

Plataforma en tiempo real para la monitorización de estructuras de la Red de Carreteras del Estado: Aplicación a taludes y laderas



Real-time platform for monitoring of structures on the State Road Network. Application to cuttings and slopes

Álvaro Parrilla Alcaide

Jefe del Área de Geotecnia

ICCP del Estado; Dirección Técnica

Dirección General de Carreteras, MITMS

Pilar Crespo Rodríguez

Jefe del Área de Estructuras

ICCP del Estado; Dirección Técnica

Dirección General de Carreteras, MITMS

La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible dispone de la plataforma *Celosía* para el seguimiento y análisis en tiempo real de las estructuras monitorizadas (puentes y taludes) de la Red de Carreteras del Estado. Esta plataforma es una apuesta por la digitalización de las infraestructuras que ha de conducir a una mejora de la gestión de su conservación y, en último término, de las condiciones de seguridad de los usuarios.

The General Directorate of Roads of the Ministry of Transport and Sustainable Mobility uses *Celosía* platform for real-time monitoring and analysis of monitored structures (bridges and slopes) of the State Road Network. This platform is a commitment to the digitalization of infrastructures that will lead to an improvement in the management of their maintenance and, ultimately, in the safety conditions of users.

1. Introducción y Antecedentes

La Red de Carreteras del Estado (RCE) cuenta con una serie de puentes y obras geotécnicas que disponen o han dispuesto en algún momento de su vida de un sistema de monitorización para la vigilancia de su comportamiento estructural o geotécnico.

Estos sistemas están orientados a uno o varios de los objetivos siguientes: herramienta de ayuda a la construcción, control de la evolución de una patología determinada, vigilancia del correcto funcionamiento de la estructura en servicio o ayuda a la explotación del tramo de carretera en el que se encuentran. Paralelamente, también pueden servir como colectores de datos que pue-

dan explotarse con fines de investigación y redacción de normativa. El control de parámetros monitorizados ha de redundar en una mejora de la seguridad y de las condiciones de servicio de las carreteras, así como en la detección temprana de eventuales problemas en la infraestructura.

La DGC cuenta con una plataforma para el seguimiento y análisis en



Figura 1. Autovía A 66 Ruta de la Plata. Tramo Hinojal-Cáceres. Viaducto del Almonte. Estructura cuya construcción fue objeto de la primera monitorización en tiempo real en la RCE, en el año 2003

tiempo real de las estructuras (puentes, taludes y túneles) de la RCE que dispongan de un sistema de monitorización con dicha potencialidad. Se trata de *Celosía*, cuyo portal de acceso web permite la gestión centralizada y homogénea de toda la información generada en dichas estructuras.

Aunque como plataforma única *Celosía* data de 2020, la idea no es nueva. En 2003 se llevó a cabo el seguimiento en tiempo real de la construcción del viaducto del Almonte (Figura 1) sobre el río homónimo, en el tramo Hinojal-Cáceres de la autovía A 66 Ruta de la Plata, cuando la tecnología de las comunicaciones vía satélite hizo posible la transmisión instantánea de los datos, tan pronto se iban produciendo. Desde ese mismo instante y durante un buen número de monitorizaciones posteriores, la DGC ha ido adquiriendo la experiencia necesaria para ir definiendo *Celosía*, no solo en puentes, sino también en taludes y laderas.

Con los años, el número de obras objeto de este tipo de instrumentaciones ha ido incrementándose paulatinamente. Los sistemas de instrumentación dispuestos, con características técnicas heterogéneas y sin requisitos comunes de comunicación, han funcionado de manera aislada y sin estandarizar, lo que implica que su gestión no ha podido ser abordada de forma adecuada

por una falta de centralización del conjunto.

A lo largo de un par de décadas de experiencia en este tipo de instalaciones, se ha puesto de manifiesto la necesidad de contar con un sistema que permita:

- Automatizar la transmisión de datos en tiempo real.
- Universalizar la presentación de la información con independencia de la tecnología utilizada para la monitorización y del consultor que la haya implementado.
- Centralizar la administración de las estructuras monitorizadas, controlando los contenidos y gestionando el acceso a la información.
- Custodiar la información mediante un banco de datos único, preservando el contenido más allá de la vida de los sistemas de monitorización.

A fecha de edición de este texto, se está preparando para su integración en la plataforma un grupo de taludes y puentes en los que, por su singularidad e importancia, se considera conveniente instalar un sistema de monitorización enfocado principalmente a facilitar la vigilancia del comportamiento geotécnico o estructural y mejorar sus condiciones de seguridad.

2. Objetivos de la plataforma

El objetivo de la plataforma es dotar a los sistemas de instrumentación de las estructuras de la RCE de un soporte común de comunicación y visualización de datos (en tiempo real), centralizando la información y normalizando los formatos a fin de que el contenido sea homogéneo y fácilmente accesible para el conjunto de los técnicos involucrados en la vigilancia estructural: direcciones de obra, asistencias técnicas, oficinas de proyecto, constructoras, equipos de conservación y empresas de instrumentación.

La plataforma pretende unificar y universalizar formatos, facilitar un sistema de visualización común, custodiar la información en un banco de datos con permanencia en el tiempo (incluso cuando los sistemas de monitorización hayan sido retirados de las obras) y, en última instancia, constituir un recurso ágil para la vigilancia y seguimiento de operaciones de construcción, mantenimiento y explotación de las estructuras.

