RAIL.

aumentación con mensajes de GNSS, o actuar sobre los algoritmos de los receptores (frecuencia dual, modelo ionosférico, RAIM, etc.), sino calcular la visibilidad de los satélites a lo largo de un trazado con una herramienta de simulación adecuada. Las figuras 4 y 5 muestran la arquitectura y el funcionamiento básico de la herramienta GNSS4RAIL, desarrollada por Ineco.

GNSS4RAIL hace un estudio espaciotemporal con las salidas siguientes:

- Estudio de un punto kilométrico de la infraestructura + tiempo instantáneo (tiempo instantáneo para un solo punto)
- Punto kilométrico + estudio temporal (análisis temporal para un solo punto)

- Infraestructura + Estudio temporal (análisis temporal y espacial a lo largo de la infraestructura)
- Estudio de la infraestructura (análisis espacial para una operación de base temporal)

Esta información sirve de entrada para la fase de planificación, en la que se diseña un plan de despliegue de las balizas virtuales a lo largo de la infraestructura. De aquí se pasa a la fase operativa, que comprende una previsión del rendimiento de las balizas virtuales y una previsión de su viabilidad para la explotación ferroviaria. La figura 6 muestra algunos casos de uso de la herramienta.

Las pruebas del sistema se han llevado a cabo con un tren laboratorio de Adif modelo Talgo BT. Las figuras de 7 a 11 muestran el tipo de tren, el ciclo de comunicaciones

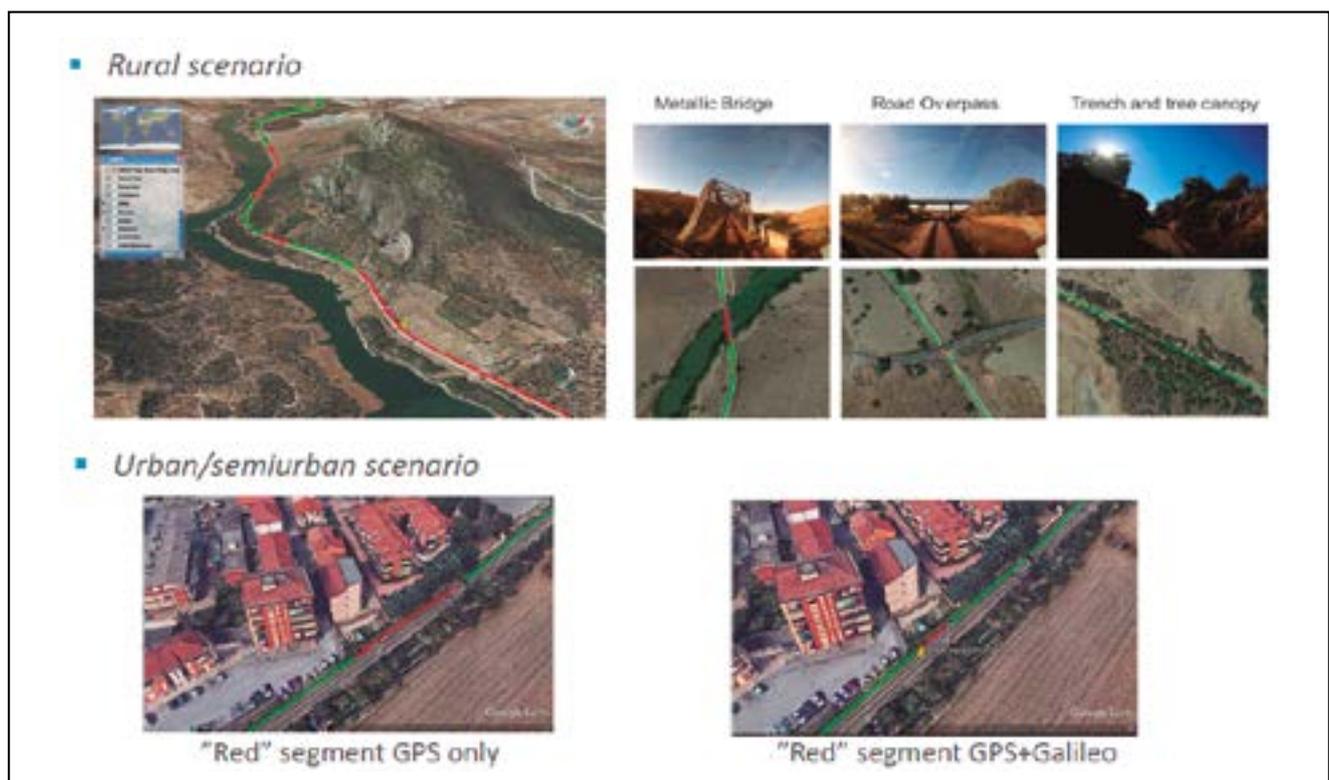


Figura 6. Casos de uso de la herramienta GNSS4RAIL.

de la baliza virtual en sustitución de las balizas físicas de ERTMS, el emplazamiento de los dispositivos en el tren,

una imagen real de las pruebas en línea y los miembros del equipo de pruebas de Ineco.

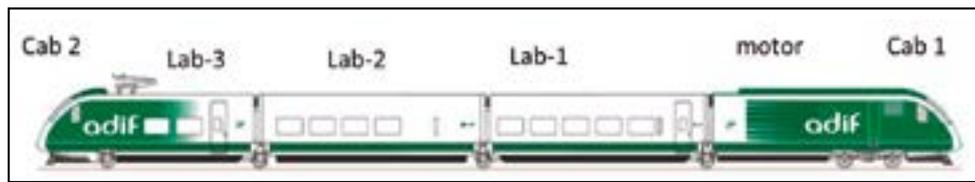


Figura 7. Tren laboratorio de Adif modelo Talgo BT.

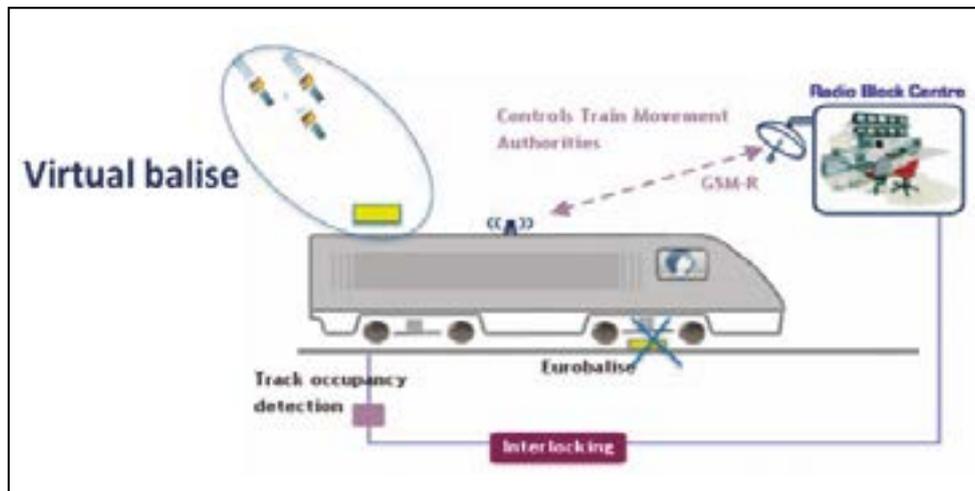


Figura 8. Ciclo de comunicaciones con la baliza virtual.

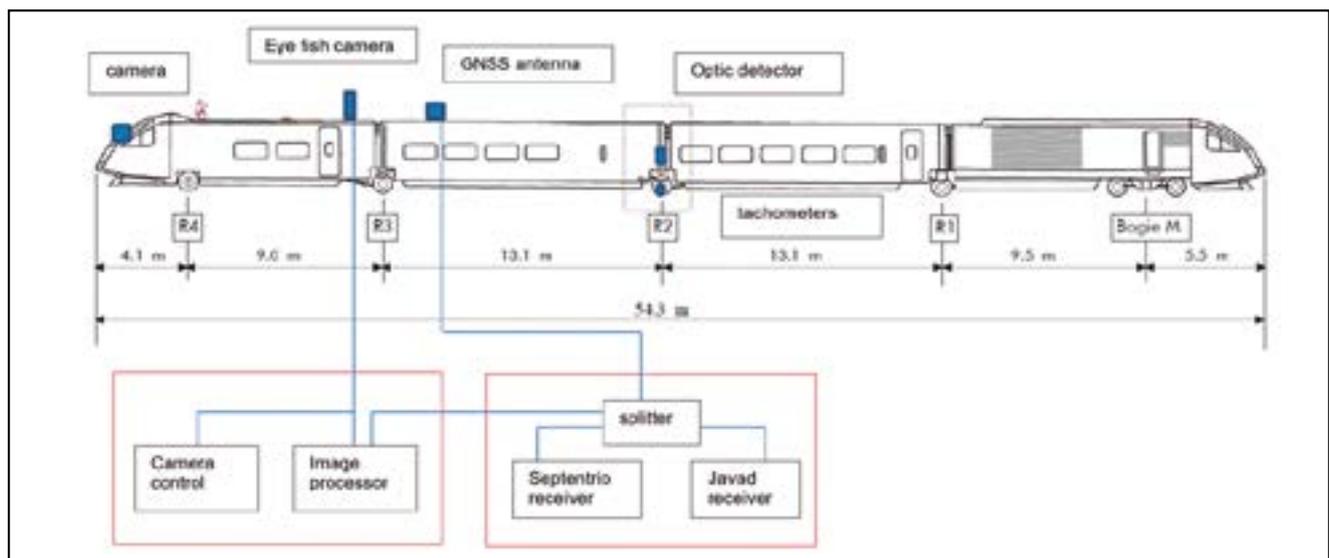


Figura 9. Esquema del emplazamiento de los dispositivos en el tren de pruebas (modelo Talgo BT).



Figura 10. Pruebas en línea con tren laboratorio de Adif (modelo Talgo BT).



Figura 11. Equipo de pruebas de Ineco.

2.4. Campaña de medidas en España

Para la campaña de pruebas en España, Adif seleccionó una línea dotada con un sistema de Bloqueo Telefónico (BT) y con baja densidad de circulaciones: la línea nº 528 de la Red Convencional de Almorchón (Badajoz) a Mirabueno (Córdoba). Es una línea clasificada en el tipo E, con una longitud total de 130,1 kilómetros y sin electrificar. Los recorridos de prueba se hicieron en el tramo Almorchón - La Alhondiguilla, que tiene una longitud de 94 kilómetros y una velocidad máxima de 60 km/h. La coordinación de ADIF, INECO, CEDEX, IFSTTAR y DLR, fue clave para el éxito de la campaña española.

Se realizó un ensayo estático de calibración de 12 horas y 20 recorridos durante 10 días de campaña en diferentes

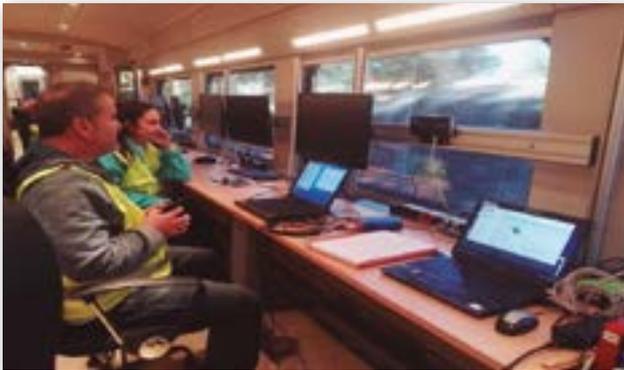


Figura 12. Análisis de datos en el tren de pruebas.



Figura 13. Sistema de IFSTTAR (socio francés), para análisis de imágenes cenitales.

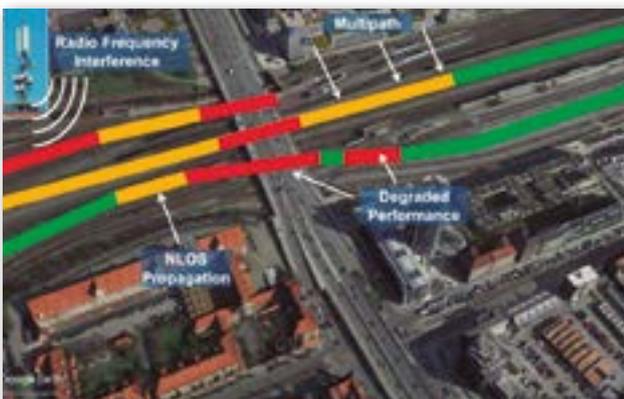


Figura 14. Zonas de cobertura durante el proceso de transmisión (Fuente: proyecto ERSAT GGC).

horarios para cubrir las distintas posiciones de los satélites tanto de la constelación GPS como de Galileo. Con todos los datos tomados (señales GNSS, imágenes y odometría), se pasó a una fase de análisis, donde el set de herramientas desarrolladas también en el proyecto permitiría clasificar la línea con relación a las principales amenazas locales de la señal GNSS en líneas ferroviarias: interferencias, *multi-path*, NLOS y prestaciones degradadas. Todas las medidas se hicieron en un tren Talgo laboratorio (BT-02), que se equipó con:

- Antena GNSS: AntCom G8-PN
- Receptor GNSS: Javad Delta3
- Receptor GNSS: Septentrio AsteRx2e
- Splitter
- Portátiles
- UPS
- Cámara de vídeo
- Sistema *ojo de pez*

2.5. Desarrollo de herramientas (simulador de prestaciones degradadas)

Ineco ha contribuido en el desarrollo de las diferentes herramientas con las que clasificar las zonas de las líneas de tren en verdes, amarillas o rojas, para la colocación de la baliza virtual. En concreto, se han desarrollado dos herramientas para integrarlas en el proyecto:

1. **SBAS_Health_Monitoring_Tool (SHMT):** asigna a cada satélite GPS un estado *health status* mediante el análisis del mensaje recibido de EGNOS (sistema de aumentación GNSS europeo).
2. **GNSS4Rail:** herramienta de simulación que permite gestionar un modelo 3D muy preciso del entorno de la línea ferroviaria (tanto en entornos rurales como en urbanos) basado en un modelo digital de superficie y la capacidad de lanzar simulaciones puntuales o temporales a lo largo de toda la línea (o parte de ella), con diferentes constelacio-

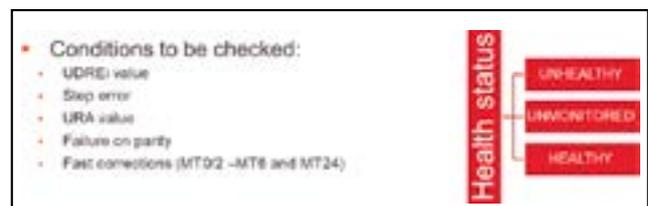


Figura 15. Lista *checking* del SHMT.

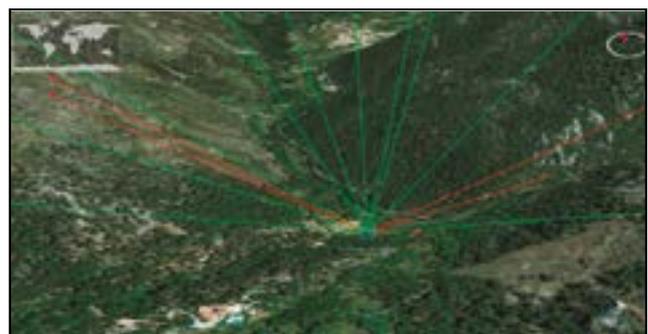


Figura 16. Satélites obstruidos por el terreno en la línea española.

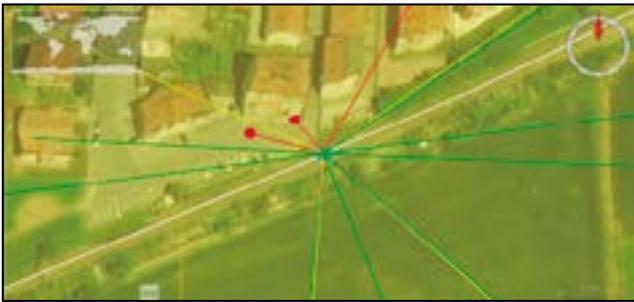


Figura 17. Satélites obstruidos por edificios en la línea italiana.

nes GNSS (GPS, Galileo) y para cualquier marco temporal.

La capacidad de prognosis es una clara ventaja frente a otras aplicaciones que solo analizan datos reales estáticos pasados.

La herramienta de clasificación de la línea se ha estructurado en seis bloques:

1. Toma de datos: se basa en un registro de datos en campo mediante la utilización de equipos de recepción de señal GNSS instalados en la BT y definidos dentro del marco del proyecto.
2. Técnicas de detección de señal GNSS: desarrollo de una herramienta donde se aúna la aplicación de diversos métodos, las técnicas de detección de amenazas GNSS locales y los rendimientos en condiciones degradadas, aplicados al entorno ferroviario (y configurados para cada tipo de receptor).
3. Evaluación global de los recorridos: mapeo de los resultados en el dominio de la vía (trayectoria) que permita la evaluación conjunta de todos los recorridos realizados en diferentes condiciones espacio-tiempo de satélites.
4. Lógica de decisión: a los resultados del análisis anterior se les aplica una lógica de decisión con el

objetivo de generar los resultados finales de la clasificación de la vía.

5. Clasificación global: los resultados finales de la de la herramienta se registran en una base de datos accesible por los socios. Esta información reúne los datos considerados para la clasificación de la línea en función de su calidad de señal GNSS acorde a las técnicas de detección implementadas evaluadas globalmente en todos y cada uno de los recorridos.
6. Codificación de colores de la línea: en un último paso y una vez analizadas todas las condiciones dinámicas con respecto a la posición de los satélites, se clasifica la línea mediante un código de colores (verde, rojo y amarillo) en función de la calidad de la señal GNSS recibida.

Dentro de los requisitos de los receptores cabe destacar que, para la aplicación de los métodos y técnicas de detección, éstos han de ser: multi-constelación, multifrecuencia (compatibles con EGNOS) y sistemas de registro internos para la detección de interferencias. En la campaña de pruebas española se utilizó el receptor JAVAD Delta-3.

En relación con el resto de técnicas de detección de amenazas, se encuentran:

- Analizador de espectro: detección de interferencias tanto dentro como fuera de las bandas GNSS.
- Evaluación del Control Automático de Ganancia: mecanismos de evaluación alta sensibilidad.
- Detección de multitrayectoria: mediante el uso de técnicas de detección a nivel de portadora, relación señal/ruido y distorsión de las medidas de pseudo-rango.
- Detección de la línea de visibilidad directa de satélites (máscara de visibilidad) basados en cámara tipo ojo de pez instalada en el techo del tren.
- Métodos de simulación SW de GNSS basado en el estudio de la visibilidad de satélites y su geometría



Figura 18. Resultado de la simulación en tramo con monte elevado.

considerando los modelos 3D del terreno en amplios escenarios de tiempo.

- Datos de estados de los satélites (SBAS) para determinar la validez de los datos de navegación de cada satélite.

Por último, cabe destacar el trabajo realizado en la fusión de todos los datos recogidos durante la campaña de pruebas, que ha permitido una evaluación global mediante el análisis de las amenazas de GNSS en distintos instantes de tiempo (localización de satélites como fenómenos locales) a lo largo de las líneas ferroviarias.

2.6. Ventajas del simulador

La herramienta GNSS4Rail presenta varias ventajas en la fase de despliegue con respecto a otros sistemas. En primer lugar, proporciona un soporte para el análisis de viabilidad y planificación del despliegue de balizas virtuales en la línea. Permite la identificación preliminar de tramos viables para el despliegue. Hace posible un análisis, tanto a lo largo de la línea ferroviaria (dominio espacial) como para un intervalo de tiempo (dominio temporal). Por último, su empleo permite reducir el número de campañas de adquisición de datos con tren auscultador, sobre todo, gracias al análisis temporal.

En la fase de operación, actúa de soporte como predictor de prestaciones de las balizas virtuales desplegadas. Además, proporciona información pretáctica a la gestión de operaciones ferroviarias basadas en GNSS. Los posibles usos de la herramienta no solo se limitan a la aplicación concreta de la baliza virtual, sino que puede ser utilizada para conocer de antemano cuál será la *cobertura* de la señal GNSS en cualquier punto de una línea y en cualquier momento, y esos resultados se pueden utilizar para otras aplicaciones como la planificación de operaciones, el control de flotas, la información al viajero, ticketing, mantenimiento, etc.

2.7. Tecnología GNSS en ERTMS

El ERTMS será el único estándar de señalización futuro no solo en Europa, sino en todo el mundo, con un máximo nivel de seguridad (SIL4) y multisuministrador.

La reducción de sus costes es el principal reto en el despliegue de este sistema, por lo que la integración de la tecnología GNSS en ERTMS ofrece a su vez ventajas tales como la reducción de los costes del sistema de señalización y los gastos de mantenimiento (reducción del equipo en vía). Por otro lado, la migración de las líneas convencionales a ERTMS con GNSS se convierte en una opción atractiva con mejores prestaciones que vienen dadas por una mejora de la odometría que a su vez redundará en un incremento de la disponibilidad y la fiabilidad del sistema. El resultado final es un aumento de la capacidad de la línea con el nivel 3 de ERTMS.

El uso del posicionamiento por satélite con ERTMS permitirá un despliegue más económico en líneas regionales, contribuyendo a su expansión a la red ferroviaria europea. Por último, hay que destacar que se están llevando a cabo importantes sinergias y colaboraciones con otros proyectos de Shift2Rail (por ejemplo, TD [IP2-TD2.4]) para

implantar la tecnología de satélite en el ERTMS), que revelan el potencial de las tecnologías de posicionamiento por satélite en la próxima generación del ERTMS, y en diferentes proyectos de la GSA, EC y ESA. El éxito de este proyecto es fruto del esfuerzo de un equipo de distintas áreas de Ineco y de la colaboración y entendimiento con otras empresas del MITMA (CEDEX y ADIF). Más información en <http://www.ersat-ggc.eu>



Figura 19. Equipo técnico de la campaña de medidas en la estación de Almorchón (Badajoz).



Figura 20. Demostración con GSA en la línea de Cerdeña.

3. ALGUNOS DETALLES SOBRE EL PROYECTO GATE4RAIL

GATE4RAIL es un proyecto perteneciente al Programa de Innovación Ferroviaria de la Comisión Europea Shift2Rail de 2018, enfocado al ámbito de la señalización ferroviaria y el uso de tecnología GNSS. El proyecto buscaba avanzar en la virtualización de las pruebas del sistema ERTMS basado en posicionamiento mediante satélites (GNSS), federándolas entre diferentes laboratorios europeos de ERTMS y GNSS, hasta cubrir la cadena completa e integrando todos los resultados. El consorcio que lo ha desarrollado estaba integrado por Radiolabs (líder, Italia), Rete Ferroviaria Italiana (RFI), Ifsttar (Francia), M3Systems (Bélgica), Unife (Bélgica), Cedex e Ineco (España), Bureau Veritas Italia (BVI) y Guide (Francia). La labor de Ineco se ha centrado en la especificación de la arquitectura de sistema y la definición de los escenarios y las pruebas; además, también se ha trabajado en el desarrollo e integración de una nueva funcionalidad de GNSS4RAIL (herramienta de desarrollo propio para la simulación de visibilidad de satélites en entornos ferroviarios), dentro del módulo 2 de la arquitectura global para la simulación de la cadena completa.

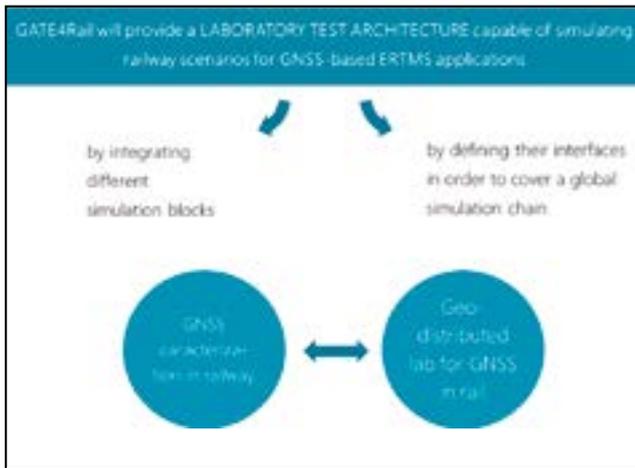


Figura 21. Objetivos del proyecto Gate4Rail.

En la conferencia final del proyecto, se realizaron las presentaciones de los diferentes paquetes de trabajo y de

las diferentes herramientas aportadas por los socios (incluida GNSS4RAIL 2.0). Además, hubo una demostración en tiempo real de cómo funciona la plataforma de laboratorios distribuida.

La participación de Ineco se ha centrado en la herramienta GNSS4RAIL, dentro del módulo 2:

- Desarrollo de la metodología de desarrollo de GNSS para ferrocarril,
 - Tarea 3.3, errores, eventos defectuosos y modelización de vulnerabilidades para componentes de posicionamiento a prueba de fallos: UGE/GUIDE de los datos medioambientales utilizando la información compartida por M3S/CEDEX.
- Creación de una infraestructura de verificación geodistribuida:
 - Tarea 4.1, requisitos para una infraestructura geodistribuida de simulación y verificación: definición de requisitos operativos.

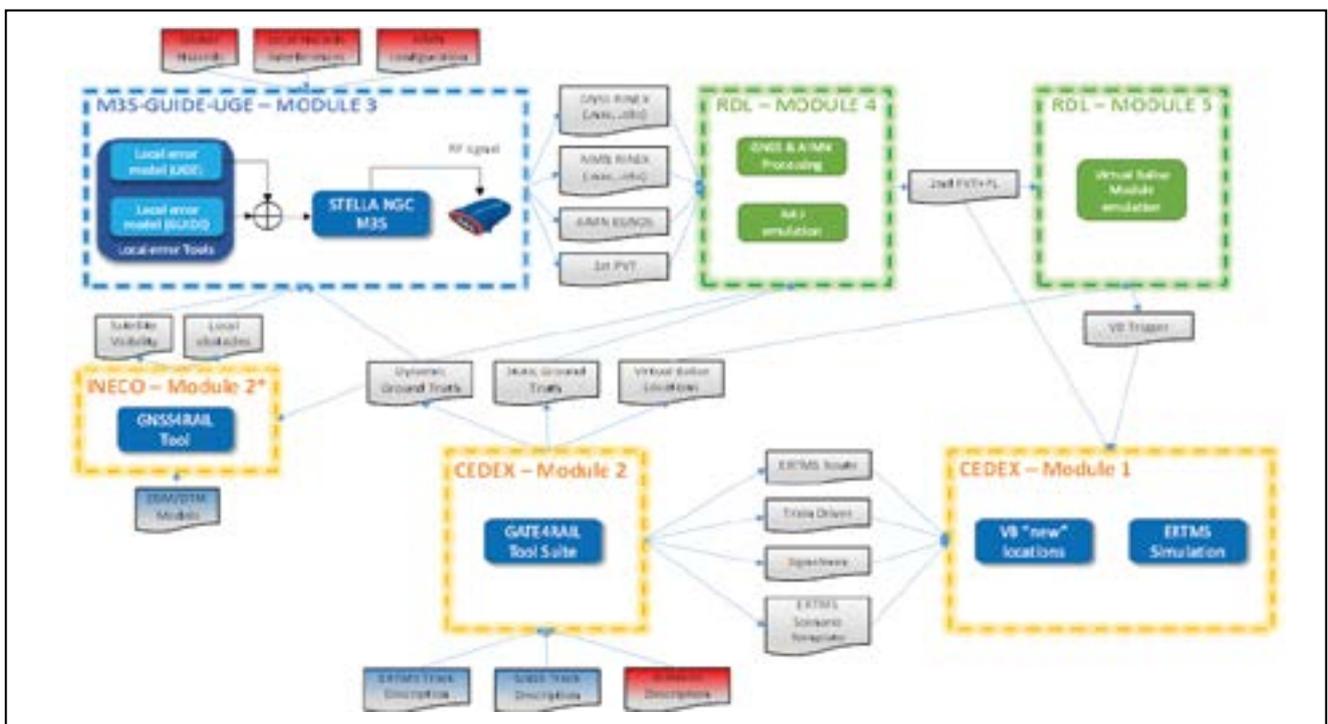


Figura 22. Distribución de los módulos del proyecto Gate4Rail.

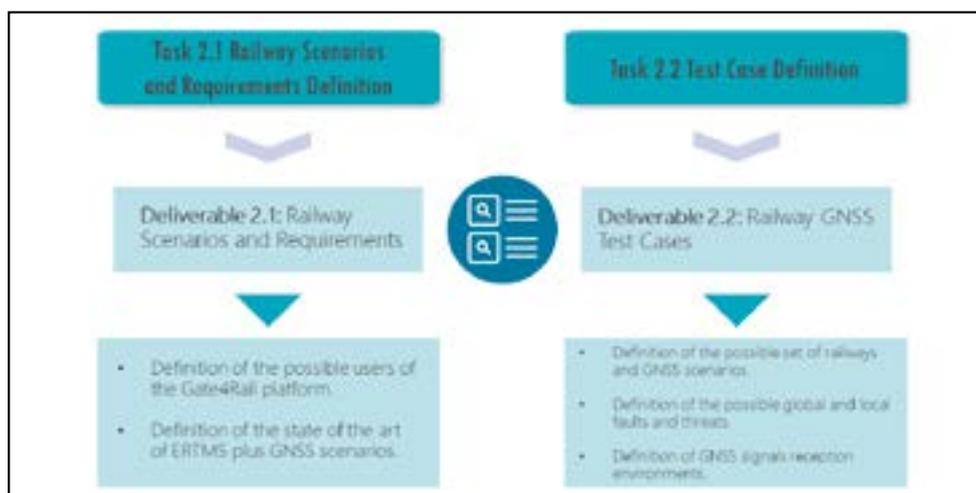


Figura 23. Estructura del laboratorio del proyecto Gate4Rail.

- Tarea 4.2, diseño de la infraestructura geodistribuida de simulación y verificación: definición de interfaces.
- Tarea 4.3, desarrollo y pruebas de la infraestructura geodistribuida de simulación y verificación: máscara de visibilidad de satélite y obstáculos en diferentes escenarios mediante la herramienta GNSS4RAIL actualizada.
- Tarea 5.1, definición conceptual y metodológica para la actualización automática del entorno de pruebas: explicación de la evolución del ERTMS, flujo de automatización de las pruebas.
- Definición del concepto y la metodología para la integración continua, la repetición de pruebas automatizadas y la evolución del sistema:
 - Tarea 6.2, metodología y pruebas para la evaluación automática de los resultados de las pruebas: coordinación de trabajos, TOC, metodología de repetición automática de pruebas.
 - Tarea 6.3, diseño y metodología para vincular las pruebas a la homologación de seguridad: investigación con BVI, diseño de pruebas de interfaces en fases futuras.

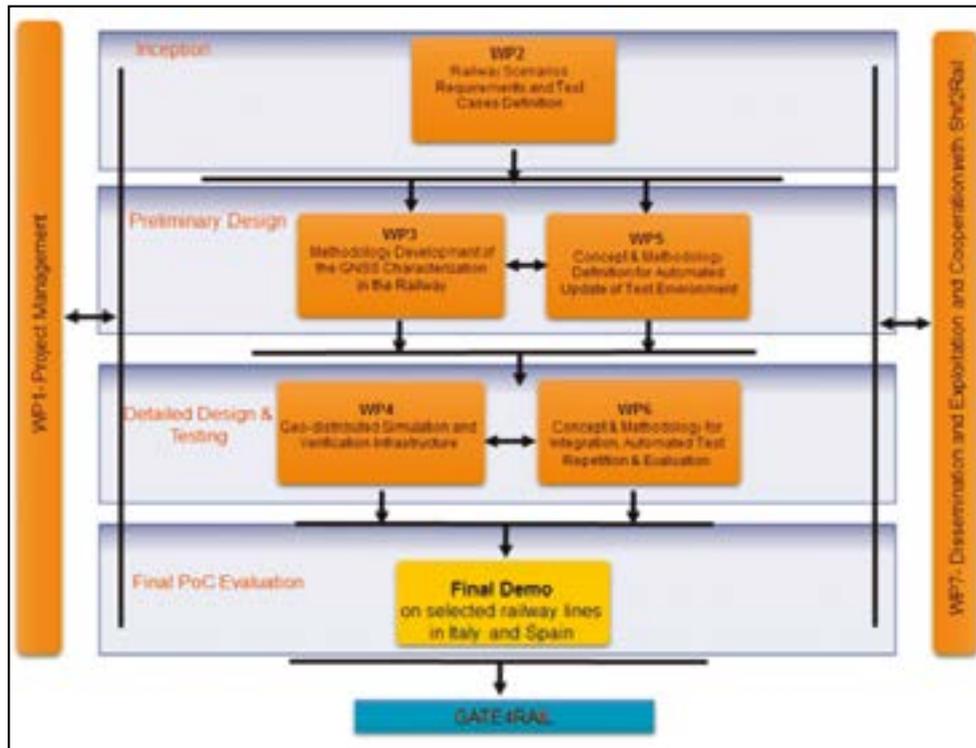


Figura 24. Paquetes de trabajo del proyecto Gate4Rail.



Figura 25. Socios del proyecto Gate4Rail.

4. ALGUNOS DETALLES SOBRE EL PROYECTO RAILGAP

Ineco, Adif y Cedex forman parte del consorcio internacional de 12 empresas al que se ha adjudicado el proyecto RAILGAP (RAILway Ground truth and digital mAP), liderado por el gestor de infraestructuras italiano Rete Ferroviaria Italiana (RFI). Enmarcado en la llamada

del Programa Horizon 2020 de la European GNSS Agency (GSA), RAILGAP se centra en el desarrollo de soluciones innovadoras de alta precisión para la obtención de los datos básicos del terreno y el tren y mapas digitales de las líneas ferroviarias, que constituyen elementos esenciales para el posicionamiento de los trenes con una fiabilidad y eficiencia sin precedentes en las operaciones ferroviarias. RAILGAP aborda estos retos con un método que utilizará trenes para captar cantidades masivas de datos; con ello se pretende mejorar la exactitud del mapeo en zonas complejas (zonas urbanas, con abundante vegetación, trincheras, etc.), extendiendo la cobertura GNSS en el ferrocarril.

El proyecto, que ha comenzado al inicio de 2021, contribuirá a la mejora en la sostenibilidad del sistema ERTMS y los sistemas de mando y control para la modernización de las líneas regionales y locales, con el consiguiente beneficio para los usuarios. Asimismo, permitirá también reducir el consumo de energía de estos sistemas, incrementando su eficiencia económica y medioambiental.

Ineco participará en todos los paquetes de trabajo del proyecto y liderará el cálculo del *ground truth* basado en una solución de hibridación de sensores, en el paquete 6. También contribuye a la identificación y caracterización de los sensores ópticos necesarios para el proyecto, sobre todo

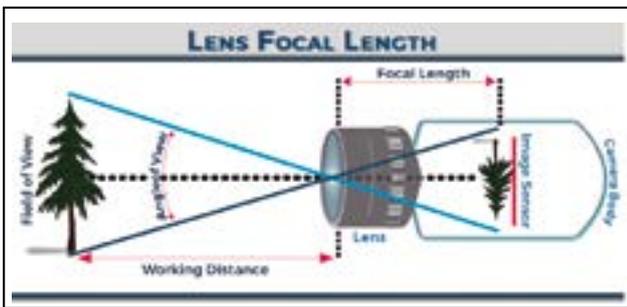


Figura 26. Campo de visión de una cámara.

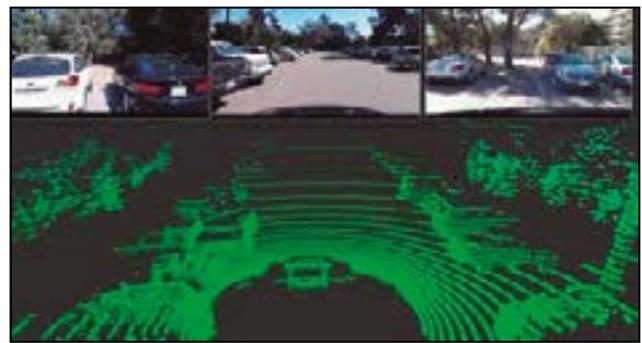


Figura 27. Combinación de cámara y lidar.



Figura 28. Objetivos del proyecto RAILGAP.

en lo que tiene que ver con las cámaras y los sensores LIDAR, y sin olvidar los temas de GNSS y ERTMS, donde Ineco tiene una larga experiencia.

Las actividades del paquete de trabajo 7, que tienen por objetivo implementar el mapa digital, también se apoyarán en la experiencia de Ineco en la identificación de imágenes y el uso de la inteligencia artificial, tal y como ya ha hecho para otros proyectos para Adif.

Las ilustraciones siguientes muestran los objetivos del proyecto RAILGAP y los tipos de equipos que se instalarán en el vehículo de pruebas.



Figura 29. Tipos de dispositivos que se instalarán en el vehículo de pruebas.

4.1. Adif movilizará un vehículo ferroviario

Por su parte, Adif participa en los ocho paquetes de trabajo de que dispone el proyecto, apoyando el desarrollo de

las distintas especificaciones técnicas del sistema y procedimientos que se van a desarrollar. Adicionalmente movilizará un vehículo sobre el que se instalarán los distintos equipos desarrollados y que será empleado para realizar las pruebas de comportamiento correspondientes. Un planteamiento similar se siguió en el proyecto ERSAT-GGC, en el que un tren laboratorio de Adif, equipado con un dos receptores GNSS, sirvió para caracterizar la cobertura de dicho sistema en la línea de pruebas.

Como gestor de la infraestructura ferroviaria nacional comprometido con la inclusión de nuevos desarrollos y tecnologías, Adif ha desarrollado desde su creación, en 2005, 109 proyectos de I+D+i de los cuales un 17 % (19 proyectos) han sido proyectos consorciales de ámbito europeo desarrollados al amparo de los distintos programas de I+D+i de la Comisión Europea. Actualmente cuenta con una cartera de 31 proyectos de I+D+i en desarrollo.

4.2. CEDEX integrará los sistemas de posicionamiento satelital

El organismo autónomo Cedex, a través de su Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria, líder en el mundo en el ensayo de componentes y subsistemas del ERTMS (Sistema Europeo de Señalización Ferroviaria), participará en el proyecto con el objetivo de integrar los sistemas de posicionamiento satelital GNSS con el ERTMS, de forma que se puedan mejorar los sistemas odométricos de los trenes y aumentar de esta forma las prestaciones del ERTMS, a la vez que se reducen los costes de despliegue del mismo.

Este organismo ha participado ya de forma muy activa en los proyectos ERSAT y GATE4RAIL de utilización de

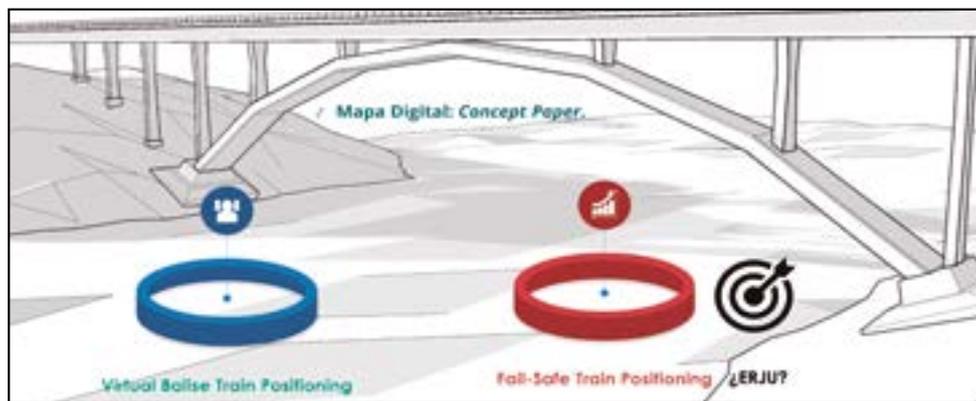


Figura 30. Punto de situación de desarrollos tecnológicos y elementos GNSS para CMS.

Galileo en el entorno ferroviario y apuesta claramente por la integración en el ferrocarril de dicha tecnología.

5. APLICACIONES GNSS PARA CONTROL, MANDO Y SEÑALIZACIÓN: REFLEXIONES Y ESTRATEGIAS EN LA RED DE ADIF

Adif tiene un firme compromiso de colaboración con iniciativas de I+D+i en soluciones GNSS para CMS. Su experiencia se remonta a 2005, con el lanzamiento del proyecto GRAIL. Desde entonces ha evolucionado la visión sobre la aplicación de este tipo de tecnologías, que han pasado de un escenario diverso a las líneas de tráfico débil.

Esta visión se encuentra en el núcleo de la estrategia de implementación de desarrollos de ERTMS en líneas de tráfico débil. El primer criterio es la sostenibilidad, entendida como una máxima: obtener las mismas prestaciones, pero con una mejor mantenibilidad. La vía para llegar a este objetivo es la que abre la interoperabilidad con soluciones estándar consolidadas en la Especificación Técnica de Interoperabilidad del sistema Control, Mando y Señalización (CMS) y con un alto nivel de madurez tecnológica. Así se pueden obtener parámetros RAMS equivalentes por medio de una digitalización segura con el empleo de gemelos digitales, y con una reducción considerable del funcionamiento en modo desagregado por falta de disponibilidad. La comparación con los sistemas actuales no deja lugar a dudas.

A partir de aquí surgen las preguntas acerca de lo que se necesita para implementar esta estrategia. En primer lugar, una cartografía digital precisa, es decir, una representación escalable de la vía a nivel topológico y geográfico, con distintas capas, según las necesidades de visualización, por ejemplo, capa de datos geográficos de vía/estaciones, capa de datos de balizas y capa de posibles limitaciones de velocidad. El formato en el que se genere el mapa digital deberá cumplir con los requisitos necesarios para su uso en aplicaciones críticas de seguridad. Será necesario también diseñar los protocolos para utilizar el GNSS junto con los sistemas de aumentación u otros sistemas de odometría, para conseguir un posicionamiento del tren en condiciones de seguridad (*fail-safe train positioning*), por ejemplo, Subset 041 (error ODO OBU de 5 m+/-5 %). Además, habrá que conseguir una estimación del error asociado a las balizas virtuales fiable. En la explotación habrá que implementar medidas como la discriminación de vía y el establecimiento/priorización de rutas en los desvíos, sin dejar

de lado la CMD (*Cold Movement Detection*). Por último, la seguridad del sistema requiere una protección adecuada, lo que supondrá un diseño específico de ciberseguridad (*spoofing*).

6. CONCLUSIONES

La aplicación de tecnologías satelitales al ferrocarril supone un avance tecnológico de gran alcance. En las líneas de tráfico débil puede permitir un aumento de la capacidad de la infraestructura que redundará en las opciones de negocio para los operadores de transporte. Por otro lado, estas tecnologías ofrecen a los administradores de infraestructuras una alternativa al equipamiento estándar del ERTMS más asequible y con los niveles de eficacia, seguridad y resiliencia necesarios para dar cobertura a la operación con las garantías exigibles a los sistemas de control de tráfico actuales. Existen inconvenientes, sin embargo, que es preciso superar, y no todos son de índole tecnológica. Los trazados de las líneas de tráfico débil responden, por lo general, a diseños antiguos que discurren integrados en la orografía del terreno, muchas veces. Túneles, pasos superiores y elementos naturales o integraciones urbanas extremas se convierten en zonas oscuras para la transmisión de la señal GNSS, lo que dificulta la instalación de las balizas virtuales. Los desarrollos en localización y precisión del posicionamiento pueden ayudar a resolver estos problemas, pero todavía queda camino por recorrer para llegar a una solución comercial robusta y exportable a cualquier tipo de infraestructura.

Los proyectos europeos en los que han participado Adif, Cedex e Ineco fijan el baremo de la tecnología española a una altura en la que se generan las tecnologías de vanguardia. Los hallazgos en análisis funcionales y de capacidad de los sistemas, el desarrollo de herramientas específicas, las pruebas en entorno real y todas las tareas llevadas a cabo en esos proyectos dejan en un lugar de vanguardia a la capacidad española y sus resultados la sitúan en los primeros puestos de la tecnología ferroviaria en todo el mundo.

7. REFERENCIAS

- Proyecto ERSAT GGC: <https://trimis.ec.europa.eu/project/ertms-satellite-galileo-game-changer#tab-outline>
- Proyecto GATE4RAIL: <https://gate4rail.eu>
- Proyecto RAILGAP: <https://railgap.eu>

Modelos de gobernanza portuaria en América: análisis Cluster

Port Governance Models in the Americas: Cluster Analysis

Alberto Camarero Orive^{1*}, José Ignacio Parra Santiago², Leticia Espinosa³, José Manuel Vassallo Magro⁴

Resumen

El artículo analiza con detalle el agrupamiento que se genera entre los diferentes modelos de gobernanza portuaria implantados en los países americanos en la actualidad. En primer lugar, se presenta una revisión teórica sobre los diferentes modelos y reformas en materia portuaria. En segundo lugar, mediante la selección de indicadores de diferentes ámbitos, se realiza el análisis *cluster* de conglomerados, que concluye con la dependencia de los factores públicos y/o privados tienen relación con la estructura política y situación de cada país.

Palabras clave: gobernanza portuaria, conglomerados, cluster, América, Latinoamérica, puertos.

Abstract

The paper analyses in detail the grouping that is currently generated between the different models of port governance implemented in American countries. First, a theoretical review of the different models and reforms in port matters is presented. And second, through the selection of indicators from different fields, a cluster analysis is carried out, which concludes establishing the dependence of public and/or private factors on the political structure and situation of each country.

Keywords: Port governance, conglomerates, cluster, América, Latinoamérica, ports.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la década de los setenta, las actividades portuarias se vieron afectadas por la rápida adopción de las modalidades de carga contenedorizada y la aparición de grandes buques portacontenedores y buques petroleros, que demandaron transformaciones tanto en las instalaciones como en la infraestructura portuaria. En los años ochenta, los países de América Latina y el Caribe, observaron que la calidad de los servicios portuarios estatales, el equipamiento y las instalaciones, no correspondían a los estándares internacionales, particularmente, porque se observaban reformas sustanciales en el modelo de organización portuaria. Para ese momento, el sistema portuario de la región se caracterizaba por tener puertos regulados y centralizados, en los cuales el Estado era responsable de la construcción, mantenimiento, administración y operación, lo cual limitaba la competencia portuaria y el desarrollo de actividades de inversión, mantenimiento y operaciones.

El presupuesto del puerto dependía de los aportes del gobierno central, así como del ingreso producto de las tarifas y gravámenes aplicados a los usuarios privados y no privados del puerto, lo que trajo como consecuencia que la

inyección de capital financiero fuera disminuyendo y las tarifas portuarias alcanzaran niveles extremadamente elevados con relación al deber ser (Camilo *et al.*, 2016). Ante esta situación, en la década de los 90 la industria portuaria en América Latina inició sus primeros intentos de modernización, que para algunos expertos fue definido como el nuevo Modelo Latinoamericano, en el cual los puertos públicos eran del tipo *landlord* y las concesiones se otorgaban con una duración de doce a treinta años, con el objeto de promover la inversión privada para la modernización tanto de la infraestructura como de la superestructura del puerto (Hoffmann, 2000). Estas reformas portuarias se dieron en países como Argentina (1992), Brasil (1993), Colombia (1991), Chile (1981), México (1992), Panamá (1994), Uruguay (1992) y Venezuela (1991), lo que provocó un aumento de la oferta de infraestructura y equipamiento, mediante una fuerte reinversión portuaria por parte de concesionarios y operadores privados, consolidación de la prestación permanente de servicios suministrados por los operadores privados, incremento de movimiento de contenedores, reducción de costos de operaciones, disminución del tiempo de estadía de los buques en puerto, oportunidades para el desarrollo regional, entre otros. Sin embargo, este impacto ha sido inferior si se compara con el impacto obtenido en países desarrollados (Gallegos, 2003).

Latinoamérica se ha dado pasos a nuevas formas de gestión con la presencia de operadores privados y regímenes regionales o municipales, se han llevado cabo con el fin de elevar la productividad del sector y mejorar la competitividad (Cerbán Jiménez, 2008).

Sin embargo, ante los retos portuarios que impone la nueva era, en el cual la globalización de la economía mundial, el modelo de desarrollo de apertura económica y liberalización comercial, impactan directamente en la industria

* Autor de contacto: alberto.camarero@upm.es

¹ Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

² Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

³ Licenciada en operaciones marítimas y portuarias por la Universidad Tecnológica de Panamá.

⁴ Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

marítima portuaria global, los puertos de América Latina deben centrarse en el desarrollo de una nueva estrategia que los convierta en centros nodulares de la cadena logística, a través de la eliminación total del monopolio estatal, el acceso al capital privado y el fomento a la sana competencia. Para ello, deben introducirse cambios que no sólo garanticen la privatización a nivel operativo, sino, también, a nivel gerencial, de manera que los esfuerzos se dirijan hacia el ofrecimiento de puertos modernos y eficientes, a través de infraestructuras portuarias especializadas en transbordo, que potencie las adquisiciones y el desarrollo de la tecnología portuaria, así como el desarrollo coordinado del puerto con la ciudad y la facilitación de la actividad portuaria.

Con la modernización y adaptación de la actividad portuaria al comercio, se han establecido modelos o tipologías principales en cuanto a la administración de los puertos. En este aspecto no existen modelos únicos o delimitados, ya que la administración portuaria depende de la institucionalidad y estructura de cada país. No obstante lo anterior, considerando que la actividad portuaria conserva semejanzas importantes a todos los niveles, los modelos que se describen a continuación han ganado una aceptación y aplicación importante. La clasificación del profesor González Laxe (2002) establece los procesos de adaptación condicionados por las características derivadas de tres dinámicas:

- a) La primera radica en la apuesta por la independencia de la gestión y de la financiación, esto es, por la mayor cuota de responsabilidad en lo tocante a las atribuciones.
- b) La segunda se sustenta en el concepto de autoridad única y su poder para ejercer el máximo control del recinto portuario.
- c) La tercera se fundamenta en la gestión de las decisiones, en la que las prestaciones privadas pueden prevalecer sobre los servicios públicos.

2. ANTECEDENTES

El sistema portuario vive un momento importante, la estratégica ubicación de las costas venezolanas; las estrechas relaciones con los vecinos sudamericanos favorecen al país en la exportación de su producto número uno: el petróleo. También las alianzas con China y el mercado norteamericano han permitido la extracción y comercialización del oro negro al extranjero, afianzando rutas marítimas y propiciando los cielos abiertos a las migraciones de empresarios con intereses en la inversión. La manera de crear en el país zonas con éxodos de poblaciones es un intento de desviar la concentración de las principales capitales para integrarse a poblar con mayor intensidad nuestras costas (Mayora Guaita, 2014).

Las reformas portuarias que se dieron en Latinoamérica y que han dado paso a nuevas formas de gestión con la presencia de operadores privados y regímenes regionales o municipales, se han llevado cabo con el fin de elevar la productividad del sector y mejorar la competitividad, resaltando el liderazgo de Argentina, así como los avances observados en Colombia, México, Brasil, Uruguay, Chile, Panamá y Venezuela, entre otros. Sin embargo, ante los retos portuarios que impone la nueva era, en la cual la

globalización de la economía mundial y el modelo de desarrollo de apertura económica y liberalización comercial impactan directamente en la industria marítima portuaria global, los puertos de América Latina deben centrarse en el desarrollo de una nueva estrategia que los convierta en centros nodulares de la cadena logística, a través de la eliminación total del monopolio estatal, el acceso al capital privado y el fomento a la sana competencia (Silva, 2008).

Estos indicadores se tratan con herramientas de análisis estadístico. Se ha elegido el análisis de conglomerados para realizar agrupamientos entre los puertos seleccionados. Para ello se ha seguido una metodología de trabajo que cubre todas las fases de la investigación: entorno, caracterización, fuente de datos, análisis de conglomerados, resultados y análisis de resultados. Los resultados obtenidos demuestran que los puertos españoles se pueden caracterizar correctamente por medio de indicadores físicos y de explotación, y que el análisis de conglomerados es una herramienta válida y útil para el entorno portuario (Camarero Orive *et al.*, 2016).

Cuando se habla de *cluster*, Michael Porter (1990) define esta figura como “un grupo geográficamente próximo de compañías interconectadas e instituciones asociadas, en un campo particular, vinculadas por características comunes y complementarias, incluyendo empresas de productos finales o servicios, proveedores, instituciones financieras y empresas de industrias conexas”.

Fue hacia finales de los noventa y a lo largo del 2000 cuando el concepto *cluster* asumió una hegemónica presencia en los desarrollos teóricos y empíricos destinados a analizar el papel de los procesos de aglomeración y sus vinculaciones con el desarrollo y la competitividad (Maskell y Kebir, 2004).

Medal y Sala realizaron en 2007 una clasificación del sistema portuario español basada en el análisis *cluster*. En su propuesta tomaron tan solo tres variables de entrada referidas al tráfico de graneles, sólidos y líquidos, y mercancía general (Medal y Sala, 2007), y concluyen que el sistema portuario español no era un conjunto homogéneo, sino que presentaba una estructura de grupos dependiendo del volumen de la actividad de los puertos.

El concepto *cluster* de gobernanza portuaria difiere sustancialmente del concepto de gobernanza empresarial que se utiliza con frecuencia porque, a diferencia de una jerarquía empresarial, una agrupación está formada por organizaciones independientes con pocas relaciones formales de control para regir sus interacciones (Wolfe y Gertler, 2004). La gobernanza de la autoridad portuaria está estrechamente vinculada a cuestiones de gobernanza empresarial, como la influencia de los accionistas, la estructura del consejo de administración y la responsabilidad social de las empresas. La gobernanza del puerto, por otra parte, está más relacionada con la gobernanza de las agrupaciones, ya que un puerto está formado por una variedad de actores. En algunos puertos, la autoridad portuaria desempeña un papel importante en la gobernanza de los conglomerados, mientras que en otros puertos son más importantes las empresas privadas (líderes) o las asociaciones portuarias. Por ejemplo, las empresas pueden tomar la iniciativa en el establecimiento de normas para el intercambio de información en algunos puertos, mientras que en otros la autoridad portuaria toma la iniciativa (De Langen, 2006).

El análisis de conglomerados (*clustering*) se ha venido utilizando en muchos entornos de investigación en los últimos años, como en el estudio de Camarero *et al.*, 2016, sobre la clasificación de los puertos españoles. Y, también, se relaciona con el análisis de conglomerados con las redes neuronales artificiales y con la minería de datos, como en el estudio de Han *et al.*, 2012, que se presenta en áreas tan dispares como el reconocimiento de patrones (Moreiro González, 2002), el análisis de datos (Navarro, 2003), los análisis médicos (Moreno y Solé, 2004), económicos (Ledesma y Sánchez, 2007), o los estudios ambientales para el análisis de patrones de distribución de especies (Field *et al.*, 1982); incluso en la enseñanza, usado para encontrar patrones de comportamiento del alumno que puedan reconocer su estilo de aprendizaje (Valle *et al.*, 2000). En los estudios acerca de las ciudades, como el presentado por Méndez *et al.*, 2006, también es frecuente utilizar esta herramienta de análisis e incluso se puede encontrar referido a la competitividad de las empresas, como en el caso de García y Álvarez, 1996.

3. METODOLOGÍA

Se deben buscar indicadores relacionados con la actividad general y portuaria que represente el país. Este proceso de identificación de indicadores, selección y posterior asignación de valores es fundamental porque estos indicadores son los que tienen que definir la actividad del país y sus puertos de forma objetiva. La finalidad de este proceso de búsqueda de indicadores es encontrar el menor número de variables necesarias para caracterizar la actividad comercial de un país con referencia a los puertos. Es preciso señalar que en los países con mayor superficie y línea de costa los indicadores reflejan mayor tráfico portuario. Es decir, que en un país determinado puede existir mayor tráfico de mercancía que en otro donde su superficie es menor, y debe quedar reflejado en su caracterización.

Después de obtener los valores para los indicadores se pasa al análisis estadístico por conglomerados (*cluster*) (Camarero Orive *et al.*, 2019). El resultado de este análisis mostrará los agrupamientos que se han generado con esos indicadores de acuerdo con la semejanza entre países y puertos. El *análisis cluster*, conocido como análisis de conglomerados, es una técnica estadística multi-variante que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. Dado que el objetivo fundamental de un análisis de conglomerados es realizar una partición de la muestra en grupos similares, el punto de partida es una matriz de similitudes o de distancias entre los sujetos, objetos o variables que queremos agrupar.

El análisis de conglomerados jerárquico es un algoritmo que determina el número de conglomerados. Para formar los conglomerados, el procedimiento comienza con cada observación en grupos separados. Luego combina las dos observaciones que fueron las más cercanas para formar un nuevo grupo. Después de recalcular la distancia entre grupos, se combinan los dos grupos ahora más cercanos. Este proceso se repite hasta que quedan solamente el número de grupos que se haya elegido. Los objetos de cada grupo que se obtengan deben tener la mínima diferencia entre sí y la máxima con los objetos de otros grupos.

Los agrupamientos son muy sensibles a la presencia de objetos atípicos, que inevitablemente serán los últimos en agruparse. Este procedimiento identifica claramente las relaciones multivariadas que difícilmente son accesibles a partir del análisis de las unidades especiales individuales.

Para el análisis *cluster* se parte de una matriz, donde cada objeto queda definido por el valor de sus indicadores (Cantillo Guerrero *et al.*, 2011). El dendrograma es la representación gráfica, en forma de árbol jerárquico, que indica secuencialmente las uniones de las unidades especiales, el cual permite definir el punto de corte de mayor aptitud y, con ello, la regionalización, donde se alinean en un eje todos los objetos y en el otro eje la distancia que les separa, lo que implica un nivel de jerarquía.

El historial de conglomeración muestra los niveles de fusión (coeficientes) en cada etapa. Los coeficientes muestran las distancias encontradas a las que se van uniendo los objetos, y elige siempre la mínima. El *cluster* formado en cada etapa se va modificando en las siguientes etapas al añadirse nuevos objetos. Observando los niveles de fusión y el diagrama de dispersión de los objetos se elegirá el número de *cluster*.

Como aplicación de esta metodología se ha realizado el estudio en el sistema portuario del continente americano, de manera que no existen condicionantes previos sobre los países escogidos ni su elección responde a criterios orientados de antemano hacia este estudio. Se han recogido los datos de (CEPAL, 2019), noticias, entrevistas dada por foros y reuniones. Atendiendo al tipo de información facilitada por los indicadores, estos se pueden clasificar como cuantitativos o cualitativos. Es decir, a los numéricos se les puede asignar un valor, como por ejemplo el número de buques al año, mientras que los descriptivos son los que explican, por ejemplo qué inversiones se han realizado en los puertos en la última década. Se considera que todos los indicadores tienen la misma influencia.

En la figura 1, se presenta de forma específica los períodos y etapas que se han seguido en la metodología utilizada para la clasificación de los países y su sistema portuario.



Figura 1. Fases de la metodología de cálculo para clasificación (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 2. Selección de Indicadores

Nombre de indicador	Definición	Unidad
Nombre de países	Comunidad social con una organización política común y un territorio y órganos de gobierno propios.	ID
Superficie km ²	Área que ocupa un territorio.	km ²
Línea de costa	Es la línea en la superficie de la Tierra que define el límite entre el mar y la tierra firme.	km
Habitantes	Persona que vive habitualmente en un lugar determinado.	n
Salida al mar	Acceso a litoral que posee un país.	
Índice de Desarrollo Humano	Mide el nivel de desarrollo de cada país atendiendo a variables como la esperanza de vida, la educación o el ingreso per cápita.	0-1
Producto Interior Bruto	Refleja el valor monetario de todos los bienes y servicios finales producidos por un país o región en un determinado período de tiempo, normalmente un año.	PIB
Per Cápita	Mide la relación existente entre el nivel de renta de un país y su población.	Dólares Americanos \$
Régimen Político	Conjunto de instituciones y leyes que permiten la organización del Estado y el ejercicio del poder	
Índice de Desarrollo Logístico	Mide la eficiencia de las cadenas de suministro de cada país y como esta se desenvuelve en el comercio con otros países (socios comerciales). Una logística ineficiente conlleva a un alza de los costos del comercio y por ende reduce la integración global afectando a los países en desarrollo que buscan competir en el mercado global.	n
Tráfico total Anual Portuario	El movimiento total de mercancía que pasa por los puertos.	t
Tráfico de Gráneles líquidos	Cantidad total de gráneles líquidos que han circulado por el puerto en el año.	t
Tráfico de Gráneles sólidos	Cantidad total de gráneles sólidos que han circulado por el puerto en el año.	t
Contenedores	Número total de contenedores que ha pasado por el puerto en el año.	TEUs
Buques	Número total de buques que ha pasado por el puerto en el año.	n
Pasajeros	Número total de pasajeros que ha pasado por el puerto en el año.	n
Ferrocarril	Acceso al ferrocarril en el área portuaria	n
Puertos total	Cantidad de puertos que hay en un país	n
Puertos públicos	Cantidad de puertos bajo la titularidad pública o estatal operan en el país	n
Puertos Privados	Cantidad de puertos bajo titularidad privadas donde las empresas privadas son las que administran	n
Institución asociada a la Gobernanza Portuaria	Ministerio o empresas que gobiernan a nivel nacional los puertos	n
Modelo de Gestión	Modelo por el cual los puertos se rigen según su titularidad y uso	n
Subsidiados por fondos públicos		n
Autoridades -Zonas	Cantidad de autoridades o zonas portuarias en un determinado país	n

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Parámetros de indicadores cualitativos a cuantitativos

Indicadores	Valor adquirido
Variable acceso al mar	1 Océano Atlántico 2 Océano Pacífico 3 Mar Caribe 4 Océano Ártico 5 Océano Pacífico y Atlántico 6 Mar Caribe y Océano Atlántico 7 Mar Caribe Y Océano Pacífico 8 No hay acceso al mar
Régimen político	1 República Democrática Presidencialista 2 Republica Federal Presidencialista 3 Republica Semipresidencialista 4 Monarquía Parlamentaria 5 Estado Socialista 6 Dependiente de los Estados Unidos
Ferrocarril	1 Sí 2 No
Institución asociada a la gobernanza	1 Autoridades dependientes de un ministerio 2 Autoridades autónomas 3 Autoridades con doble jurisdicción 4 Sin Autoridad Nacional
Modelo de gestión	1 Service Port 2 Tool Port 3 Landlord Port 4 Private Port 5 Service Port, Tool Port 6 Landlord Port y Private Port 7 Privados, Semi-Públicos, Públicos 8 Alianza Público Privado, Service Port 9 Landlord Port, Tool Port 10 Service Port, Private Port 11 Service Port, Landlord
Subsidiados por fondos públicos del gobierno	1 No 2 Sí

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resultados y conclusiones

El resultado del análisis es obtener clasificaciones con un marcado carácter exploratorio, de manera que los individuos pertenecientes a un grupo sean tan similares entre sí como sea posible, mientras que los otros grupos sean tan disimilares como sea posible.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se eligieron los 20 países de América (figura 2 y tabla 1) y, con los datos obtenidos durante el estudio, cuyo objetivo es el de identificar tendencias y patrones de los modelos de gestión y financiamiento de los puertos en América, se ha realizado una base de datos desglosada también por regiones en la que se pueden ver los valores de los distintos índices para cada país. Cabe recalcar que, en algunos casos, hay datos que no ha sido posible obtener, presentándose con un guion. También se han hecho una serie de tablas y gráficos comparativos que aparecen a lo largo de este artículo.

Antes de proceder al análisis *cluster* se debe establecer el número de patrones, la definición de proximidad, el tipo de *clustering* y la representación de los datos. Para los datos es necesario realizar una tipificación previa, puesto que cada variable se mide en distinta escala. En cuanto a la similitud entre los objetos de un *cluster*, se puede optar por medidas de correlación, distancia o asociación. Para datos métricos en escala de intervalo, como es este caso, una de las más apropiadas es la distancia euclídea al cuadrado. Por su parte, el algoritmo utilizado para la obtención del *cluster* está basado en procedimientos jerárquicos, y se prefiere el *método de Ward* (Schielke *et al.* 2009) porque une los casos, buscando minimizar la varianza dentro de cada grupo. Para ello se calcula, en primer lugar, la media de todas las variables en cada conglomerado y, a continuación, se calcula la distancia entre cada caso y la media del conglomerado, sumando después las distancias entre todos los casos. Posteriormente se agrupan los conglomerados que generan menos aumentos en la suma de las distancias dentro de cada conglomerado. Este procedimiento crea grupos homogéneos y con tamaños similares.

La figura 3 representa la matriz de proximidades entre los países y la figura 4 representa el historial del análisis indicando el número de etapas, los conglomerados que se forman y los coeficientes de distancia euclídea. El resultado de aplicar el análisis de conglomerados a los indicadores es el que se representado en el dendrograma de la figura 5.

En primer lugar, se observan claramente varios grupos diferenciados (figura 6). En el primer grupo formado por

Etapa	Clúster continuo			Primera aparición del clúster de etapa		Etapa siguiente
	Clúster 1	Clúster 2	Coefficientes	Clúster 1	Clúster 2	
1	14	16	992	0	0	8
2	2	7	2.214	0	0	7
3	4	5	4.196	0	0	6
4	3	13	6.488	0	0	10
5	9	10	8.778	0	0	13
6	4	6	11.256	3	0	9
7	2	8	15.023	2	0	10
8	14	15	19.734	1	0	12
9	1	4	25.420	0	6	11
10	2	3	31.764	7	4	13
11	1	12	39.703	9	0	14
12	14	20	47.983	8	0	18
13	2	9	59.881	10	5	14
14	1	2	74.829	11	13	15
15	1	11	87.115	14	0	16
16	1	18	120.425	15	0	18
17	17	19	159.291	0	0	19
18	1	14	208.992	16	12	19
19	1	17	261.000	18	17	0

Figura 3. Matriz de proximidades (Fuente: Elaboración propia).

País	Distancias euclídeas al cuadrado									
	1 ARGENTINA	2 CHILE	3 COLOMBIA	4 ECUADOR	5 PERÚ	6 URUGUAY	7 COSTA RICA	8 GUATEMALA	9 HONDURAS	10 NICARAGUA
1 ARGENTINA	0	9.788	12.221	9.702	8.528	10.973	16.510	22.504	27.120	22.735
2 CHILE	9.788	0	4.942	6.424	4.243	6.191	2.446	6.841	17.488	12.582
3 COLOMBIA	12.221	4.942	0	6.590	7.110	13.266	4.293	5.761	9.943	10.783
4 ECUADOR	9.702	6.424	6.590	0	3.963	4.870	7.249	8.538	12.855	9.714
5 PERÚ	8.528	4.243	7.110	3.963	0	4.546	7.058	8.612	16.609	9.895
6 URUGUAY	10.973	6.191	13.266	4.870	4.546	0	10.037	14.262	19.034	14.488
7 COSTA RICA	16.510	2.446	4.293	7.249	7.058	10.037	0	3.481	12.878	9.301
8 GUATEMALA	22.504	6.841	5.761	8.538	8.612	14.262	3.481	0	8.402	5.331
9 HONDURAS	27.120	17.488	9.943	12.855	16.609	19.034	12.878	8.402	0	4.660
10 NICARAGUA	22.735	12.082	10.783	9.714	9.895	14.488	9.301	5.331	4.660	0
11 PANAMÁ	35.829	23.466	25.493	30.116	27.182	34.746	21.901	25.803	37.324	30.889
12 SALVADOR	19.006	12.751	14.486	7.667	7.663	15.304	10.046	7.961	20.959	9.348
13 MÉXICO	9.378	8.731	4.505	13.993	11.198	19.370	10.546	14.194	18.040	19.140
14 ANTIGUA Y BARBUDA	26.171	26.122	25.848	20.672	23.630	28.969	22.671	24.293	25.959	17.638
15 JAMAICA	19.578	14.651	17.289	12.647	12.418	17.320	13.051	13.547	15.624	6.543
16 BARBADOS	28.787	24.205	28.224	22.757	22.390	27.116	20.855	23.247	28.781	16.548
17 E.E.U.U.	124.420	121.791	133.934	154.362	132.260	140.738	140.060	155.006	168.056	158.816
18 BRASIL	15.627	26.542	22.794	27.462	19.782	30.994	36.046	30.767	42.532	39.445
19 CANADÁ	81.780	70.515	76.058	91.130	77.213	99.202	82.860	96.741	106.816	99.312
20 PUERTO RICO	27.678	29.155	32.187	27.173	29.854	25.979	29.777	35.484	30.434	29.554

Esto es una matriz de similitud.

11 PANAMÁ	12 SALVADOR	13 MÉXICO	14 ANTIGUA Y BARBUDA	15 JAMAICA	16 BARBADOS	17 E.E.U.U.	18 BRASIL	19 CANADÁ	20 PUERTO RICO
35.829	19.006	9.378	26.171	19.578	28.787	124.420	15.627	81.780	27.678
23.466	12.751	8.731	26.122	14.651	24.205	121.791	26.542	70.515	29.155
25.493	14.486	4.505	25.848	17.289	28.224	133.934	22.794	76.058	32.187
30.116	7.667	13.993	20.672	12.647	22.757	154.362	27.462	91.130	27.173
27.182	7.663	11.198	23.630	12.418	22.390	132.260	19.782	77.213	29.854
34.746	15.304	19.370	29.969	17.320	27.116	140.738	30.994	99.202	25.979
21.901	10.046	10.546	22.671	13.051	20.855	140.060	36.046	82.860	29.777
25.803	7.961	14.194	24.293	13.547	23.247	155.006	30.767	96.741	35.484
37.324	20.959	18.040	25.959	15.624	28.781	168.056	42.532	106.816	30.434
30.889	9.348	19.140	17.638	6.543	16.548	158.816	39.445	99.312	29.554
0	29.473	28.478	43.746	33.579	42.151	150.473	53.410	94.490	54.715
29.473	0	22.694	17.783	10.128	16.608	159.927	36.310	94.578	37.078
28.478	22.694	0	30.411	21.159	32.953	168.766	19.604	56.495	33.389
43.746	17.783	30.411	0	8.352	1.993	173.485	46.603	95.834	10.422
33.579	10.128	21.159	8.352	0	6.773	161.942	37.042	85.617	14.250
42.151	16.608	32.953	1.993	6.773	0	163.796	48.831	93.715	11.990
150.473	159.927	168.766	173.485	161.942	163.796	0	102.197	77.730	161.387
53.410	36.310	19.604	46.603	37.042	48.831	102.197	0	48.731	48.824
94.490	94.578	56.495	95.834	85.617	93.715	77.730	48.731	0	62.743
54.715	37.078	33.389	10.422	14.250	11.990	161.387	48.824	62.743	0

Figura 4. Historial de conglomeración (Fuente: Elaboración propia).

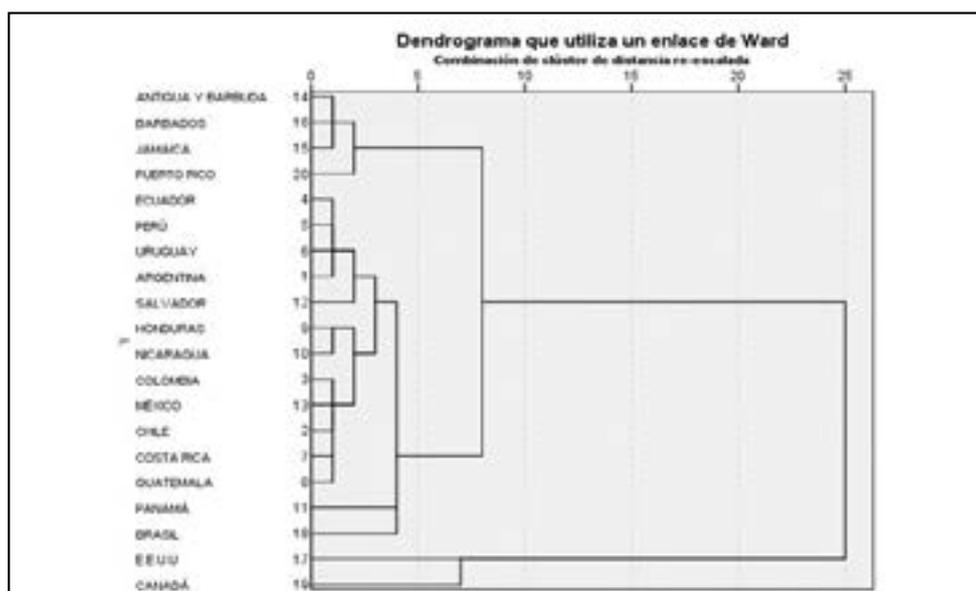


Figura 5. Dendrograma con los indicadores portuarios (Fuente: Elaboración propia).

Antigua y Barbuda, Barbados, Jamaica y Puerto Rico. Sin extendernos en muchas consideraciones, se puede añadir que ese primer grupo corresponde a los países con menor tráfico portuario en el 2018, además que posee un sistema de menor cantidad de puertos en sus territorios, y tienen

poca especialización en sus terminales. El segundo grupo está formado por Brasil, Panamá, Guatemala, Costa Rica, Chile, México, Colombia, Nicaragua, Honduras, Salvador, Argentina, Uruguay, Perú y Ecuador. Tienen similitudes y características más homogéneas en cuanto al tamaño,

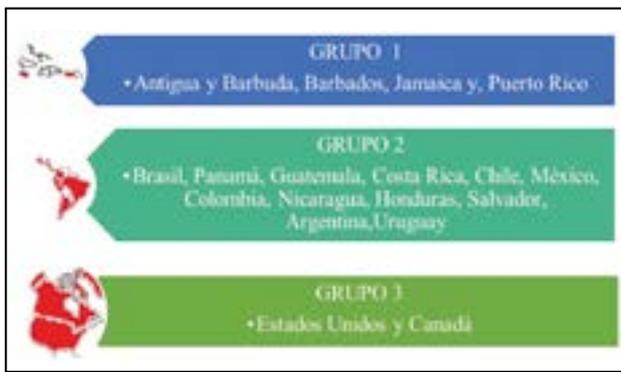


Figura 6. Agrupamientos según el dendrograma (Fuente: Elaboración propia).

tráfico de contenedores, gráneles sólidos, además de tener un modelo *landlord* que permite la participación del sector privado en la provisión de servicios de infraestructura. El tercer grupo es el formado por Estados Unidos y Canadá. Estos dos países están separados de los demás debido a la gran diferencia con el resto. Por sus características se puede afirmar que, en virtud de su superficie, su tráfico portuario y su IDL, es superior al resto de países de América. Además estos dos países forman parte de los más desarrollados a nivel mundial.

América tiene el reto de avanzar en la modernización del sistema portuario desde una perspectiva de red que englobe la totalidad del sistema portuario regional. La modernización de la infraestructura portuaria deberá ir acompañada de un reforzamiento de los modelos de gestión de infraestructura logística especializada.

Posteriormente se ha seguido estudiado la región de la misma manera (América del Sur, América Central, América del Norte y las islas del Caribe) para ver su comportamiento entre sí.

4.1. Análisis de los resultados en los países de América Central

De la observación de los resultados obtenidos a partir del dendrograma se pueden distinguir los agrupamientos. En este caso los puertos de Centroamérica presentan situaciones dispares en cuanto a competitividad y calidad de servicio a las rutas navieras que los recalcan. Por una parte, se percibe un fuerte liderazgo en ambas costas asumido por Panamá, a pesar que es una franja estrecha de tierra tiene gran importancia en el tráfico marítimo internacional, lo cual ha llevado al país a ser el principal centro de transbordo de las Américas. Se puede observar también que en el resto de la región se verifican situaciones muy dispares en cuanto a modernización y calidad de los servicios portuarios. Guatemala, si bien presenta un importante volumen de carga, aún en sus puertos de ambas costas no se desarrollan terminales especializadas, como sí lo han hecho Honduras, Costa Rica y, últimamente, El Salvador.

Costa Rica, Salvador, Honduras, Guatemala y Nicaragua son muy parecidos, de acuerdo con la tabla, siendo similares en su IDH, no superior a 0.75, y con un IDL inferior a 2.8, predominando el modelo *service port* y *tool port*.

La figura 9 presenta la matriz de proximidades entre los países.

La figura 10 presenta el historial del análisis, indicando el número de etapas, los conglomerados que se crean y los coeficientes de distancia euclídea. El resultado de aplicar el análisis de conglomerados a los indicadores es el que se presenta en el dendrograma de las figuras 7 y 8.

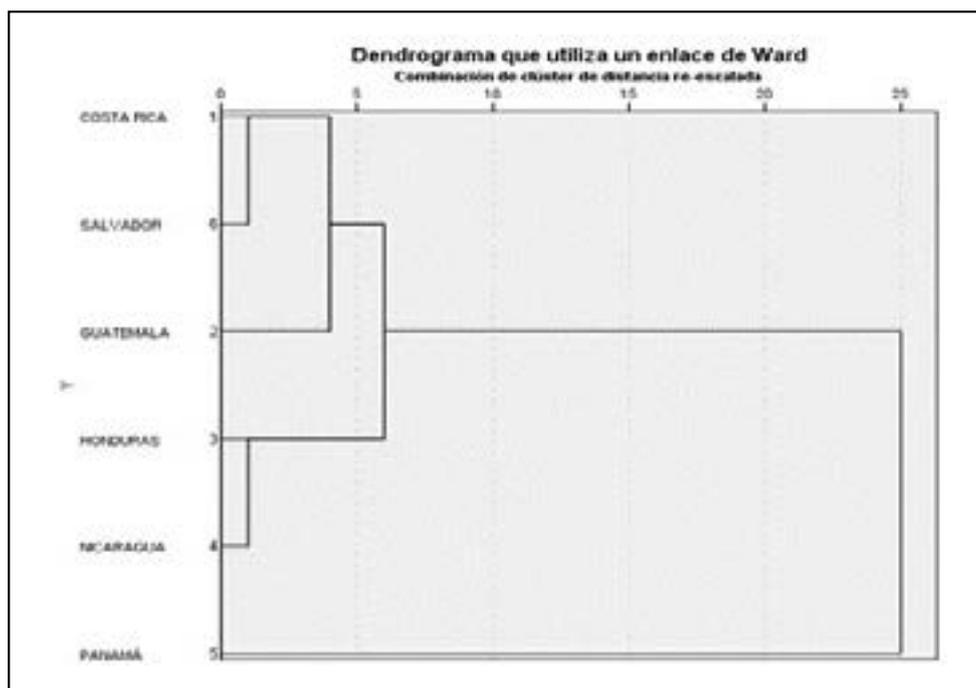


Figura 7. Dendrograma con los indicadores portuarios América Central (Fuente: Elaboración propia).

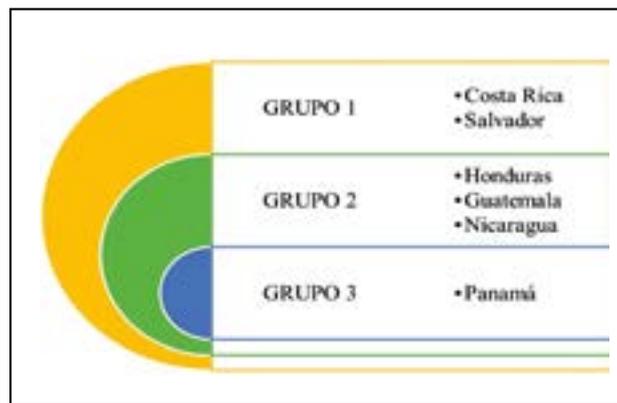


Figura 8. Agrupamientos según el dendrograma América Central (Fuente: Elaboración propia).

Caso	Distancia euclídea al cuadrado					
	1: COSTA RICA	2: GUATEMALA	3: HONDURAS	4: NICARAGUA	5: PANAMÁ	6: SALVADOR
1: COSTA RICA	.000	31.507	28.537	27.996	40.470	23.045
2: GUATEMALA	31.507	.000	28.863	36.783	72.835	27.763
3: HONDURAS	28.537	28.863	.000	25.240	77.973	39.751
4: NICARAGUA	27.996	36.783	25.240	.000	76.715	27.295
5: PANAMÁ	40.470	72.835	77.973	76.715	.000	65.226
6: SALVADOR	23.045	27.763	39.751	27.295	65.226	.000

Esto es una matriz de disimilaridad.

Figura 9. Matriz de proximidades América Central (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Clúster combinado			Primera aparición del clúster de etapa			Etapa siguiente
	Clúster 1	Clúster 2	Coefficientes	Clúster 1	Clúster 2		
1	1	6	11.523	0	0	3	
2	3	4	24.143	0	0	4	
3	1	2	40.050	1	0	4	
4	1	3	59.356	3	2	5	
5	1	5	105.000	4	0	0	

Figura 10. Historial de conglomerados América Central (Fuente: Elaboración propia).

4.2. Análisis de los resultados en los países de América del Sur

Del examen de los resultados obtenidos a partir del dendrograma se pueden distinguir los agrupamientos.

Podemos observar cómo se distancia Brasil de los demás, debido a la superficie y su línea de costa, apreciándose una relación entre el producto interior bruto y el tráfico anual, cuanto mayor es uno más crece el otro. Argentina, Uruguay y Chile destacan por tener un amplio sistema portuario en sus costas, con un IDH promedio. Chile, por detrás de Brasil, es uno de los países con mayor línea de costa, haciendo un buen uso de ellas, ya que es uno de los países que experimenta notablemente la entrada del sector privado en sus sectores infraestructurales. Colombia, Ecuador y Perú son muy similares entre ellos, tienen similitudes en

el PIB *per cápita* e IDL, lo que demuestra que con un IDL superior a 2.8 se usa el modelo *landlord*, en algunos casos como esquema único y en otros combinando *landlord*, *private* o *tool port*. Estos países avanzan simultáneamente a competencias mundialistas. Se puede recalcar que en la región sudamericana prevalece el régimen de república democrática, en donde la institución asociada a la gobernanza portuaria se da por ministerios o autoridades autónomas, y en su mayoría son puertos de inversión privada y uso público o gestionado por empresas mixtas.

La figura 13 presenta la matriz de proximidades entre los países. La figura 14 presenta el historial del análisis indicando el número de etapas, los conglomerados que se crean y los coeficientes de distancia euclídea. El resultado de aplicar el análisis de conglomerados a los indicadores es el que se presenta en el dendrograma de las figuras 11 y 12.

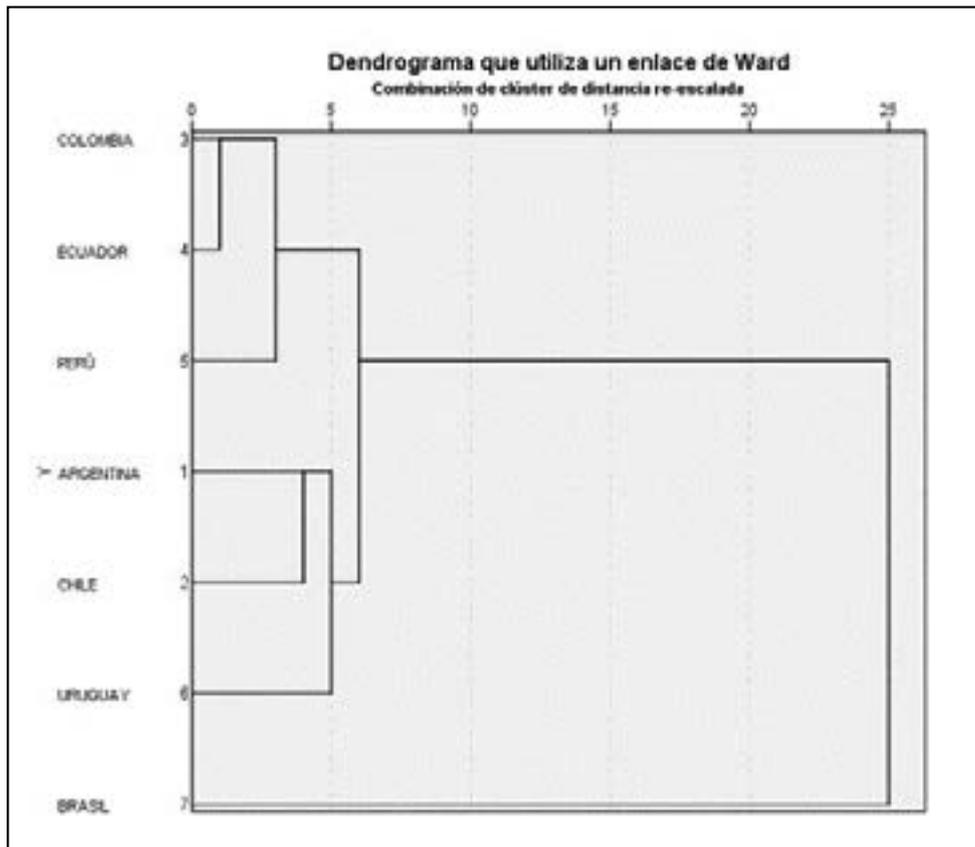


Figura 11. Dendrograma con indicadores portuarios América del Sur (Fuente: Elaboración propia).