Constituye, por tanto, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones relativas a la construcción, mantenimiento y explotación de las estructuras de la RCE, así como a la redacción de normativa técnica, que ha de contribuir a mejorar la eficiencia de las auscultaciones estructurales y a un mejor aprovecha-

miento de los recursos económicos que a ello se dedican.

Cuánto se ha indicado, implica la necesidad de efectuar una selección previa, tanto de las estructuras que se incluyen en el sistema, como de los parámetros que se controlan en cada caso, toda vez que lo contrario podría llevar a la acumulación desordenada de una ingente cantidad de datos de difícil aprovechamiento, lo que trata de evitarse a toda costa. Así, puede afirmarse que en *Celosía* la obtención de cada parámetro, en cada puente o talud, tiene un objetivo claro y concreto.

Por lo expuesto previamente, no está entre los objetivos principales de la plataforma promover las instrumentaciones, como un objetivo en sí mismo, sino ayudar a mejorar su eficiencia, cuya existencia estará motivada por razones diversas (ayuda a la construcción, vigilancia de patologías, control del comportamiento en servicio, ayuda a la explotación, investigación, etc.). Desde estos puntos de vista, la plataforma sí constituye un recurso esencial en la promoción de la digitalización de la RCE al crear un entorno de trabajo común y fácilmente accesible que da transparencia y difusión a la información obtenida a través de las monitorizaciones estructurales.

Tampoco es objeto de la plataforma establecer condiciones técnicas a los equipos instalados en las estructuras, ni interferir en los procedimientos inherentes a cada sistema, sino marcar unas pautas de adquisición y disponer de la información en el plazo más breve posible desde que haya sido adquirida, respetando las características técnicas y particularidades de cada sistema instrumental.

3. Principios generales de funcionamiento

El principio rector de la plataforma es permitir el acceso a la información en tiempo real. Cualquier dato experimental que se tome en una estructura debe ingresar en el banco de datos y estar disponible a través del portal web en cuestión de segundos. Así pues, el sistema gravita en torno a los siguientes motivos:

- Tiempo real, tanto en lo relativo a la recepción de los datos registrados en las estructuras como en lo relativo a la publicación de los mismos
- Accesibilidad universal a la información a través del portal web, mediante contraseñas
- Compatibilidad con cualquier tecnología de medida y de almacenamiento

La plataforma integra un banco de datos, un portal web y un conjunto de herramientas de análisis en un espacio único de trabajo.

El banco de datos contiene los datos reales que se recogen a lo largo del tiempo en las estructuras alojadas en la plataforma. El portal web es el medio de publicación y visualización gráfica, con utilidades de control para el seguimiento de los procesos monitorizados. Las herramientas de análisis conforman un entorno interactivo de proceso avanzado de datos al servicio de los técnicos de la DGC para el estudio individual o conjunto de las estructuras (puentes y taludes).

El portal de estructuras es el expositor principal de las obras que están o han estado instrumentadas, a las que también puede accederse mediante un mapa de enlaces georeferenciados. Presenta información relativa a la duración de vida

de cada sistema instrumental, así como un resumen estadístico —que puede ser general o particular de un grupo estructural dado— y un conjunto de pilotos de control para facilitar la vigilancia telemática de los estados de actividad. Cuenta con un servicio de mensajería para el envío de notificaciones de parada, alerta o cualquier otra índole a los usuarios vinculados al seguimiento de la estructura en cuestión.

El sistema es automático. Los contenidos se generan y presentan a demanda de los usuarios, actualizados siempre a los últimos datos disponibles. El motor central de la plataforma conjuga los datos reales (experimentales) con las variables y algoritmos internos necesarios para producir un contenido de mayor nivel y utilidad que alimenta en línea y actualiza los diferentes objetos visuales de la plataforma (infogramas, diagramas, diales, etc.). Por ello, la programación de algoritmos, permite que se pueda disponer no solo de datos en bruto, sino de magnitudes derivadas.

Esta elaboración de los datos puede llevar a su vez a la elaboración de umbrales de alerta que impliquen más de una variable, que supongan una evolución temporal, etc. Así a modo de ejemplo, la alerta en la vigilancia de un talud, con aviso a los usuarios predeterminados en tiempo real, se puede deber a que la lectura de un piezómetro concreto alcance un determinado valor (variable única obtenida por la lectura de la presión sobre un sensor en un piezómetro), o bien por una elevación generalizada de niveles en una alineación de piezómetros, sin visos de disminución en un periodo determinado de tiempo, tras una lluvia de intensidad conocida previamente registrada por el sistema, lo que supone la combinación de diferentes variables.

Los datos contenidos en la plataforma tienen múltiples usos, que se extienden desde el control de maniobras y vigilancia de medios auxiliares de construcción (corto plazo) al seguimiento de la evolución de patologías (medio plazo) o a la detección de patrones de comportamiento (largo plazo).

La información almacenada resulta de utilidad para mejorar la comprensión de las estructuras, sus materiales, sustentar avances en el diseño y fortalecer la normativa de proyecto. La continuidad de las series históricas de datos y su tratamiento con visión de conjunto son fundamentales para acometer estos retos.