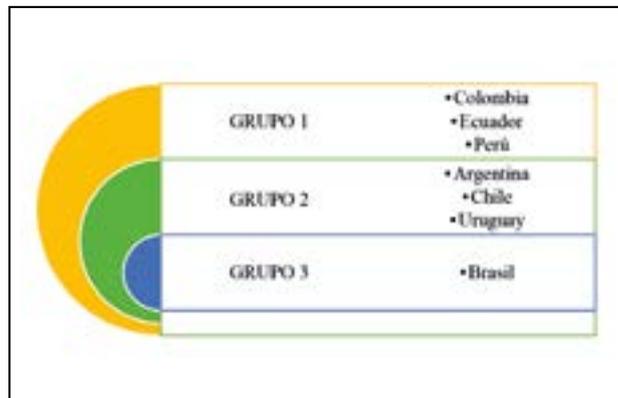


Figura 12. Agrupamientos según el dendrograma América del Sur (Fuente: Elaboración propia).

Caso	Distancia euclídea al cuadrado						
	1: ARGENTINA	2: CHILE	3: COLOMBIA	4: ECUADOR	5: PERÚ	6: URUGUAY	7: BRASIL
1: ARGENTINA	.000	28.850	31.783	27.202	28.871	32.002	65.837
2: CHILE	28.850	.000	19.610	25.314	30.707	31.468	83.672
3: COLOMBIA	31.783	19.610	.000	11.437	19.920	36.549	65.569
4: ECUADOR	27.202	25.314	11.437	.000	17.793	19.693	90.509
5: PERÚ	28.871	30.707	19.920	17.793	.000	26.101	75.614
6: URUGUAY	32.002	31.468	36.549	19.693	26.101	.000	113.418
7: BRASIL	65.837	83.672	65.569	90.509	75.614	113.418	.000

Esto es una matriz de disimilaridad.

Figura 13. Matriz de proximidades América del Sur (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Clúster combinado		Coeficientes	Primera aparición del clúster de etapa		Etapa siguiente
	Clúster 1	Clúster 2		Clúster 1	Clúster 2	
1	3	4	5.719	0	0	2
2	3	5	16.383	1	0	5
3	1	2	30.808	0	0	4
4	1	6	47.157	3	0	5
5	1	3	64.550	4	2	6
6	1	7	126.000	5	0	0

Figura 14. Historial de conglomeración América del Sur (Fuente: Elaboración propia).

4.3. Análisis de los resultados en los países de América del Norte

Del examen de los resultados obtenidos a partir del dendrograma se pueden distinguir los agrupamientos.

Se puede observar cómo México se distancia de Estados Unidos y Canadá, como anteriormente se señalaba. Esto se debe, en primer lugar, a que la superficie de México es menor. En segundo lugar, se puede mencionar que, aunque los puertos sean del Estado, varios son concesionados a empresas privadas, respondiendo al modelo *landlord* y *private port*. La estrategia de la política económica portuaria, considerando las ventajas comparativas y competitivas que ofrece el país y los beneficios esperados de esta industria, se queda corta al compararse a las de Estados Unidos y Canadá, que muestran que en tráfico anual portuario son representados por cifras arriba del billón de acuerdo con el anexo 1.

Los dos países del primer grupo se asemejan en cuanto a superficie, su extensa línea de costa, que cuentan con un gran número de puertos, en cuanto a su IDH superior a 0,9, su PIB per cápita superior a 40.000 dólares, podríamos decir que su corporativa mantiene el equilibrio entre la autonomía comercial y las limitaciones que impone el sector público en cuanto al control y uso de los activos. La operación queda en manos del sector privado, mientras que la infraestructura y terrenos se ponen al servicio de los operadores mediante un sistema de concesiones. También cabe mencionar que estos dos países son unos de los que mayormente reciben pasajeros que destacan por su ubicación turística.

Los sistemas portuarios de América del Norte poseen autosuficiencia económica, a pesar de que sus regímenes políticos no son similares. Se aprecia una tendencia en Estados Unidos, que es el país de América con mayor desarrollo y no tiene un modelo único de gobernanza portuaria.

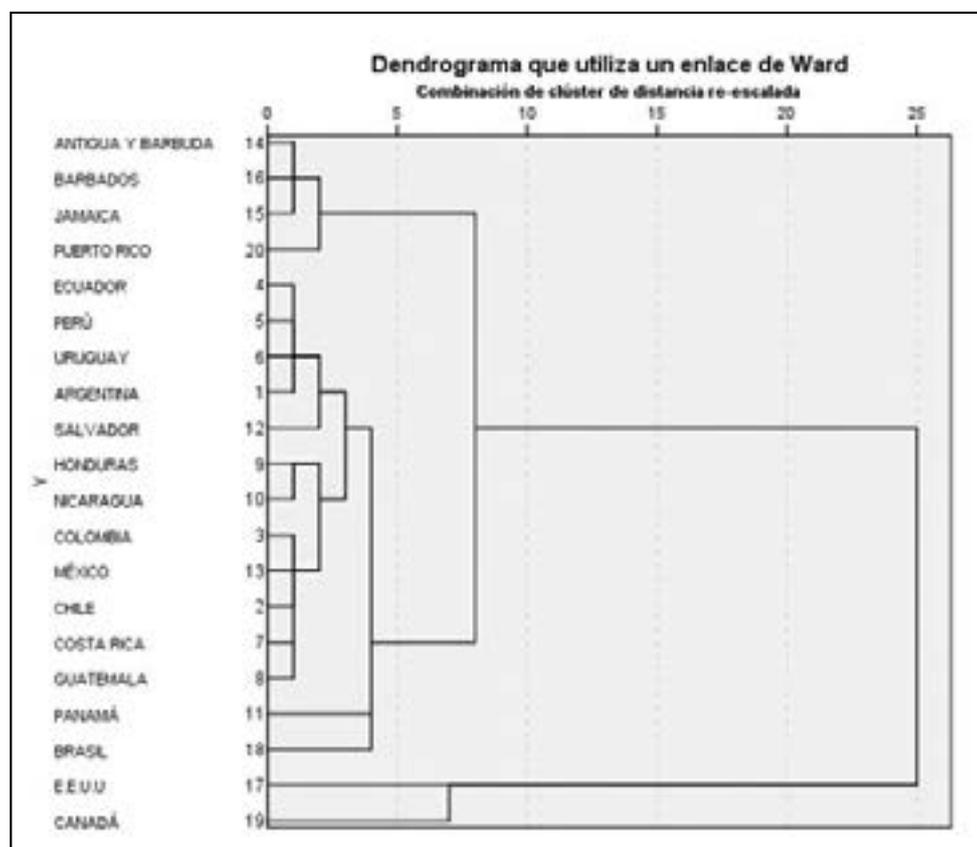


Figura 15. Dendrograma con indicadores portuarios América del Sur (Fuente: Elaboración propia).

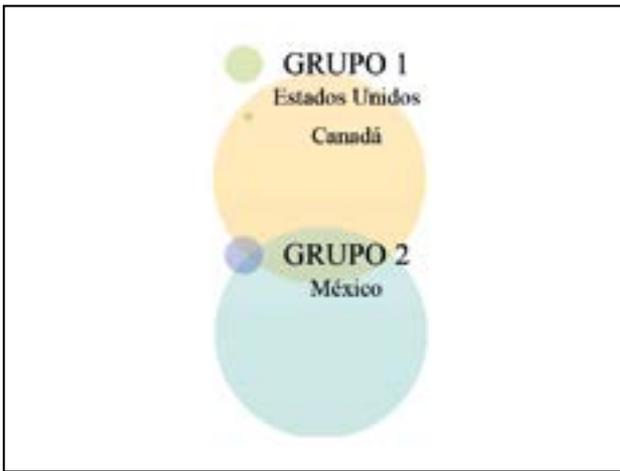


Figura 16. Agrupamientos según el dendrograma América del Norte (Fuente: Elaboración propia).

La figura 17 presenta la matriz de proximidades entre los países.

La figura 18 presenta el historial del análisis, indicando el número de etapas, los conglomerados que se crean y los coeficientes de distancia euclídea. El resultado de aplicar el análisis de conglomerados a los indicadores es el que se presenta en el dendrograma de las figuras 15 y 16.

Caso	Distancia euclídea al cuadrado		
	1: MÉXICO	2: E.U.U	3: CANADÁ
1: MÉXICO	.000	55.804	43.573
2: E.U.U	55.804	.000	26.623
3: CANADÁ	43.573	26.623	.000

Esto es una matriz de disimilaridad.

Figura 17. Matriz de proximidades América del Norte (Fuente: Elaboración propia).

Etapa	Clúster combinado		Coeficientes	Primera aparición del clúster de etapa		Etapa siguiente
	Clúster 1	Clúster 2		Clúster 1	Clúster 2	
1	2	3	13.311	0	0	2
2	1	2	42.000	0	1	0

Figura 18. Historial de conglomeración América del Norte (Fuente: Elaboración propia).

4.4. Análisis de los resultados en las islas del Caribe

Del examen de los resultados obtenidos a partir del dendrograma se pueden distinguir los agrupamientos.

En el primer grupo, a simple vista, se puede observar su tamaño reducido, tanto en superficie como en población. En cuanto la escasez de un Índice de Desempeño Logístico (IDL), se identifica la infraestructura como uno de los puntos más débiles de la región. En relación con el sector

portuario, sus infraestructuras portuarias son públicas, a cargo del Estado, y no se permite la intervención del sector privado, lo que las hace poco competitivas a nivel de América.

En el segundo grupo, se observa que Jamaica y Puerto Rico tienen un gran tráfico portuario, con sus puertos públicos concesionados. Ciertamente sus economías dependen de sus puertos.

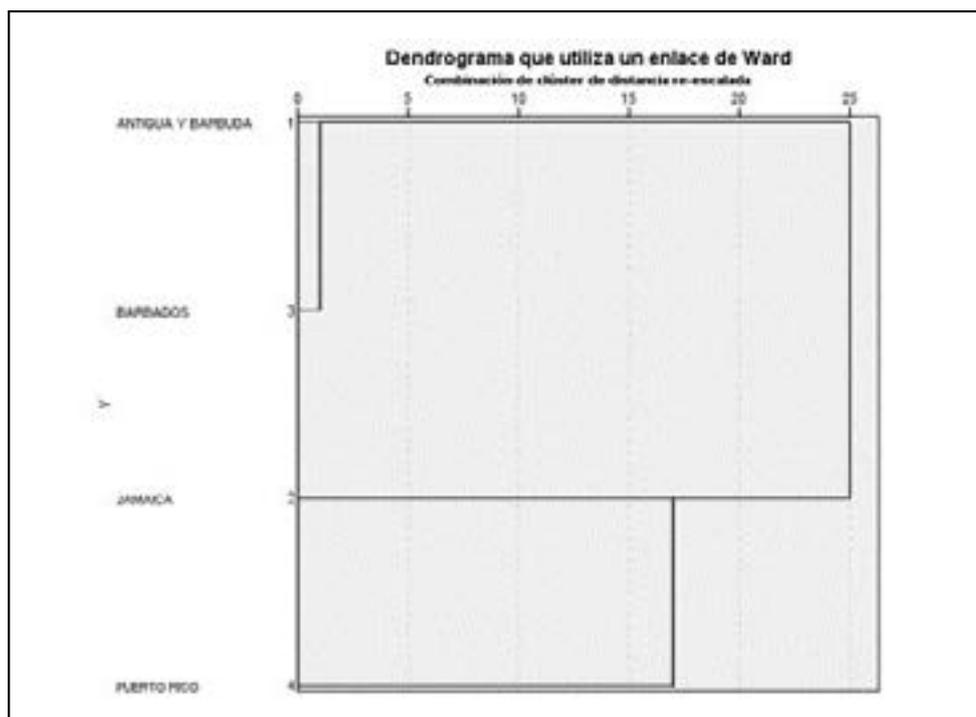


Figura 19. Dendrograma con indicadores portuarios islas del Caribe (Fuente: Elaboración propia).

Caso	Distancia euclídea al cuadrado			
	1: ANTIGUA Y BARBUDA	2: JAMAICA	3: BARBADOS	4: PUERTO RICO
1: ANTIGUA Y BARBUDA	.000	48.469	13.853	31.080
2: JAMAICA	48.469	.000	47.842	42.186
3: BARBADOS	13.853	47.842	.000	44.571
4: PUERTO RICO	31.080	42.186	44.571	.000

Este es una matriz de disimilaridad.

Figura 20. Matriz de proximidades islas del Caribe (Fuente: Elaboración propia).

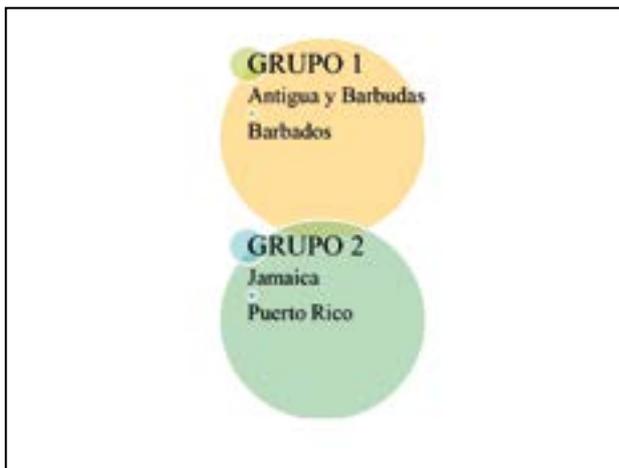


Figura 21. Agrupamientos según el dendrograma islas del Caribe (Fuente: Elaboración propia).

Las islas están sometidas a diversas limitaciones estructurales que restringen su capacidad de alcanzar su pleno potencial de desarrollo. Su reducido tamaño les impide cosechar los beneficios de las economías de escala. Esta región sigue siendo un mercado importante para los transbordos, pero ha ido perdiendo cuota de mercado durante los últimos años.

Etapa	Clúster combinado			Primera aparición del clúster de etapa		Etapa siguiente
	Clúster 1	Clúster 2	Coefficientes	Clúster 1	Clúster 2	
1	1	3	6.926	0	0	3
2	2	4	28.019	0	0	3
3	1	2	57.000	1	2	0

Figura 22. Historial de conglomeración islas del Caribe (Fuente: Elaboración propia).

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos presentados, hay que señalar que la metodología para realizar análisis de conglomerados con herramientas de *clustering* en el entorno portuario, utilizando indicadores que reflejen la actividad portuaria, es efectiva. Se puede afirmar que se puede definir indicadores a través de los cuales se refleje la actividad del país en general y portuaria. El análisis de conglomerados es una herramienta que permite trabajar de manera sencilla, pero rigurosa, en el entorno portuario para realizar agrupamientos, comparaciones o clasificaciones. Se debe elegir un número no muy pequeño de elementos para clasificar y definir los indicadores según el propósito de la investigación. Cuanto más específica sea la investigación, también lo serán los indicadores seleccionados. El número de indicadores tampoco debe ser muy alto para que la herramienta de análisis funcione en las mejores condiciones. Se estima que un número de entre 20 y 50 es apropiado.

Se puede concluir que la gestión portuaria depende de gran cantidad de factores públicos y privados. Es fundamental para entender la estructura portuaria de un país

conocer también su situación y estructura política, pues no es lo mismo el reparto de competencias en un país fuertemente desarrollado con uno en vías de desarrollo.

La región centroamericana en su ámbito comercial, tiene cruce de intereses estratégicos por el canal de Panamá y, lógicamente, un medio cuyos recursos han sostenido a las poblaciones y están siendo también aprovechados por terceros países.

En la región sudamericana los modelos de gestión portuario se encuentran en continua evolución y se adaptan a los cambios y las nuevas necesidades que surgen en el comercio internacional, por lo que los sistemas portuarios nacionales deben estar preparados para asumir los retos futuros sin perder competitividad y siendo sostenibles, tanto social como económicamente.

En la región de América del Norte, las actividades marítimas han tenido, económicamente, la importancia que han alcanzado al ser potencia mundial, sobre todo desde el punto de vista del desarrollo industrial y del desarrollo humano, y del buen uso y la distribución de los recursos.

Las islas del Caribe. Estos pequeños Estados caribeños han iniciado un proceso de modernización marítima a

pasos lentos. En la actualidad aún existen islas que no han empezado su modernización, lo que le conlleva poco tráfico portuario a pesar de que su posición sea estratégica para el paso de grandes barcos.

El modelo de gestión marítima en América se está dotando de nuevos instrumentos, multiplicando las relaciones bilaterales y multilaterales, lo que lo que en unos años será un factor estratégico, por la que se convertirá en columna vertebral del comercio intercontinental.

6. REFERENCIAS

Camarero Orive, Alb., Cerbán Jiménez, M.M., Turias Domínguez, I.J., Camarero Orive, Alf., González-Cancelas, N. (2016). Metodología para la clasificación de los puertos mediante indicadores de explotación utilizando análisis de conglomerados. *INGE CUC*, 12(2): pp. 41-49. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.12.2.2016.04>

Camarero Orive, Alb., Cerbán Jiménez, M.M., Turias, I.J., Camarero Orive, A., y González-Cancelas, N. (2019). Clasificación de los puertos españoles mediante análisis cluster. *Informes de la Construcción*, 71(554): e296. <https://doi.org/10.3989/ic.61806>

Cantillo Guerrero, E.F., Sánchez Sánchez, F., Ardila Rueda, W., Caballero Lafaurie, A., Lázaro Alvarado, D., y Mendoza Zambrano, O. (2011). Aplicación de los fundamentos de clúster y competitividad al sector logístico del departamento del Atlántico, Colombia. *Prospectiva*, 9(1): pp. 89-95. <http://hdl.handle.net/11619/1300>

CEPAL (2019). *Statistical Yearbook for Latin America and the Caribbean 2018 (english/spanish edition)*. UNITED NATIONS. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44445-anuario-estadistico-america-latina-caribe-2018-statistical-yearbook-latin>

Cerbán Jiménez, M.M. (2008). La competitividad portuaria de los puertos de titularidad estatal. *Economistas*, 26(116): pp. 277-282. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2577728>

De Langen, P.W. (2006). Stakeholders, conflicting interests and governance in port clusters. *Research in Transportation Economics*, 17(1): pp. 457-477. [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(06\)17020-1](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(06)17020-1)

Doerr, O., y Sánchez, R.J. (2006). Indicadores de productividad para la industria portuaria. Aplicación en América Latina y el Caribe. *CEPAL-Serie Recursos Naturales e Infraestructura*, 112, pp. 5-14. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=U6zb1xg1EJQC&oi=fnd&pg=PA5&dq=sistema+portuario+america&ots=73ls7PPVmAQ&sig=PGjDd58LHQB8EqmLeO0KdZ-QYaME#v=onepage&q=sistema+portuario+america&f=false>

Field, J.G., Clarke, K.R., y Warwick, R.M. (1982). A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Marine Ecology Progress Series*, 8(1): pp. 37-52. <https://www.jstor.org/stable/24814621>

Gallegos, C.M. (2003). El Rol Estratégico de la Industria Portuaria para el Desarrollo Económico de América Latina y el Caribe. OEA (CIDI/CIP/doc. 128/03) http://www.oea.org/cip/english/docs/the_committee/past_meetings/ordinary_meetings/3meeting_mexico03/16_rol_estra_industria_port_doc128_03.doc.doc

García Erquiaga, E., y Álvarez Fernández, J.C. (1996). Factores de éxito y riesgo en la PYME: Diseño e implantación de un modelo para la mejora de la competitividad. *Economía Industrial*, nº 310, pp. 149-161.

González Laxe, F. (2002). Economía marítima y tipologías portuarias. *Boletín Económico de ICE, Información Comercial Es-*

pañola, 2717, pp. 21-34. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=206155>

Han, J., Kambel, M., y Pei, J. (2012). *Data Mining: Concepts and Techniques*. New York: Elsevier.

Hoffmann, J. (2000). Tendencias en el transporte marítimo internacional y sus implicaciones para América Latina y el Caribe. *Ponencia presentada en la Reunión Anual de la AAPA*, Veracruz, México.

Ledesma Martínez, Z.M., y Sánchez Machado, I.R. (2007). Análisis del riesgo crediticio bancario en la economía cubana. *Teoría y Praxis*, nº 3, pp. 77-87. <http://hdl.handle.net/20.500.12249/782>

Maskell, P., y Kebir, L. (2005). What qualifies as a Cluster Theory?. *DRUID Working Paper 05-09*. Copenhagen: Department of Industrial Economics and Strategy/Alborg University, Department of Business Studies.

Mayora Guaita, H.J. (2014). Importancia de la logística portuaria y resultados de la centralización del sistema de puertos venezolanos. *Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura*, 20(1): pp. 247-269. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=36433515012>

Medal, A., y Sala, R. (2007). Clasificación y eficiencia del Sistema Portuario Español. *XV Jornadas de ASEPUMA y III Encuentro Internacional Rect@*.

Méndez, R., Michelini, J.J., Romeir, P., Sánchez Moral, S., y Romeiro, P. (2006). Ciudades intermedias y desarrollo territorial en Castilla-La Mancha. *Xeográfica*, nº 6, pp. 69-93. <http://hdl.handle.net/10347/3749>

Moreiro González, J.A. (2002). Aplicaciones al análisis automático del contenido provenientes de la teoría matemática de la información. *Anales de Documentación*, nº 5, pp. 273-286. <https://revistas.um.es/analesdoc/article/view/2101>

Moreno, V., y Solé, X. (2004). Uso de chips de ADN (microarrays) en medicina: fundamentos técnicos y procedimientos básicos para el análisis estadístico de resultados. *Medicina Clínica*, 122(1): pp. 73-79.

Navarro Arancegui, M. (2003). Análisis y políticas de clusters: teoría y realidad. *Ekonomiaz: Revista vasca de economía*, nº 53, pp.14-49.

Porter, M.E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. New York: Free Press.

Saldarriaga Restrepo, S., Múnera Osorio, J.D., y Bedoya López, J.C. (2016). *La tecnología y estructura logística que se deben tener en cuenta para el desarrollo del puerto de Urabá (puerto Antioquia) para ser competitivo*. Colecciones digitales. Sistema Nacional de Biblioteca Rafael García Herreros. <http://hdl.handle.net/10656/4599>

Schielke, H.J., Fishman, J.L., Osatuke, K., y Stiles, W.B. (2009). Creative consensus on interpretations of qualitative data: The Ward method. *Psychotherapy Research*, 19(4-5): pp. 558-565. <https://doi.org/10.1080/10503300802621180>

Silva, D. (Universidad Nacional Experimental Marítima del Caribe) (2008). Los puertos de América Latina en el nuevo milenio. En: *Global Conference on Business and Finance Research Proceedings*, 3(1): pp. 313-316.

Valle Arias, A., González Cabanach, R., Núñez Pérez, J.C., Suárez Riveiro, J.M., Piñeiro Aguín, I., y Rodríguez Martínez, S. (2000). Enfoques de aprendizaje en estudiantes universitarios. *Psicothema*, 12(3): pp. 368-375. <http://hdl.handle.net/10651/27512>

Wolfe, D.A., y Gertler, M.S. (2004). Clusters from the inside and out: local dynamics and global linkages. *Urban Studies*, 41(5-6): pp. 1071-1093. <https://doi.org/10.1080/00420980410001675832>

El hidrógeno como futuro de los combustibles en automoción

Hydrogen as the Future of Automotive Fuels

Alejandro Marín Soler^{1*}

Resumen

El presente artículo expone la situación en la que se encuentra actualmente el hidrógeno como fuente alternativa de combustible para el sector de la automoción. Por ello, comenzará con una breve explicación de cómo el hidrógeno puede ser utilizado como una fuente de energía en los diferentes tipos de vehículos, así como sus aplicaciones en estos. Se continuará exponiendo el estado del arte de la tecnología que se puede aplicar hoy en día, explicando cómo se obtiene el hidrógeno que la industria utiliza hoy en día, además de hacer una pequeña mención a la red de suministro actualmente disponible en España. Se continuará mostrando el presente, pero, sobre todo, el futuro de esta tecnología. Pasando por las nuevas formas de producción de hidrógeno de manera sostenible, así como situando a éste como una solución para el transporte pesado por carretera. Asimismo, se presentará un análisis de ciclo de vida para poder mostrar las ventajas de los vehículos de hidrógeno en lo que a impacto ambiental se refiere. Finalmente, el artículo cerrará con algunas conclusiones sobre la tecnología que actualmente disponemos, con sus pros y contras, así como su viabilidad a corto plazo.

Palabras clave: CEV, pila de combustible hidrógeno, transporte por carretera, impacto ambiental, hidrógeno verde.

Abstract

This paper outlines the current status of hydrogen as an alternative fuel source for the automotive sector. First, it begins with a brief explanation of how hydrogen can be used as an energy source in different types of vehicles, as well as its applications in these. Second, it presents the state of the art of the technology that can be applied today, showing how the hydrogen that the industry uses today is obtained. There is also a mention of the supply network currently available in Spain. Third, the present and, above all, the future of this technology is analysed. Further, it looks through new ways of producing hydrogen in a sustainable way, putting it forward as a solution for heavy road transport. Additionally, a life cycle analysis is presented to show the advantages of hydrogen vehicles in terms of their environmental impact. Finally, it draws some conclusions on the technology currently available, with its pros and cons, and its viability in the short term.

Keywords: FCEV, hydrogen fuel cell, heavy road transport, environmental impact, green hydrogen.

1. INTRODUCCIÓN

Atendiendo a los nuevos tiempos que corren en la industria de la automoción en lo que a emisiones contaminantes se refiere, las diferentes marcas del sector están apostando por la electrificación de su flota de vehículos. El principal motivo de este cambio es el de poder alcanzar los objetivos que las diferentes instancias oficiales están dictando en materia de emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero. Sin embargo, no todas las marcas están siguiendo el mismo concepto de electrificación. Por ello, lo que se va a plasmar en el presente artículo es una visión global de cómo una serie de marcas del sector está haciendo una apuesta de futuro, teniendo como base uno de los gases más abundantes en la atmósfera, el hidrógeno. Pero antes de entrar en materia, hemos de remontarnos un poco en el tiempo para poner en situación todo el sector y ver la evolución del mismo en lo que a tipos de motorizaciones se refiere.

Los automóviles, desde su creación a finales del siglo XIX, siempre han utilizado motores de combustión

interna, entendiéndolos como una evolución de la máquina de vapor. Desde su creación, el concepto de éstos siempre ha sido el mismo, el de aprovechar la energía generada al quemar cualquier tipo de combustible fósil para producir un trabajo. Con el paso del tiempo, se ha ido introduciendo una serie de mejoras que han aumentado el rendimiento de éstos, siempre disminuyendo sus gases contaminantes. Pese a ello, cualquier tipo de motor que funcione con combustibles fósiles siempre tendrá un mal endémico, el de generar una serie de gases contaminantes. Por ello, estamos ante unos años clave para un cambio de paradigma en lo que a movilidad se refiere, estimulando a las marcas a estar apostando por diferentes tecnologías para lograr este objetivo de transición.

Si se observa el mercado, se puede apreciar una tendencia generalizada en cuanto a la transición en el sector, la cual viene dada por dos fases. Una primera, en la cual estaríamos totalmente inmersos en este año, y hasta aproximadamente 2035, que es la de proponer un producto que combine un motor de combustión tradicional, junto con una ayuda eléctrica, la cual permita disminuir las emisiones sin encarecer en gran medida el producto final, y sobre todo, sin disminuir la autonomía del vehículo. Las marcas que han optado por esta estrategia lo hacen para poder tener un producto de transición al vehículo eléctrico

* Mail: alejandromarinssoler@hotmail.com

¹ Grado en Ingeniería Mecánica. Máster en Ingeniería de Automoción. Applus + IDIADA.

a baterías, el cual debería ser su único producto más allá del 2035.

En cambio, e introduciendo el propósito final de este artículo, existe una vertiente alternativa. Ésta es menos conocida o, mejor dicho, menos divulgada, pero que puede ser otra posible solución a los problemas de contaminación que se presentan en la actualidad, y con un mayor impacto en el transporte pesado por carretera, como se podrá leer más adelante.

Esta propuesta, que podemos calificar como alternativa, sería la de disponer de vehículos eléctricos de baterías, pero con un extensor de autonomía, el cual, en vez de utilizar combustibles fósiles, puede ser un motor de combustión interna alimentado por hidrógeno o una pila de combustible basada en hidrógeno. De esta forma, se pueden resolver los principales problemas del vehículo eléctrico de batería convencional, tales como la autonomía, el peso, el tiempo de recarga y el impacto ambiental en su construcción y reciclaje, como se comentará más adelante.

2. ESTADO DEL ARTE

Cuando se hace referencia al hidrógeno como alternativa al uso de combustibles fósiles, se puede entender aquí como un carburante alternativo en un motor de combustión interna tradicional. Esto, desde el punto de vista de la técnica, es totalmente viable, ya que el hidrógeno puede aportar diversas particularidades que, en su caso, los combustibles tradicionales no tienen.

Si se ahonda más en el tema, se podría decir que el hidrógeno tiene dos puntos fuertes respecto a los combustibles fósiles. El primero de ellos es que el hidrógeno es una fuente inagotable de energía, a diferencia de los combustibles fósiles, y el segundo, el más importante, es que la combustión de éste no produce ningún gas contaminante para el medio ambiente.

Por tanto, si se contempla el panorama que nos presenta el hidrógeno, este podría ser muy alentador, pero no es totalmente cierto. En realidad, la sustitución total de los combustibles fósiles por el hidrógeno no es viable actualmente. En primer lugar porque, a diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno no se encuentra en estado libre en nuestro planeta, sino formando compuestos como el agua o la mayoría de los compuestos orgánicos. Su producción es tremendamente complicada, económicamente elevada y, por el momento, no se trata de una producción neutra en emisiones de gases contaminantes como subproductos de esta generación.

Por ello, es preciso desarrollar sistemas capaces de producirlo de manera eficiente y limpia. Debido a esto, sería necesario habilitar nuevas infraestructuras o técnicas de producción y de suministro de hidrógeno para permitir su accesibilidad, como si de otro combustible fósil se tratase, creando una completa red de estaciones de servicio de hidrógeno, o “hidrogeneras”, lo cual implicaría una fuerte inversión.

Por este motivo, la única alternativa que tiene actualmente la industria para utilizar el hidrógeno como combustible es mediante su combinación con otras sustancias químicas para la obtención de una energía final. Este proceso, en el caso del hidrógeno, se puede llevar a cabo gracias a la pila de combustible de hidrógeno.

2.1. La pila de hidrógeno

La pila de hidrógeno es una de las tecnologías más prometedoras en la búsqueda de nuevos combustibles y sistemas de movilidad eficientes. La teoría consiste en combinar hidrógeno con oxígeno, con vapor de agua como único residuo, para extraer energía eléctrica. Sin embargo, en la práctica no todo es tan sencillo como parece.

Lo que ocurre en una pila de combustible se llama reacción electroquímica. Se trata de una reacción química, porque implica la unión de dos sustancias químicas, pero también es una reacción eléctrica, porque la electricidad se produce a medida que la reacción sigue su curso.

Una pila de combustible tiene tres partes claves similares a las de una batería (figura 1). Tiene un terminal de carga positiva (que se muestra en rojo), un terminal de carga negativa (azul), y una sustancia química de separación llamada electrolito entre los dos (gris), que los mantiene separados.

En cuanto a la generación de electricidad, el proceso de hidrólisis se realiza de la siguiente manera. El hidrógeno, almacenado en forma de gas en el tanque (mostrado aquí en la flecha roja de la izquierda), alimenta por una tubería al terminal negativo. El hidrógeno es inflamable y explosivo, por lo que el tanque tiene que ser extremadamente resistente. Éste contiene el hidrógeno a una presión de 70 MPa y suele tener una capacidad entre 50 y 100 l, lo que otorga al vehículo una capacidad para almacenar entre 5 y 10 kg de hidrógeno. El oxígeno del aire (flecha roja de la derecha) baja por un segundo tubo hasta el terminal positivo. El terminal positivo (rojo) está hecho de platino, un catalizador de metales preciosos diseñado para acelerar la química que ocurre en la célula de combustible.

Cuando las moléculas de gas de hidrógeno llegan al catalizador, se dividen en iones de hidrógeno (protones) y electrones (pequeñas gotas azules). Los protones, al estar cargados positivamente, son atraídos al terminal negativo (azul) y viajan a través del electrolito (gris) hacia él. El electrolito es una fina membrana formada por una película especial de polímero (plástico) y sólo los protones pueden atravesarla.

Los electrones, mientras tanto, fluyen a través del circuito exterior. Al hacerlo, alimentan el motor eléctrico (representado con una bombilla), que impulsa las ruedas del vehículo o se utiliza para la recarga de la batería del mismo, dependiendo de las necesidades que el conductor demande y de la configuración del vehículo, así como de su electrónica de gestión y control de la energía.

Eventualmente, los electrones también llegan al terminal positivo (rojo). En este terminal, los protones y electrones se recombinan con el oxígeno del aire en una reacción química que produce agua. El agua se desprende del tubo de escape en forma de vapor de agua.

Este tipo de pila de combustible se llama PEMFC (*Proton-Exchange Membrane Fuel Cell*), es decir, Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, que es la utilizada por los fabricantes en automoción y permite su funcionamiento con hidrógeno. Ésta seguirá funcionando mientras haya suministro de hidrógeno y oxígeno. Como siempre hay mucho oxígeno en el aire, el único factor limitante es la cantidad de hidrógeno que hay en el tanque. De

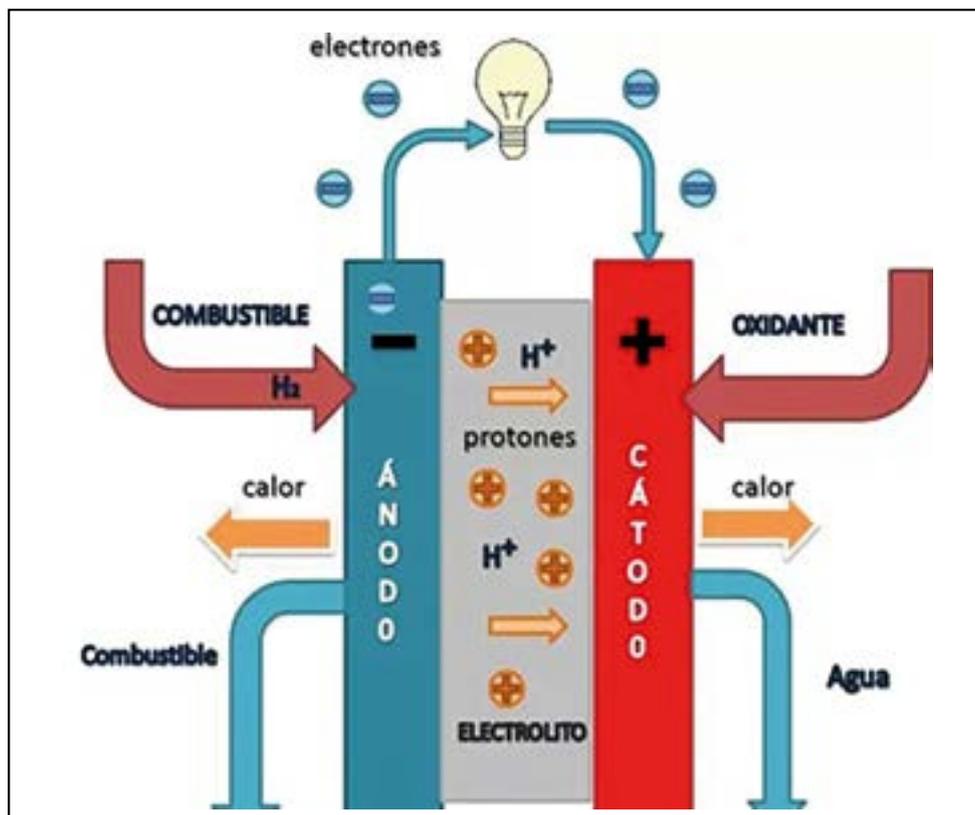


Figura 1. Funcionamiento de una pila de combustible (Fuente: [1]).

ahí que la autonomía de estos vehículos sea igual o similar a la de un vehículo de combustión interna, ya que puede ser mayor o menor en función del tamaño de sus depósitos de hidrógeno.

3. PRODUCCIÓN Y SUMINISTRO

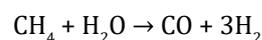
Al igual que la electricidad, el hidrógeno es un excelente vector energético para las diferentes tipologías de vehículos, ya que se puede obtener a partir de diversas fuentes de producción, tales como gas natural, carbón, agua y energías renovables. La utilización del hidrógeno en las celdas de combustible, particularmente en el sector del transporte, permitirá en el futuro diversificar el suministro energético, aprovechar los recursos nacionales y reducir la dependencia de la importación de petróleo.

La producción de hidrógeno a gran escala en estos momentos se está realizando mediante una serie de procesos industrializados que, aunque menos contaminantes, siguen dependiendo de combustibles fósiles o derivados, como es el caso del gas natural, dado que es la forma más eficiente para obtener el hidrógeno. De todos modos, aunque se produzca de esta forma, este tipo de combustible aún no está disponible en las cantidades requeridas por la industria de la automoción y otras industrias, a diferencia del petróleo; por lo tanto, es un proceso industrializado que está en continua evolución y crecimiento para poder suplir las posibles necesidades de la industria.

Además de lo apuntado anteriormente, por parte de los diferentes organismos gubernamentales a nivel europeo se está realizando una fuerte inversión para suplir esta carencia en la producción del hidrógeno, sobre todo el que se puede producir de manera totalmente limpia, como se detalla a continuación.

3.1. Reformado de hidrocarburos y metano

El proceso de reformado es el utilizado durante las últimas décadas para la producción industrial del hidrógeno. El reformado de metano (CH_4) con vapor es la tecnología más económica que existe en estos momentos para la generación del hidrógeno que requiere la industria actualmente. Este proceso, aunque eficaz, sigue dependiendo de la utilización de un gas proveniente de combustibles fósiles, por lo que, aun siendo un buen proceso en cuanto a emisiones, sigue produciéndolas. Para la generación del hidrógeno (H_2), la reacción básica que se produce durante el proceso es la siguiente:



3.2. Electrólisis del agua

El segundo proceso industrializado para la generación de hidrógeno es la aplicación de la electrólisis del agua. Esta forma de producir hidrógeno se utiliza cuando los volúmenes requeridos en una determinada aplicación no son elevados. La reacción electrolítica se realiza en medio alcalino, debido a que en este medio se incrementa la conductividad eléctrica. El hidrógeno producido en el cátodo se debe purificar, ya que contiene impurezas de oxígeno y un cierto nivel de humedad. La corriente de hidrógeno se seca mediante un absorbente y las impurezas de oxígeno se eliminan con un convertidor DeOxo. Además, en el ánodo del electrolizador se produce oxígeno, cuyo volumen es la mitad del volumen de hidrógeno, tal y como corresponde a la composición de la molécula de agua.

Conviene señalar el hecho de que el hidrógeno producido por electrólisis requiere una energía del orden de

4,9-5,6 kWh por cada m³ de hidrógeno producido, lo que resulta al menos dos veces más caro que el hidrógeno obtenido por reformado del gas natural, si tomamos una media del coste de producción en la UE.

Hablando de su precio de venta, el coste del hidrógeno se sitúa en torno a los 10 €/kg de PVP, debido al método de producción que, en caso de realizarse mediante electrólisis, puede alcanzar los 16-18 €/kg.

Por otra parte, cabe destacar que España es un país puntero en lo que a producción de hidrógeno se refiere, mediante la utilización de la hidrólisis, disminuyendo en gran medida su coste. Esto se debe a que las pocas plantas del territorio nacional utilizan el excedente eléctrico de la red, por lo que el coste de la electricidad de situaría sobre los 55 €/MWh, lo cual permite producir hidrógeno sobre los 5-6 €/kg. Este precio es sumamente competitivo, pero hay que remarcar que aún habría que sumarle los costes de distribución y suministro. De esta manera, se puede vislumbrar la obtención de hidrógeno mediante nuevas formas de producción. Estas, además de abaratar el coste, dependiendo de la procedencia de la energía que se utilice, pueden contribuir a producir hidrógeno de manera más ecológica, como se mencionará más adelante.

3.3. Red de suministro

Una vez que se conocen las formas de producción del hidrógeno para la industria de la automoción, se debe tratar el tema del suministro del mismo a los usuarios finales, como si de una gasolinera estuviéramos hablando. Por ello, la recarga de los tanques de hidrógeno de cualquier vehículo que lo utilice como combustible se lleva a cabo en las *hidrogeneras*. Estas “gasolineras de hidrógeno” no son más que una adaptación de una gasolinera convencional para funcionar mediante unos surtidores de hidrógeno, que suministran en pocos minutos los kilogramos necesarios para llenar los depósitos de los vehículos.

Actualmente, la infraestructura de hidrogeneras en España es bastante limitada, por no decir prácticamente

inexistente. El repostaje del gas tiene en la venta del propio hidrógeno uno de los mayores condicionantes, ya que, en España, la lista de hidrogeneras no llega a la decena, en concreto, son sólo ocho los puntos de repostaje de hidrógeno en todo el territorio nacional.

Por comunidades autónomas, la mayor concentración de hidrogeneras en España se localiza en Aragón, con tres estaciones de servicio en las localidades de Huesca, Barbastro y Zaragoza, seguidos de Andalucía, con una en Sanlúcar La Mayor y otra en Sevilla, y dos en Castilla-La Mancha, ubicadas en Puertollano y Albacete, respectivamente. Cerrando el listado, hay una única estación de hidrógeno en Madrid, situada en la propia ciudad. Cabe remarcar que, aunque estén construidas las hidrogeneras mencionadas, a día de hoy sólo tres de ellas se encuentran operativas: las dos de Castilla-La Mancha y la de Huesca (figura 2).

Esta escasez en el número de ubicaciones para la recarga viene dada por el número testimonial de ventas de vehículos que utilizan este combustible. También es cierto que los pocos usuarios que opten por esta tecnología diferenciada se lo piensan dos veces si no disponen de puntos para la recarga del gas que impulsa sus vehículos. Esto hace que un problema retroalimente al otro y que no se avance en la infraestructura. Esto puede cambiar, como se ha mencionado anteriormente, gracias a los planes impulsados desde diferentes organismos para proveer de puntos de recarga de este combustible a los vehículos.

En lo referente al repostaje en sí, recargar hidrógeno en un coche con pila de combustible es similar a repostar gas, bien sea gas natural comprimido (GNC) o gas licuado del petróleo (GLP), ambos hidrocarburos, cuya red de distribución es ampliamente superior a la de hidrógeno.

La arquitectura de estos surtidores es muy similar a la que podemos encontrar en cualquier gasolinera hoy en día. Cuenta con una manguera a la que se instala un conjunto formado, principalmente, por el gatillo y el boquerel. Este cuenta con una cánula que tiene un sistema de seguridad, con acoplamiento y cierre a la boca de carga del depósito de hidrógeno.

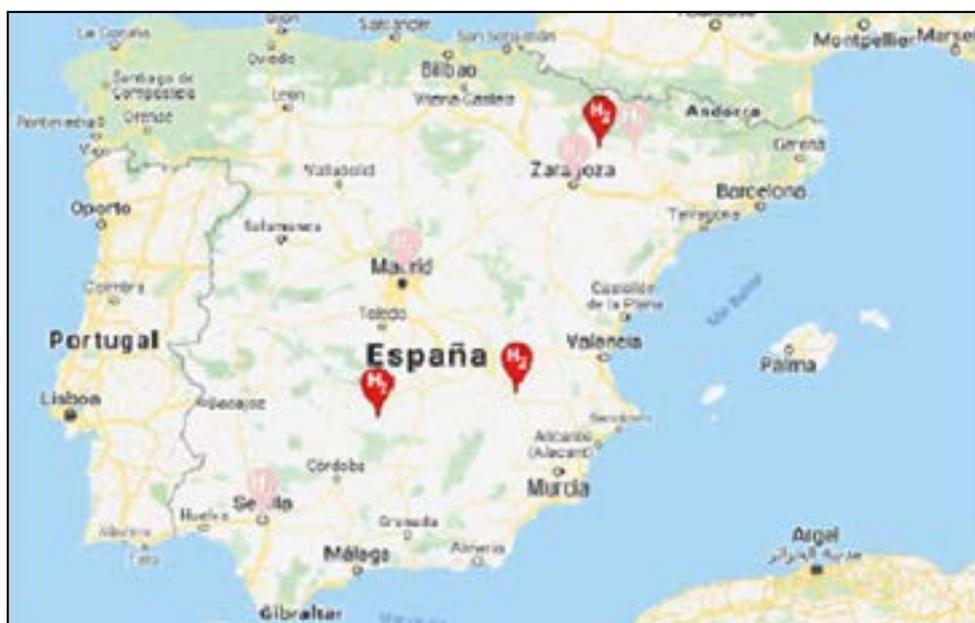


Figura 2. Mapa de hidrogeneras de España (Fuente: [2]).

Por tanto, el repostaje es muy similar al de un coche de combustión, con la diferencia del sistema de anclaje de seguridad, ya que se está repostando un gas a alta presión. En lo referente al tiempo de recarga, estaríamos hablando de unos 5-8 minutos, dependiendo del tipo de tanque de hidrógeno que disponga el vehículo. Esto hace que se obtenga un tiempo similar al que presentaría cualquier vehículo convencional y mucho menos tiempo que la recarga de una batería de vehículo eléctrico.

4. PRESENTE Y FUTURO

Una vez que se ha comentado tanto el proceso de generación del hidrógeno, como la forma en que se puede utilizar como fuente de energía para impulsar los diferentes tipos de vehículos, se van a tratar a continuación los puntos clave para la viabilidad de esta tecnología actualmente, y en mayor medida, en los próximos años.

Para ello, se debe remarcar que el principal problema de la tecnología pasa por la escasa, por no decir inexistente, red de recarga, además de la necesidad de producir hidrógeno realmente de manera limpia para convertirse en una alternativa real a cualquier otro tipo de unidad motriz. A esto se le suma el coste de la propia tecnología, pero al igual que en su día sucedió con los motores de combustión interna, a medida que el mercado crezca y la producción se realice en masa, el precio disminuirá.

4.1. Producción limpia de hidrógeno

Como se ha mencionado anteriormente, el mayor problema del hidrógeno es que su producción depende en mayor medida de la utilización de combustibles fósiles o derivados, por lo que, aun pudiendo producir la demanda teórica, seguiría sin ser una producción totalmente limpia.

Por ello, el factor crucial será lograr una producción a partir de métodos que no sean perjudiciales para el medio ambiente. En consecuencia, existen multitud de proyectos de investigación en busca de un método de producción ecológico y viable económicamente, con ayudas por parte de los diferentes gobiernos y organizaciones, incluidas las principales marcas alrededor del mundo.

Después de realizar una búsqueda de este tipo de proyectos de I+D, cabe resaltar el realizado por la Universidad de Stanford [3], donde investigadores de dicha universidad han ideado una manera de generar combustible de hidrógeno utilizando la electrólisis del agua, energía solar y agua salada sin purificar.

Como señalan en este estudio, esta tecnología podría revolucionar la producción de hidrógeno consiguiendo que fuera más económico, además de producir mayor cantidad del mismo en un menor tiempo. Esto lo consiguen gracias a la energía fotovoltaica, que permite una nueva concepción en la producción del hidrógeno, ya que esta se podría realizar en las propias estaciones de repostaje, eliminando costes de producción y transporte.

Además de este tipo de proyectos de I+D donde se intenta generar hidrógeno a partir de fuentes renovables, y no de combustible fósiles, existen otro tipo de proyectos donde se busca generar una nueva infraestructura de producción/recarga, como si de un entorno circular se tratara.

Por ello, y más teniéndolo en territorio nacional, cabe destacar el proyecto *Power to Green Hydrogen Mallorca* [4], impulsado por el Gobierno Balear y diferentes empresas del sector energético, que propone la creación de una planta de generación de hidrógeno, totalmente sostenible y que lidere el cambio de las Islas a un consumo de combustibles fósiles menor hasta sustituirlos por, en este caso, un combustible alternativo y limpio como es el hidrógeno. El proyecto comenzará en 2021, con un presupuesto de 50 millones de euros y se espera que en 2023 la planta esté totalmente operativa, consiguiendo así ser la planta de generación de hidrógeno más importante de Europa. Una planta que se nutrirá de energía fotovoltaica y eólica producida en Mallorca, y que se convertirá en uno de los primeros pasos para ir cambiando el modelo energético de la isla.

Este proyecto consiste, básicamente, en convertir la energía fotovoltaica en hidrógeno, que se realizará a través de esta planta situada en el municipio de Lloseta. El segundo paso será almacenar el hidrógeno a través de varios sistemas, para proporcionarlo como combustible tanto a los autobuses de la Empresa Municipal de Transportes (EMT), como a los coches de alquiler que se recogen en el aeropuerto, a las naves de los polígonos industriales y a los hoteles que cuenten con las instalaciones adecuadas.

Así se podrá iniciar la fase de descarbonización de la isla, e ir sustituyendo los combustibles fósiles por una energía limpia, que no generaría ningún tipo de contaminación en el entorno. Con la producción de hidrógeno que se genere en esta planta será suficiente para cubrir toda la demanda de los clientes de Mallorca, pero tampoco se descarta que, a través del sistema de almacenaje, se pueda distribuir también a la península.

4.2. Transporte pesado por carretera

Por último, utilizando toda la información anteriormente presentada y viendo el futuro de la industria, el hidrógeno puede ser una opción muy viable para la descarbonización del transporte pesado por carretera.

Haciendo un breve repaso a la tecnología actual, se puede observar que los sistemas de propulsión que utilizan las pilas de hidrógeno son sumamente complejos y, por el momento, de un tamaño considerable. Debido a esto, en vehículos de pequeño tamaño, como turismos, el realizar miniaturizaciones de este tipo de sistemas resultaría realmente caro en términos económicos. Por este motivo, a día de hoy, quedan en un segundo plano ya que el estado de la técnica no los hace económicamente viables.

Por otro lado, y utilizando el mismo principio, el crear vehículos pesados de transporte por carretera completamente eléctricos impulsados por baterías es totalmente inviable, dado el elevadísimo peso de éstos, por no mencionar los eternos tiempos de recarga. Es aquí donde la tecnología de utilizar el hidrógeno como generador de energía eléctrica, que permite repostar en pocos minutos y evita montar gigantescas baterías, podría ser una opción más viable actualmente con la tecnología de baterías que se tiene hoy en día.

Para ejemplificar que esta tecnología brindará la transformación del parque de vehículos industriales de transporte por carretera, se puede tomar como referencia a la

empresa MAN, una de las más potentes del sector, la cual ya presenta información acerca de su nuevo vehículo para el transporte por carretera que utiliza una pila de hidrógeno para su generación de energía. Este vehículo promete recargas en pocos minutos, gran capacidad de arrastrar mercancía gracias a sus motores eléctricos, y por supuesto, una gran autonomía, alrededor de los 800 km [5]. Este vehículo comenzó su fase de pruebas en otoño de 2021, con vistas a que esté en circulación en 2024.

5. IMPACTO AMBIENTAL

Una vez se ha situado al vehículo con pila de hidrógeno como una nueva alternativa electrificada, se debe realizar una comparativa con las diferentes tipologías de propulsión actuales, tales como la tecnología de motores de combustión existente, la tecnología híbrida e incluso los vehículos eléctricos de batería, para poder conocer realmente su impacto sobre el medio y cuantificar cuál de estas arquitecturas proporciona un impacto ambiental menor.

Para ello, la manera más contundente de abarcarlo y encontrar una solución pasa por la realización de un análisis de ciclo de vida (ACV) del vehículo [6]. Esta es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo, esto es, de la cuna a la tumba. Se trata de una técnica que engloba los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto mediante:

- La recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto (producto/proceso en estudio).

- La evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario.
- La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

Este tipo de análisis comprende cualquier proceso, de principio a fin, de un producto determinado, en este caso un vehículo, consistiendo estos procesos en las diferentes etapas de un ciclo de vida de un bien de consumo (figura 3).

Dado que para realizar este tipo de análisis se necesitan multitud de datos y mediciones, es realmente complicado hacerlo uno mismo. Por ello, se va a mostrar un ACV que realizó Toyota, comparando un vehículo eléctrico suyo, el MIRAI, basado en pila de combustible (FCEV), con sus propios vehículos de combustión e híbridos, disponiendo así de toda la información necesaria [7].

Sin ahondar en los diferentes análisis y mediciones intermedias, las cuales se encuentran en el artículo que se acaba de referenciar, se muestra a continuación una gráfica en la que se comparan las emisiones de CO₂ de toda la vida de cada vehículo (figura 4). En ella aparecen reflejados a lo largo de una vida de uso las siguientes arquitecturas de vehículos:

- GV (*Gasoline Vehicle*): vehículo con motor de combustión de gasolina.
- HV (*Hybrid Vehicle*): vehículo híbrido.
- MIRAI NG (*Natural Gas*): FCEV de Toyota que utiliza hidrógeno proveniente de reformado de hidrocarburos.
- MIRAI RE (*Renewable Energy*): FCEV de Toyota que utiliza hidrógeno verde.

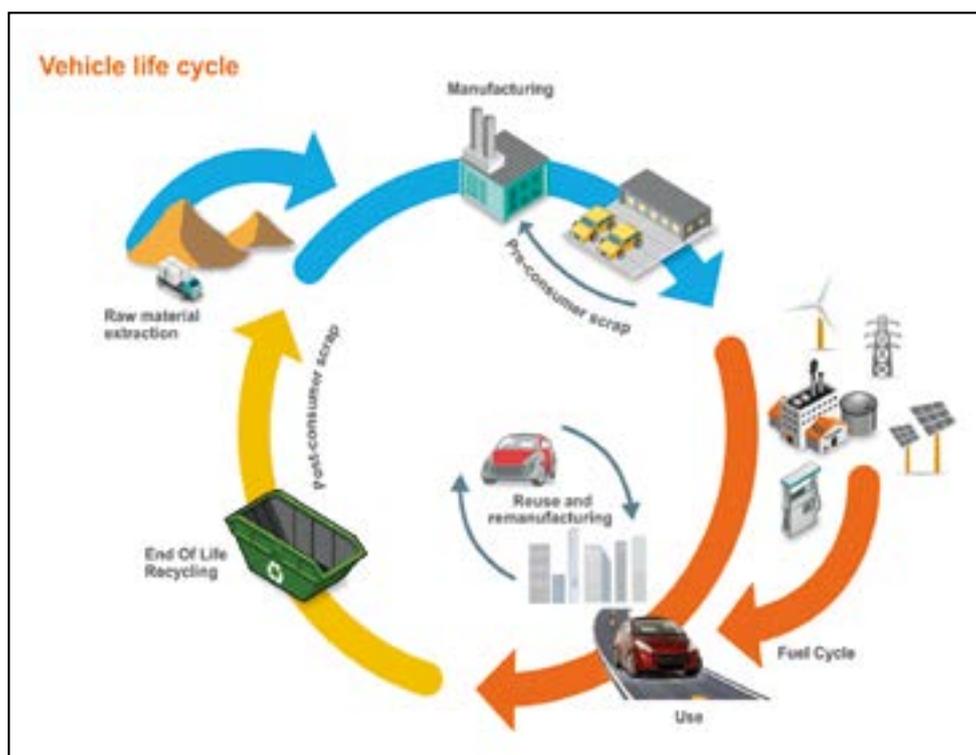


Figura 3. Procesos comprendidos en un análisis de ciclo de vida de un bien de consumo (Fuente: [6]).

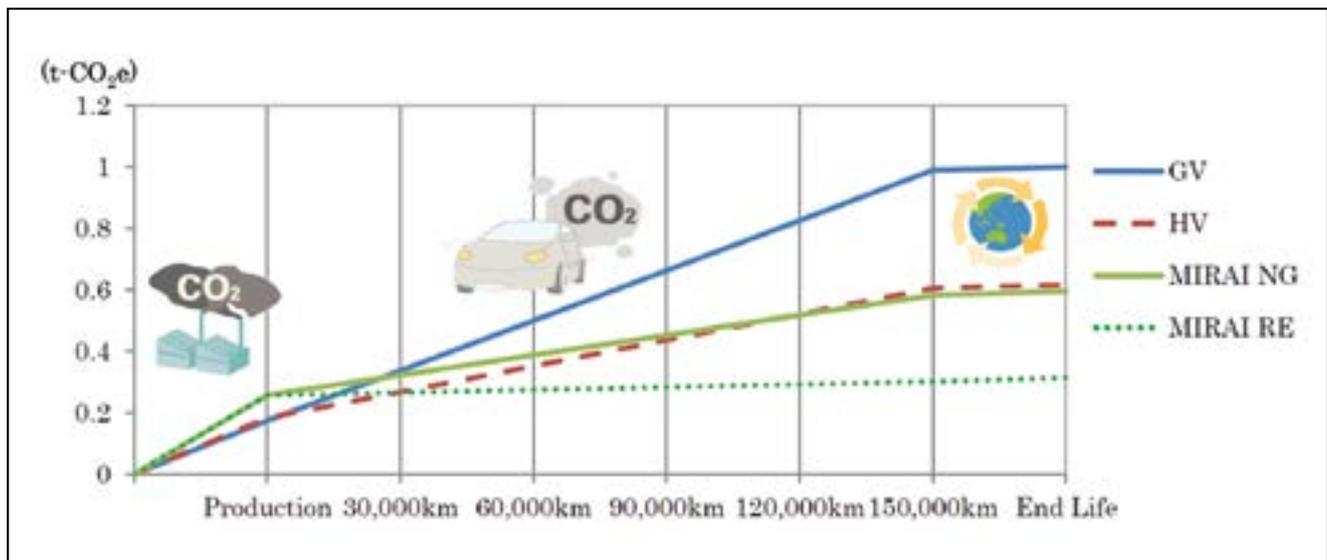


Figura 4. Resultados emisiones de CO₂ durante todo el ciclo de vida (Fuente: [7]).

Como se puede observar, existe una gran diferencia entre utilizar un hidrógeno verde y otro que proviene de combustible fósiles, y es aquí donde converge todo lo citado anteriormente, ya que si no se logra el combustible mediante ese tipo de producción no se va a poder revertir el problema de contaminación que actualmente sufre el planeta.

A su vez, y por enfatizar el gran futuro de esta tecnología en el transporte por carretera, si se mira con detenimiento la figura 4 se puede observar cómo la alternativa de vehículo FCEV, impulsado con hidrógeno producido mediante fuentes renovables, aporta una rebaja sustancial en lo que a contaminación de CO₂ /km se refiere. Se vislumbra que la rebaja de emisiones es cuantiosa respecto a cualquier otra tipología. Como alternativa que no aparece en la figura, se tendría la de un vehículo impulsado 100 % por baterías, con la cual rivalizaría, y siempre dependiendo del *mix* energético que se utilizara para la generación de electricidad para la recarga de sus baterías.

Remarcar que el estudio está realizado comparando tipologías de vehículos de turismo, por lo que el realizar un ACV concreto para el transporte pesado por carretera podría hacer variar algo estos valores, pero seguirían en principio la misma tendencia. Esto es así debido a que el transporte por carretera necesitaría un estudio basado en una distancia mucho mayor, dada la vida útil de estos vehículos. En definitiva, este tipo de vehículos siguen las mismas tendencias de producción que un turismo, pero a una escala de construcción mayor, por lo que a nivel de materiales, construcción o vida de uso, sería equivalente.

6. CONCLUSIONES

En definitiva, después de toda la información adjunta en el presente artículo, y como conclusión al mismo, se observa cómo la industria ha ido mejorando una tecnología llamada a ser una de las alternativas más factibles a los combustibles fósiles, sobre todo, y tal como se vislumbra en las perspectivas futuras, en los grandes vehículos para el transporte pesado por carretera.

Para ello, la industria de la automoción, además de las diferentes instancias gubernamentales, debe seguir apostando por esta nueva fuente de energía, impulsando proyectos

de generación de hidrógeno de manera sostenible, sin necesidad de combustibles fósiles, y potenciando la creación de infraestructuras de recarga a lo largo de la geografía nacional y europea.

Además de esto, se conoce que esta nueva tecnología supone unos retos tecnológicos enormes, por la complejidad técnica de todo el equipo de generación de energía a partir del hidrógeno que se debe alojar en los vehículos. Como se ha mencionado, esto tiene un coste económico realmente elevado mientras no se impulse la tecnología y pueda bajar de precio gracias a la economía de escala. Por ello, se debe seguir la senda de incentivación a los usuarios o empresas, por ejemplo mediante ayudas para la compra de esta nueva generación de vehículos.

Finalmente, cabe mencionar que la sociedad actual demanda que las empresas del sector del transporte por carretera, ya sea de turismos o pesados, apuesten por la sostenibilidad, y de ahí la necesidad de buscar combustibles alternativos y respetuosos con el medioambiente, entre otros, el hidrógeno verde. Está en nuestras manos empezar este cambio, ya que se dispone del conocimiento para ir desarrollando esta tecnología para que, poco a poco, se pueda ir introduciendo como una alternativa más.

7. REFERENCIAS

- [1] Autogazette (2010). Hydrogen-Mazda: Saubere Drehorgel. <https://www.autogazette.de/politik/hydrogen-mazda-saubere-drehorgel-78184.html>
- [2] Centro Nacional del Hidrógeno (2019). Mapa Hidrogeneras. <http://auto.cnh2.es/mapa-hidrogeneras/>
- [3] Stanford University (2019). Stanford researchers create hydrogen fuel from seawater. <https://news.stanford.edu/2019/03/18/new-way-generate-hydrogen-fuel-seawater/>
- [4] Mestre, J.F. (2019). La fábrica de Lloseta será la planta de hidrógeno más importante de Europa. *Diario de Mallorca* (08/05/19). <https://amp.diariodemallorca.es/part-forana/2019/05/08/fabrica-lloseta-sera-planta-hidrogeno/1415177.html>
- [5] MAN Truck & Bus (2021). Hydrogen meets truck. Man is building initial prototypes. <https://www.mantruckandbus.com/>

en/innovation/hydrogen-meets-truck-man-is-building-initial-prototypes.html

[6] World Steel Association (2021). Five Things To Look for in an Automotive LCA. <https://ahssinsights.org/blog/five-things-to-look-for-in-auto-lca/>

[7] Toyota Motor Corporation (2015). The MIRAI Life Cycle Assessment Report. http://www.gronabilister.se/toyota-mirai-lca.pdf?cms_fileid=9b81589a2a7ae33e34936c3de80b4c51

7.1. Referencias complementarias

ALD-Automotive (2019). ¿Cuánto cuesta y cómo se produce el hidrógeno para automoción? <https://noticias-renting.aldautomotive.es/produccion-hidrogeno-automocion/>

Carscoops (2018). Nikola One Hydrogen Electric Semi Hits The Road In Official Film. <https://www.carscoops.com/2018/01/nikola-one-hydrogen-electric-semi-hits-road-official-film/>

García Fierro, J.L. (2011). El hidrógeno: metodologías de producción (2011). *Lychnos*, nº 6. http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/hidrogeno_metodologias_de_produccion

Rincón Educativo (2016). El hidrógeno y la energía. <http://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/el-hidrogeno-y-la-energia>

Woodford, C. (2021). Fuel cells. <https://www.explainthatstuff.com/fuelcells.html#whatare>

El sistema VIGÍA: control de pandemias a través del análisis del agua residual

The VIGÍA System: Pandemic Control Through Wastewater Analysis

Antonio Lastra de la Rubia^{1*}, Jaime Botello Herranz², Alejandro Pinilla Riveiro³, Juan Sánchez García⁴, Pascual Fernández Martínez⁵

Resumen

Este estudio analiza la presencia y dinámica del ARN del SARS-CoV-2 en el sistema de saneamiento de aguas residuales de la Comunidad de Madrid, iniciado a principios de 2020. Los resultados estadísticos se presentan diariamente a través de una plataforma que sirve como herramienta para la detección temprana del ARN del SARS-CoV-2 y su propagación, mediante técnicas de epidemiología basada en aguas residuales (WBE, por sus siglas en inglés). El proyecto recibe el nombre de “SISTEMA VIGÍA”.

La primera aproximación fue la realización de una prueba piloto para establecer los criterios de selección de los puntos de muestreo. Posteriormente, la red para toda la Comunidad de Madrid se conformó con 289 puntos de muestreo, que recogen los vertidos de casi siete millones de habitantes.

En este documento se resume la metodología referente a los análisis de laboratorio y estadísticos, así como la interpretación de resultados. Cada punto de muestreo representa a una cuenca de la red de alcantarillado, donde algunos de ellos se encuentran en una distribución en cascada. Las muestras se analizan para determinar la concentración de ARN del SARS-CoV-2 (gc/l, copias del genoma por litro), y se analizan diferentes parámetros fisicoquímicos para validar o descartar muestras alteradas. Se establecen comparaciones de los resultados de las muestras recogidas en campo, con los indicadores de salud disponibles como son las tasas de incidencia y los datos de hospitalización, observando correlación entre estas variables. Esta información se comparte diariamente con las autoridades sanitarias para el asesoramiento y la toma de decisiones.

Palabras clave: SARS-CoV-2; Epidemiología basada en las aguas residuales (WBE); salud pública; VIGÍA, aguas residuales.

Abstract

This study analyses the presence and dynamics of SARS-CoV-2 RNA in the wastewater sanitation system of the Community of Madrid, initiated in early 2020. The statistical results are presented daily through a platform that serves as a tool for the early detection of SARS-CoV-2 RNA and its spread, using to this effect wastewater-based epidemiology (WBE) techniques. The project is named “Vigia System”.

The first step was to conduct a pilot test to establish the criteria for the selection of sampling points. Then, a network for the entire Community of Madrid was built with 289 sampling points, collecting the discharges of almost seven million inhabitants.

Thus, this paper summarises the methodology followed regarding the laboratory and the statistical analyses, as well as the interpretation of the results. Each sampling point represents a catchment of the sewerage network, where some of them are in a cascading distribution. Samples are analysed for SARS-CoV-2 RNA concentration (gc/l, genome copies per litre), and different physicochemical parameters are analysed to validate or discard altered samples.

Finally, comparisons are made between the results of samples collected in the field by using available health indicators such as incidence rates and hospitalisation data, and observing correlations between these variables. This information is shared daily with health authorities for advice and decision making.

Keywords: COVID-19, Wastewater-Based Epidemiology (WBE), public health, VIGÍA, wastewater.

* Autor de contacto: alastra@canal.madrid

¹ Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. Subdirección de I+D+i, Canal de Isabel II. C/ Santa Engracia 125, Madrid.

² Ingeniero de caminos, canales y puertos. Subdirección de I+D+i. Canal de Isabel II. C/ Santa Engracia 125, Madrid.

³ Ingeniero industrial. Subdirección de I+D+i, Canal de Isabel II. C/ Santa Engracia 125, Madrid.

⁴ Ingeniero de caminos, canales y puertos. Dirección de Innovación e Ingeniería. C/ Santa Engracia, 125, Madrid.

⁵ Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales. Consejero delegado. Canal de Isabel II. C/ Santa Engracia, 125, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

A principios de 2020, a consecuencia de la evolución de la pandemia COVID-19, se llevaron a cabo diferentes estudios en los cuales se validaron procesos de monitorización y detección de trazas del SARS-CoV-2 en las aguas residuales en múltiples países. Canal de Isabel II, como empresa responsable de la gestión de la infraestructura hídrica en la Comunidad de Madrid, ideó desde la Subdirección de I+D+i un sistema para la monitorización de la propagación del SARS-CoV-2 en las aguas residuales que sirviera como herramienta en la toma de decisiones para las autoridades sanitarias de la Comunidad de Madrid.

Se realizaron estudios previos que informaron de la detección de ARN del SARS-CoV-2 en las aguas residuales

en diferentes países como son los Países Bajos (Medema *et al.*, 2020), EEUU (Sherchan *et al.*, 1406), Australia (Ahmed *et al.*, 2020a) e Italia (La Rosa *et al.*, 2020). Uno de los primeros estudios basados en la vigilancia de COVID-19 en aguas residuales se realizó en Australia, donde se enumeraron las copias de ARN viral utilizando la reacción en cadena de la polimerasa cuantitativa con transcriptasa inversa (RT-qPCR), lo que dio como resultado dos detecciones positivas dentro de un periodo de seis días desde la misma estación depuradora de aguas residuales (EDAR), (Ahmed *et al.*, 2020a). En los Países Bajos se analizaron muestras de aguas residuales en seis ciudades y el aeropuerto mediante ensayos de RT-qPCR, tres de los cuales se enfocaron en el gen de la nucleocápside (N1-N3) y uno el gen de la envoltura (E), a principios de marzo, se detectaron uno o más fragmentos de genes en las aguas residuales de tres sitios (Medema *et al.*, 2020). En Italia, se probaron doce muestras de aguas residuales en afluentes, recolectadas entre febrero y abril de 2020 de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Milán y Roma, de las cuales seis de las doce muestras fueron positivas. Uno de los resultados positivos se obtuvo en una muestra de aguas residuales de Milán recogida unos días después del primer caso italiano notificado de SARS-CoV-2 autóctono (La Rosa *et al.*, 2020).

2. OBJETIVOS PERSEGUIDOS

En este estudio, el objetivo fue analizar la presencia y evolución del material genético del SARS-CoV-2 en el sistema de saneamiento de aguas residuales de la Comunidad de Madrid basado en el método RT-qPCR como una herramienta potencial para la detección de alerta temprana de la propagación del SARS-CoV-2 en la población. Dicho trabajo se inició a finales del mes de marzo del 2020, cuando las cifras epidemiológicas en España de casos confirmados de personas contagiadas de COVID-19 y decesos diarios rondaban los 10.000 y 850 respectivamente (Worldometer.info, 2020), coincidiendo con la cresta de la primera ola de la pandemia que afectó a España y en particular a la Comunidad de Madrid. El proyecto partió con el reto de monitorizar las aguas residuales de prácticamente toda la región de Madrid, lo cual supuso la definición de cada una de las cuencas de alcantarillado de la Comunidad de Madrid y se tuvo que realizar una selección exhaustiva de puntos de muestreo de la red de saneamiento que recogerían datos relevantes para la investigación, con el fin de representar la carga viral por habitante.

Para la definición de dichas cuencas de alcantarillado se tuvieron en cuenta varias variables como la distancia al centro de la ciudad o el número de habitantes. Cada punto de muestreo recolecta las aguas residuales de las diferentes cuencas de alcantarillado definidas, esto significa que semanalmente se monitorean más de seis millones y medio de habitantes. Además, teniendo en cuenta que la red de alcantarillado tiene una configuración de red arbórea, algunos de esos puntos de muestreo recogen las aguas residuales de otros puntos aguas arriba en el sistema de alcantarillado, a lo que se denomina distribución en cascada. En la actualidad, este estudio se lleva a cabo en toda la Comunidad de Madrid mediante 289 puntos de muestreo estratégicamente ubicados en colectores a lo largo de la red de alcantarillado y en estaciones depuradoras de agua residual.

La investigación anterior se basa en la recogida de muestras individuales con periodicidad semanal de los 289 puntos de muestreo definidos en el sistema y, posteriormente, se realiza el análisis de laboratorio de dichas muestras, un proceso de cribado y validación de datos y un análisis estadístico de los resultados obtenidos, para finalmente visualizarlo en una plataforma de interpretación de resultados. Los resultados son representados como datos de visualización gráfica (Canal de Isabel II, 2020) por esta poderosa herramienta, que actúa como un sistema de detección de alerta temprana del SARS-CoV-2. Esos resultados ya han sido útiles para anticipar la segunda, tercera, cuarta y quinta oleadas que se han producido de la pandemia en la Comunidad de Madrid, mostrando similitudes en cuanto a tendencias se refiere entre las concentraciones de material genético de SARS-CoV-2 en las aguas residuales y los datos de hospitalización comunicados por la Consejería de Sanidad de la Comunidad de Madrid (<https://www.comunidad.madrid/covid-19>).

Este estudio, desarrollado por Canal de Isabel II en las aguas residuales, detecta la propagación de SARS-CoV-2 a través de un enfoque epidemiológico. Estos datos se comparten diariamente con la Consejería de Sanidad de la región de Madrid con fines de consulta y toma de decisiones.

3. METODOLOGÍA UTILIZADA

Este estudio se ha realizado sobre toda la red de saneamiento de la Comunidad de Madrid, la cual se encuentra principalmente combinada y da servicio a 179 municipios. La red cuenta con más de 15.000 km de colectores y emisarios y 157 estaciones depuradoras de aguas residuales, todas ellas responsables del tratamiento de las aguas residuales de más de seis millones y medio de habitantes (Las-tra *et al.*, 2019).

En la actualidad, este estudio se realiza en toda la Comunidad de Madrid mediante 289 puntos de muestreo ubicados estratégicamente a lo largo de la red de alcantarillado y las estaciones depuradoras de aguas residuales, y se caracterizan semanalmente en términos de concentración de ARN SARS-CoV-2. En estudios previos se apunta a que una estrategia de muestreo semanal ofrece una cuantificación adecuada (La Rosa *et al.*, 2020), y esto es especialmente relevante en sistemas con gran número de puntos y amplia extensión geográfica, en los que hay que alcanzar un compromiso entre representatividad y capacidad de realizar análisis.

Para ello se ha dispuesto un complejo sistema logístico de entre cuatro y seis rutas diarias de recogida de muestras puntuales de 500 ml, las cuales se planifican diariamente desde aguas arriba hasta aguas abajo. Además, las muestras se toman a una hora fija en cada punto buscando obtener una “foto” comparable entre tomas sucesivas, evitando así las variaciones que experimenta el flujo a lo largo del día y que son consecuencia directa de los hábitos de la población (Peccia *et al.*, 2020; The Water Research Foundation, 2020). Cada muestra debe mantenerse refrigerada en el entorno de los 4 °C y enviarse al laboratorio tan pronto como finalice el proceso de recolección, ya que la temperatura juega un papel importante en términos de degradación viral a lo largo del tiempo (Gundy *et al.*, 2009).

Los vertidos industriales y los eventos de lluvia podrían afectar potencialmente la detección de presencia de ARN del virus en la red de alcantarillado, por lo que se analizan parámetros fisicoquímicos adicionales (Ahmed *et al.*, 2020b) para evaluar concentraciones inusuales en las aguas residuales. En tales casos, se requiere un nuevo muestreo.

3.1. Definición de cuenca de alcantarillado

A principios del segundo trimestre de 2020 se llevó a cabo una prueba piloto en un municipio de la Comunidad de Madrid de más de 100.000 habitantes, basada en RT-qPCR y con ello tratar de obtener unos criterios de definición de las cuencas de alcantarillado y así poder extenderlo a toda la región de Madrid. Se seleccionaron 10 pozos de la red de alcantarillado para evaluar la ubicación de cada punto de muestreo en términos de distancia de los centros de población y tiempos de retención hidráulica. Esta elección de puntos se hizo para que los puntos ubicados aguas abajo incluyan las cargas de ARN del virus de aguas arriba y así poder estudiar la agregación del flujo y la degradación del material genético del SARS-CoV-2 con el tiempo y la dilución.

Los resultados permitieron a los investigadores establecer criterios de definición de cuencas para poder escalar el sistema de seguimiento a toda la red de saneamiento de Madrid. Para lograr la representatividad adecuada del SARS-CoV-2 y, cuando sea posible, se deben aplicar los

siguientes criterios de selección de los puntos de muestreo: una cuenca de alcantarillado de un máximo de 25.000 habitantes equivalentes, una distancia de no más de 3,5 km del centro de la población y no más de 2,5 km de distancia desde la última acometida de descarga de saneamiento (figura 1).

Teniendo en cuenta las particularidades de la Comunidad de Madrid (alta densidad de población en el centro de la región y muchas áreas dispersas con baja densidad de población a su alrededor), y para poder cumplir con los criterios establecidos, se han utilizado un total de 289 puntos de muestreo para recoger los datos de toda la población de la Comunidad de Madrid (figura 2). De estos 289 puntos de muestreo, se han seleccionado 116 en estaciones depuradoras de agua residual cuando ha sido posible, para facilitar la recogida de muestras y el resto en pozos de la red de alcantarillado.

El proyecto depende significativamente de la cadena logística para la recolección y el transporte de las muestras, por lo que se considera prioritario la labor de muestreo sobre el terreno. El funcionamiento de este sistema logístico es fluido y no implica que los técnicos de recogida de muestras entren en contacto directo con las aguas residuales sin tratar. Para cumplir con este requisito y estar del lado de la seguridad y salud de las personas que recogen las muestras se han reubicado más del 60 % de los pozos de acceso a la red de alcantarillado para garantizar la seguridad.



Figura 1. Criterios de definición de cuencas de alcantarillado y selección de puntos de muestreo.

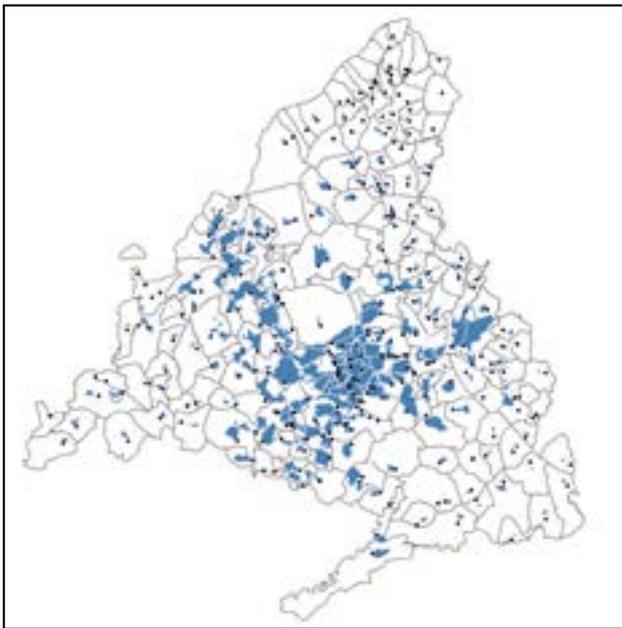


Figura 2. Mapa de cuencas (en azul) y puntos de muestreo del sistema Vigía.

3.2. Análisis de los resultados

El proceso de análisis de los resultados obtenidos en laboratorio tiene una alta complejidad debido a la sensibilidad y variabilidad de la señal de ARN del SARS-CoV-2 en la red de saneamiento, es por ello por lo que se lleva a cabo un cribado, normalización y validación de los resultados obtenidos previamente en el laboratorio. Las muestras no se analizan únicamente para detectar la presencia del SARS-CoV-2, además se analizan parámetros fisicoquímicos como la temperatura, DQO, niveles de cloruro y conductividad eléctrica para verificar la composición de las aguas residuales y detectar el efecto de la escorrentía en días de lluvia o los vertidos industriales que se pueden producir a la red de alcantarillado.

Canal de Isabel II analiza las muestras en tres laboratorios de los cuales uno de ellos es propio de Canal, de esta manera se establecen procedimientos de control de calidad internos para el análisis de los resultados obtenidos y así poder disponer de un sistema de control en caso de que se produzca una incidencia en alguno de los laboratorios que conlleve la alteración de los resultados. Además, se sigue el criterio de que aquellas muestras tomadas del mismo punto de muestreo deben ser analizadas en el mismo laboratorio.

Los resultados están disponibles como máximo en los dos días posteriores a la recogida de muestras. Una vez recibidos, se homogeneizan los datos debido a que cada laboratorio cuantifica el ARN del SARS-CoV-2 con protocolos distintos y se analizan al menos 5 puntos de muestreo, correspondientes a cuencas de alcantarillado importantes por triplicado (en los 3 laboratorios), como control de calidad interno para el proceso de homogeneización de resultados.

En cuanto a los criterios de cribado y validación de resultados, cabe mencionar el cambio porcentual de la concentración de SARS-CoV-2 para detectar tendencias extremas y los resultados de los parámetros fisicoquímicos, que se comparan con la serie histórica registrada en cada punto de muestreo de forma independiente, y que deben estar dentro de los límites de cuantificación esperados en las aguas residuales urbanas.

Es importante tener en cuenta que se trabaja con una variedad importante en cuanto a las características de las cuencas, tanto por su tamaño como por sus usos. Este es el motivo por el que los parámetros se controlan individualmente. Por ejemplo, se observan claras diferencias entre cuencas urbanas (DQO \approx 800 mg/L), rurales (DQO \approx 300 mg/L) y cuencas con una actividad industrial significativa (DQO superiores a 1.000 mg/L en promedio y mayor variabilidad).

Cuando un nuevo parámetro tiene un valor extremo (Ahmed *et al.*, 2020a; Hart y Halden, 2020), se solicita una muestra nueva en ese punto para la validación del resultado, que se recoge en los siguientes 2 o 3 días hábiles (Candel *et al.*, 2021). En definitiva, este contranálisis podría validar o descartar la primera muestra. Durante este periodo sin datos reales, la concentración de material genético del SARS-CoV-2 se extrapola provisionalmente (Kumar *et al.*, 2020) utilizando resultados anteriores para dar una visión global de toda la región de Madrid y en los puntos de muestreo que no se dispone de datos se completan utilizando la media móvil de los dos últimos valores.

El sistema Vigía dispone de diferentes gráficos de representación de los resultados, para mostrar la presencia semanal del SARS-CoV-2 en las aguas residuales de toda la Comunidad de Madrid, todos los puntos de muestreo se agregan en una curva, evaluada de acuerdo con el análisis estadístico previamente explicado. Los resultados se normalizan por 100.000 habitantes para estar alineados con los indicadores de salud y las estadísticas locales. Además, se ha desarrollado una agregación de los resultados a nivel municipal, a disposición pública en <https://www.canaldeisabelsegunda.es/mapa-vigia>.

4. RESULTADOS OBTENIDOS E INTERPRETACIÓN

Desde julio de 2020, Canal de Isabel II ha estado analizando las aguas residuales para evaluar la presencia de ARN del SARS-CoV-2 de forma regular. Los resultados muestran una fuerte correlación entre la presencia de SARS-CoV-2 en aguas residuales y diferentes indicadores epidemiológicos. En esta sección se realiza un análisis comparativo con los indicadores de hospitalización y los casos notificados.

4.1. Procesamiento de datos diarios

El sistema de alcantarillado de Madrid es principalmente combinado, lo que significa que, junto con los vertidos domésticos, el alcantarillado recoge escorrentía y vertidos industriales. Todavía no está claro cómo los fragmentos detectables del virus SARS-CoV-2 de personas infectadas interactúan con los efluentes anteriores. Sin embargo, para anticipar una dilución inusual que podría afectar potencialmente la detectabilidad del virus, también se monitorean los parámetros fisicoquímicos para detectar valores atípicos. Según los datos disponibles la DQO parece ser el parámetro más relevante para detectar una composición de la dilución inusual en las aguas residuales, dado que es más sensible a ambos escenarios (altas diluciones por episodios de lluvia y mayor presencia de contaminantes de lo habitual por vertidos industriales). Además, los niveles de cloruro y la conductividad eléctrica también se controlan como criterios adicionales para detectar una composición inusual, aunque son más estables (figuras 3 y 4).

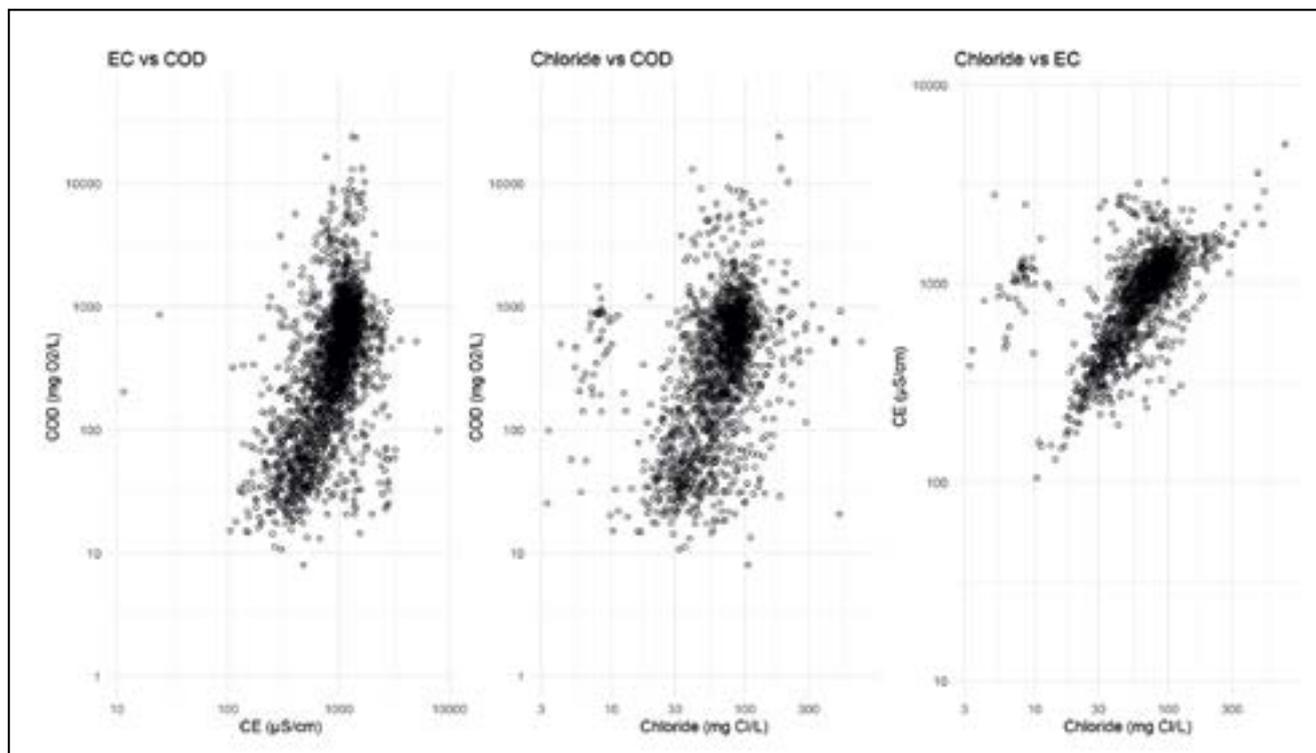


Figura 3. Análisis de dispersión de los parámetros fisicoquímicos: conductividad eléctrica (EC, por sus siglas en inglés), DQO (COD) y cloruros (Chloride).