4. Aspectos particulares de funcionamiento

4.1. Autosuficiencia de las monitorizaciones

Los sistemas de monitorización que se dispongan en la RCE, deben ser autónomos y autosuficientes. Deben funcionar en su integridad con independencia de la existencia de la plataforma. Es decir, dichos sistemas de monitorización deben mantener todos los elementos de la cadena tradicional: sensores, datalogger y PC de control (cualquiera que sea su ubicación). La plataforma no sustituye a los sistemas de monitorización de las estructuras en ninguno de sus aspectos. Es un “además de” y no un “en lugar de”.

4.2. Secuencia de funcionamiento

Como se ha indicado previamente, la secuencia de obtención y envío del dato, sigue el siguiente orden: sensores, registrador de datos (o datalogger) y ordenador de control.

Los sensores pueden ser de lo más variopinto: células de carga, clinómetros, piezómetros, extensómetros, inclinómetros, estaciones meteorológicas, etc. y su tecnología variada.

La transmisión de datos a la plataforma debe efectuarse desde el PC de control vinculado al sistema de monitorización de la estructura. Es decir, desde el ordenador que primariamente recibe y almacena la información que proporciona el registrador de datos (datalogger). Esto es independiente de la ubicación física de dicho ordenador (obra, centro de conservación, etc.) ya que la técnica actual permite la deslocalización.

En ningún caso la transmisión se efectúa directamente desde el datalogger a la plataforma, puesto que el responsable de la monitorización debe tener el control efectivo del archivo histórico de datos y ejercer sobre el mismo una labor de supervisión con capacidad de corrección de datos.

Se ha optado por el protocolo FTP, el más sencillo y universal para el suministro de datos a la plataforma, con la idea de que en ningún caso este aspecto se convierta en una limitación o impedimento a la integración.

4.3. Personal que interviene

Tal y como se ha indicado previamente, algo que se pretende evitar a toda costa es la simple acumulación de ingentes cantidades de datos sin una persona responsable de cada uno de ellos. Estas personas deben estar claramente identificadas en cada caso.

Así, en cada estructura (puente, talud, túnel) del portal debe existir un responsable de monitorización, persona que conoce la estructura

monitorizada, los datos objeto de monitorización y el funcionamiento de la plataforma. Tiene a su cargo el mantenimiento del sistema de instrumentación y de la transmisión de la información a la plataforma y debe cuidar la calidad de los datos que se envían, lo que implica la eliminación de posibles registros espurios que debe corregir y reenviar correctamente.

El gestor de la plataforma se encarga de la organización de la misma en toda su extensión (altas de estructuras, organización del banco de datos, gestión de contraseñas, resolución de dudas, atención a solicitudes de acceso, análisis transversal de la información, etc.) Se ocupa también de vigilar el correcto funcionamiento general de la plataforma y de la accesibilidad continua a datos por parte de los usuarios.

Los usuarios son los equipos involucrados en la vigilancia y análisis de las estructuras (direcciones de obra, asistencias técnicas, oficinas de proyecto, constructoras, equipos de conservación ...)

Así, la plataforma es una nueva herramienta puesta a disposición de los técnicos de la DGC y de quienes les acompañan en sus funciones, que no modifica en nada la distribución de competencias existente. Todas las obras en construcción o en servicio que dispongan de un sistema de monitorización podrán ser vigiladas y atendidas, además de por su propio sistema, a través de la plataforma, pero dicha vigilancia, así como la toma de decisiones derivada, seguirá estando a cargo de las unidades territoriales con competencia sobre la obra o tramo de carretera en el que se encuentra instalado el sistema.

4.4. Portal internet

Los técnicos de la DGC, así como las empresas colaboradoras, tienen acceso a las utilidades web de la plataforma y pueden hacer uso de la información facilitada a través de la página web correspondiente de cada estructura para llevar a cabo las labores de seguimiento y vigilancia que tengan encomendadas. A fecha de redacción de este texto, la dirección web (Figura 2) de la plataforma es: www.celosia.es.

En Celosía hay una parte de los contenidos, de carácter general, que es de libre acceso. Sin embargo, para acceder a los datos registrados por los sistemas de monitorización, es necesario disponer de contraseña. Las contraseñas tienen carácter personal y son otorgadas por el gestor de la plataforma.

La plataforma dispone de una réplica de los archivos de datos registrados en cada estructura. Es con esa réplica con lo que se alimentan los motores algebraicos que permiten la visualización web en tiempo real (gráficos de evolución histórica, infogramas, diales de control, diagramas de barras, análisis estadístico por sensores, etc.).

Los datos alojados en la plataforma son una réplica fiel de los almacenados por los sistemas de monitorización. La plataforma publica de forma automática y en tiempo real dicha información, cuya calidad debe estar asegurada por quien los envía (figura del *responsable de la monitorización* definida en la OC 2/2021).

La plataforma está concebida de modo no intrusivo y no modifica ni limita las funcionalidades del sistema de monitorización, que únicamente tiene que transmitir una copia de los datos conforme los va obteniendo (tiempo real).



Figura 2. Aspecto general de la página (marzo de 2025): www.celosia.es

Por último, señalar que la plataforma es objeto de un contrato administrativo que está siendo financiado con cargo al Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (fondos *Next Generation EU*).