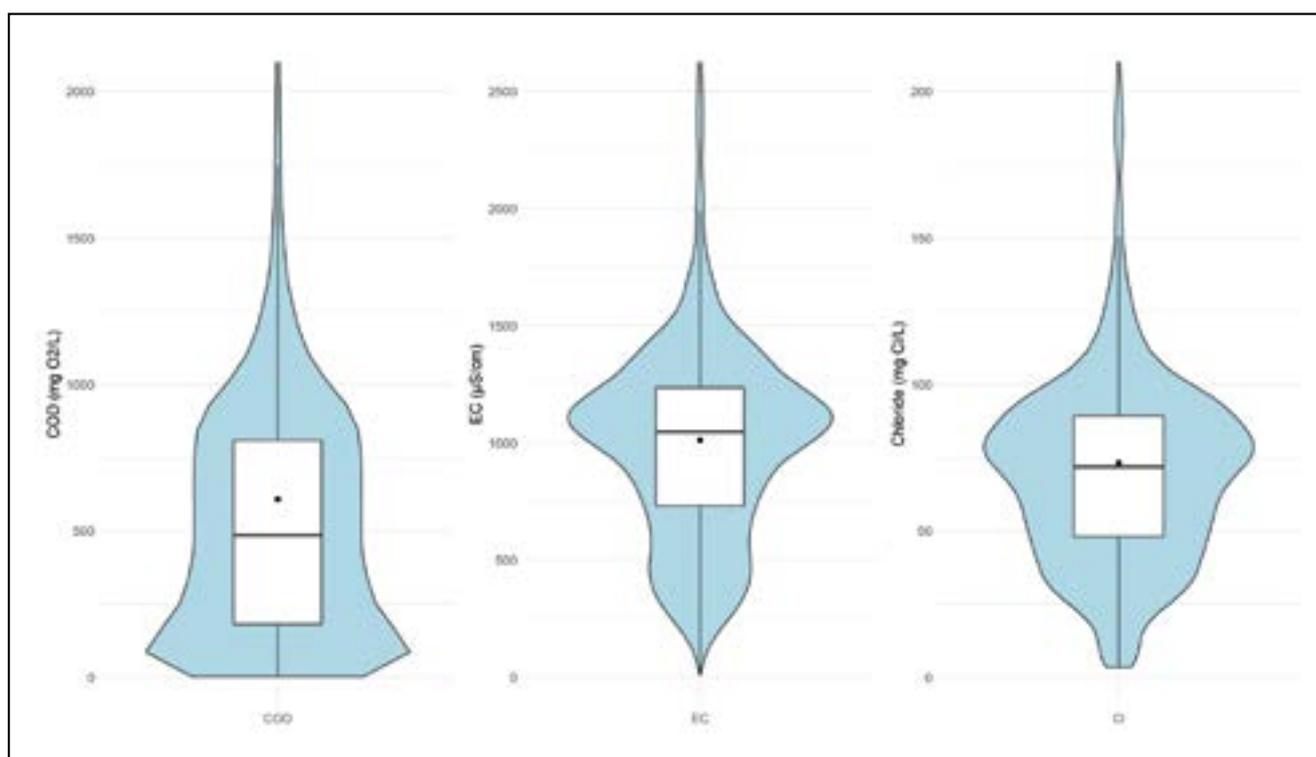


Figura 4. Distribuciones observadas de los parámetros fisicoquímicos: conductividad eléctrica (EC, por sus siglas en inglés), DQO (COD) y cloruros (Chloride).

Las muestras con valores fuera de rango se vuelven a muestrear para verificar o descartar los resultados de la PCR en un plazo de 2 a 3 días. En la figura 5 se puede ver un ejemplo de muestras descartadas, con valores altos y bajos de DQO asociados con valores atípicos de gc/L de SARS-CoV-2.

Este procedimiento para la validación de los resultados corresponde a una parte del procedimiento completo (figura 6). La repetición de muestras no ha dado lugar a un

aumento significativo del trabajo de campo. Los eventos de lluvia han sido la principal causa de dispersión, como se muestra en la figura 7, donde las muestras mensuales descartadas no representaron más del 10 % entre septiembre y noviembre y menos del 5 % entre agosto de 2020 y marzo de 2021.

Las muestras muy diluidas a menudo se relacionan con concentraciones poco consistentes de presencia de

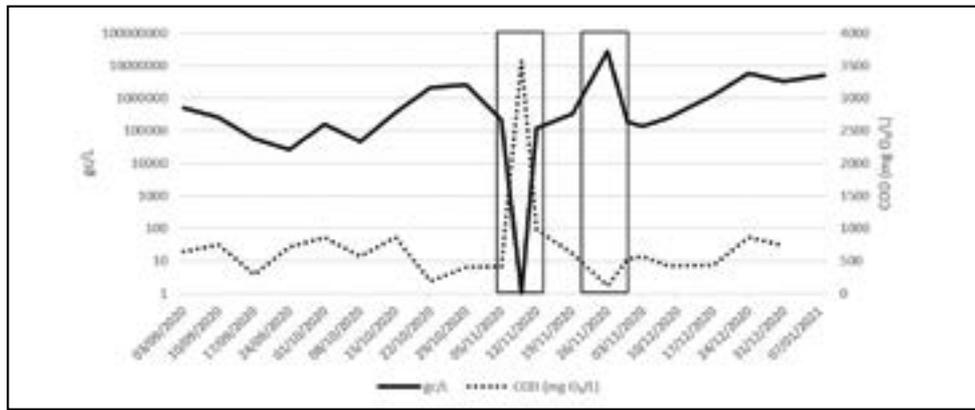


Figura 5. Detección de valores atípicos en DQO.

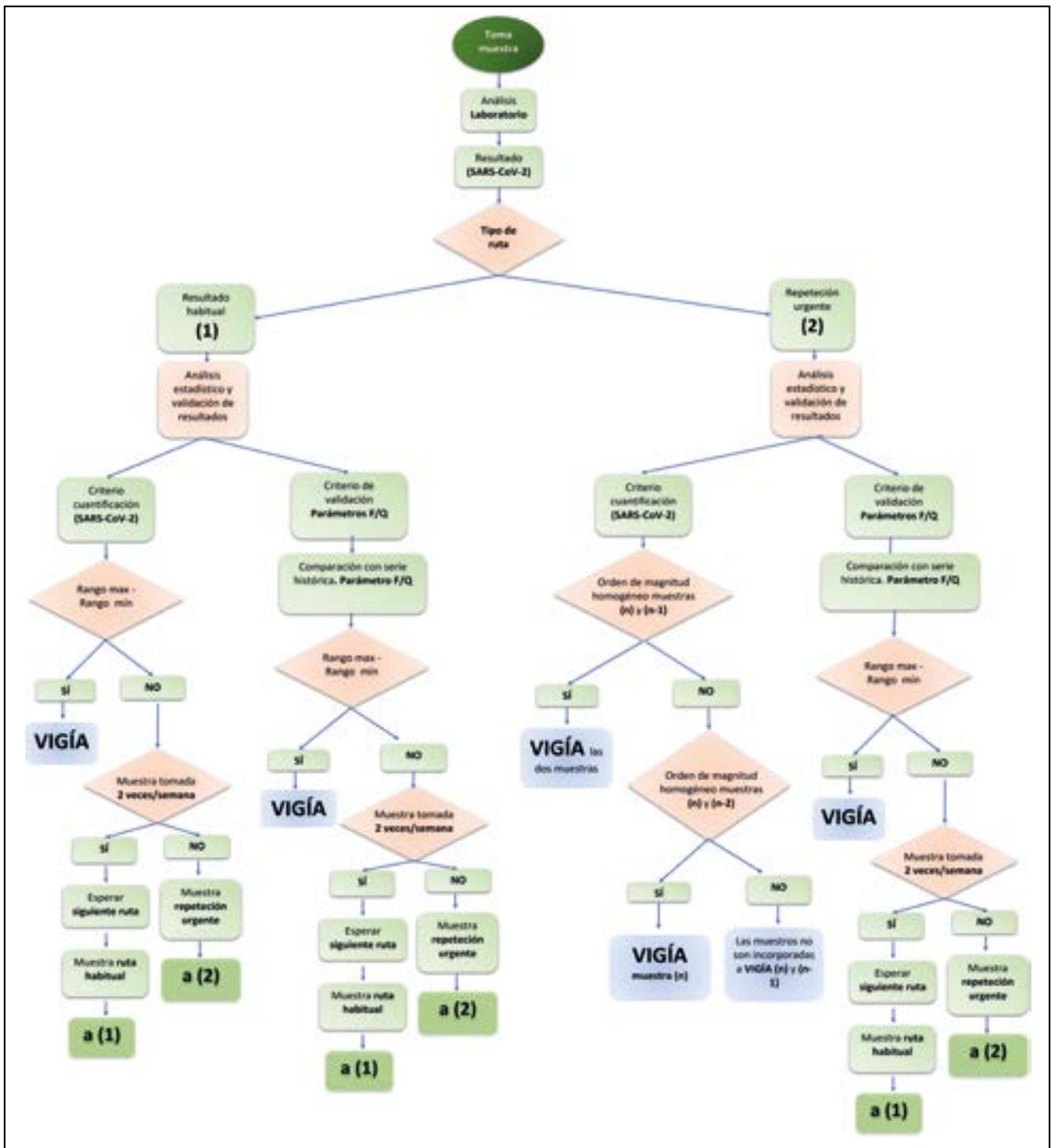


Figura 6. Proceso completo de validación de resultados.

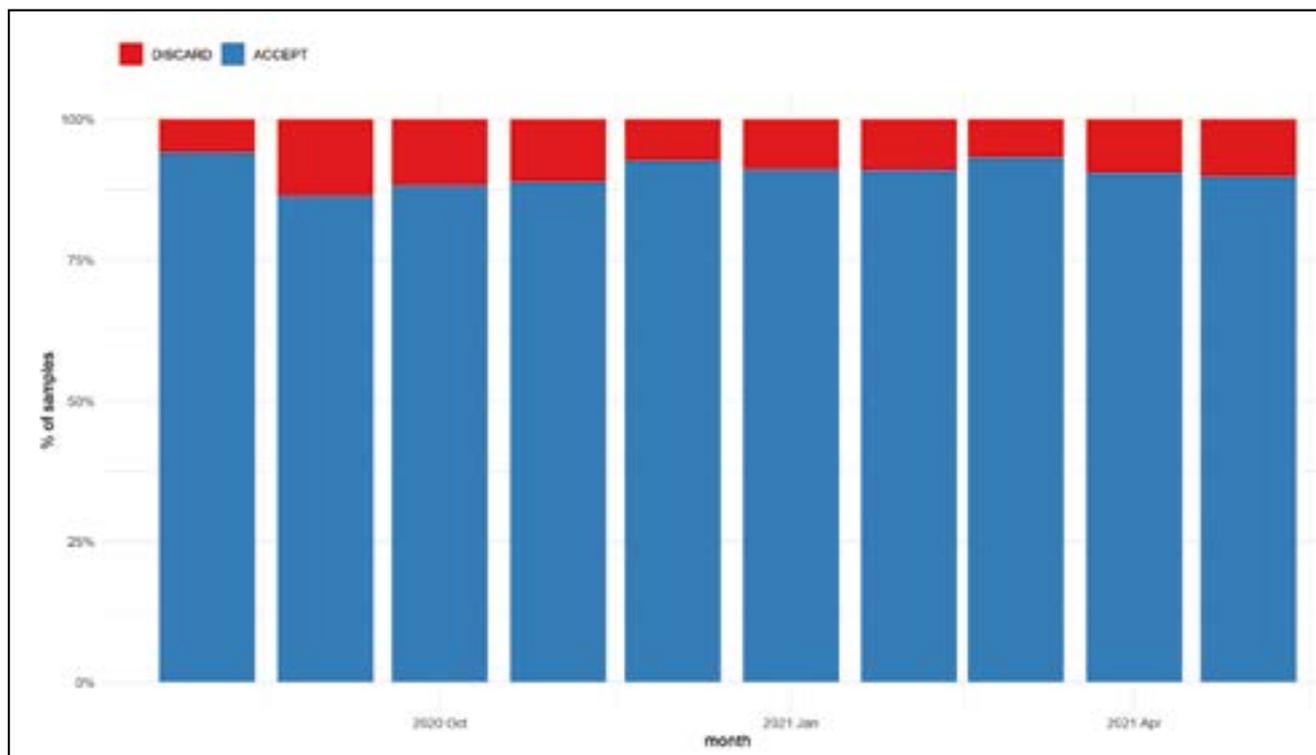


Figura 7. Porcentaje de muestras descartadas y aceptadas mensualmente.

ARN del SARS-CoV-2 en los colectores; sin embargo, esto no significa que las concentraciones sean necesariamente bajas. De hecho, algunos resultados mostraron altas concentraciones de SARS-CoV-2 junto con bajas DQO en muestras tomadas en días con eventos de lluvia, esto podría deberse a fenómenos de primer lavado o re-suspensión en la red de alcantarillado. Los valores representativos de DQO son significativos siempre que se comparen con el mismo punto de muestreo, teniendo cada pozo una representatividad diferente debido a que la Comunidad de Madrid tiene sistemas de saneamiento muy diferentes desde el punto de vista de la dilución de las aguas residuales.

Buscando representar la variabilidad observada en los resultados, junto con los dos criterios principales de descarte de resultados (variación relativa respecto a la muestra anterior y valor de DQO), se muestra en la figura 8, para toda la serie histórica disponible, la variación porcentual logarítmica en dos muestras sucesivas de un mismo punto, según la ecuación 1, frente al valor normalizado de DQO (cada punto de muestreo normalizado respecto a su serie histórica propia), según la ecuación 2:

$$\text{Log_porcentaje_cambio_ARN}_i = \log\left(\frac{\text{ARN}_{\text{concentración}_i}}{\text{ARN}_{\text{concentración}_{i-1}}}\right) \quad [1]$$

$$\text{DQO } z \text{ score}_i = \frac{\text{DQO}_i - \text{media}(\text{DQO})}{\text{desvest}(\text{DQO})} \quad [2]$$

Como se puede observar, las muestras descartadas se concentran principalmente donde se han experimentado importantes variaciones en la señal de SARS-CoV-2. Además, también destacan muestras con valores extremos de DQO, aunque no hayan supuesto en algunos casos una modificación de la señal muy importante, ubicadas en los extremos del eje horizontal, especialmente los valores bajos asociados a precipitaciones.

Dado que los criterios de repetición y descarte no son rígidos, por el carácter tan variable de los datos y las incertidumbres asociadas, además de la imposibilidad de repetir muchos ensayos de una red de puntos tan extensa, no aparecen fronteras delimitadas para los resultados descartados y aceptados en la figura.

Entre los criterios de control descritos anteriormente, se considera el valor de DQO como más representativo, ya que se ha observado que tiene mayor sensibilidad a las composiciones inusuales de las muestras que el resto, tanto para los episodios de lluvia con diluciones importantes como para los picos de contaminación.

Esta información analítica también se complementa con observaciones en campo, que en muchas ocasiones alertan de caudales inferiores o superiores a lo habitual (posibles operaciones de mantenimiento aguas arriba) o color inusual de la muestra (posibilidad de vertidos industriales), por nombrar algunos ejemplos.

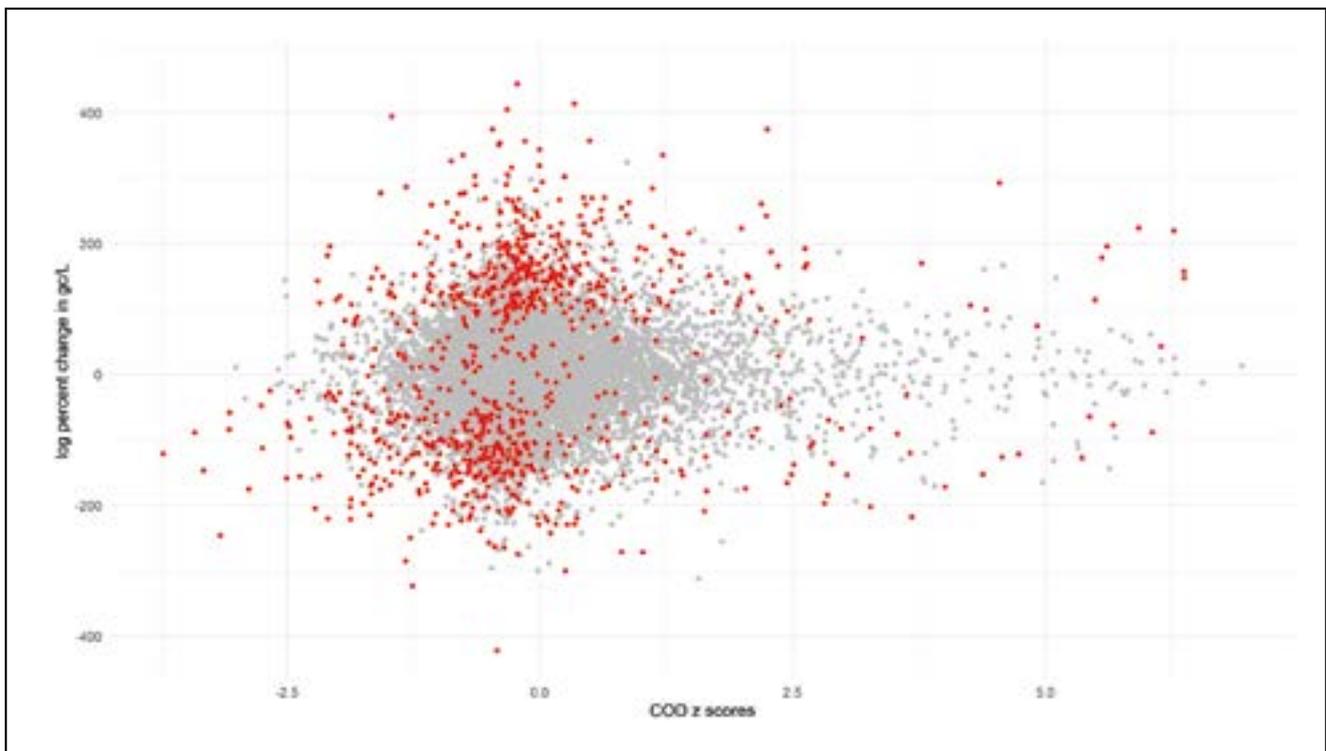


Figura 8. Muestras descartadas (rojo) en términos de % de cambio según valores estandarizados de DQO.

4.2. Agregación de series temporales

Dado que se muestrea un subconjunto de puntos cada día de la semana, se establece una serie diaria de resultados con las siguientes consideraciones:

- La señal se estima constante en los días entre tomas.
- Cuando el lapso entre dos muestras excede el período de 7 días (por repetición de la muestra o alguna dificultad en el trabajo de campo), los resultados se extrapolan para completar la información restante, aplicando la pendiente de la serie de promedios móviles para los dos resultados anteriores.

Luego, las series para diferentes puntos se agregan y normalizan en función de los datos de población que contiene cada cuenca asociada a cada punto de muestreo y, como resultado, se compara una señal global agregada con los siguientes indicadores sanitarios: las hospitalizaciones diarias y las tasas de incidencia.

4.3. Tasas de incidencia

Una fuente importante de información sobre la evolución de la pandemia son las tasas de incidencia reportadas por los organismos de salud pública. De todos los indicadores disponibles, se observó una relación significativa entre la concentración de ARN de SARS-CoV-2 en las aguas residuales y las tasas de incidencia acumuladas a 14 días con infección activa. Los casos positivos notificados se registran como casos con infección activa en cualquiera de los siguientes escenarios (Ministerio de Sanidad, Instituto de Salud Carlos III, 2020):

- Personas con síntomas compatibles con COVID-19 y prueba diagnóstica de infección activa positiva

- Personas asintomáticas con prueba diagnóstica de infección activa positiva e IgG negativa o sin prueba de anticuerpos.

La información proporcionada por los casos activos notificados ofrece una buena imagen en términos de evaluar la propagación de la infección. Sin embargo, los ensayos clínicos se encuentran sujetos a protocolos determinados por las autoridades competentes, que pueden variar dependiendo de cómo se esté desarrollando la pandemia.

En los momentos en los que hay un incremento relevante de casos, es habitual que las pruebas diagnósticas se vean limitadas a casos sintomáticos y contactos estrechos, de forma que se pueda satisfacer el balance entre el aumento de demanda y la escasez de pruebas. A esta circunstancia hay que añadir aquellos casos que, bien por ser asintomáticos, bien por presentar una sintomatología leve, no son diagnosticados, dando como resultado una infraestimación de la situación epidemiológica, que además no se produce de manera homogénea en el tiempo.

4.4. Datos de hospitalización: correlación y anticipación

Para evaluar la capacidad de las aguas residuales como un indicador de alerta temprana, la agregación de las concentraciones de ARN del SARS-CoV-2 para toda la Comunidad de Madrid también se compara con las nuevas hospitalizaciones por COVID-19 notificadas. Las series diarias de hospitalización presentan una fuerte estacionalidad semanal, por lo que se prefiere una media móvil de 7 días como indicador más robusto. A continuación, la figura 9 muestra similitudes entre ambas series, y anticipación de la curva de resultados agregados de concentración de fragmentos de genoma de SARS-CoV-2 de aguas residuales respecto de la curva de hospitalización.

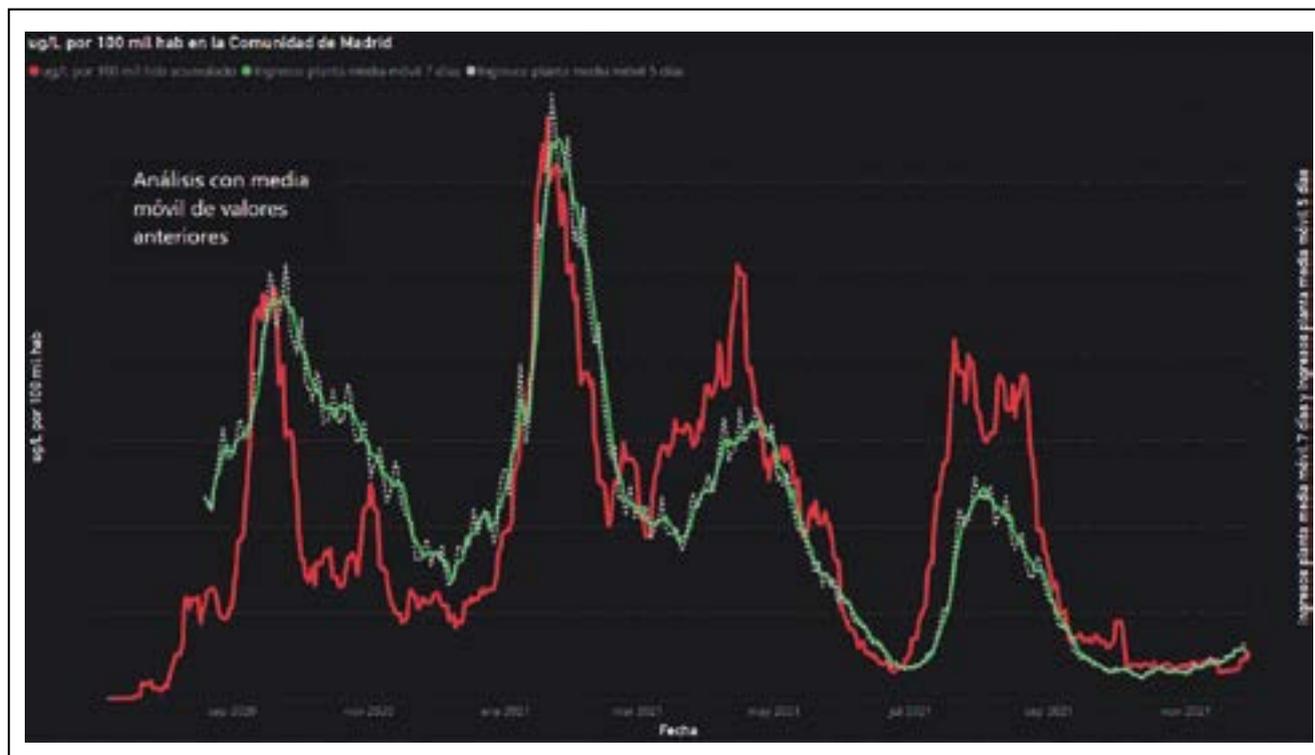


Figura 9. Porcentaje de muestras descartadas y aceptadas mensualmente.

La explicación comúnmente aceptada para este desfase entre la presencia de material genético de SARS-CoV-2 en las aguas residuales y las hospitalizaciones es que el SARS-CoV-2 se puede encontrar en las heces de los pacientes antes de la aparición de los síntomas. La anticipación de las pruebas de aguas residuales puede diferir según la ubicación, el tamaño y la población de la cuenca, las estrategias de muestreo o la temperatura, entre muchos otros factores, ya que las aguas residuales son, en general, un entorno muy heterogéneo. Los resultados oscilan entre 3 y 11 días de anticipación entre las cuencas de alcantarillado estudiadas.

5. PRÓXIMOS TRABAJOS

El trabajo futuro y ya probado incluye un sistema de vigilancia epidemiológica permanente donde se monitoreará un subconjunto de 87 puntos estratégicos de los 289 puntos de muestreo actuales y, en caso de detección de material genético del virus, se activarán puntos de vigilancia más detallados en esa cuenca para localizar puntos calientes de infección.

También se está desarrollando un estudio para analizar cuál es el decaimiento de la señal del SARS-CoV-2 en aguas residuales sin tratar, basado en un modelo de red de alcantarillado para la calidad del agua, donde se declara un conjunto de nuevos contaminantes teóricos para modelar su evolución a lo largo de la red de alcantarillado.

Además, se está trabajando en paralelo con diferentes universidades para el desarrollo de bio-sensores que sean capaces de detectar con cuantificación en tiempo real el ARN del SARS-CoV-2 en las aguas residuales, y se está trabajando en un nuevo sistema de normalización de resultados a partir del análisis de parámetros microbiológicos como concentración de virus endógenos y en otros parámetros químicos diferentes de los monitorizados hasta la fecha.

6. CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado las capacidades de la epidemiología basada en aguas residuales como una herramienta de alerta temprana para la pandemia actual de COVID-19 en la Comunidad de Madrid. El sistema dispone de un total de 289 puntos de muestreo que se analizan sistemáticamente para la detección y cuantificación de la concentración de material genético de SARS-CoV-2.

El proceso de selección de los puntos de muestreo ha sido fundamental para este objetivo: siguiendo los criterios obtenidos tras una prueba piloto, se estableció que siempre que sea posible, es preferible para el diseño de la cuenca de alcantarillado que descarga sobre cada punto de muestreo un máximo de 25.000 habitantes equivalentes, 3,5 km de distancia a los núcleos de población y 2,5 km de distancia al último punto de descarga para obtener resultados óptimos.

Se ha comprobado que una estrategia de muestreo semanal ofrece una cuantificación adecuada, fijando las horas de toma de muestra para cada punto, de modo que se pueda reducir el efecto de las variaciones diarias. Sin embargo, los resultados de laboratorio deben ser validados con parámetros fisicoquímicos para detectar composiciones inusuales.

La presencia y evolución del ARN del SARS-CoV-2 en las aguas residuales muestran una fuerte conexión tanto con las tasas de incidencia de 14 días con infección activa como con las hospitalizaciones por COVID-19. La información se comparte diariamente con las autoridades sanitarias para su consulta y toma de decisiones y los resultados están disponibles como un agregado para toda la región y para cada cuenca de alcantarillado.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Área de Análisis Medioambiental de Canal de Isabel II por su colaboración e implicación en el proyecto Vigía.

Al Área de Conservación de Canal de Isabel II por facilitar el trabajo de selección de puntos de muestreo y por el soporte al personal de laboratorio en las recogidas de muestras en los colectores visitables.

A Javier Viana y Jonatan Romero, técnicos delineantes de la Subdirección de I+D+i, por el diseño de las cuencas de alcantarillado.

Y a Celia Ortega y Mónica Ortega, de la Subdirección de I+D+i, por su colaboración en las revisiones de los artículos publicados.

8. REFERENCIAS

Ahmed, W., Angel, N., Edson, J., *et al.* (2020a). First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: A proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. *Science of Total Environment*, Vol. 728, 138764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138764>

Ahmed, W., Bertsch, P.M., Bibby, K., *et al.* (2020b). Decay of SARS-CoV-2 and surrogate murine hepatitis virus RNA in untreated wastewater to inform application in wastewater-based epidemiology. *Environmental Research*. Vol. 191, 110092. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110092>

Canal de Isabel II (2020). Innovación (11/03/21). *Mapa Vigía*. <https://www.canaldeisabelsegunda.es/mapa-vigia>.

Candel, F.J., San-Román, J., Barreiro, P., *et al.* (2021). Integral management of COVID-19 in Madrid: Turning things around during the second wave. *The Lancet*, Vol. 2, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.lanpe.2021.100039>

Gundy, P.M., Gerba, C.P., y Pepper, I.L. (2009). Survival of coronaviruses in water and wastewater. *Food and Environmental Virology*, 1(10): pp. 10–14. <https://doi.org/10.1007/s12560-008-9001-6>

Hart, O.E., y Halden, R.U. (2020). Computational analysis of SARS-CoV-2/COVID-19 surveillance by wastewater-based epidemiology locally and globally: Feasibility, economy, opportunities and challenges. *Science of The Total Environment*, Vol. 730, 138875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138875>

Kitajima, M., Ahmed, W., Bibby, K., *et al.* (2020). SARS-CoV-2 in wastewater: State of the knowledge and research needs. *Science of The Total Environment*, Vol. 739, 139076. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139076>

Kumar, M., Patel, A.K., y Shah, A.V., *et al.* (2020). First proof of the capability of wastewater surveillance for COVID-19 in India through detection of genetic material of SARS-CoV-2. *Science of The Total Environment*, Vol. 746, 141326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141326>

La Rosa, G., Iaconelli, M., Mancini, P., *et al.* (2020). First detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewaters in Italy. *Science of The Total Environment*, Vol. 736, 139652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139652>

Larsen, D.A., y Wigginton, K.R. (2020). Tracking COVID-19 with wastewater. *Nature Biotechnology*, 38, 1151–1153. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0690-1>

Lastra, A., Suárez, J., Puertas, J., *et al.* (2019). Development of a Smart System for the Operation of a Complex Sanitation System. En: G. Mannina (ed.), *New Trends in Urban Drainage Modelling*, pp. 207–212. Palermo: Springer International Publishing.

Medema, G., Heijnen, L., Elsinga, G., Italiaander, R., y Brouwer, A. (2020). Presence of SARS-coronavirus-2 RNA in sewage and correlation with reported COVID-19 prevalence in the early stage of the epidemic in The Netherlands. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(7): pp. 511–516. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00357>

Ministerio de Sanidad/Instituto de Salud Carlos III (2020). Estrategia de detección precoz, vigilancia y control de COVID-19. Madrid: Ministerio de Sanidad/Instituto de Salud Carlos III.

Peccia, J., Zulli, A., Brackney, D.E., *et al.* (2020). Measurement of SARS-CoV-2 RNA in wastewater tracks community infection dynamics. *Nature Biotechnology*, 38, 1164–1167. <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0684-z>

Sherchan, P., Shahin, S., Ward, L.M., *et al.* (2020). First detection of SARS-CoV-2 RNA in wastewater in North America: A study in Louisiana, USA. *Science of The Total Environment*. 743, 140621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140621>

The Water Research Foundation (WRF) (2020). *Wastewater Surveillance of the COVID-19 Genetic Signal in Sewersheds*. Denver (CO/USA): The Water Research Foundation.

Worldometer (2020). Worldometer Coronavirus (02/04/20). <https://www.worldometers.info/coronavirus/country/spain/>

Ensayos reológicos y empíricos de un betún recuperado de testigos y utilizado en la fabricación de una mezcla bituminosa semicaliente con tensoactivos

Rheological and Empirical Tests of Bitumen Recovered from Cores and Used to Produce a Warm Mix Asphalt with Surfactants

Belén Enciso Ramos¹, María Sánchez Pallarés², Rafael Jiménez Sáez^{3*}

Resumen

Con el objetivo de reducir las emisiones en la fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas se han desarrollado a lo largo de los últimos años nuevos tipos de mezclas que permiten trabajar a temperaturas menores que las de las mezclas bituminosas en caliente. Unas de ellas, las mezclas semicalientes, se fabrican a unos 40 °C por debajo de la temperatura habitual, con lo cual se reduce notablemente la cantidad de gases contaminantes emitidos a la atmósfera. Para obtener estas mezclas semicalientes existen varios métodos, uno de los cuales es adicionar agentes tensoactivos que son capaces de reducir la tensión superficial del betún, disminuyendo el ángulo de contacto entre este y los áridos, y mejorando la trabajabilidad de la mezcla, lo que permite una adecuada envuelta de los áridos a temperaturas menores.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de realizar ensayos empíricos y prestacionales a betunes recuperados de testigos de un tramo de la autovía A-62, entre los PP.KK. 171+100 y 191+000, en el cual se ha extendido una mezcla semidensa semicaliente fabricada con tensoactivos. Para poder comparar los resultados obtenidos, también se han ensayado los betunes recuperados de otras dos mezclas bituminosas en caliente extendidas en el mismo tramo.

Con este estudio se pretende aportar una mayor información sobre el comportamiento de los betunes utilizados para la fabricación de mezclas semicalientes con tensoactivos.

Palabras clave: mezcla semicaliente, ensayos reológicos, tensoactivo, módulo dinámico, diagrama de Black, curvas maestras.

Abstract

New types of bituminous mixtures have been developed over the last few years in order to reduce greenhouse gas emissions. Warm bituminous mixtures are produced and placed at temperatures some 40 °C lower than hot bituminous mixtures, which significantly reduces the amount of polluting gases emitted into the atmosphere. There are several methods to obtain these warm bituminous mixtures. Surfactants are capable to reduce the bitumen surface tension. This lowers the contact angle between bitumen and aggregates, and improves coverage of aggregates and workability of the mixture at lower temperatures.

This work presents the results obtained from carrying out empirical and performance tests on bitumens recovered from cores of a section of the A-62 highway, between km 171+100 and 191+000, in which a warm semidense bituminous mixture with surfactants added, has been placed. For comparison of the results obtained, bitumens recovered from two different hot bituminous mixtures and placed in the same section have also been tested.

The aim of this study is to provide more information about the behavior of bitumens used for the production of warm bituminous mixtures with surfactants.

Keywords: Warm bituminous mixture, rheological tests, surfactant, dynamic modulus, Black Diagram, master curves.

1. INTRODUCCIÓN

Para conocer en mayor profundidad el comportamiento de las mezclas semidensas semicalientes fabricadas con

betún con tensoactivos, el Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX, ha realizado un trabajo en el cual se han recuperado diversos ligantes de mezclas bituminosas extendidas en el tramo de la autovía A-62 entre los PP.KK. 171+100 y 191+000, y se han caracterizado mediante ensayos empíricos y prestacionales. El objetivo del estudio ha sido, además de conocer las características de cada uno de los ligantes tras dos meses de la puesta en obra de las mezclas, poder comparar sus propiedades para determinar si los ligantes utilizados en mezclas semicalientes presentan diferencias en sus características respecto a los convencionales.

* Autor de contacto: rafael.jimenez@cedex.es

¹ Doctora ingeniera industrial. Investigadora I+D+i. Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

² Licenciada en Ciencias Químicas. Directora de Programa. Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

³ Licenciado en Ciencias Químicas. Consejero Técnico. Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

Los ligantes analizados corresponden a testigos de tres mezclas bituminosas diferentes. La primera de ellas es una mezcla en capa base AC 22 S fabricada con un 20 % de asfalto reciclado, y cuyo betún es un B 50/70. La segunda, colocada en capa intermedia, es una mezcla semicaliente AC 22 S, fabricada con un 5 % de asfalto reciclado y un betún BT 35/50 con tensoactivos. La tercera corresponde a la mezcla bituminosa en caliente equivalente a la semicaliente, AC 22 S, es decir, fabricada con los mismos componentes (áridos, filler, material reciclado y curva granulométrica), pero con un betún convencional B35/50.

Las características de los ligantes se han obtenido a través de los ensayos empíricos de penetración, anillo y bola y fragilidad Fraass, y de ensayos prestacionales, realizados mediante reómetro DSR: Determinación de módulos dinámicos/ángulos de fase y ensayo de fluencia-recuperación (MSCR).

2. ENSAYOS EMPÍRICOS

Para la ejecución de los ensayos de penetración, determinación del punto de reblandecimiento y determinación del punto de fragilidad Fraass se han seguido las normas de ensayo UNE-EN 1426 [1], UNE-EN 1427 [2] y UNE-EN 12593 [3] respectivamente. Los ligantes se recuperaron mediante extractor centrífugo y diclorometano según UNE-EN 12697-1 [4], eliminando el disolvente con evaporador rotatorio (UNE-EN 12697-3) [5].

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los ensayos empíricos sobre betunes

	B 50/70 Capa base	BT 35/50 Capa intermedia semicaliente	B 35/50 Capa intermedia
Penetración a 25 °C (0,1 mm)	31	28	33
Punto de reblandecimiento A y B (°C)	55,9	58,4	54,9
Punto de fragilidad Fraass (°C)	-8	-7	-9

En los resultados de penetración se aprecia el envejecimiento propio de cualquier ligante que se recupere de una muestra de mezcla bituminosa, con una disminución de la penetración respecto a los intervalos que debían cumplir los ligantes originales de acuerdo a las especificaciones [6]. En este caso hay que añadir además el efecto del betún envejecido procedente del material reciclado, que ha pasado a formar parte del betún recuperado. Destaca en este aspecto el B50/70 cuya disminución de penetración es muy notable, comparada con la experimentada por los otros dos ligantes, lo que se explicaría debido a que la mezcla de procedencia tiene en su composición un 20 % de material reciclado frente al 5 % de las otras dos muestras.

Respecto a los aumentos del punto de reblandecimiento y del punto Fraass no se dispone de datos de los betunes originales para comparar, aunque según especificaciones, los ligantes recuperados de la capa intermedia aún se encuentran dentro (mezcla convencional con B35/50) o muy cerca (mezcla semicaliente con BT35/50) del intervalo del punto de reblandecimiento definido para un ligante tipo

B35/50 original sin envejecer (50-58 °C), mientras que el B50/70 de la capa base queda fuera de su intervalo (46-54 °C). En cualquier caso, y a pesar del efecto del betún envejecido procedente del fresado, ninguno de los tres ligantes recuperados parece haber superado el incremento máximo permitido del punto de reblandecimiento en ligantes envejecidos a corto plazo: 11° C para un B35/50 y 10° C para un B50/70.

En cuanto al punto de fragilidad Fraass, los tres betunes cumplen la especificación, no superando los valores máximos prescritos para ligantes originales (solo el B50/70 iguala su límite máximo de -8 °C).

Se aprecian ligeras diferencias entre los valores del betún B35/50 y el BT35/50 de baja temperatura, asumiendo que el ligante aditivado se ha obtenido a partir del primero simplemente por incorporación del producto tensoactivo y no se ha partido de otro betún. El punto de reblandecimiento y el de fragilidad Fraass son mayores en el BT35/50, y la penetración es algo menor. Es decir, a pesar de las menores temperaturas de fabricación y extendido aplicadas por la presencia del aditivo, el betún recuperado de la mezcla semicaliente parece haber experimentado una alteración ligeramente mayor debido a la fabricación, puesta en obra y puesta en servicio durante 2 meses, haciéndolo ligeramente más rígido, que el obtenido de la mezcla fabricada con B35/50. El proceso de recuperación de este ligante a partir de la mezcla también ha podido influir, ya que la eliminación del disolvente se prolongó mucho más tiempo del habitual.

3. ENSAYOS REOLÓGICOS

Los ensayos reológicos se han realizado con el fin de determinar características y parámetros de tipo prestacional propios de los ligantes bituminosos que, previsiblemente, formarán parte de futuras especificaciones europeas. Se han realizado los ensayos de módulo dinámico en cizalla y de fluencia-recuperación. Para ello se ha empleado un reómetro de cizallamiento dinámico (DSR).



Figura 1. Reómetro DSR.

3.1. Ensayos de módulo dinámico

Para la determinación de módulos dinámicos en cizalla G^* se ha seguido el método descrito en la norma UNE-EN 14770 [7]. Consiste en preparar una muestra del

ligante en forma de disco colocado entre dos placas paralelas concéntricas, una fija y otra oscilante, y se aplica un esfuerzo cortante de oscilación sinusoidal alrededor de la posición inicial de reposo en la muestra. La amplitud cíclica del esfuerzo se mantiene constante durante el ensayo y se mide la amplitud cíclica de deformación relativa producida en la muestra, deformación que también será en forma de onda sinusoidal.

El módulo complejo en cizalla G^* se determina a partir de la relación entre las amplitudes de las ondas de esfuerzo y de deformación. Al ser el ligante un material visco-elástico, tiene lugar un desfase temporal entre ambas ondas, que se mide mediante el ángulo de fase δ .

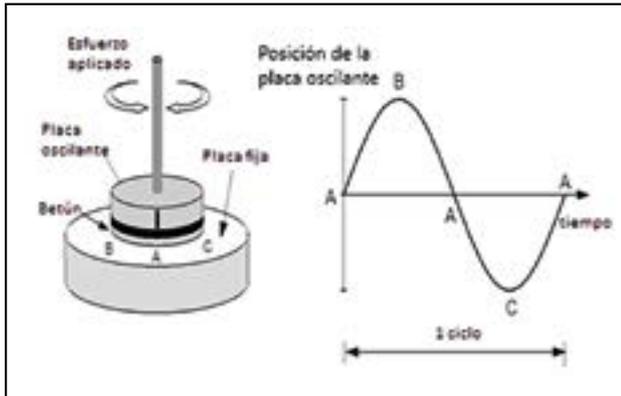


Figura 2. Esfuerzo sinusoidal de corte aplicado en un reómetro DSR para el estudio de ligantes bituminosos.

El módulo G^* , sus dos componentes elástica (o de almacenamiento) y viscosa (o de pérdidas) G' y G'' respectivamente, y el ángulo de fase δ , se determinan a diferentes temperaturas y frecuencias de oscilación, para lo cual se realizan barridos de frecuencia desde 0,1 Hz hasta 10 Hz a temperaturas constantes cubriendo un rango desde 5 °C hasta 85 °C y tomando medidas cada 5 °C, según se indica en la norma UNE-EN 14770. Es importante considerar que

el esfuerzo constante aplicado sea tal que el betún trabaje durante todo el ensayo y todo el rango de temperaturas en su régimen viscoelástico lineal.

A partir de estos parámetros reológicos se pueden obtener distintas representaciones de los mismos, que dan una gran información del comportamiento del ligante analizado:

- El **diagrama de Black** es una representación gráfica de G^* frente a δ que incluye todos los pares de valores obtenidos en las diferentes condiciones de temperatura y frecuencia. El resultado se puede considerar como una especie de “huella dactilar” del ligante, ya que se obtiene una curva característica del material cuya forma puede cambiar mucho según se trate de un betún convencional, modificado con polímeros, o que incorpore algún otro aditivo modificador de sus propiedades reológicas [8]. Asimismo, el estado de envejecimiento del ligante también da lugar a cambios significativos en la forma de las curvas en estos diagramas, con respecto a las de los ligantes originales.

Se representan en la figura 3 los diagramas de Black de los tres betunes recuperados.

Como puede observarse, los tres betunes resultan ser muy similares presentando la misma tipología de curva, propia de los betunes convencionales sin modificar. No se aprecia que la presencia del tensoactivo en el BT35/50 para reducir la temperatura de fabricación haya aportado algún cambio significativo en el comportamiento reológico de ligante, ya que su curva apenas se distingue de las otras dos. Asimismo, el betún B50/70, a pesar de ser de un grado de penetración inicialmente mayor que el de los otros betunes, tampoco muestra diferencias significativas. La presencia de betún envejecido procedente del material reutilizado, en mayor proporción en el B50/70 respecto a los otros dos ligantes también

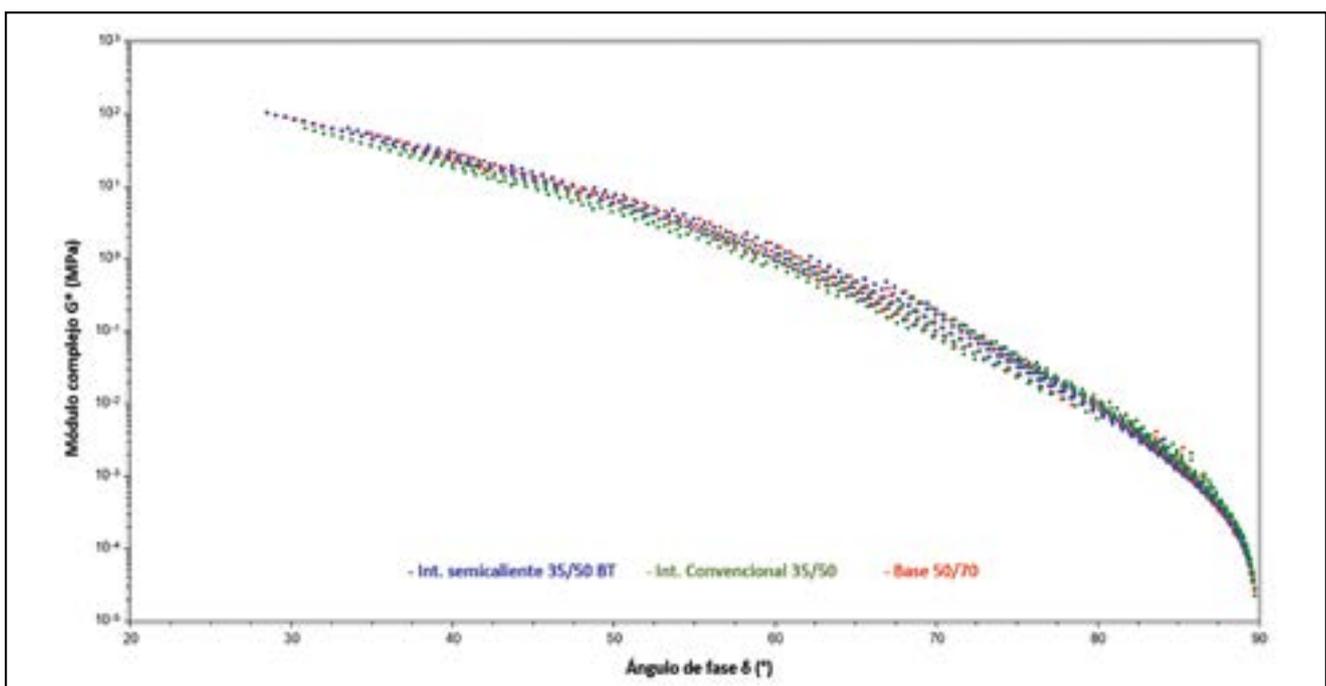


Figura 3. Diagramas de Black de los betunes recuperados.

puede estar contribuyendo a que esta similitud en las características reológicas de los tres ligantes recuperados sea aún mayor.

- **Curvas maestras.** Mediante una combinación de los datos medidos en las distintas condiciones de frecuencia y temperatura se pueden obtener las llamadas curvas maestras, que dan una representación de las magnitudes reológicas en un rango de frecuencias mucho más ampliado respecto a las medidas ensayadas, lo que permite caracterizar cada ligante de una forma más completa [9].

Para ello se toma una temperatura de referencia y se representan los correspondientes valores de G^* y de δ a las distintas frecuencias obteniendo la curva isoterma de referencia. El resto de isotermas obtenidas a las demás temperaturas y las mismas frecuencias son desplazadas a ambos lados de la curva de referencia hasta solapar entre sí, obteniendo una nueva y única isoterma muy ampliada en su rango respecto a las curvas de partida. Los desplazamientos aplicados a las distintas isotermas para formar la isoterma maestra se pueden determinar mediante diferentes métodos de cálculo.

En la figura 4 se muestran las curvas maestras para cada betún representando la variación del módulo complejo y del ángulo de fase frente a la frecuencia. Son isotermas cuya temperatura de referencia es de 20 °C.

El betún con un mayor módulo complejo a lo largo de todo el rango de frecuencias es el betún con tensoactivos de la mezcla semicaliente en capa intermedia (BT 35/50), seguido del betún de la capa base y del B35/50 convencional, que es el menos rígido de los tres. Contrariamente a lo que cabría esperar, su comportamiento se aleja de su homólogo con tensoactivos y se aproxima más al B50/70; esta aproximación se incrementa ligeramente al aumentar la frecuencia de ensayo.

Analizando el ángulo de fase, y a pesar de la mayor variabilidad que presentan los puntos de las curvas maestras en esta magnitud, su variación es acorde con la del módulo: los menores ángulos de fase se obtienen para el betún BT35/50, por lo que, de los tres betunes, además de ser el de mayor módulo es el que presenta un comportamiento más elástico; asimismo los mayores ángulos corresponden al B35/50, siendo por ello, el de mayor carácter viscoso. Se puede observar también, que a las frecuencias más bajas, el comportamiento de los tres betunes es prácticamente viscoso, alcanzando ángulos de fase cercanos a 90°. A medida que la frecuencia aumenta lo hace también la componente elástica, llegando a alcanzar, a las mayores frecuencias, ángulos de fase en torno a los 30°.

- Las **curvas isócronas** son otras de las representaciones más habituales y muestran la variación del módulo G^* o de δ frente a la temperatura a un único valor de frecuencia dado (el valor tomado como referencia para ligantes bituminosos es 1,59 Hz (10 rad/s), que equivaldría al paso de un vehículo a unos 75-90 km/h) [10]. A su vez las isócronas se utilizan para la obtención de otros parámetros indicativos de las características intrínsecas del ligante ensayado con respecto a la formación de deterioros por deformaciones plásticas o por fatiga.

Se observa de nuevo que el ligante que presenta un mayor módulo a lo largo de todo el intervalo de temperaturas es el betún con tensoactivos perteneciente a la mezcla semicaliente, BT35/50 y que además, su ángulo de fase es el menor de los tres betunes. Con su homólogo sin tensoactivos, el B35/50, sucede lo contrario, menor módulo y mayor ángulo de fase.

A continuación, se han determinado los valores críticos de temperatura de los tres betunes según el tipo de fallo (deformaciones plásticas o fatiga) aten-

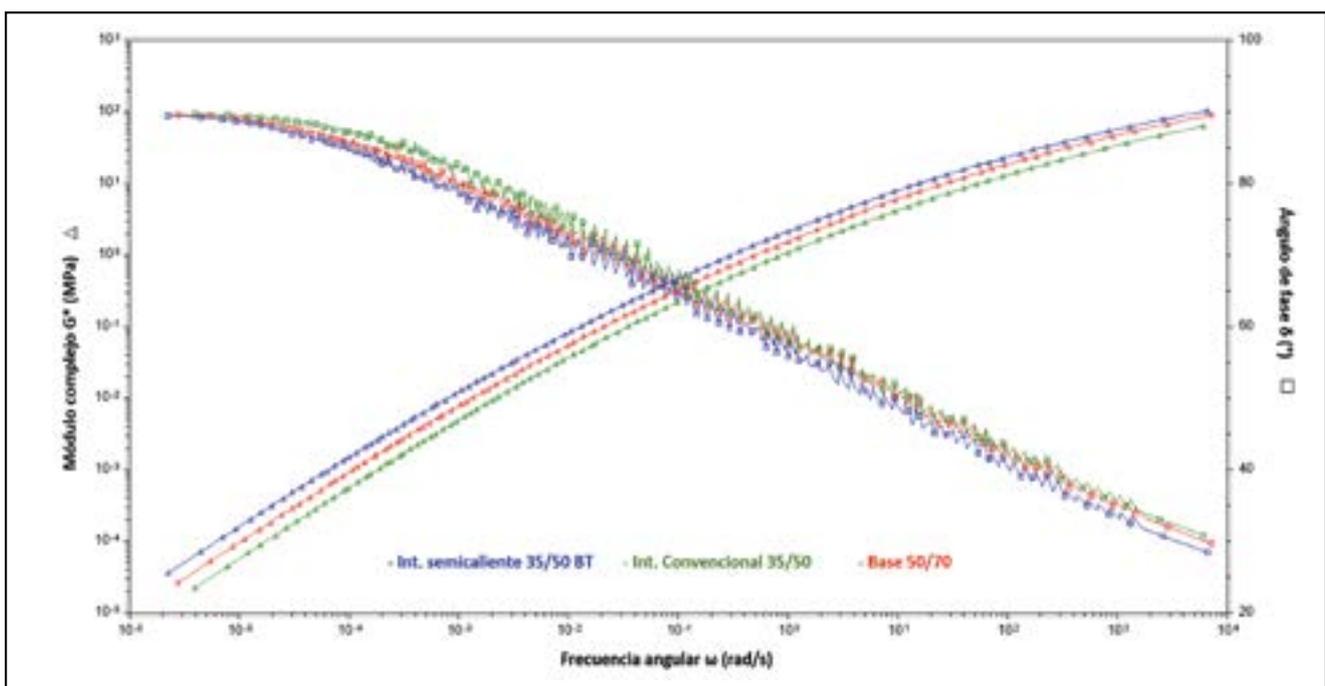


Figura 4. Curvas maestras de G^* y de δ a 20 °C para los tres betunes.

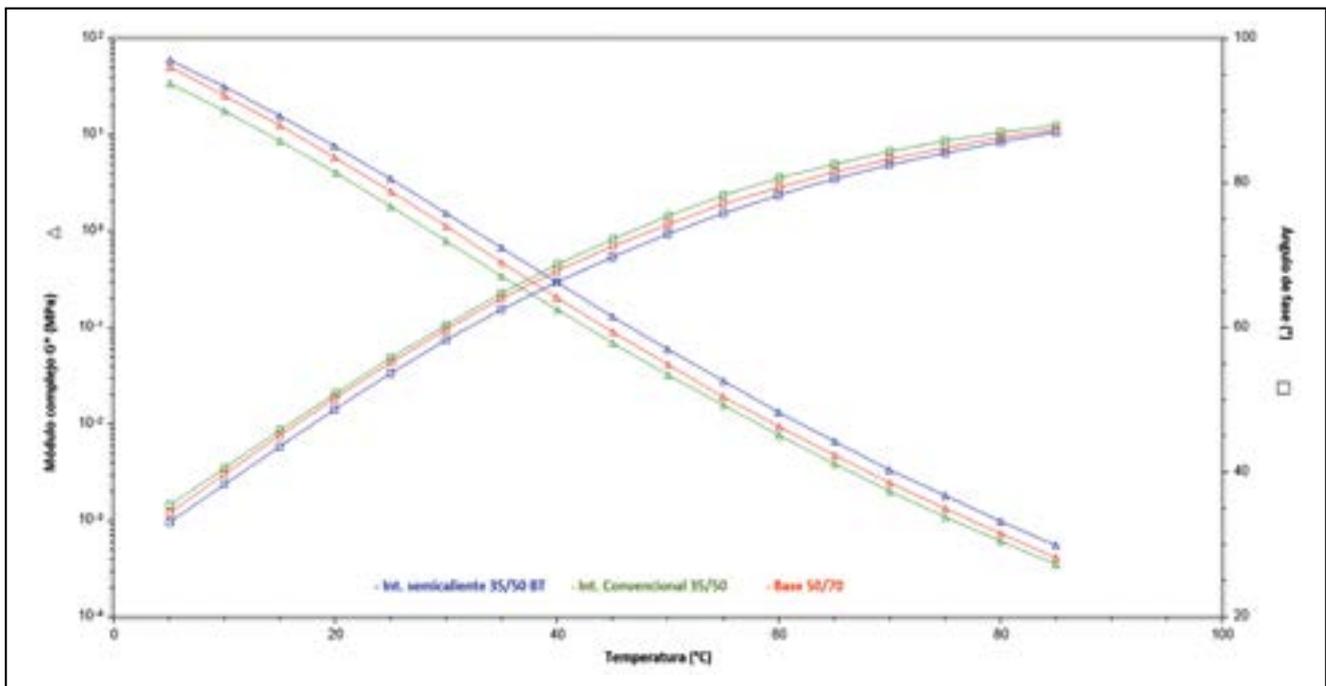


Figura 5. Isócronas de G^* y de δ a 10 rad/s.

diendo a los criterios para posibles especificaciones prestacionales que aún están en valoración y de los cuales todavía no se ha llegado a un consenso en Europa [11].

Fallo por deformaciones plásticas (roderas)

La formación de roderas se debe a la acumulación de tensiones por el paso repetido de los vehículos, que son disipadas en forma de deformaciones viscosas, no recuperables, y de calor. Por ello, este modo de fallo es importante a temperaturas medias-altas durante los primeros años en servicio del pavimento, puesto que, a medida que va

envejeciendo aumenta la rigidez del ligante y la formación de roderas es menos probable.

Para betunes convencionales se considera un valor crítico $G^* = 50 \text{ kPa}$, para el cual hay que determinar la temperatura y el ángulo de fase asociados a dicho valor. A continuación, en la figura 6 y la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos para los tres betunes en las condiciones citadas a partir de las isócronas a una frecuencia de 1,59 Hz.

Cuanto mayor es la temperatura a la cual el módulo alcanza el valor de 50 kPa y menor es el ángulo de fase (comportamiento más elástico), menor será la tendencia del betún a la formación de roderas.

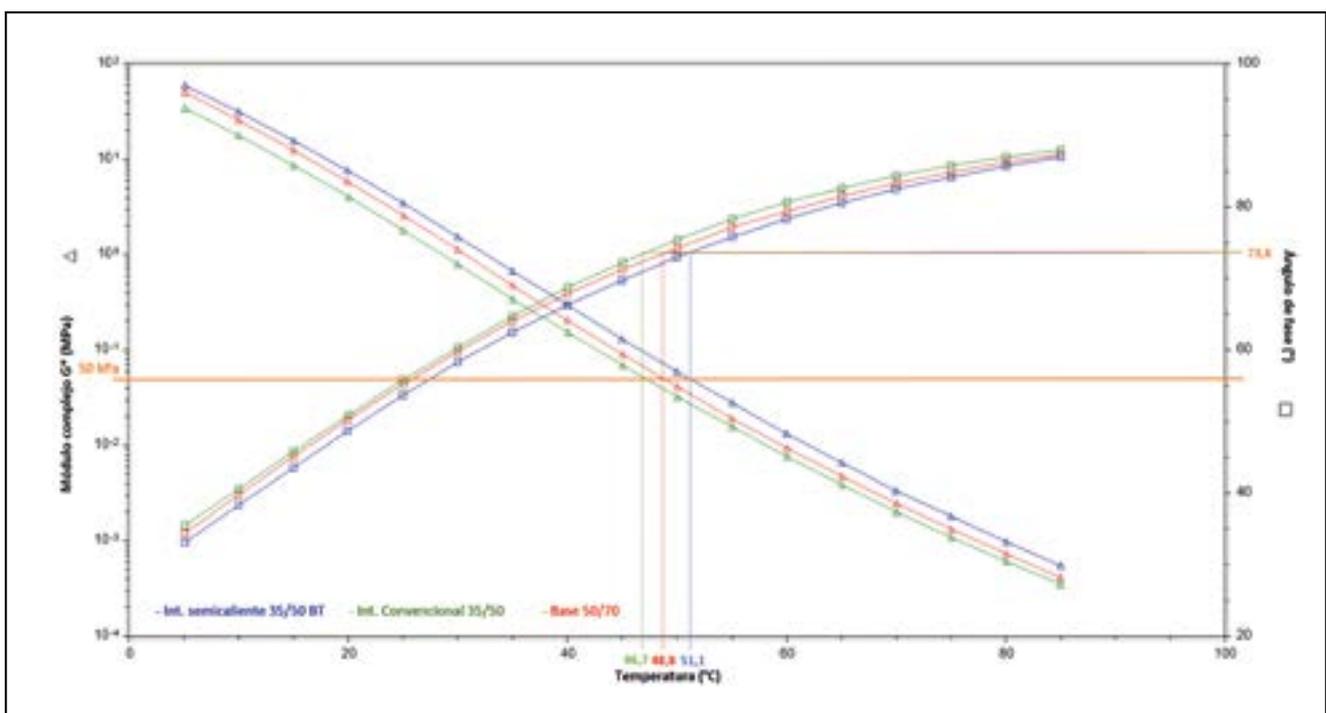


Figura 6. Parámetros de deformaciones plásticas. Cálculo de temperaturas y δ para $G^* = 50 \text{ kPa}$.

Tabla 2. Parámetros de deformaciones plásticas

Ligante	Temperatura (G* = 50 kPa) (°C)	Ángulo de fase (G* = 50 kPa) (°)
B 35/50	46,7	73,8
BT 35/50	51,1	73,8
B 50/70	48,8	73,8

A la vista de los resultados anteriores, el betún que alcanza el valor crítico a la mayor temperatura es el BT 35/50, correspondiente a la mezcla semicaliente; la menor temperatura sería para el B35/50. Estos resultados están en línea con todos los resultados anteriores.

Fallo por fatiga

La fisuración por fatiga se debe a la aplicación repetida de cargas por debajo de la resistencia máxima de la mezcla bituminosa y se suele producir a temperaturas próximas a la temperatura ambiente. La resistencia a fatiga depende de la capacidad del material para recuperarse tras la aplicación de la carga. Por lo tanto, comportamientos muy elásticos (valores bajos de ángulo de fase) favorecen esta recuperación. Pero también una mayor resistencia a fatiga se ve favorecida por valores bajos del módulo complejo, lo cual implica un menor desarrollo de tensiones ante la deformación inducida por la carga y, por tanto, una recuperación más fácil del estado tensional inicial. Esta resistencia se evalúa sobre un betún mediante DSR, considerando como valor crítico $G^* = 5 \text{ MPa}$.

Según este criterio, se han obtenido los siguientes resultados (figura 7, tabla 3):

Tabla 3. Parámetros de fallo por fatiga

Ligante	Temperatura (G* = 5 MPa) (°C)	Ángulo de fase (G* = 5 MPa) (°)
B 35/50	18,4	49,5
BT 35/50	22,5	51,9
B 50/70	20,9	51,1

A temperaturas inferiores a la que se obtiene el valor crítico, el módulo complejo es tan elevado que puede dar lugar fácilmente a fisuración bajo cargas repetidas y por tanto es más probable el fallo por fatiga. De esta forma, los ligantes con menores valores de temperatura a la que $G^* = 5 \text{ MPa}$ serán los que, *a priori*, tengan una mayor resistencia a la fisuración por fatiga, al disponer de un rango de temperaturas más amplio sin que este deterioro se produzca en gran medida.

En este caso, la menor temperatura para el valor crítico la proporciona el betún convencional B35/50 de la mezcla de la capa intermedia, que además presenta el valor de ángulo de fase más bajo. En cambio, es el betún BT35/50 el que peor comportamiento a fatiga muestra, según este criterio. Estos resultados confirman de nuevo lo ya obtenido en resultados previos al observar que el betún convencional B35/50 era el de menor módulo, en todo el rango de operación estudiado.

3.2. Ensayos de fluencia-recuperación

En cuanto al ensayo de fluencia-recuperación o MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*), se ha seguido el método descrito en la norma UNE-EN 16659 [12]. Partiendo igualmente de un disco de ligante, en este caso se le aplican diez

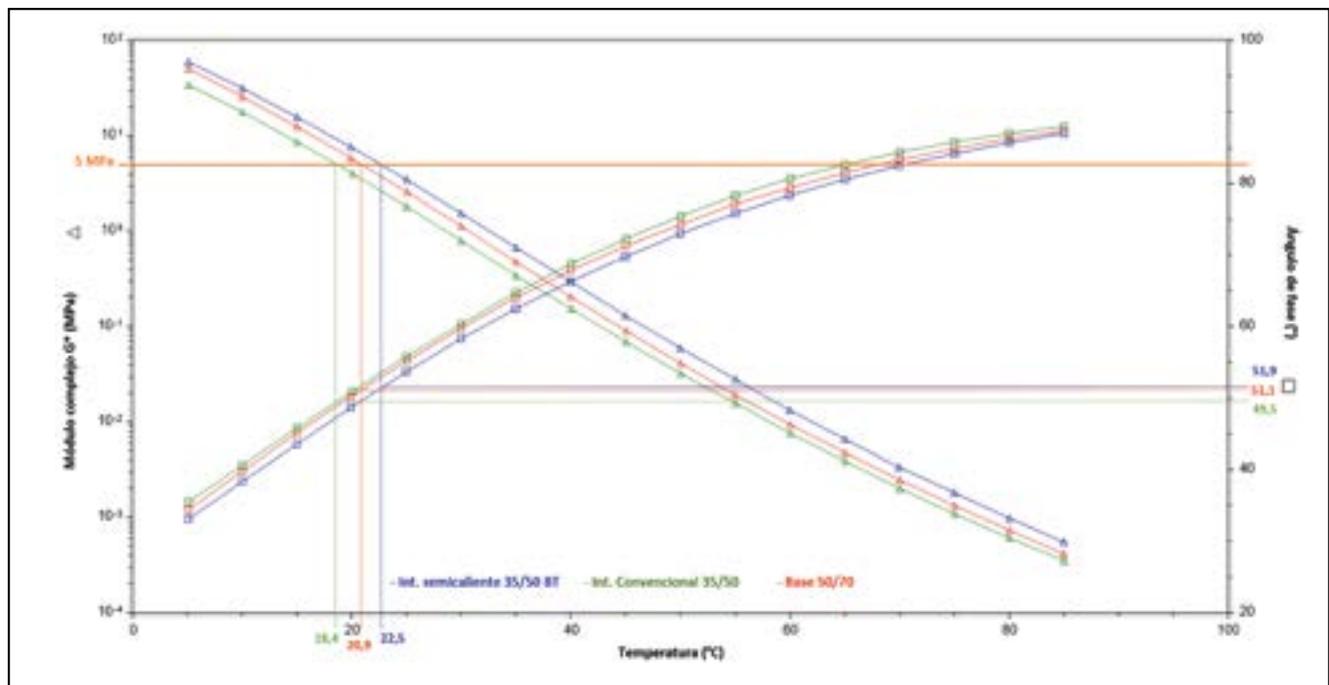


Figura 7. Parámetros de fallo por fatiga. Cálculo de temperaturas y δ para $G^* = 5 \text{ MPa}$.

ciclos sucesivos de esfuerzo-recuperación para dos niveles diferentes de esfuerzo de cizalla (primero a 0,1 kPa y seguidamente a 3,2 kPa). En cada ciclo el esfuerzo de cizalla dura 1 segundo, permitiendo la relajación de la muestra durante los 9 segundos siguientes. Se recogen los datos de porcentajes de deformación recuperada (elástica) y no recuperada (de fluencia) en cada ciclo y se calcula el promedio para los diez ciclos aplicados con cada nivel de esfuerzo.

Con este ensayo se evalúa la respuesta elástica del ligante y cómo varía según el nivel de esfuerzo aplicado. Asimismo, se determina el parámetro denominado *compliance no recuperable de fluencia* (Jnr), que permite valorar la susceptibilidad intrínseca del ligante a las deformaciones plásticas, siendo menor cuanto mayor es su comportamiento elástico y menor es su tendencia a la fluencia [13]. De acuerdo con la propiedad prestacional que se pretende evaluar, los ensayos se realizan en condiciones desfavorables para el ligante, es decir, a una temperatura elevada (entre 50 °C y 80 °C).

El ensayo se ha realizado a una temperatura de 50 °C. En la tabla 4 se muestran, para cada betún, los resultados obtenidos de *porcentajes medios de recuperación* a 0,1 y 3,2 kPa, la *diferencia porcentual de recuperación entre ambos niveles de esfuerzo* (R diff), la *compliance no recuperable* a 0,1 y 3,2 kPa (Jnr) y la *diferencia porcentual entre ambas compliances en fluencia no reversible* (Jnr diff).

Tabla 4. Resultados de los ensayos de fluencia-recuperación a 50 °C

Ligante	R _{0,1kPa} (%)	R _{3,2kPa} (%)	Jnr _{0,1kPa} (kPa-1)	Jnr _{3,2kPa} (kPa-1)	R diff (%)	Jnr diff (%)
B 35/50	5,81	4,80	105,36	113,45	17,37	7,67
BT 35/50	7,92	6,85	59,26	63,22	13,43	6,68
B 50/70	6,82	5,69	88,72	95,48	16,69	7,62

La figura 8 representa la evolución de cada betún en los porcentajes de deformación al aplicar los diez ciclos de

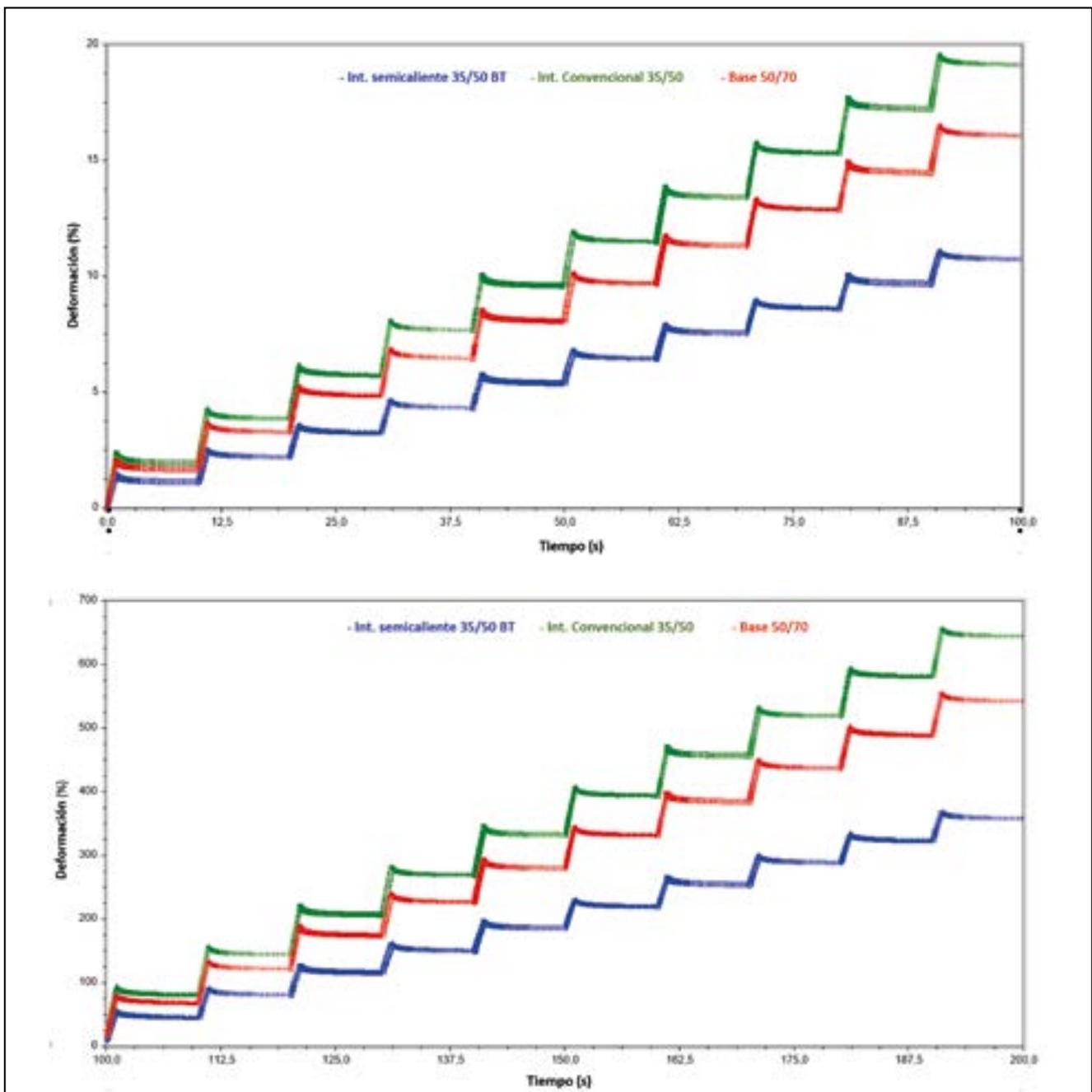


Figura 8. Ensayos de Fluencia- Recuperación a 0,1 kPa (superior) y 3,2 kPa (inferior).

esfuerzo / recuperación a 0,1 kPa (gráfico superior) y 3,2 kPa (gráfico inferior).

A la vista de los resultados, y en línea con los obtenidos en los ensayos de módulo complejo para $G^* = 50$ kPa, el betún BT35/50 presentaría el mejor comportamiento, ya que es el que mayor porcentaje de deformación recupera (comportamiento más elástico), alcanzando así un menor valor de deformación acumulada al completarse los diez ciclos. Se observa, en general, un comportamiento algo más cercano entre el betún de la capa base, B50/70, y el B35/50 sin tensoactivos, siendo este último el que peor tendencia reflejaría desde el punto de vista de las deformaciones plásticas permanentes.

El betún BT35/50 es también el que muestra una menor dependencia respecto a la intensidad del esfuerzo aplicado, proporcionando los valores más bajos de R_{diff} y $J_{nr, diff}$. Aquí también presentan mayor similitud entre sí los otros dos betunes.

4. CONCLUSIONES

Los análisis realizados sobre los betunes de las diferentes mezclas recuperados a partir de los testigos indican que las características empíricas de los tres ligantes son bastante parecidas. Básicamente, a pesar de que incorporan betún envejecido procedente del material bituminoso reutilizado, y de haber experimentado también un envejecimiento durante la fabricación y puesta en obra de las mezclas, los tres cumplen las especificaciones en cuanto a penetración retenida y aumento de la temperatura anillo y bola.

El B50/70 procedente de la capa base es el que más alteración parece presentar respecto al ligante original, dado que también incorpora mayor proporción de ligante envejecido del fresado, lo que ha aproximado sus características a las de los otros betunes usados en la capa intermedia, en principio más duros.

En el betún recuperado de la mezcla semicaliente fabricada con BT35/50, a pesar de la reducción en las temperaturas de trabajo gracias a la presencia del aditivo, se aprecia una alteración ligeramente mayor que en el recuperado de la mezcla fabricada con B35/50. La heterogeneidad asociada al fresado y la propia variabilidad del proceso de recuperación de los ligantes pueden haber sido responsables en parte de estas diferencias, dejando al margen la influencia que pueda haber tenido el tensoactivo en las propiedades del betún de la mezcla semicaliente.

En cuanto a los análisis reológicos realizados, las diversas representaciones de los datos de módulo y ángulo de fase medidos a distintas frecuencias y temperaturas (diagrama de Black, curvas maestras y curvas isócronas) también confirman la similitud entre los tres betunes recuperados, con pequeñas diferencias. En el ligante de la mezcla semicaliente no se aprecia que el tensoactivo empleado haya producido cambios especialmente significativos en su comportamiento reológico respecto a los otros dos betunes no aditivados.

Las curvas maestras (isotermas a 20 °C) indican que el betún con mayor módulo G^* y mayor carácter elástico (menor ángulo de fase) para todas las frecuencias de ensayo es el BT35/50, siendo el B35/50 el que presenta menor módulo y mayor carácter viscoso (mayor ángulo de fase).

Los ensayos empíricos de los betunes muestran tendencias acordes con estas características.

Las curvas isócronas a 1,59 Hz muestran que este mismo comportamiento de los ligantes se mantiene también en todo el intervalo de temperaturas de ensayo. La mayor temperatura para el fallo por deformaciones plásticas (valor crítico de $G^* = 50$ kPa) la ha dado el BT35/50 y la menor el B35/50, con ángulos de fase idénticos en los tres betunes. Para el fallo por fatiga (valor crítico de $G^* = 5$ MPa), la menor temperatura y el menor ángulo de fase se han obtenido con el B35/50 y los mayores valores con el BT35/50. Por tanto, el ligante recuperado que presenta a priori mejores características frente a las deformaciones plásticas es el BT35/50 y el menos adecuado el B35/50; con respecto al fallo por fatiga sucedería al contrario.

Respecto a los ensayos de fluencia-recuperación (MSCR) a 50 °C, el ligante obtenido de la mezcla semicaliente (BT 35/50) es, de nuevo, el que presentaría mejores propiedades frente a las deformaciones plásticas ya que, gracias a su mayor elasticidad, es capaz de recuperar un mayor porcentaje de deformación para los dos niveles de esfuerzo ensayados; también el que menos dependencia muestra frente a la intensidad del esfuerzo. Asimismo, el B35/50 vuelve a ser el de peor comportamiento según este ensayo. En cuanto al B50/70, sus propiedades se asemejan más al BT35/50 que al B35/50.

Por lo tanto, a la vista de todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados, el ligante utilizado para la mezcla semicaliente, BT 35/50, en el que se ha adicionado un agente tensoactivo para bajar la temperatura de fabricación, presentaría en principio unas características algo más favorables que el betún convencional sin aditivado, B 35/50 respecto a la resistencia a las deformaciones plásticas, y menos favorables frente al comportamiento a fatiga.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta respecto al ligante aditivado, que el proceso de recuperación también ha podido influir en las características del material obtenido y analizado posteriormente, dado que dicho proceso resultó bastante más prolongado que con los otros dos ligantes convencionales. Por ello, también debe profundizarse, mediante más experimentación, y comprobar si el método actualmente empleado para recuperar los ligantes de las mezclas para su ensayo sigue siendo suficientemente fiable en los casos en que se incorporen estos nuevos tipos de aditivos, sin que se alteren de forma excesiva las características del ligante respecto a las que presenta en la mezcla.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la Dirección General de Carreteras del MITMA, a su Demarcación de Carreteras en Castilla y León Occidental y a la empresa HERGON S.A.U., por las facilidades dadas para la realización del trabajo descrito en este artículo, así como a J. Cirugeda, O. Leonis, E. Marull y E. Sosa por su colaboración en la realización de los ensayos.

6. REFERENCIAS

[1] Norma UNE-EN 1426:2015 (versión corregida en 2016). Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la penetración con aguja. Madrid: AENOR.

[2] Norma UNE-EN 1427:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de reblandecimiento. Método del anillo y bola. Madrid: AENOR.

[3] Norma UNE-EN 12593:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del punto de fragilidad Fraass. Madrid: AENOR.

[4] Norma UNE-EN 12697-1:2013. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayos para mezclas bituminosas en caliente. Parte 1: Contenido de ligante soluble. Madrid: AENOR.

[5] Norma UNE-EN 12697-3:2013+A1:2020. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 3: Recuperación de betún. Evaporador rotatorio. Madrid: AENOR.

[6] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículo 211. Betunes asfálticos (última revisión publicada en Orden FOM 2523/2014). Madrid: Ministerio de Fomento.

[7] Norma UNE-EN 14770:2012. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación del módulo complejo de corte y del ángulo de fase usando un reómetro de corte dinámico [Dynamic Shear Rheometer (DSR)]. Madrid: AENOR.

[8] Sol-Sánchez, M., Jiménez del Barco Carrión, A., Hidalgo-Arroyo, A., Moreno-Navarro, F., Saiz, L., y Rubio-Gómez, M.C. (2020). Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures. *Construction and Building Materials*, 265(1): 120154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120154>

[9] Yu, J., Guo, Y., Peng, L., F. Guo, F., y Yu, H. (2020). Rejuvenating effect of soft bitumen, liquid surfactant, and bio-rejuvenator on artificial aged asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol. 254, pp. 119336. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119336>

[10] Airey, G.D. (2003). Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel*, 82(14): pp. 1709–1719. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7)

[11] Barceló Martínez, F., Pereira Mozota, C., González González, M., y Pérez Mena, V. (2018). Reología de los ligantes españoles en el contexto del anexo informativo de la nueva EN 12591 (2015). Comunicación presentada en la *XIII Jornada Nacional ASEFMA, Madrid, 2018*.

[12] Norma UNE-EN 16659:2016. Betunes y ligantes bituminosos. Ensayos de la fluencia-recuperación bajo múltiples esfuerzos repetidos (ensayo MSCR). Madrid: AENOR.

[13] Liu, H., Zeiada, W., Al-Khateeb, G.G., Shanableh, A., y Samarai, M. Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review. *Construction and Building Materials*, Vol. 269, p. 121320, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121320>

Agua regenerada para luchar contra los incendios forestales

Javier Anguiano Aranzubia^{1*}, Mario Ruiz², Ferrán Dalmau-Rovira³

¹ Ingeniero industrial. Hidraqua. Proyecto Guardian-UIA03-338.

² Ingeniero químico. CETAQUA. Proyecto Guardian-UIA03-338.

³ Ingeniero forestal. Máster en Incendios Forestales: Ciencia y Gestión Integral. Medi XXI GSA. Proyecto Guardian-UIA03-338.

*Autor de contacto: janguiano@hidraqua.es

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso limitado y limitante. Lo ha sido históricamente, y en un contexto de cambio climático los modelos de predicción indican que puede serlo cada vez más. Desde el punto de vista climatológico, según datos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2018), dependiente de la Organización de las Naciones Unidas, en los últimos 150 años la temperatura media global ha aumentado casi 0,8 °C, y alrededor de 1 °C en Europa. En un

análisis comparado de datos más completos, incluyendo información desde 1850, que proviene de la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE UU), el Instituto Goddard de Investigaciones de la NASA, el programa Copernicus del Centro Europeo de Predicción Meteorológica, el Servicio Meteorológico del Reino Unido y el de Japón, y realizado por la Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2019), se muestra de forma clara que la temperatura media mundial en superficie de 2017 superó en 1,1 °C a la de la era preindustrial. Según la misma fuente se prevé que, debido a la inacción a escala mundial para limitar las emisiones, pueda producirse un nuevo aumento de las temperaturas globales de entre 1,8 °C y 4,0 °C para 2100, lo que podría determinar cambios irreversibles y probablemente catastróficos.

Desde una perspectiva de los incendios forestales estos datos resultan relevantes en tanto en cuanto determinan la evapotranspiración, la temperatura, la humedad relativa y otros factores fundamentales en el cálculo de la disponibilidad de los combustibles. Según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2019), en un análisis de sus datos oficiales desde 1981 a 2010 para España, se observa una clara tendencia hacia un incremento del número de años cálidos que se concentra especialmente en lo que va del siglo XXI.

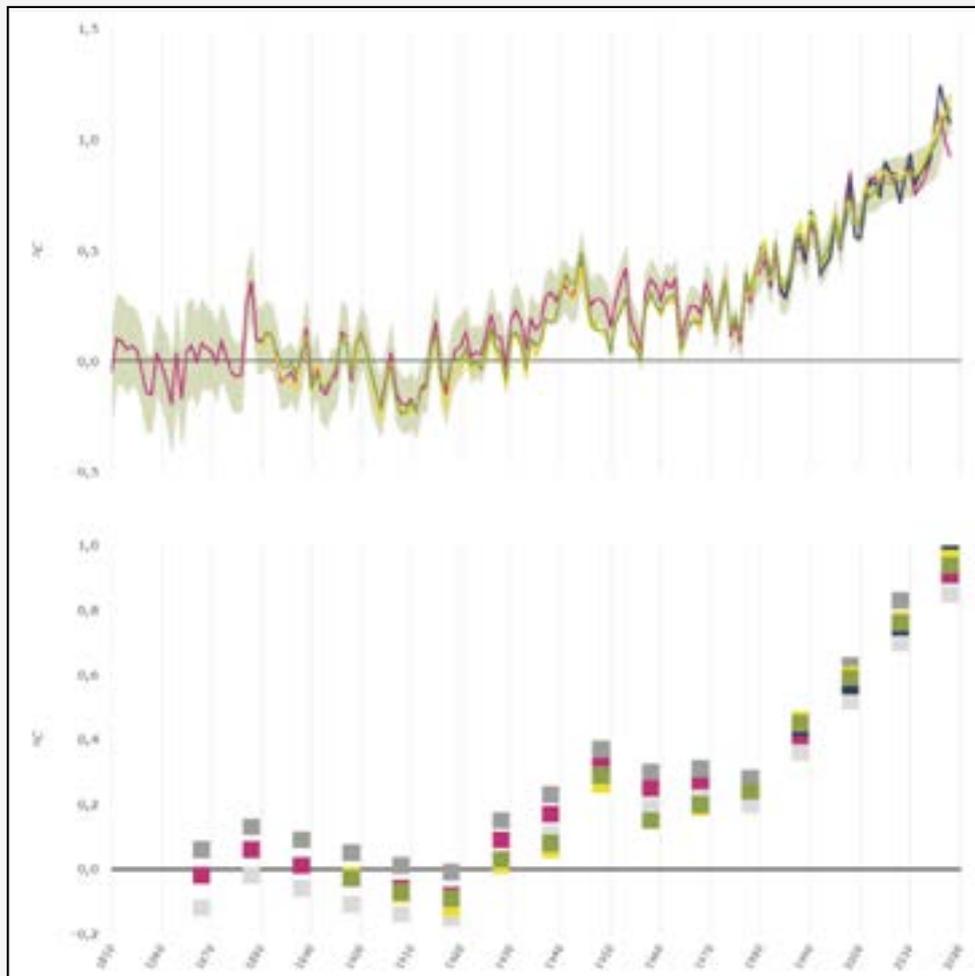


Figura 1. Temperatura media mundial cerca de la superficie en relación con el período preindustrial (Fuente: European Environment Agency a partir de datos de la Organización Mundial de Meteorología).