4.5. Integración de sistemas preexistentes

Uno de los principios rectores de la plataforma es el de garantizar la compatibilidad con cualquier tecnología de medida y de almacenamiento, en la búsqueda, entre otros, de que los sistemas preexistentes pudiesen integrarse.

Dicha integración es independiente de la tecnología de medida, tanto en lo relativo al hardware como al software. Así, no es objeto de la plataforma establecer condiciones técnicas a los equipos instalados en las estructuras, ni interferir en los procedimientos inherentes a los mismos. La plataforma respeta las características técnicas y particularidades de cada equipo instrumental. Únicamente, se han establecido unos criterios comunes relativos a los intervalos de medida, unidades de medida y criterios de signos, imprescindibles para unificar la presentación y facilitar el análisis de datos. Estos criterios se recogen, fundamentalmente, en el

anexo a la Orden Circular 2/2021.

5. Normativa: La Orden Circular 2/2021

Para tratar de unificar criterios, evitar duplicidades y establecer unas reglas comunes a todas las monitorizaciones de la RCE, el 19 de marzo de 2021 entró en vigor la Orden Circular 2/2021 *sobre la plataforma de monitorización de estructuras de la Red de Carreteras del Estado*, que además establece la obligatoriedad de integrar en *Celosía* todas las estructuras que ya dispongan de un sistema de instrumentación electrónica de control.

La Orden Circular incluye un preámbulo justificativo, una parte dispositiva y un anexo con el protocolo para la integración de los sistemas de monitorización de estructuras.

En la parte dispositiva se establecen como ámbito de aplicación los siguientes elementos de la RCE:

- Puentes y estructuras asimilables
- Terraplenes, desmontes y otras obras geotécnicas
- Túneles

Se indica que cuando se prevea disponer un sistema de instru-

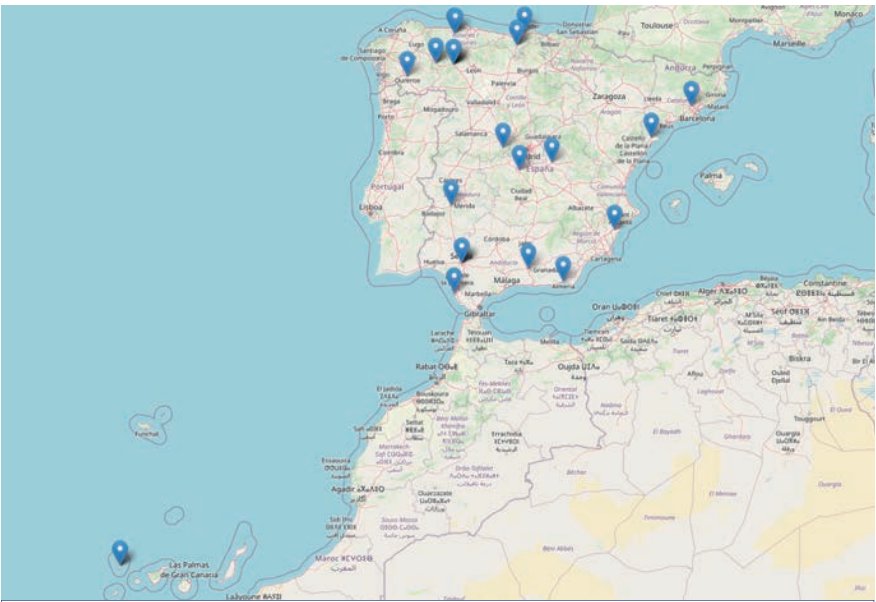


Figura 3. Celosía: Mapa de estructuras monitorizadas (marzo de 2025)

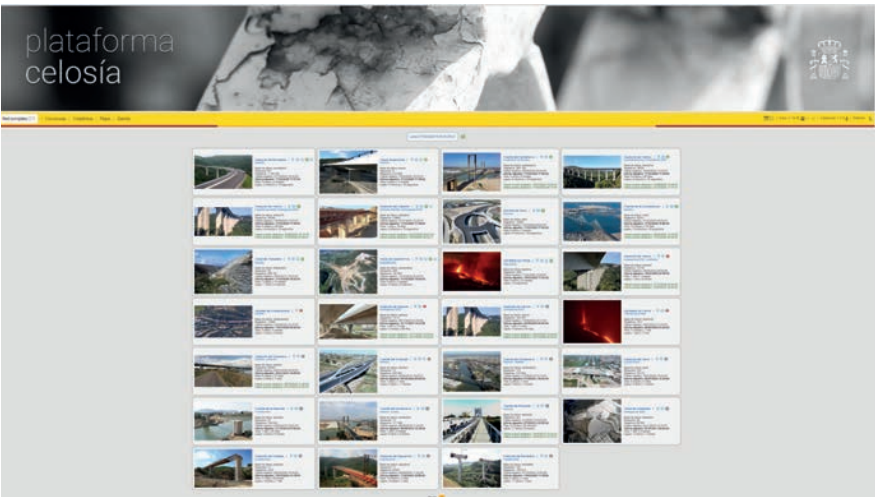


Figura 4. Aspecto general de la galería de imágenes correspondiente a las estructuras monitorizadas (marzo de 2025)

mentación electrónica de control de parámetros de tipo estructural o geotécnico, cualquiera que sea su finalidad, se debe integrar en la plataforma *Celosía*. Para ello se debe seguir el protocolo del anexo que acompaña a la Orden.

Se establece además algo poco común en la técnica normativa en general y es la retroactividad de la medida. Así se dispone que todos los elementos de la RCE en los que ya se encontrase en funcionamiento un sistema de instrumentación electrónica de control de parámetros de

tipo estructural o geotécnico, deben integrarse en *Celosía*. En caso de duda, se debe consultar a la Dirección Técnica (DT) de la DGC la aplicación a cada caso concreto.

La Orden comprende el anexo *Protocolo para la integración de los sistemas de monitorización de estructuras* que detalla cuestiones como la propiedad de la información, el proceso de alta de una estructura, los tipos de datos y archivos, el protocolo de transferencia y los formatos de los datos, la frecuencia de medida y las definicio-

nes y nomenclatura que resulta de aplicación. La Orden establece que corresponden a la DT los posibles ajustes o modificaciones a futuro de este protocolo, mediante nota técnica.

Otra de las cuestiones que establece la Orden es la frecuencia de las medidas que, en las instrumentaciones de carácter estático, es de un registro de datos cada cinco minutos (5 min). De esta forma, se dispone de doscientos ochenta y ocho instantáneas de la situación estructural por cada día, generando una base de datos histórica que puede alcanzar cientos de miles de registros a lo largo de los años. La toma de datos debe hacerse coincidente con las horas exactas y sus progresivos incrementos de cinco minutos (por ejemplo, a las 12:00, 12:05, 12:10, etc.). Esto tiene por objetivo no solo ordenar adecuadamente los datos en el tiempo, sino también permitir los estudios de correlación de datos entre diferentes subestructuras de una misma obra e, incluso, entre diferentes estructuras.

Además de lo anterior, en ciertos casos, en el campo de los puentes, se requieren lecturas cada minuto (fases de construcción con empujes, tesados...), mientras que en parámetros dinámicos (por ejemplo, vibraciones en puentes atirantados) se deben registrar cien lecturas por segundo, es decir $f = 100\text{Hz}$.

A fecha de redacción de este

¹ Entre estructuras con monitorizaciones vivas y bases de datos correspondientes a actuaciones ya cerradas (normalmente de construcción). Se ha contado como una única estructura el control flecha/temperatura en nueve pasos superiores de diferentes regiones (que no aparecen en el mapa general).

² Se trabaja en la integración de doce puentes y dos taludes adicionales.

texto las estructuras monitorizadas se encuentran en las ubicaciones indicadas en el mapa de la Figura 3 y totalizan más de cinco mil canales de lectura instalados. A día de hoy, contamos con veintisiete estructuras¹ (Figura 4) incluidas en la plataforma y, como se ha indicado previamente, se está preparando para su integración en la plataforma un nuevo grupo de taludes y puentes².

6. El primer talud: Trabadelo

El talud de Trabadelo se sitúa en el PK 418 de la A-6 *Autovía del Noroeste*, próximo a la localidad que le da nombre, en la provincia de León, muy cercana al puerto de Piedrafitas. De excepcional complejidad técnica, ha sufrido diferentes intervenciones de enjundia. La primera gran actuación tuvo lugar en 2000 y 2001, tras de la cual, el tramo de autovía entró en servicio. Un nuevo episodio de inestabilidad tuvo lugar en 2009, lo que obligó a desviar el tráfico y a acometer nuevas obras de reparación que se prolongaron durante un año más.

Es uno de los taludes más altos de España y constituye un elemento perfectamente reconocible e identificable como tal por la población del entorno. Ha sido objeto de numerosos artículos tanto técnicos como en prensa (Figura 6). No obstante, no constituye el objeto de este documento el tratar de su problemática como talud, sino de la monitorización llevada a cabo sobre el mismo.

La monitorización del talud de Trabadelo comenzó durante las obras de emergencia iniciadas en 2009. Lo positivo de la experiencia por la relevancia del conocimiento de los datos en tiempo real para la

seguridad de la infraestructura, llevó a tomar la decisión de continuar, una vez finalizara la reparación, por lo que se empezó a controlar como talud en servicio desde 2011, continuándose hasta la fecha.

La monitorización en activo cuenta con un total de veintiocho (28) canales de adquisición de datos en tiempo real que se distribuyen como sigue:

- Veinte (20) canales para lectura de carga en anclajes
- Siete (7) canales para lectura piezométrica

- Un (1) canal para lectura de temperatura ambiente

Otros cuatro (4) canales han quedado fuera de servicio por diferentes motivos desde 2011 (dos canales de lectura piezométrica y dos células de carga en anclajes), si bien el sistema almacena el histórico de sus datos mientras han resultado operativos.

La plataforma permite la visualización de la ubicación de los canales de lectura y las lecturas en un momento concreto. Véase como ejemplo la Figura 7, correspondiente a las 17:00 h del 17 de marzo de 2025.