Figura 2. Clasificación climática anual (entre 1981 y 2010) en función de la temperatura y la precipitación (Fuente: Agencia Estatal de Meteorología, 2019).

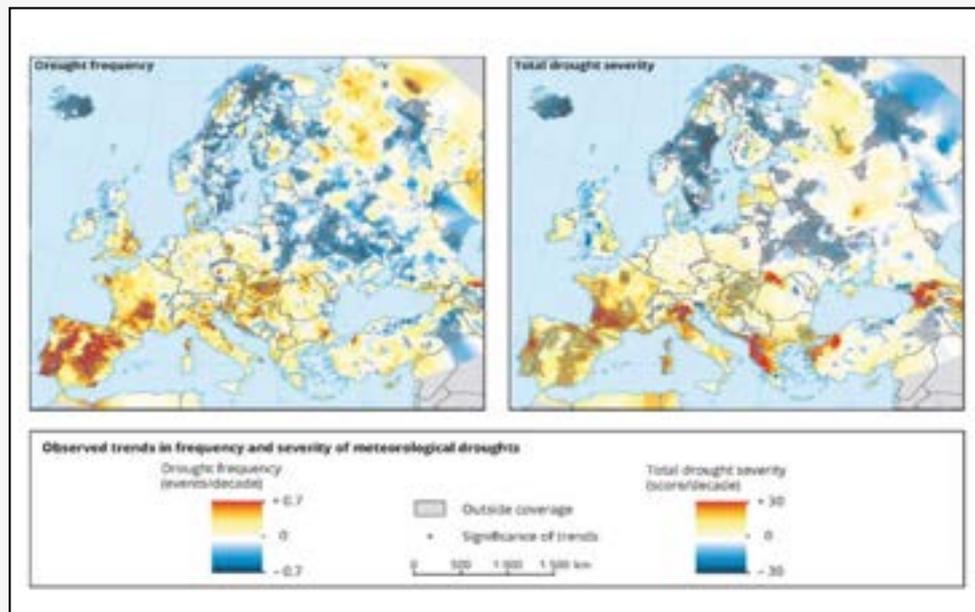


Figura 3. Tendencias en la frecuencia (izquierda) y severidad (derecha) de las sequías meteorológicas entre 1950 y 2012. Puntos: tendencias significativas en $\geq 95\%$ [Fuente: Joint Research Centre (JRC, 2017)].

Según el Informe PESETA III (*Projection of Economic Impacts of Climate Change in Sectors of the EU Based on Bottom-Up Analysis*), publicado en 2018 por la Comisión Europea en referencia al impacto del cambio climático esperable en Europa, el calentamiento global inducido por la actividad humana irá provocando una amplia gama de impactos ambientales y socioeconómicos en toda Europa, que requieren de una adaptación planificada. El aumento de las temperaturas, unido a una reducción potencial de la precipitación y la humedad, dará como resultado un impacto los ecosistemas forestales. Los cambios vegetativos que se generarán en la floración de las especies vegetales, sus temporadas de crecimiento y, especialmente, en el contenido de agua del suelo afectarán a la productividad agrícola y a los ecosistemas forestales. Consecuentemente, esto va a generar modificaciones del hábitat en términos de estación (caracteres

culturales de las especies) y, por tanto, de la vegetación potencial. Este cambio puede tener como consecuencia que la vegetación forestal actual pase a ser mucho más vulnerable frente a los incendios al encontrarse fuera de rango de temperaturas o precipitación, más débil y más sensible frente a plagas o enfermedades. Esta situación favorece la producción de incendios forestales.

Pese a la incertidumbre, los modelos publicados muestran claramente que los países del sur se verán más afectados por el calentamiento global en comparación con las partes del norte de Europa. Este aspecto se asocia con la mortalidad humana relacionada con el calor, **la escasez de recursos hídricos, la progresión de la sequía y la desertificación, la pérdida de cierto tipo de hábitats**, así como con la demanda de energía para la climatización (aires acondicionados) y los incendios forestales.

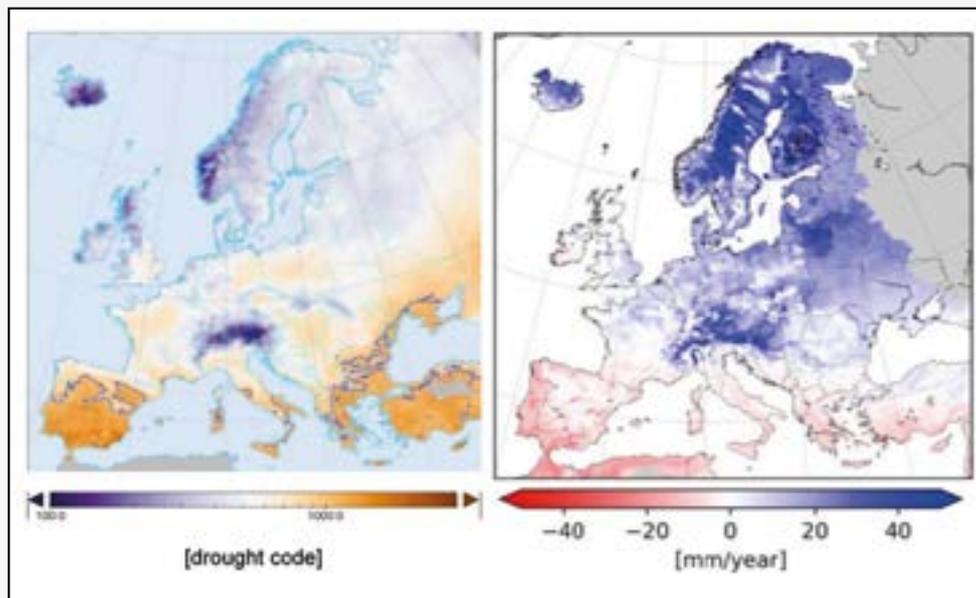


Figura 4. Evolución prevista del Índice de Sequía (*Drought Code*, DC) y FWI (izquierda) y la precipitación (de-
recha) en un escenario de incremento de la temperatura de 2 °C [Fuente: Joint Research Centre (JRC, 2018)].

Según todas las fuentes consultadas, el área mediterránea parece ser la más vulnerable al cambio climático en Europa. Según datos de AEMET, del JRC (Centro Común de Investigación) y del IPCC consultados, el sur de Europa debe afrontar el hecho de la creciente escasez de agua. Entre otras cosas, los escenarios actuales vaticinan que la mayor parte de los impactos en la sociedad y el medio ambiente estarán relacionados con fenómenos meteorológicos extremos por un aumento relevante en comparación con los promedios climatológicos utilizados para la obtención de tendencias. El IPCC prevé que el riesgo de inundación fluvial aumente en muchas regiones de Europa debido a la deforestación de las cuencas hidrológicas y a un incremento de la torrencialidad.

El último informe del JRC establece claramente que habrá un aumento importante de la mortalidad humana por todos estos fenómenos, incluso en el escenario menos restrictivo, con un incremento de la temperatura media de 2 °C.

2. GREEN URBAN ACTIONS FOR RESILIENT FIRE DEFENSE OF THE INTERFACE AREA (GUARDIAN)

El proyecto GUARDIAN es una iniciativa financiada por la Unión Europea, dentro de la **convocatoria UIA (Acciones Urbanas Innovadoras)**, a través de la cual se subvenciona con fondos FEDER el 80 % de



Figura 5. Estación Regeneradora de Agua (ERA) instalada en la depuradora Camp de Túria II (Fuente: proyecto GUARDIAN).

soluciones nuevas para problemas relativos al desarrollo urbano sostenible que resulten relevantes para el conjunto de la Unión. Este proyecto está enfocado a aumentar la resiliencia contra incendios forestales en 4 zonas de interfaz urbano-forestal (IUF) del Parc Natural del Túria (Valencia). Se inició en noviembre de 2018.

Así, pese a que este proyecto fue aprobado hace ya tres años, se adelanta a la situación actual, y es que la Hoja de Ruta del Pacto Verde Europeo (*Green Deal*) menciona explícitamente el problema de los incendios forestales dentro de la línea estratégica de preservación y restablecimiento de los ecosistemas y la biodiversidad, destacando “la necesidad de poner en marcha acciones y medidas para evitar los incendios forestales”.

Actualmente, está habiendo una apuesta por la reutilización de aguas regeneradas en la lucha contra la escasez hídrica y los efectos derivados del cambio climático. Entre los habituales usos de las aguas regeneradas se encuentran el riego agrícola, los riegos de parques y jardines o el baldeo de calles, pero **el proyecto GUARDIAN propone un uso novedoso e innovador al utilizar agua regenerada en la prevención y lucha de incendios forestales.**

En el marco del proyecto, se ha diseñado y construido tanto la instalación para someter el agua a los tratamientos específicos para su reutilización como toda la infraestructura hidráulica encargada de almacenar y distribuir el agua regenerada por la zona.

En concreto, la Estación Regeneradora de Agua (ERA) se diseñó para tratar una parte del agua depurada procedente de la depuradora Camp de Túria II. Los tratamientos convencionales de las estaciones depuradoras de aguas residuales buscan obtener un agua tratada que pueda ser vertida al medio natural. En el proyecto GUARDIAN se requiere una calidad aún mayor que permita su reutilización para los usos previstos. Además de garantizar que el uso del agua regenerada sea seguro, cumpliendo con las calidades exigidas en el RD 1620/2007, la ERA permitirá la eliminación de contaminantes emergentes. Estos microcontaminantes se encuentran de



Figura 6. Torre de aspersión (pruebas de funcionamiento) (Fuente: proyecto GUARDIAN).

forma habitual en el medio acuático y proceden principalmente de pesticidas, productos farmacéuticos y de cuidado personal, o de compuestos industriales, entre otros.

La ERA tiene una capacidad de diseño de 10 m³/h y está integrada por tres fases. En la primera de ellas, un filtro de arena se encarga de reducir la presencia de sólidos, a fin de optimizar los procesos posteriores. A continuación, el agua se somete a un tratamiento mediante ozono, que se generará en la propia estación. Esta tecnología permite degradar las moléculas de los microcontaminantes de un modo eficiente, además de ser un potente desinfectante. Una vez superada la etapa de ozonización, el agua atraviesa un sistema de biofiltración por carbón activo donde se degradan los productos obtenidos en la etapa previa. Por último, un sistema de desinfección añade una barrera adicional con el fin de garantizar la calidad y completa seguridad del agua regenerada obtenida.

Una vez el agua ha superado todas las etapas de tratamiento, se bombea a través de una tubería a un primer depósito. En total, cinco depósitos de almacenamiento y 6.500 metros de conducciones, permitirán conducir el agua desde la ERA (Estación Regeneradora de Agua) hasta los puntos en los que se encuentren instalados las 40 torres SIDEINFO (Sistema de Defensa contra Incendios Forestales). Los riegos prescritos permitirán la creación de barreras verdes, que con una longitud total de 2,9 km actuarán como cortafuegos para reducir la capacidad de avance del fuego hacia las zonas de IUF, y viceversa, del área poblada al Parque Natural. Cabe señalar que todos estos trabajos se basan, además, en la gestión de casi 50 hectáreas en Áreas Estratégicas de Gestión del combustible forestal, y en la instalación de SIDEINFO NetSENSE, que es una red sensorial inalámbrica que monitoriza el riesgo meteorológico (FWI–Fire Weather Index) de incendios forestales y el estado de la vegetación en tiempo real. Estos riegos preventivos en días de alerta máxima reducirán la disponibilidad del combustible, y junto con el cambio de la estructura de la masa, permitirán que en caso de impacto, este se produzca dentro de capacidad de extinción. En caso de incendio, el sistema puede activarse de forma inmediata preparando el terreno para la llegada de los Servicios de Emergencias.

Añadir que, cuando el sistema de prevención no requiere agua regenerada, se emplea en otro uso, el ambiental. El excedente de producción de la ERA se aporta al embalse de La Vallesa, para mejorar la calidad del agua de esa zona húmeda protegida, ya que el agua regenerada sustituirá a los caudales de inferior calidad que actualmente recibe el embalse.

3. CONCLUSIONES

Si se confirman las predicciones, la escasez de agua puede ser acuciante en pocos años. En este sentido, el agua regenerada supone una alternativa viable para



Figura 7. Imagen aplicación plataforma de control NETSENSE (Fuente: proyecto GUARDIAN).

diversos ámbitos del sector primario y, en especial, para la defensa y la lucha contra incendios forestales. La aportación al medio de un agua que ya ha sido empleada para uso urbano, y depurada y regenerada para conseguir una calidad adecuada, permite incorporar este recurso a los ecosistemas forestales en zonas localizadas para generar zonas de transición entre los sistemas urbanos y los sistemas forestales. Estas zonas de tamponamiento, a su vez, al tener un mayor aporte hídrico, y una calidad de estación diferente a las de su entorno, permiten también incrementar la biodiversidad implantando y haciendo convivir en zonas estratégicas especies que de forma natural, debido a las restricciones hídricas, no podrían habitar en dichas áreas. El papel de la UPV (Universidad Politécnica de Valencia, entidad socia de GUARDIAN) es ajustar estos parámetros de cálculo para evitar problemas fitosanitarios o fisiológicos que afecten al desarrollo de la vegetación. Se trata de afinar el punto óptimo de riego equilibrando riesgo–desarrollo vegetativo excesivo a modo de ecualizador. Todas las actuaciones van acompañadas de acciones formativas orientadas a la población para mejorar su capacidad de respuesta ante un eventual incidente por fuego forestal.

La disponibilidad de agua (Volumen de Agua Movilizable) para la lucha contra el fuego en entornos de IUF se puede asegurar mediante la regeneración del propio efluente, que se obtiene de las depuradoras de las zonas pobladas. Una zona de IUF sin gestión del entorno constituye un notable incremento de la vulnerabilidad en caso de incendio dado que su defensa puede ser mucho más difícil, y derivar en se destinen recursos de extinción y por tanto que se quemem más hectáreas de monte. Una zona de IUF autoprotegida, con un entorno preparado para recibir el impacto de un incendio forestal, se convierte en una oportunidad para el control de la intensidad y el avance del fuego, un lugar más seguro para sus habitantes, para los servicios de emergencia y para proteger el bosque.

Esta será la aportación del proyecto GUARDIAN al reto colectivo de la lucha contra la Emergencia Climática y sus consecuencias. Agua regenerada para un entorno más seguro y sostenible en caso de incendio forestal.

4. REFERENCIAS

AEMA (2011). *Los impactos del cambio climático en Europa: evaluación basada en indicadores*. Informe conjunto de la AEMA, CCI y la OMS. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

Behrens, A., et al. (2010). Future Impacts of Climate Change across Europe. *CEPS Working Document*, nº 324. <http://www.ceps.eu>

Calkin, D., et al. (2014). How risk management can prevent future wildfire disasters in the wildland-urban interface. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*.

Dalmau–Rovira, F. (2019). Creación de áreas de Interfaz Urbano-Forestal defendibles contra incendios mediante la implementación de riegos prescritos. *Máster en Incendios Forestales: Ciencia y Gestión Integral*. Lleida: Universidad de Lleida.

Dicus, C. (2016). Changing WUI fire risk in dissimilar communities of Southern California, USA. *Proceedings of the International Conference on Forest Fires and WUI Fires*. Aix-en-Provence, France. California Polytechnic State University.

Fuentes, R., et al. (2017). Productivity of wastewater treatment plants in the Valencia Region of Spain, *Utilities Policy*, Vol. 46, pp. 58-70.

Hernández-Sancho, F., et al. (2015a). *Economic Valuation of Wastewater-The cost of action and the cost of no action*. United Nations Environment Programme.

Hernández-Sancho, F., et al. (2015b). Pricing for Reclaimed Water in Valencia, Spain: Externalities and Cost Recovery (pp. 431-442). En: Dinar, A., Pochat, V., y Albiac-Murillo, J. (Eds.), *Water Pricing Experiences and Innovations*. Springer International Publishing.

Madrigal Olmo, J., et al. (2013). Characterization of wildland-urban interfaces for fire prevention in the province of Valencia (Spain). *Forest Systems*, 22(2): pp. 249-254.

Modugno, S., et al. (2016). Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management*, Vol. 172, pp. 112-126.

Omil, F., et al. (2013). Chapter 9-Removal of Pharmaceuticals by Membrane Bioreactor (MBR) Technology. *Comprehensive Analytical Chemistry*, Vol. 62, pp. 287-317.

Prats, D., y Melgarejo, J. (2006). Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante. Alicante: COEPA-Instituto Universitario del Agua y Ciencias Ambientales.

VV.AA. (2016). LIFE aWARE: Innovative Hybrid MBR Systems to promote Water Reuse–Lyman’s Report. <http://www.life-aware.eu>

JOSE ENTRECANALES IBARRA: VIDA Y SEMBLANZA DE "EL INGENIERO PROFESOR"¹

Gloria Quiroga Valle^{1*}

¹ Profesora contratada doctora en la Universidad Complutense de Madrid (UCM).

*Mail: mariagloria.quiroga@pdi.ucm.es

"Fue uno de los mejores ejemplos de que la generación del 27 no se situó sólo en la órbita de la poesía. Perteneció, en efecto, a esa generación, pero fue uno de los preclaros ingenieros que salieron de aquel tiempo de esperanza creativa española. ¡Qué gran hornada la de aquellas promociones sucesivas de la Escuela de Caminos, en la década de los veinte, de las que salieron ingenieros como Reparaz, Botín, Grasset, Balbás, Entrecanales, Rodríguez Bachiller, Urgoiti (Ricardo) y Bustelo!. [...] Fueron creadores de empresas y de industrias para las que no había precedente en nuestro país."²

Las palabras de Ortega Spottorno sobre Francisco Bustelo, uno de los mejores amigos de nuestro protagonista, pueden ser aplicadas a la perfección a José Entrecanales, como uno, si no el mayor, exponente de esta Generación del 27 del ámbito ingenieril. Fue José Entrecanales Ibarra, un brillante ingeniero, un magnífico profesor de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, un gran empresario y cofundador de la compañía Entrecanales y Távora, S.A., la actual todopoderosa ACCIONA y un actor importante tanto en la historia de la economía española del siglo XX como en la formación de sucesivas generaciones de ingenieros que vieron en él al mejor profesor que la exigente Escuela de la época tuvo.

José Entrecanales Ibarra nació el 16 de diciembre de 1899 en Bilbao, uno de los lugares económicamente más avanzados del país y donde la industrialización se estaba desarrollando de manera extraordinaria. Allende la ría del Nervión comenzaban a desarrollarse las navieras, los altos hornos y los grandes bancos que iban a financiar importantes proyectos industriales y energéticos del país. Familias como los Ybarra, Sota, Aznar, Chávarri o Zubiria, por citar sólo algunos ejemplos, comenzaban a ser partícipes de la gran burguesía industrial no sólo de Vizcaya, sino de todo el país, ejerciendo su influencia económica y también política. Y en este hervidero emprendedor que se estaba convirtiendo el País Vasco, destacarían grandes ingenieros de la época, con los que nuestro protagonista compartiría no sólo formación, sino también relevancia

empresarial. Vascos e ingenieros de Caminos como él fueron Valentin Gorbeña (1855-1923), José Orbegozo Gorostegui (1870-1939), Isidoro Delclaux (1894-1984), José M^a Aguirre Gonzalo (1897-1988), con quien además compartió claustro o Nicolás María de Urgoiti (1869-1951), que, aunque nacido en Madrid, se sentía vasco de corazón. Pero también otros ingenieros de distintas especialidades como Víctor Chávarri (1854-1900), Pedro Chalbaud (1865-1943), Julio de Arteche (1878-1970), Tomás de Zubiria (1857-1932), Juan Urrutia (1866-1925), los hermanos Alfredo (1862-1920) y Carlos Ajuria (1866-1935) y Enrique (1924-2018) y José Manuel (1928-1998) Sendagorta o José M^a Oriol (1905-1985), por citar sólo algunos nombres. En definitiva, ingenieros que fueron grandes emprendedores, que dinamizaron nuevos sectores y que se convirtieron no sólo en "capitanes de la industria vizcaína", sino de la española en general. Con su participación en sectores como el energético, la construcción, las comunicaciones, los transportes, la siderurgia, la minería, etc., permitieron la modernización de nuestro país en la primera mitad del siglo XX.

Pues bien, nuestro protagonista vivió sus primeros dieciséis años en este Bilbao bullicioso desde el punto de vista económico. De orígenes acomodados, dado que su padre, José Entrecanales Pardo, era un médico pediatra de origen cántabro, muy conocido en la ciudad, ya que fue uno de los primeros en practicar traqueotomías y dirigió durante años la "Gota de Leche", una institución que se encargaba de dar un servicio de lactancia para niños sin recursos. Tras el fallecimiento de su madre,



D. José Entrecanales Ibarra.

¹ Este trabajo está basado en la investigación conjunta con Begoña Moreno Castaño que se plasmó en el libro *José Entrecanales Ibarra, ingeniero, empresario y profesor, 1899-1990*, y a quien agradezco su apoyo, generosidad y amistad. También al evaluador anónimo que realizó observaciones muy interesantes. No obstante, de los defectos de este trabajo, soy la única responsable.

² Ortega Spottorno, José (1987), "En la muerte Francisco Bustelo", *El País*, 14 de marzo.



Puente de San Telmo en Sevilla.

Delfina Ibarra Zubieta, cuando contaba con tres años de edad, su padre se volvió a casar con María, una hermana de su difunta esposa, que crió a José con la ayuda de sus otras dos tías Micaela y Cipriana, con las que tuvo una relación muy especial. En este matriarcado, tan típico del norte de España, es dónde vivió su infancia el joven José, al que pronto se le sumaron tres hermanos, fruto del nuevo matrimonio de su padre.

Realizó sus estudios medios en el Instituto General y Técnico de Vizcaya, conocido como el Instituto Vizcaíno, un centro de cierto elitismo donde también estudió Unamuno o de la Sota, pero decidió no seguir la tradición familiar de estudiar medicina y mostró pronto sus preferencias por los estudios técnicos. Y a tenor de cómo fue su vida, parece que fue una elección más que acertada: fue un estudiante brillante en la Escuela de Caminos, número uno de su promoción, llegaría a ser uno de los catedráticos más respetados de la Escuela y dueño de una empresa de construcción cuya característica más sobresaliente fue la excelencia técnica.

En 1915, el joven José llegó a Madrid para preparar el examen de ingreso a la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, el único centro en el que se impartían estos estudios en todo el país. Y en esta ciudad se afincó hasta su muerte en 1990, aunque nunca dejó de sentirse vasco. Para preparar el durísimo examen de ingreso en la Escuela que era aprobado por un número muy reducido de aspirantes cada año, se matriculó en la Academia Krahe, una de las de mayor prestigio en la preparación de este tipo de exámenes.

Dos años después de llegar a Madrid, con 18 años, consiguió aprobar el examen de ingreso para cubrir las plazas del primer año del curso 1918-19, y desde el inicio comenzó destacando, pues en su primer curso fue uno de los siete estudiantes que obtuvieron la calificación de muy bueno y que aún mejoraría al año siguiente al serle concedido por el claustro la matrícula de honor. Estas notas se repetirían durante toda la carrera de José, de tal forma que en el curso 1923-24 terminó como número uno de su promoción, con la calificación de sobresaliente. Durante estos años de carrera coincidió con otros grandes nombres de la ingeniería civil de nuestro país como Bustelo, Reparaz, Botín, Torroja,...

Simultaneó sus estudios de ingeniería con la obligación del servicio militar, realizándolo, como era

costumbre entre los universitarios, en los veranos. Pero en 1921 y por el Desastre de Annual, José Entrecanales fue llamado a filas. Se integró en el batallón del regimiento de Infantería de Jovellanos, destinado en Málaga. Afortunadamente, no llegó a entrar en combate porque en septiembre de 1922, justo cuando iba a ser trasladado a Marruecos, fue desmovilizado e inmediatamente volvió a Madrid y pudo examinarse para no perder el curso, viviendo durante algunos meses en la Residencia de Estudiantes. El ambiente, aunque interesante, le resultó excesivamente "elistista", algo que no cuadraba con su personalidad y la abandonó tras un breve periodo de tiempo.

Tras su vuelta se dedicó por entero a sus estudios y el 28 de enero de 1924 ya era Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dado su excelente expediente fue seleccionado para ampliar sus estudios durante tres meses en el extranjero, concretamente en Francia, Bélgica y Holanda, realizando un estudio sobre las construcciones marítimas en el mar del Norte, y una visita a la Universidad Libre de Bruselas, con una dotación económica de 4.500 pesetas.³ A su vuelta, publicó en la *Revista de Obras Públicas* una serie de artículos comentando las técnicas empleadas en Europa y que podrían ser importadas y adaptadas a España. Este viaje sólo fue el primero de los muchos que realizaría a lo largo de su vida para estar en contacto desde el punto de vista técnico con lo que ocurría más allá de nuestras fronteras.

Durante estos años José también se dedicó a una de sus aficiones favoritas, el deporte. Practicó atletismo, hockey, fútbol, pelota y tenis. Fue seleccionado para los Juegos Olímpicos de Amberes de 1920, a los que finalmente no pudo acudir y perteneció al Club Abra de hockey y al Club Aviación de fútbol (germen del Atlético de Madrid).

Fueron precisamente los estudios y el deporte lo que unió de por vida a José con sus amigos más íntimos, Francisco Bustelo, Federico Reparaz, José Luis Grasset, Vicente Olmo y Carlos Botín, el auto-denominado "Cartel", amistad que se extendería a las que fueran sus esposas y también a los hijos. Según recoge Leopoldo Calvo Sotelo, que fue su alumno, en sus *Memorias*:

³ *Gaceta de Madrid*, nº 232. Orden de 14 /8/1925.

“El origen histórico del grupo habían sido seis brillantes ingenieros de caminos, compañeros de la escuela. [...] Todos tenían, o se habían ganado, una buena posición económica y social en aquellos difíciles años cuarenta. Eran liberales y, que yo sepa, ninguno socialista. Se oponían con claridad, pero sin ostentación, al régimen de Franco, y alguno coqueteaba discretamente con Estoril, como discretamente había coqueteado alguno con la República”⁴.

Recién licenciado regresó a Bilbao para comenzar su andadura profesional. Dada la adscripción de los ingenieros de caminos al Ministerio de Fomento, se incorporó como ingeniero auxiliar a la Junta de Obras del Puerto de Bilbao, trabajando durante casi dos años en la construcción del rompeolas y las obras de la inserción del ferrocarril Portugalete-Santurce. A finales de 1925 José abandonó temporalmente el sector público y volvió a Madrid para incorporarse a la sociedad privada Construcciones Hidráulicas y Civiles (Hidrocivil) como jefe de su oficina técnica. La empresa había sido creada por el que fue su profesor y del que él se convertirá en sustituto, Eugenio Ribera, considerado por muchos como el constructor más brillante del siglo XX, además del introductor del hormigón armado en nuestro país. Y en Hidrocivil también coincidió con otro gran ingeniero, Eduardo Torroja. De ambos aprendió la que sería su seña de identidad en el mundo de la ingeniería y de la empresa: la importancia de la excelencia técnica. Tras trabajar un tiempo en Hidrocivil, en 1927 volvió a la Administración ocupando puestos relacionados con los puertos.

1926-1929 fueron los años más trascendentales de su vida en todos los aspectos: personal, profesional y académico. En el personal, ya que en 1926 se casó con María de Azcárate Flórez -miembro de la conocida familia de tradición liberal republicana y cuyos hermanos, tras ocupar altos cargos durante la II República, acabaron exiliados-, con la que tuvo sus cinco hijos. En el profesional, ya que en 1928 conoció a Manuel Távora, un carpintero de ribera sevillano convertido en constructor y colaborador de Manuel de Zafra y Eugenio Ribera en la construcción de las primeras obras de hormigón armado en Sevilla. Pues bien, en 1928, Hidrocivil consiguió la adjudicación de la obra de construcción del puente de San Telmo en Sevilla y Eugenio Ribera le propuso a José Entrecanales que se asociara con Manuel Távora para trabajar en el proyecto. A este proyecto le siguieron otros donde se fue consolidando el buen hacer en cimentaciones y construcciones bajo el agua, hasta que el 11 de marzo de 1931 decidieron crear la sociedad Entrecanales y Távora S.A. Y en el académico, ya que en 1929 regresó a la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid para ejercer como docente, siendo nombrado profesor auxiliar en la Cátedra de Puertos y Señales marítimas.

Momentos de éxito tuvo muchos, ya que su empresa creció espectacularmente hasta colocarse entre las grandes constructoras del país. A lo largo de seis décadas, José Entrecanales estuvo al frente de Entrecanales

y Távora, S.A., primero como director gerente en compañía de Manuel Távora de 1931 a 1940 y en solitario hasta 1970, y después, tras dejar la compañía en manos de sus dos hijos varones, José M^a y Juan, como consejero, presidente de honor y asesor hasta 1981, cuando se retiró definitivamente a los 82 años. Durante todos estos años, llevó a cabo multitud de obras, muchas de ellas de una gran complejidad, que siempre solventó con lo que él denominaba la fórmula del éxito: la “Excelencia técnica”. Él mismo escribió en su despedida:

“Para permanecer y en mayor medida para crecer, durante cincuenta años de tan acelerado ritmo de cambio en todas las actividades humanas, ha sido preciso conocer todas las técnicas que se ensayan y utilizan en los más distintos campos, dado que tanto en la técnica como en la ciencia el mestizaje es obligado por fecundo”⁵.

Entrecanales y Távora no fue una excepción en la historia de España; hubo muchas otras compañías que fueron fundadas o cofundadas por ingenieros: Hidrocivil, creada por Eugenio Ribera en 1915, Agromán, por el también vasco y profesor de la Escuela, José M^a Aguirre Gonzalo y Alejandro San Román en 1927, Dragados y Construcciones por Luis Sánchez Guerra e Ildefonso Sánchez del Río en 1941, que llegaría a ser la empresa más grande del sector en España, o Ferrovial fundada en 1952 por Rafael del Pino Moreno, alumno de José Entrecanales. Todas ellas se crearon entre la I Guerra Mundial y 1950, amparándose en las oportunidades de negocio creadas por las políticas de obras públicas de Primo de Rivera, de la República y del franquismo, tanto en la reconstrucción del país tras la Guerra Civil como en los planes de industrialización y el desarrollismo.

Lo que hizo diferente a Entrecanales y Távora fueron sus inicios tremendamente modestos (su capital fundacional fue de 650.000 pesetas frente a los 5 millones de Fomento de Obras y Construcciones en 1900 o los 20 millones de pesetas de Dragados en 1941)⁶, y que todo el capital perteneciera exclusivamente a dos socios, que posteriormente se ampliaría a amigos y personal de la empresa, sin participación bancaria alguna (como el caso de Dragados, cuyo principal accionista era el Banco Central, o el Banco Urquijo, promotor de OCISA)⁷.

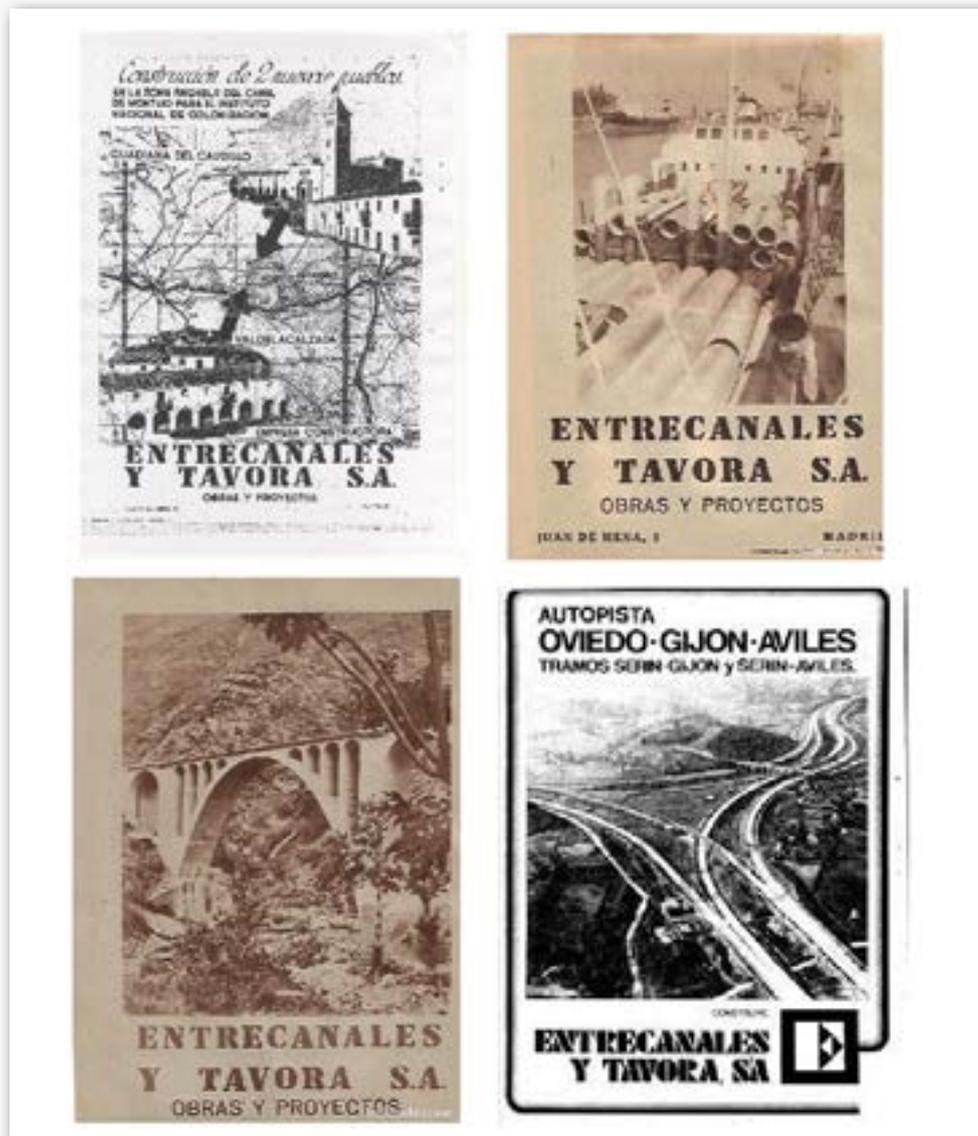
Los inicios fueron complicados por el exiguo tamaño de la empresa, por los enormes gastos que tuvieron que soportar para la compra de maquinaria, por la necesidad de captar clientes, etc., pero también por las difíciles circunstancias políticas que les tocó vivir, en especial con el estallido de la Guerra Civil. Sin embargo, acabado el conflicto, tal y como expuso Leopoldo Calvo Sotelo, “Con la reconstrucción de la posguerra la empresa que lleva

⁴ Calvo Sotelo Bustelo, Leopoldo (2003), *Pláticas de Familia, 1878-2003*, Madrid, La Esfera de los Libros, p. 154.

⁵ Cit. por Moreno (2011), p. 219.

⁶ Torres Villanueva, Eugenio (2009a), “La internacionalización de dos grandes empresas constructoras españolas: FCC y Dragados (c. 1960-1992)”, *Revista de Historia Industrial*, 40, 2, pp. 155-187.

⁷ Torres Villanueva, Eugenio (2009b), “Las grandes empresas constructoras españolas: crecimiento e internalización en la segunda mitad del siglo XX”, *Información Comercial Española*, 849, p. 113 y 127.



Anuncios publicitarios de la empresa.

su nombre inició su largo camino hacia el gran imperio mercantil que todos conocen⁸.

Su interés por la experimentación científica, por el uso de nuevos materiales de construcción, como fue el caso del hormigón armado, por la aplicación de las técnicas novedosas, así como el hecho de encargarse no sólo de la realización de las obras, sino también de sus proyectos, hicieron que su empresa se convirtiera en una de las mayores y mejores constructoras en España.

Además, él supervisaba personalmente todos los proyectos de la empresa, corregía planos junto con sus empleados y aportaba ideas y soluciones a problemas de difícil solución técnica, dejando su impronta en todas y cada una de las obras que la empresa realizó. Ejemplo de ello son las cimentaciones de hormigón armado mediante cajones flotantes que se usaron en la construcción de su primera obra, el puente de San Telmo, pero cuya técnica, mucho más refinada, permitió construir el dique seco de Cádiz, cuyas dimensiones le hacían estar entre los diez diques mayores del mundo. En este caso, se utilizó otra innovación técnica, hacer la soldadura de

los cajones a flote, de modo que fuera visible, y después de soldada, la junta se rellenaba de hormigón, y para ello utilizó el cemento fundido de baja absorción del agua, ya que el cemento tipo Portland, empleado con anterioridad en la bahía de Cádiz había sufrido cierto deterioro⁹. Fue la primera vez en el mundo que se utilizaba esta técnica y con posterioridad fue usada en otros diques secos como en de Trieste, Génova, Messina y Ferrol, y José recogió todo el procedimiento, así como la ejecución técnica, en tres artículos publicados en la *Revista de Obras Públicas*.¹⁰

Esta especialización en cimentaciones profundas y en puentes de hormigón le permitió realizar la mayor parte de las reconstrucciones de las vías férreas del país tras la Guerra Civil, pero también construir la fábrica de la Empresa Nacional Siderúrgica (ENSIDESA) en Avilés (Asturias), un complejo "mastodóntico" pensado para utilizar el

⁸ Calvo Sotelo (2003), pp. 57-58.

⁹ Peral-López, José y López-Bravo, Cecilia (2019), "José Entrecanales Ibarra a través de sus proyectos: los inicios de la transferencia en la Obra Civil Española", en Molina Recio, Raúl (dir.), *Pioneros: Empresas y Empresarios en el primer tercio del siglo XX*. Granada: Comares Historia. Pp. 289-318.

¹⁰ Moreno (2011), pp. 66-67.

carbón de la cuenca asturleonés en la fabricación siderúrgica. En su momento, fue la mayor obra civil en España y una de las más grandes de Europa. Para José esta obra reunía todo lo que un ingeniero-empresario podía desear: envergadura, riesgo y, sobre todo, singularidad técnica, y con ella, la empresa se “hizo grande”. La ubicación escogida para la construcción del complejo era una zona de marismas en la ría de Avilés, ciudad cuyo puerto además era pequeño (con una sola dársena) y con una entrada muy estrecha. Por tanto, lo primero era construir una dársena al lado de la factoría. Al concurso, se presentó un proyecto supervisado completamente por José Entrecanales con una idea francamente ingeniosa: a la construcción con cajones de hormigón armado (obra que fue muy delicada ya que hubo incluso que diseñar y fabricar en Madrid un barco-puerta), se le sumaba una draga con capacidad de impulsar los productos del dragado hasta más de seis kilómetros; con ello conseguía dejar la ría navegable, construir una dársena de dimensiones adecuadas y el terreno dragado para construir la factoría. El problema entonces fue la cimentación en la marisma de las enormes cargas de la instalación. La solución técnica fue cimentar las grandes cargas con cajones de hormigón hincados mediante aire comprimido. Y dado que sabía los problemas que podía causar el aire comprimido en los trabajadores, el propio Entrecanales diseñó y construyó una cámara hiperbárica, que fue la primera de este tipo que se instaló en España¹¹.

Pero Entrecanales y Távora siguió innovando desde finales de los cincuenta y sobre todo en los años sesenta y setenta, en pleno desarrollismo, caracterizado por un rápido crecimiento y una fuerte industrialización muy dependiente desde el punto de vista energético. Era el momento de construir centrales hidroeléctricas, térmicas y nucleares, y José Entrecanales estuvo allí, aportando soluciones técnicas muy novedosas. Desde la construcción de la Cazoleta del Esla entre los derrubios de la antigua presa, anulada por sucesivas riadas o la presa de la Almendra, para cuya construcción se constituyó un consorcio formado, además de por Entrecanales y Távora, por Dragados y la constructora suiza Zschkcke, y que se convirtió en una de las más altas del mundo por aquel entonces (202 metros), hasta centrales térmicas como la de Velilla del Río Carrión (Palencia) y la de Pasajes (Guipúzcoa), donde se construyó por primera vez en España una chimenea troncocónica que fue la más alta de Europa, pasando por las centrales nucleares, donde la empresa “reinó” en solitario, ya que construyó todas menos la de Ascó.

José Entrecanales creó una gran empresa, ampliando mercados, internacionalizándose y diversificándose, lo que se plasma en la actual ACCIONA. Las claves de su éxito fueron la excelencia técnica y el capital humano.

Para José Entrecanales la formación era lo más importante en un ingeniero, aprendizaje que nunca se acababa y que se renovaba día a día en cada obra nueva. Prueba de ello es que la empresa dedicaba una parte importante de fondos a formar a sus ingenieros, primero en la oficina de proyectos y más tarde no dudaba en enviarlos al extranjero, especialmente a Alemania, a visitar

obras y ver “sobre el terreno” las técnicas allí empleadas. Con cada obra nueva que era adjudicada a la empresa, el primer paso era estudiar hasta encontrar la mejor técnica posible, bien consultando bibliografía, que en muchas ocasiones el propio José proporcionaba, bien visitando obras en el extranjero. No es de extrañar que, con esta formación, los ingenieros que trabajaron para su empresa fueran todos excelentes profesionales. Por citar algunos ejemplos, Manuel Gil de Santivañes, Juan Basabe, Ricardo Castelo, José Luis Marín o Gabino Guedán. Pero esta máxima de estar siempre aprendiendo también la aplicó a su persona, ya que dedicó una gran parte de su vida a la docencia y al estudio.

Porque la figura de José Entrecanales no puede entenderse completamente sin su faceta como docente en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Para él, la formación que se daba en la Escuela era la que “deja huella más permanente y duradera en el funcionamiento del Cuerpo de Ingenieros de Caminos”¹², y a esa misión dedicó gran parte de su vida, con bastante éxito por las generaciones de ingenieros que formó, pero también fue una de la que más satisfacciones le dio.