Figura 5. Talud de Trabadelo. Fotografía general del emplazamiento que aparece en la plataforma

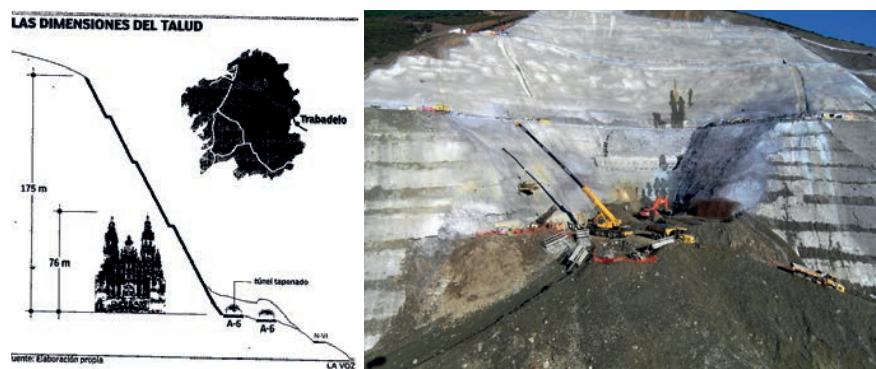


Figura 6. Ilustración de La Voz de Galicia del 1 de febrero de 2010, e imagen de las obras de reparación llevadas a cabo en esas fechas

Otra de las utilidades de la plataforma es la visualización de la evolución temporal de la lectura de un canal (parámetro medido por un sensor). La plataforma permite la realización de zoom sobre las escalas, por lo que se puede seleccionar un intervalo temporal concreto (Figura 8 y línea inferior de la Figura 9).

La plataforma permite combinar datos provenientes de canales diferentes, generando a partir de ellos escenarios que pueden ser tan elaborados como se desee. Así, por ejemplo, en el talud de Trabadelo se han definido dos perfiles, cada uno de los cuáles contiene a su vez dos piezómetros (línea superior de la Figura 9). En este caso concreto, el criterio de representar el nivel piezométrico como una línea recta entre ambos niveles de cada perfil, se consideró suficientemente representativo a efectos prácticos.

Otra de las utilidades de la plataforma es la de la determinación de umbrales o niveles de alerta, que requieren de un análisis geológico-geotécnico previo y de la programación posterior de los correspondientes algoritmos numéricos en que se traduzcan.

Así, por ejemplo, en Trabadelo y a partir de estudios previos de estabilidad, se determinó como umbral de alerta en el perfil reflejado en la Figura 9, que el nivel piezométrico no alcanzase una determinada alineación, relacionada a su vez con las posiciones de los bulbos de los anclajes y con los cálculos de estabilidad del talud. Estas condiciones se pueden representar gráficamente de forma bastante intuitiva como se muestra en la parte derecha de la línea superior de la Figura 9, donde la superación de la línea roja por el nivel de agua (línea azul oscura y textura por debajo en color azul celeste) daría lugar a una alerta. Una alerta constituye un aviso de supe-

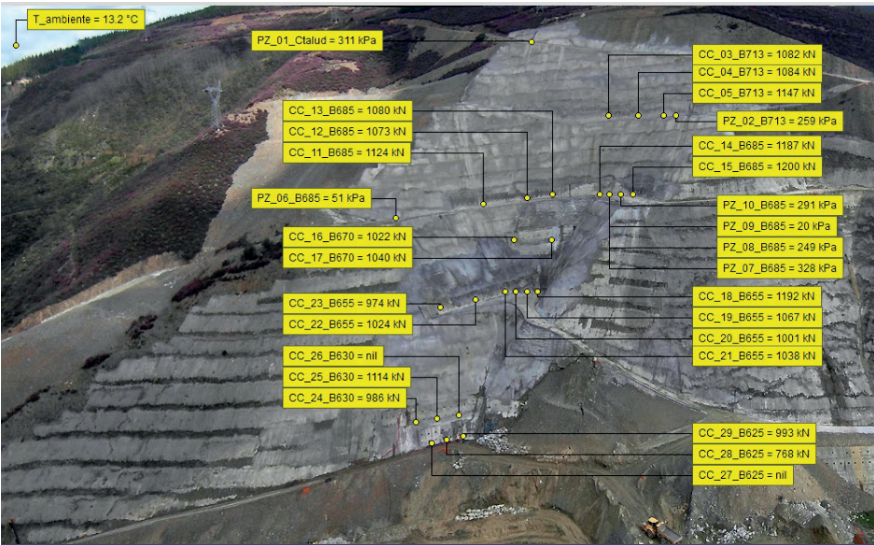


Figura 7. Talud de Trabadelo: Canales y lecturas a las 17:00 h del 17 de marzo de 2025