Cinco años después de terminar sus estudios, en 1929, volvió a la Escuela, esta vez como profesor auxiliar en la Cátedra de Puertos y Señales marítimas, mientras que la cátedra recayó en Eduardo de Castro, que era además el ingeniero director del puerto de Gijón. Después de dos años, el claustro de la Escuela le propuso pasar a ser catedrático de otra asignatura, la de Cimientos y Puentes de Fábrica y de Hormigón, que quedaba vacante tras la jubilación de su maestro José Eugenio Ribera. Era una de las asignaturas más complejas porque aún estaba en pleno desarrollo técnico y con una gran carga docente¹³. El mismo escribió en un artículo de la *Revista de Obras Públicas* que “la técnica de las cimentaciones está pasando, de una especie de curanderismo, a una especie de medicina, pero sin llegar todavía a Ingeniería”¹⁴, pero desde su cátedra, fue uno de los ingenieros que más contribuyó al desarrollo de la geotecnia y de la mecánica del suelo y en esta revista plasmó sus conocimientos sobre la materia¹⁵. Compartió claustro con otros grandes de la ingeniería, como Eduardo Torroja o José M^a Aguirre, y todos sus esfuerzos se centraron en

¹² *Actas Escuela Especial de Ingenieros de Caminos (1950-1956)*, p. 87.

¹³ La asignatura constaba de cincuenta lecciones teóricas y otras tantas prácticas que lo obligaban a impartir clases los viernes y sábados a primera hora de la mañana.

¹⁴ *Revista de Obras Públicas*, 1 de marzo de 1941, n.º 2711, p. 90.

¹⁵ En *Revista de Obras Públicas*, escribió doce artículos entre 1926 y 1941. Los cinco primeros, escritos entre 1926 y 1929, están dedicados a exponer el resultado del viaje de fin de estudios que realizó por varios países europeos, estudiando puentes, esclusas y puertos (1926, 74, Tomo I (2451), pp. 220-222; 1927, 75, tomo I (2489), pp. 429-434; 1928, 76, tomo I (2513), pp. 399-402; 1929, 77, tomo I (2517), pp. 28-32; 1929, 77, tomo I (2526), pp. 198-202). Los tres siguientes, escritos en 1930, a su primera gran obra, el dique seco de Cádiz, (1930, 78, tomo I (2561), pp. 497-503; 1930, 78, tomo I (2562), pp. 517-530; 1930, 78, tomo I (2563), pp. 537-547). Y entre 1940 y 1941 publicó cuatro artículos más, sobre métodos de comprobación de cimentación y estructuras (1940, 88, tomo I (2708), pp. 213-220; 1941, 89, tomo I (2709), pp. 1-12; 1941, 89, tomo I (2710), pp. 37-54; 1941, 89, tomo I (2711), pp. 75-90).

¹¹ Moreno (2011), p. 120 y ss.

convertir a la Escuela en un centro de formación de excelencia, reclamando nuevos laboratorios, becas para que los alumnos pudiesen completar su formación en el extranjero, ya que para él, viajar, aprender otros idiomas y estudiar lo que hacían otros eran componentes que tenían que formar parte de la educación de los ingenieros. Lamentablemente, y dado la situación de penuria y de aislamiento del país, muchas de sus peticiones no se pudieron conceder.

En 1946, se incorporó a la Escuela como ayudante en su cátedra Carlos Lorente de No, accionista y director de la oficina de proyectos de Entrecanales y Távora y quien le ayudaría a escribir sus famosos apuntes mecanografiados de Geotecnia, apuntes que fueron utilizados por alumnos de multitud de promociones e hicieron que sus enseñanzas se situaran a la cabeza de Europa y por ello se le considera como el introductor de la matemática geotécnica en España¹⁶. De hecho, algunos de sus alumnos que más tarde fueron empleados y estrechos colaboradores (como el caso de José Luis Marín) se sorprendían cuando, al asistir a congresos en el extranjero o revisar patentes, se exponían conocimientos o se utilizaban técnicas que Entrecanales les había enseñado en las aulas diez o quince años antes¹⁷. Para ello, se esforzó al máximo para que los estudiantes tuvieran a su disposición los últimos libros y artículos, la mayoría de las veces escritos en otros idiomas, por lo cual hizo muchas solicitudes para que se tradujeran o incluso las costeó. Y también predicaba con el ejemplo, solicitando a lo largo de su vida académica permisos para viajar a Francia, Estados Unidos o Portugal para adquirir información sobre algunas técnicas constructivas que tenían relación con su asignatura o incluso proponer la creación de nuevas asignaturas, como la de Física Nuclear, porque tras asistir a la Conferencia para los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear de Ginebra en 1955, su carácter visionario le hizo prever que ésta iba a ser una de las energías del futuro y que los ingenieros de Caminos debían participar. En sus propias palabras, “formando su juventud para los estudios atómicos, que [...] constituyen el único capital y valor permanente que cada Nación puede poseer”¹⁸.

Sus clases, además de ser excelentes desde el punto de vista técnico, eran el foro perfecto para que Entrecanales diera rienda suelta a su vena humanística y conversadora sobre temas complementemente ajenos a la ingeniería. Leopoldo Calvo Sotelo lo resumía de esta manera:

“La personalidad de Entrecanales era fuerte, desbordante, avasalladora: frente a él no cabía la indiferencia. Conmigo alternaba la dureza innecesaria [...]

¹⁶ Sus famosos apuntes eran cuatro tomos dedicados respectivamente a Muros y Taludes, a Cimientos I (dedicado a cimentaciones superficiales como zapatas), Cimientos II (a avanzadas como pilotes) y Cimientos III (con ampliaciones como cimentaciones directas sumergidas, flotación de buques y flotadores). Además de la teoría, se incluían ejercicios prácticos. Morilla Abad, Ignacio, “Un tesoro geotécnico ignorado”, *Tierra y Tecnología: revista de información geológica*, 46 (2015). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5898797>

¹⁷ Moreno (2011), p. 79.

¹⁸ Cit. por Moreno (2011), p. 167.

y la distinción: por las tardes, en las clases prácticas, se acodaba sobre mi tablero de dibujo [...]. Y empezaba a hablar de política internacional. Era un monólogo larguísimo que Entrecanales escenificaba en forma de un diálogo conmigo, diálogo inexistente porque yo no abría la boca [...]. Así transcurría el diálogo/monólogo socrático hasta que el timbre anunciaba el término de las dos horas de clase. Inmediatamente cortaba don José la peroración y se despedía: “para el próximo jueves preparen ustedes el cálculo de pilotes por el método de Nokkentved”, y dejaba el aula presurosamente, con las manos a la espalda y la barbilla hundida en el pecho.”¹⁹

Sin embargo, el 29 de noviembre de 1957 solicitó la excedencia voluntaria, aduciendo la falta de tiempo para continuar con sus tareas docentes, dado el elevado número de alumnos y la materia tan extensa que impartía. Realmente el trabajo realizado por Entrecanales era titánico; en sus propias palabras “El curso pasado tuve que dar un total de 134 clases, entre teóricas, prácticas y de laboratorio. Tuve que comprobar, aunque fuera someramente, más de diez mil ejercicios y más de cuarenta proyectos”. De hecho, tras su renuncia, la asignatura se desdobló en dos, y se contrataron más profesores para impartirla. Geotecnia y Cimientos pasó a ser la asignatura de José Antonio Jiménez Salas, y Puentes de Fábrica de Carlos Fernández Casado.

Obviamente, entre los motivos de su renuncia a su gran pasión por la docencia estuvo el enorme trabajo de su asignatura, el crecimiento de la empresa que cada vez requería más de su atención y el deseo de pasar más tiempo con su familia, en especial con su primogénita que vivía en Londres. Pero quizá también pesó en su decisión, el hecho de que la Escuela y el Cuerpo de Ingenieros tal y como él lo había conocido desapareció ese año con la Ley de Reforma de las Enseñanzas Técnicas por la cual la Escuela dejaba de estar bajo el control del Ministerio de Fomento y pasaba al de Educación, además de que sospechaba que el nuevo plan de estudios iba a ser menos exigente.

La huella que dejó en generaciones de alumnos fue enorme incluso muchos años después de haber abandonado su labor docente. Por sus clases pasaron miles de futuros ingenieros, destacando nombres como los ya mencionados Leopoldo Calvo Sotelo o José Antonio Jiménez Salas, su propio hijo y presidente de Acciona, José M^a, pero también competidores como Antonio Durán, Juan Manuel Villar Mir o Rafael del Pino Moreno y altos cargos políticos como Enrique Balaguer o Vicente Mortes Alfonso y empresariales como Manuel Gómez de Pablos. Tenía fama de profesor duro, pero su nivel de exigencia hacia ellos era el mismo que el de autoexigencia y parece que nunca suspendía, porque se encargaba personalmente de ayudar a todos los alumnos con dificultades. Como muestra, sirvan estas frases de dos de sus alumnos anteriormente mencionados²⁰:

¹⁹ Calvo Sotelo (2003), pp. 154-5.

²⁰ La lista de comentarios sobre su personalidad y sobre todo sobre su labor docente sería interminable. Para más ejemplos, véase entre otros, Moreno (2011), Sáenz Ridruejo, Fernando (2016), *Una historia de la Escuela de Caminos. La Escuela de Caminos de Madrid a través de sus protagonistas*, de Del Campo y Francés, Ángel (2006), *La vida mía*, en especial la página 227.



Sus apuntes de Geotecnia.

“En sus intensas clases, en las que no podía percibirse ni el más pequeño poso de convencionalismo o rutina, explicaba las teorías más recientes, y también describía ejemplos de aplicación que despertaban el interés del alumno. Pero lo que quizá era más importante es que presentaba antes los asistentes la obra de ingeniería como una creación, síntesis de diversas actividades, que deben conducir a la realización de una idea sobre algo que ha de rendir un servicio. La concepción de esta idea, englobando todas las fases necesarias para materializarla, es la tarea fundamental del Ingeniero. [...] Sus clases fueron para muchos uno de los factores que más influyeron en su sentido ingenieril, en su concepto de la técnica y del papel que el ingeniero debe cumplir dentro de la sociedad. [...] Si en alguien el quehacer del profesor ha trascendido hasta la misión del Maestro, éste fue Entrecanales.”²¹

“Pocas personas han dejado en mi vida profesional, y aun personal, una huella tan profunda como don José. Y pienso que no soy una excepción [...]. Su asignatura se llamaba “Cimientos y Estructuras”, pero en realidad don José Entrecanales era “maestro de todo”: de ingenieros y de hombres. [...] No le dolía el tiempo para sus alumnos, ni en la escuela, ni, cuando era preciso, en su despacho de la calle de Juan de Mena.”²²

Dejó la docencia, pero nunca se desvinculó de la Escuela. Fue nombrado profesor honorario en 1958 y desde ese momento inició una serie de donaciones que permitieron a sus herederos y a la Universidad Politécnica

de Madrid, donde está adscrita la Escuela, constituir en 1999 la Fundación José Entrecanales Ibarra, con una dotación fundacional de mil quinientos millones de pesetas procedentes de las donaciones del matrimonio Entrecanales-Azcárate.

En reconocimiento a sus méritos, en 1983 el Colegio de Ingenieros de Caminos le concedió el título de Colegiado de Honor, su máximo galardón; y también en su honor y para que sea visto y recordado por las nuevas promociones de futuros ingenieros, una escultura suya preside la entrada a la actual Escuela de Caminos en la Ciudad Universitaria.

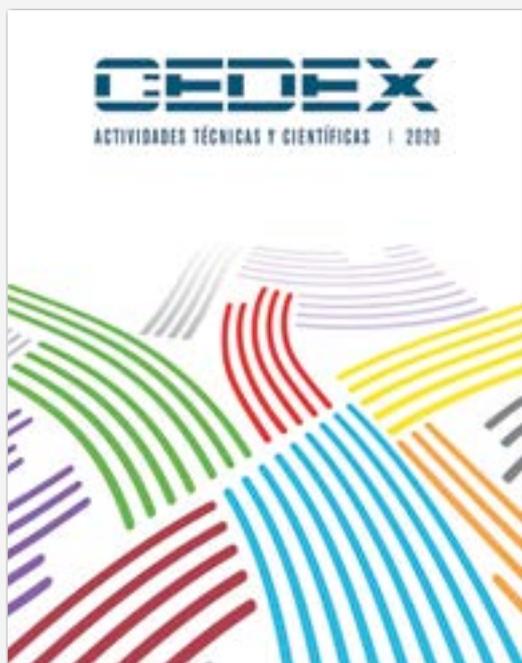
Culto, disciplinado, pesimista, y como buen conversador, polémico, irónico y mordaz al tiempo que tolerante. Despertó entre los que le trataron personal y profesionalmente, cariño, respeto, admiración y simpatía, pero también temor debido a su fuerte temperamento. Fue un extraordinario ingeniero, un gran hombre de empresa y un magnífico profesor y con su trabajo contribuyó de manera importante al crecimiento y transformación económica de España en el siglo XX. Falleció en 1990 y tal y como expresó José Antonio Jiménez Salas, que había sido primero su alumno y luego sucesor en la Escuela:

“La Historia de la Ingeniería Civil española [ha] pasado página, [...] con él [ha] desaparecido un punto de referencia fundamental para muchas generaciones de profesionales. [Es de esperar que alguien pueda] renovar la energía, el espíritu de trabajo, la inteligencia y la sensibilidad técnica y humana del que un día enseñó en esas aulas que, desde esa fecha del 12 de febrero de 1990 se sienten un poco huérfanas.”²³

²¹ Jiménez Salas, José Antonio, cit. por Pacheco, José-Carlos (2016), “José Antonio Jiménez Salas o el valor de los grandes maestros (1916-2000)”, *Ingeniería Civil*, nº 181, p. 108.

²² Vicente Mortes Alfonso, cit. por Moreno Moreno (2011), p. 233.

²³ Acciona Noticias (1999), “Entrevista a José Antonio Jiménez Salas”, *Boletín de régimen interior de ACCIONA*, 8 de julio.



CEDEX: Actividades Técnicas y Científicas, 2020

CEDEX: Technical and Scientific Activities, 2020

Autoría: CEDEX

NIPO: 797-20-013-4

NIPO: 797-20-022-0

Gratuito

Año: 2021

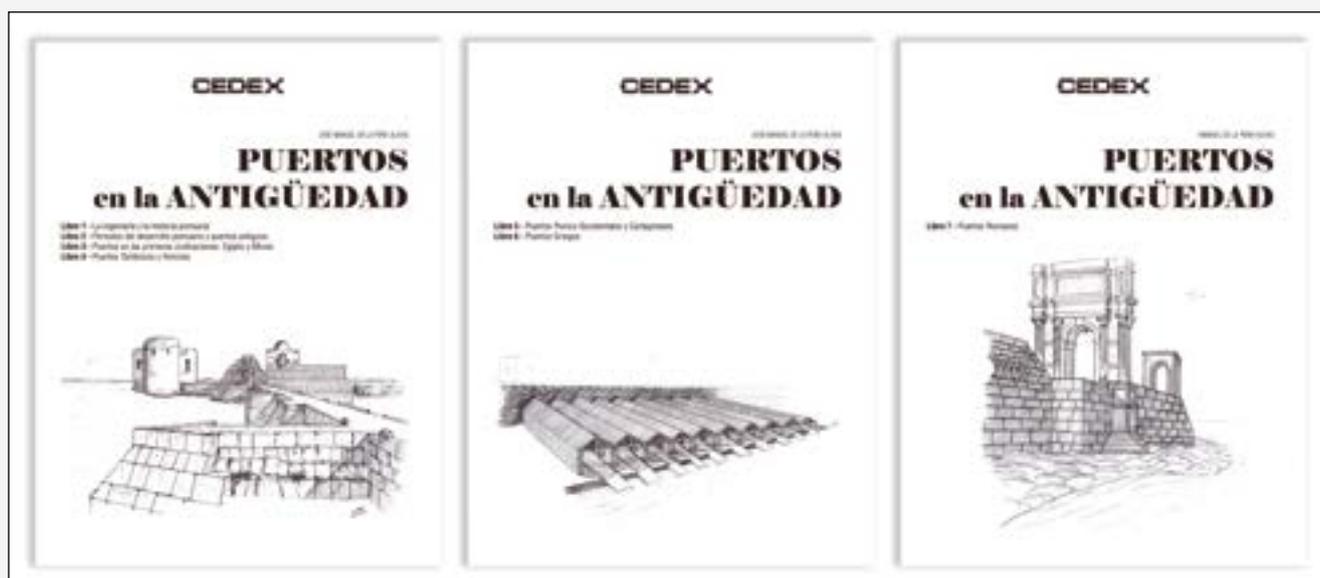
La Memoria de Actividades Técnicas y Científicas CEDEX 2020 recoge las labores acometidas por este organismo durante dicho año, un año distópico caracterizado por las extraordinarias circunstancias provocadas por la emergencia sanitaria de la COVID-19.

En síntesis, la actividad del CEDEX durante 2020 refleja el desarrollo de la planificación recogida en su *Plan Estratégico 2020-2022*, cuyo principal objetivo es la adecuación de la asistencia técnica, la I+D+i y la transferencia de conocimiento a las políticas públicas impulsadas por el MITMA y el MITERD. Es importante, en este sentido, subrayar el relevante papel que, en la propia definición del Plan, y más concretamente en el Programa Anual 2020, ha supuesto el marco definido por la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. De este modo, el organismo ha consolidado su papel de referencia como brazo tecnológico de ambos departamentos en aspectos estratégicos como la digitalización, la innovación en la movilidad, o el impulso específico de la innovación entendida como investigación aplicada a la solución de problemas complejos propios de la moderna ingeniería civil.

digitalización, la innovación en la movilidad, o el impulso específico de la innovación entendida como investigación aplicada a la solución de problemas complejos propios de la moderna ingeniería civil.

The CEDEX Report on Technical and Scientific Activities for 2020 includes the work undertaken by CEDEX during that year, a dystopian year characterised by the extraordinary circumstances caused by the COVID-19 health emergency.

In short, CEDEX's activity during 2020 reflects the development of the planning laid out in its Strategic Plan for 2020-2022, whose main objective is to adapt technical assistance, R&D&I and knowledge transfer to the public policies promoted by MITMA and MITERD. In this regard, it's important to highlight the importance of the framework derived from the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals, and its role in the definition of the aforementioned Plan, and more specifically of the 2020 Annual Programme. In this way, the agency has consolidated its pivotal role as the technological arm of both departments in strategic aspects such as digitalisation, innovation in mobility, or the specific promotion of innovation deemed as research applied to the solution of complex problems inherent to modern civil engineering.



Puertos en la Antigüedad

Ports in Antiquity

Autor: José Manuel de la Peña Olivas

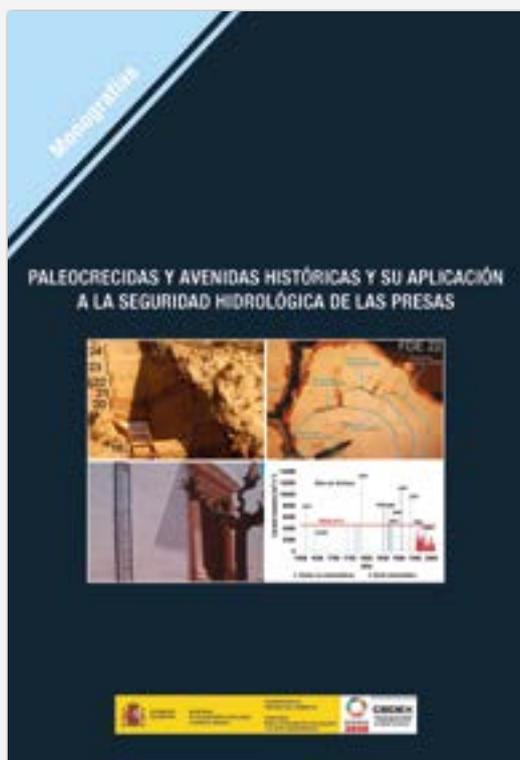
ISBN: 978-84-7790-631-5

Año: 2021

PVP: 75 € (los 3 volúmenes)

El objetivo de este libro es acercar al ingeniero actual el conocimiento que tuvo el ingeniero en la Antigüedad, cómo éste resolvió los problemas y qué grado de conocimiento técnico alcanzó en el campo de la ingeniería marítima, y con ello valorar mejor nuestro patrimonio técnico, portuario y de señalización marítima. Para ello hay que remontarse a las primeras civilizaciones que comenzaron a desarrollar la ingeniería de puertos: la prehistoria, Egipto y el mítico imperio de Minos ocupan este primer desarrollo. Siguiendo el hilo conductor del desarrollo portuario, se analizarán las técnicas y logros de civilizaciones posteriores que tuvieron un especial significado en el devenir portuario español: tartesios, fenicios, cartagineses y griegos. La culminación en desarrollo tecnológico en la Antigüedad se debe a la civilización romana, que alcanzó nuevas cimas tanto en la tecnología como en la organización portuaria y en los sistemas de ayuda a la navegación, cimas no sobrepasadas hasta el siglo XVIII.

The aim of this book is to bring to the current engineer, the knowledge engineers had in antiquity, how they solved the problems and what degree of technical knowledge they reached in the field of maritime engineering, and thus better appreciate our technical, port and maritime signalling heritage. To do so, we need to go back to the first civilizations that began to develop port engineering: prehistory, Egypt and the mythical empire of Minos occupy this first development. Following the thread of port development, we will analyse the techniques and achievements of the ensuing civilizations, which were of special significance to Spanish port development: Tartessians, Phoenicians, Carthaginians, and Greeks. The pinnacle of technological development in antiquity was reached by the Roman civilization, which rose to new heights in technology, port organization, and navigational aid systems that were not to be surpassed until the 18th century.



Paleocrecidas y avenidas históricas y su aplicación a la seguridad hidrológica de las presas (M-143)

Edición en papel

Autores: Antonio Jiménez Álvarez (coord.), Mariano de Andrés Rodríguez-Trelles, Gerardo Benito Ferrández, Andrés Díez Herrero, Josep Carles Balasch Solanes, Luis Mediero Orduña, Félix Francés García y Celia García Montañés

ISBN: 978-811-7790-636-0

Año: 2021

PVP: 25 €

Edición en línea

ISBN: 978-811-7790-637-7

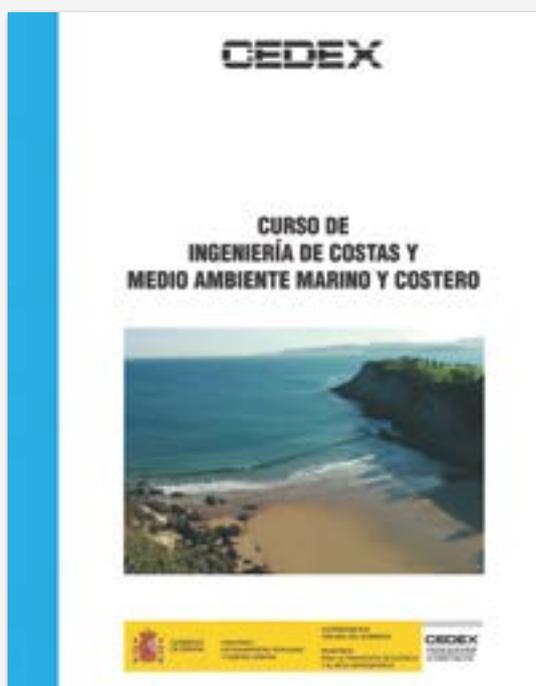
PVP: 15 €

La adopción de estándares de seguridad hidrológica para las presas cada vez más exigentes implica la utilización de periodos de retorno muy elevados para las avenidas de proyecto y extrema, cuya estimación conlleva una gran incertidumbre. La utilización de información sobre avenidas pasadas (ya sean procedentes del registro geológico, documental, etc.) tiene una especial importancia, pudiendo contribuir a reducir en gran medida la incertidumbre de las estimaciones.

Con el objetivo de difundir su utilización en la práctica profesional y de mejorar la seguridad de nuestras presas, se abordan en esta monografía aspectos como las distintas fuentes de información sobre avenidas pasadas, la incorporación de este tipo de información en el cálculo de los caudales de alto periodo de retorno, la posible falta de estacionariedad de los datos y la reducción de la incertidumbre esperable con estas técnicas.

The adoption of increasingly demanding hydrological safety standards for dams implies the use of very high-return periods for project and extreme floods, whose estimation involves great uncertainty. The use of information on past floods (from geological, documentary records, etc.) is particularly important, and can contribute to reduce significantly the uncertainty of the estimates.

In order to disseminate its use in professional practice and to improve the safety of our dams, this monograph addresses aspects such as the different sources of information on past floods, the use of this type of information in the estimation of the discharges of the high-return period, the possible non-stationary of the data, and the reduction of the uncertainty expected from these techniques.



Curso de Ingeniería de Costas y Medio Ambiente Marino y Costero

Edición en papel

Autores: José Luis Buceta Miller, Ramón Gutiérrez Serret, José María Grassa Garrido, Melva Martín Soldevilla, José Francisco Sánchez González y José Manuel de la Peña Olivas

ISBN: 978-811-7790-623-0

Año: 2021

PVP: 40 €

Edición en línea y USB

ISBN: 978-811-7790-644-5

ISBN: 978-811-7790-645-2

PVP: 15 €

A lo largo de 2019, el CEDEX realizó tres ediciones (marzo, mayo y septiembre) del “Curso de Ingeniería de Costas y Medio Ambiente Marino y Costero” para la Dirección General de la Costa y el Mar, dentro del convenio de colaboración, plasmado en la “Encomienda de Servicio Técnico para la realización de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico (2017-2020)”. A los alumnos se les entregó documentación de cada una de las lecciones impartidas.

Fruto de esta documentación, una vez revisada y actualizada, es esta publicación que servirá para la formación de futura generación.

Throughout 2019, CEDEX carried out three editions (March, May and September) of the “Coastal Engineering and Marine Environment Course” for the General Directorate of the Coast and the Sea, within the collaboration agreement embodied in the “Commission of Technical Service for the realization of technical assistance, research and technological development (2017-2020)”. Students were given documentation of each of the lessons taught. The result of this documentation, once revised and updated, is this publication that will serve for the training of future generations.

EXPOSICIONES

El Museo ICO presenta la arquitectura de Anna Heringer, concebida para ofrecer un futuro mejor

- El Museo ICO presenta la primera retrospectiva en España dedicada a la arquitecta alemana
- 'Anna Heringer. La belleza esencial', comisariada por Luis Fernández-Galiano, podrá visitarse desde el 9 de febrero hasta el 8 de mayo e incluye visitas guiadas y talleres para acercar la arquitectura también a los más pequeños

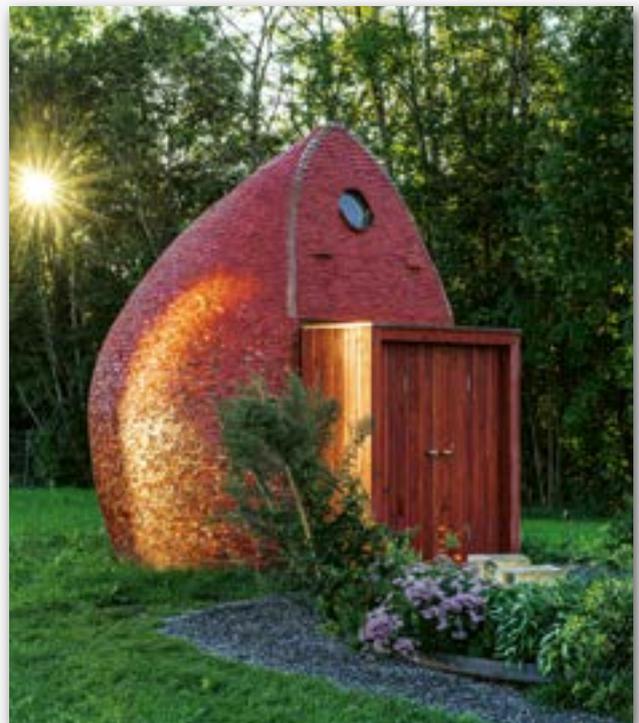
El Museo ICO presenta la primera exposición monográfica dedicada en España a la arquitecta alemana **Anna Heringer**, que apuesta por el uso de materiales y técnicas locales para ofrecer un futuro mejor. Su obra se basa en la exploración y uso de la arquitectura como un medio para fortalecer la confianza individual, y en la propia cultura, apoyando las economías locales y fomentando el equilibrio ecológico.

La exposición, comisariada por Luis Fernández-Galiano, podrá visitarse **desde el 9 de febrero hasta el 8 de mayo de 2022** en el Museo ICO (calle Zorrilla, 3, Madrid), el único en nuestro país dedicado específicamente a la difusión de la arquitectura como disciplina artística y cultural.

La visita propone un recorrido por la obra y la filosofía de **Anna Heringer** (Rosenheim, 1977), profundamente



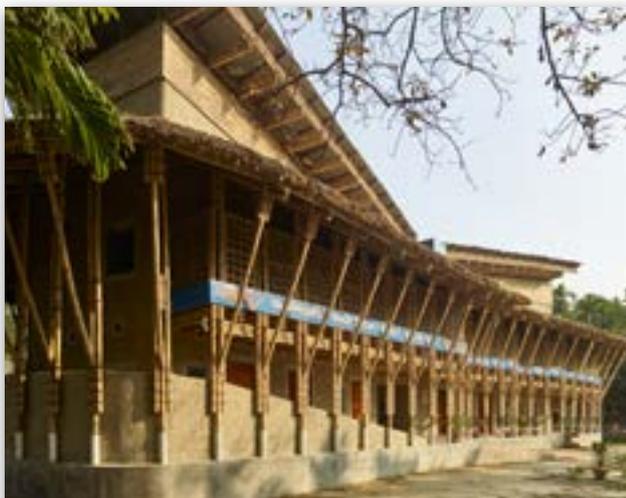
Hostel at the International Bamboo Architecture Biennale, Baoxi (China), 2016. © Jenny Ji.



Birth Space, Frauenmuseum Hittisau, Vorarlberg (Austria), 2016. © Laurenz Feinig.



Escuela METI, Rudrapur (Bangladesh), 2006. © Kurt Hörbst.



Edificio Anandaloy, Rudrapur (Bangladesh), 2018-2020. © Kurt Hörbst.

interesada en el desarrollo sostenible de nuestra sociedad y del entorno construido. Para ella, "sostenibilidad es sinónimo de belleza, y lo que define el valor estético y sostenible de un edificio es que se encuentre en armonía con su diseño, estructura, técnica y uso de materiales, así como en relación con su ubicación, con el entorno, con el usuario y con el contexto sociocultural".

Focaliza su trabajo en el uso de materiales y técnicas locales para crear edificios característicos del lugar donde se ubican. Estos conceptos quedan reflejados en la exposición, y la presentación de los proyectos se apoya en los textiles realizados por mujeres de Bangladés que reproducen las plantas y los alzados de sus edificios. La muestra se completa con textos (como el *Manifiesto de Laufen*, impulsado por la propia arquitecta), fotografías, dibujos y maquetas que trazan un recorrido a través de los principales proyectos realizados por **Anna Heringer** desde 2006.

Entre ellos figuran las Escuelas Meti (2006) y Desi (2008), y el edificio Anandaloy (2020), en Rudrapur (Bangladés); los Albergues en la Bienal de Bambú de Longquan en Baoxi (China, 2013-2016), el Museo de la Cerámica de Majiayao (China), el altar para la iglesia de San Pedro en Worms (Alemania, 2018) o el proyecto de ecoturismo en el Cortijo La Donaira de Ronda (España), entre otros.

A lo largo de su trayectoria, ha recibido numerosas distinciones como el Premio Aga Khan, el New European Bauhaus Prize 2021, el Philippe Rotthier European Prize for Architecture 2021, el Archdaily Building of the Year 2020, el OBEL Award 2020, el Global Award for Sustainable Architecture, el Curry Stone Design Prize o el Femmes Architects Award 2020. Su trabajo se ha expuesto en el MoMA de Nueva York, el V&A de Londres, La Loge de Bruselas, la Cité de l'architecture et du patrimoine de París, el MAM de Sao Paulo o la Bienal de Venecia.

Anna Heringer imparte conferencias por todo el mundo, incluida una charla TED en 2017, y ha sido profesora visitante en Harvard, en la ETH Zürich y en la Universidad Politécnica de Madrid.

Los textiles de las mujeres de Bangladés como componente solidario

La exposición incluye un espacio donde pueden adquirirse diferentes productos tejidos por mujeres de Rudrapur (Bangladés) gracias al apoyo ofrecido por "Dipdii Textiles", una iniciativa colectiva de **Anna Heringer**, Veronika Lena Lang y DIPSHIKHA –sociedad para la educación, la formación y la investigación no formales para el desarrollo de las aldeas en Bangladés–. Los beneficios íntegros de la venta de estos productos serán destinados a "Dipdii Textiles" para la continuación de su actividad.

El catálogo

La muestra se completa con la publicación de un catálogo que, publicado por la Fundación ICO en colaboración con *Arquitectura Viva*, quiere convertirse en referencia obligada sobre la obra de **Anna Heringer**. Editado en español e inglés y profusamente ilustrado, cuenta con textos del comisario Luis Fernández-Galiano, Angelika Fitz y una entrevista de Peter Buchanan a **Anna Heringer**.

Visitas guiadas y talleres educativos

Como es habitual, el Museo ICO ofrece **visitas guiadas** y **actividades educativas** para aproximar mejor la figura y el trabajo de **Anna Heringer** al público adulto e infantil. Tanto la visita libre como estas actividades estarán supeditadas al cumplimiento de la normativa vigente relativa a la COVID-19 y respetando todas las recomendaciones de seguridad para una visita segura.

Sobre el Museo ICO

El Museo ICO se inauguró el 28 de marzo de 1996, destinándose, en un primer momento, a la exhibición de las colecciones permanentes del Instituto de Crédito Oficial.

Desde 2012, la Fundación ICO ha retomado la línea centrada en el ámbito de la arquitectura y del urbanismo para la realización de sus exposiciones temporales. En torno a ellas, el Museo ICO desarrolla actividades didácticas dirigidas al público infantil y juvenil, y visitas guiadas y acompañadas, dirigidas al público adulto, con la intención de profundizar y completar su discurso.

Tanto la visita libre como estas actividades estarán en cualquier caso supeditadas al cumplimiento de la normativa vigente relativa a la COVID-19 y respetando todas las recomendaciones de seguridad para que la experiencia sea segura y satisfactoria.

Más información:

Fecha de la exposición: del 9 de febrero de 2022 al 8 de mayo de 2022

Lugar: Museo ICO, calle Zorrilla 3, 28014 Madrid
www.fundacionico.es

Teléfono: 91 420 12 42



Casa de huéspedes RosAna, Rosenheim (Alemania), 2015. © Gabriela Obert.



Zonas de descanso, Omicrom Electronics, Klaus (Austria), 2015. © Stefano Mori.

INTRODUCCIÓN

Ingeniería Civil (IC) se define como una publicación científico-técnica especializada en ingeniería civil y medioambiental. Es editada con periodicidad trimestral por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), organismo público de referencia en los campos de la ingeniería civil, la edificación y el medio ambiente asociado, al que han estado ligados eminentes ingenieros españoles como Eduardo Torroja o José A. Jiménez Salas. IC cuenta con un sistema de revisión por pares que permite la evaluación externa de todos los artículos científico-técnicos recibidos, y acepta para su publicación artículos sobre trabajos relacionados con las siguientes áreas temáticas y tecnológicas de actividad: Aguas, Estructuras y Materiales, Puertos y Costas, Transportes y Movilidad, Carreteras, Sostenibilidad, Transición Ecológica, Geotecnia, Interoperabilidad Ferroviaria, Patrimonio Histórico de Obras Públicas, Economía Circular y Transferencia de Conocimiento. En este sentido, la revista realiza una labor fundamental como vehículo de difusión y transferencia tecnológica dentro de las áreas de conocimiento mencionadas.

PRESENTACIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS ARTÍCULOS

Los originales, que deberán ser inéditos, se harán llegar por correo electrónico a la dirección ingcivil@cedex.es, haciendo constar en el asunto del mensaje que se trata de un artículo presentado para su publicación en la revista IC. Ésta, por su parte, se compromete a adoptar una decisión sobre la publicación de originales en el plazo de seis meses, reservándose el derecho de publicación por un plazo de dos años de acuerdo a las necesidades de la misma.

Los originales seguirán la siguiente estructura: (1) página de título; (2) introducción que defina la finalidad del estudio; (3) objetivos perseguidos; (4) metodología utilizada; (5) resultados obtenidos y su significación; (6) conclusiones principales; (7) agradecimientos; y (8), referencias.

La página de título, a su vez, ha de incluir los siguientes componentes: (a) título en español e inglés; (b) nombre completo del autor/es así como su filiación académica y lugar de trabajo; (c) dirección de correo electrónico y postal del correspondiente autor/a de contacto o corresponding author; (d) resumen (español)/abstract (inglés), con una extensión entre 150-250 palabras; y (e), palabras clave (español) y keywords (inglés), con 5 términos como mínimo y 10 como máximo.

Los originales habrán de ir en español y su extensión, incluyendo las correspondientes imágenes, será entre 15 y 40 páginas, tamaño A4, en formato Word, a doble espacio y usando Times New Roman con un tamaño de fuente de 12 puntos. En casos excepcionales podrán publicarse artículos de mayor extensión, cuya aceptación quedará sujeta al criterio del Comité de Redacción de la revista.

Las figuras, cuyo objeto es simplificar y/o complementar el texto, se ordenarán según el orden de aparición en el texto, siendo identificadas con la expresión “figura 1”, “figura 2”, etc. Todas las figuras deberán llevar un pie de imagen o descriptor que ha de ser simple y claro. Más importante de todo, las figuras habrán de enviarse en los formatos propios de imagen (tiff., jpg., png., gif., etc.) para conformar los estándares de calidad plástica y gráfica establecidos por la revista. La resolución de las imágenes, para posterior impresión en papel, ha de ser 300 ppp (píxeles por pulgada), aunque 240 también se puede considerar un valor aceptable.

En el caso de las tablas, se seguirá el mismo criterio de numeración que en las figuras, utilizando la expresión “tabla 1”, “tabla 2”, etc. Todas las tablas llevarán un título en cursiva que ha de ser breve y explicativo.

Los títulos de los ejes de coordenadas y cualquier elemento de texto que se incorpore a las figuras y gráficos deben estar realizados en la misma fuente y tamaño (preferentemente en Minion Pro).

Por su parte, es conveniente que las fórmulas y ecuaciones incluidas en el artículo sean realizadas en Cambria Math con un tamaño de fuente de 9 puntos. En todo caso, y al igual que las figuras y tablas, dichas fórmulas/ecuaciones habrán de ir numeradas correlativamente, poniendo el número de orden entre corchetes [1], [2], etc.

Las citas de libros y artículos aparecerán preferentemente en el cuerpo del texto y no a pie de página. Las referencias que se inserten dentro del texto incluirán, entre paréntesis, el autor/res y el año que corresponda.

En lo que se refiere a la citación de fuentes bibliográficas o de cualquier otro tipo, se remite a los autores al seguimiento de las pautas del sistema Harvard-APA (American Psychological Association: <http://www.apa.org/>). Sirvan a este respecto los ejemplos que siguen a continuación:

Libros

Dean, E.T.R. (2010). *Offshore Geotechnical Engineering*. London: Thomas Telford Publishing.

Fernández Casado, C. (2013). *Historia del puente en España. Puentes romanos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Jiménez Salas, J.A., de Justo, J.L., y Serrano, A. (1981). *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas*. Madrid: Editorial Rueda.

Capítulos de libros

Richardson, W.J. (1995). Documented Disturbance Reactions. En W.J. Richardson, C.R. Greene, C.I. Malme y D.H. Thomson (eds.), *Marine Mammals and Noise* (pp. 241-324). San Diego, CA (EE UU): Academic Press.

Artículos de revistas

Casagrande, A. (1965). Role of the Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering. Terzaghi Lecture. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 91(4): pp. 1-40.

Dapena, E., Alaejos, P., Lobet, A., y Pérez, D. (2011). Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4): pp. 414-422.

Tamarit, J., e Iglesias, J.I. (2016). Los sistemas de señalización en España: el ERTMS y el ASFA Digital. *Ingeniería Civil*, nº 182, pp. 27-39.

Ponencias, congresos, conferencias y seminarios

Stive, M.J.F., De Schipper, M.A., Luijendijk, A.P., Ranasinghe, R.W.M.R.J.B., Van Thiel de Vries, J.S.M., Aarninkhof, S., Van Gelder-Maas, C., De Vries, S., Henríquez, M., y Marx, S. (2013). The Sand Engine: A Solution for Vulnerable Deltas in the 21st Century? En *Coastal Dynamics: 7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon, France, 24-28 June, 2013* (pp. 1537-1546). Bordeaux (France): Bordeaux University.

Tesis no publicadas

Toledo, M.A. (1997). *Presas de escollera sometidas a sobrevertido: estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa* [tesis doctoral inédita]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Recursos electrónicos

A la referencia correspondiente según el tipo de documento (libro, artículo, etc.), se añadirá a continuación, si se estima oportuno, el número de identificación digital (DOI, por sus siglas en inglés), que es un identificador único y permanente para las publicaciones electrónicas, y si no lo tuviese se consignará la URL que corresponda poniendo a continuación “Disponible en: <http://xxxxx>”

García de Arquer, F.P. et al (2021). Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges. *Science*, 373, eaaz8541. DOI: 10.1126/science.aaz8541

United States Environmental Protection Agency (EPA) (2018). *Guide to Purchasing Green Power*. Washington, DC (EE UU): EPA. Disponible en: <https://www.epa.gov/greenpower/guide-purchasing-green-power>

CEDEX

ACTIVIDADES TÉCNICAS Y CIENTÍFICAS | 2020





Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

DIRECCIÓN

Directora: **Áurea Perucho Martínez**
C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 75 14/15

SECRETARÍA DEL CEDEX

Secretaria: **Sonia Fernández-Pacheco Rodríguez**
C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 75 01

GABINETE DE RELACIONES EXTERNAS Y
ACTIVIDADES COMERCIALES

Jefe: **Miguel González Portal**
C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 74 90

CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Director: **Federico Estrada Lorenzo**
Pº Bajo de la Virgen del Puerto, 3 - 28005 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 79 00

CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS

Director: **José María Grassa Garrido**
C/Antonio López, 81 - 28026 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 77 00

CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE

Director: **Antonio Sánchez Trujillano**
Autovía de Colmenar Viejo, PK. 18,2 - 28760 El Goloso, Madrid
Telf.: (+34) 91 335 78 00

CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS

Director: **Francisco Javier Cachón de Mesa**
C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 72 00

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES

Directora: **Pilar Alaejos Gutiérrez**
C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 335 74 11/13

LABORATORIO DE GEOTECNIA

Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo**
C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 73 43/46

LABORATORIO DE INTEROPERABILIDAD FERROVIARIA

Director: **Jorge Ignacio Iglesias Díaz**
C/Julían Camarillo, 30 - 28037 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 71 50

CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE OBRAS PÚBLICAS Y
URBANISMO (CEHOPU)

C/Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Telf.: (+34) 91 335 74 56