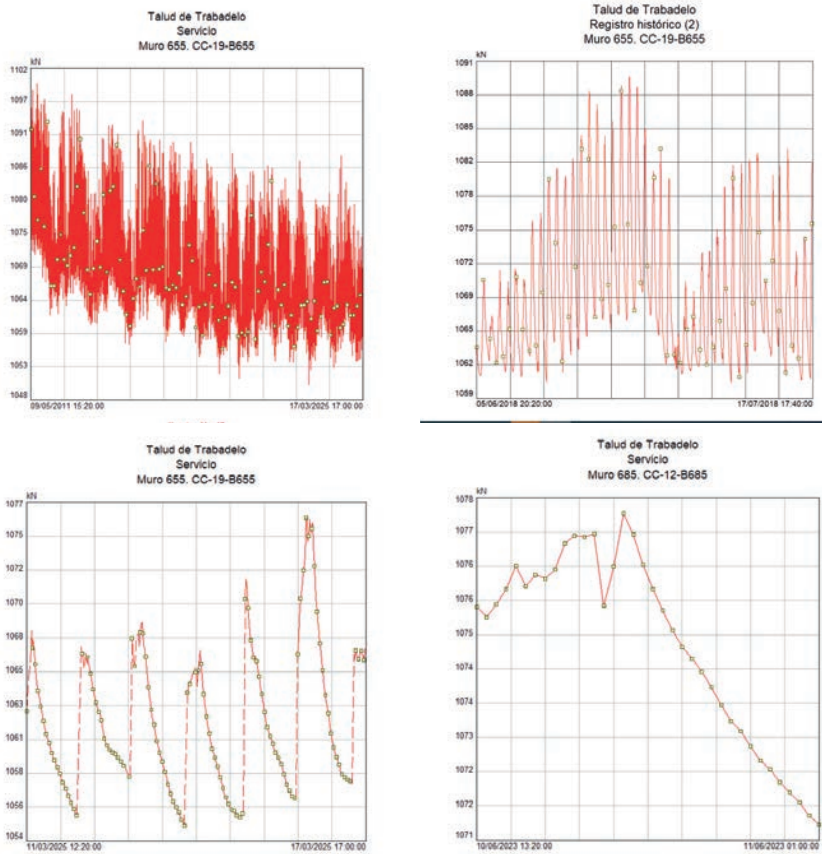


Figura 8. Canal 19 (célula de carga en anclaje en el muro a cota z=655 m). Registros correspondientes a un periodo de casi catorce años, de un mes y medio, de una semana y de doce horas. Pueden observarse tendencias hiperanuales, oscilaciones cíclicas diarias y hasta horarias por efecto principal del soleamiento.

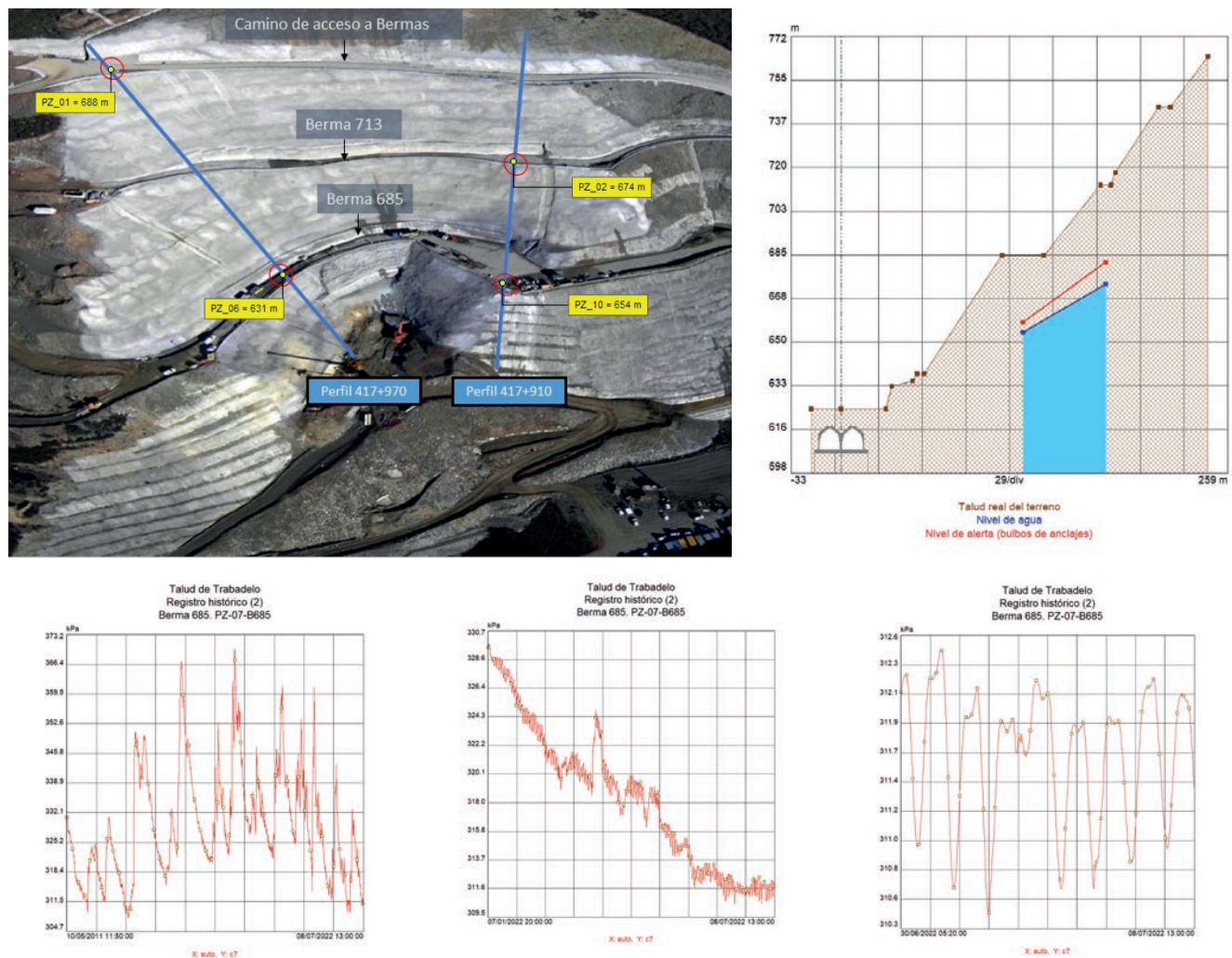


Figura 9. Talud de Trabadelo. Piezometría

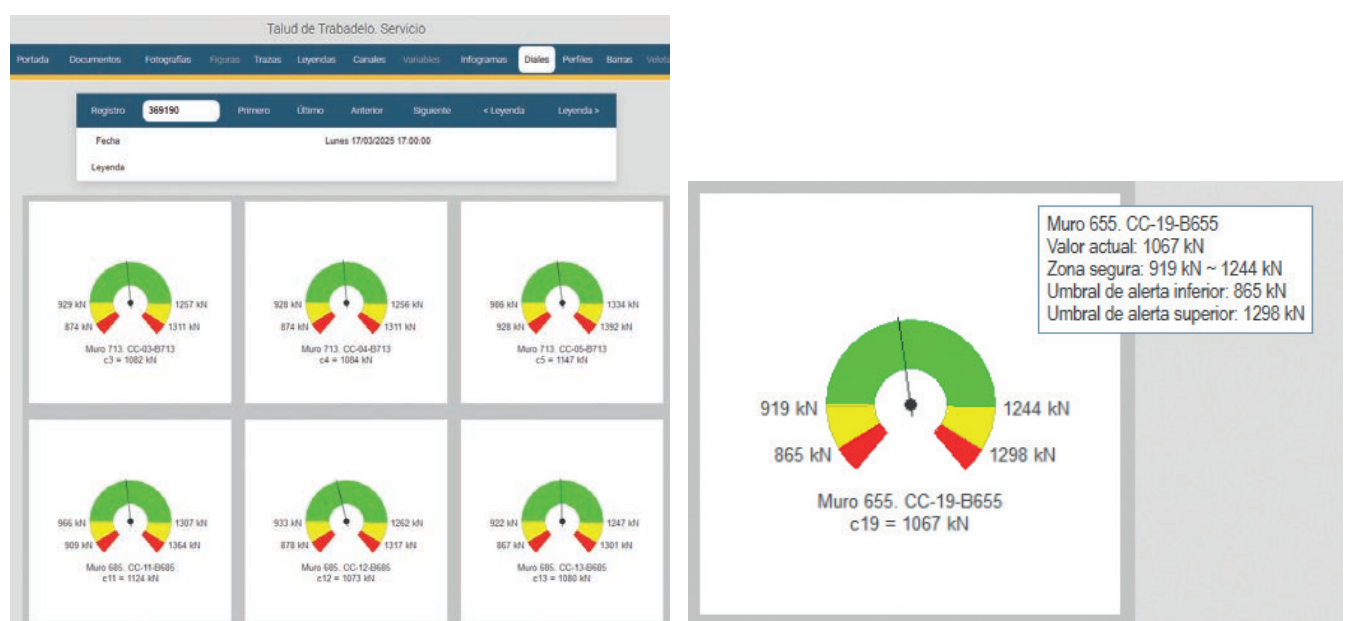


Figura 10. Talud de Trabadelo. Diales y umbrales de alerta. A la izquierda, pantalla de visualización de diales (en imagen, seis canales concretos correspondientes a otras tantas células de carga en anclajes) correspondientes a la lectura de las 17:00 del 17 de marzo de 2025. A la derecha, detalle de umbrales de alerta y lectura para el canal 19 (anclaje de la Figura 10)

ración de un umbral predefinido, que debe ser evaluada con criterio ingenieril por los responsables de cada monitorización.

Además de las alertas, la plataforma permite la representación de diales, en que con un código de colores se muestran los niveles de funcionamiento de cada sensor en cada momento dentro de unos rangos, previamente definidos con valores numéricos para cada uno de ellos y representados según un código semafórico de colores verde/amarillo/rojo. Asociados a estos niveles de alerta el sistema puede enviar mensajes de advertencia de peligro (SMS, correo electrónico...)

a las personas responsables previamente identificadas.

En Trabadelo se ha optado, por ejemplo, por fijar los niveles de alerta para las células de carga en anclajes, en ciertos porcentajes de la carga real de tesado tanto en más como en menos. Estos umbrales se pueden modificar conforme se va adquiriendo experiencia. Así en la parte derecha de la Figura 10, se representan los umbrales de alerta del anclaje de la Figura 8 (sensor que ocupa el canal 19).

7. Otros activos de naturaleza geotécnica incluidos en la plataforma

Además del talud de Trabadelo, que acumula la información de más de quince años de datos, la plataforma integra otros activos geotécnicos que son los taludes de Viladecavalls (Barcelona) y Casazorrina (Asturias).

Los taludes de la B-40 en Viladecavalls (Figura 11) y el de la A-63 en Casazorrina (Figura 12), se integraron en la plataforma en fechas próximas entre sí, en septiembre y octubre de 2022. Se trata de instrumentaciones dispuestas durante la fase de obras³ que responden a situaciones de gran complejidad técnica y que comprenden la integración en tiempo real de lecturas de células de carga en anclajes, clinómetros, inclinómetros, piezómetros y diferentes variables meteorológicas.

Está previsto que, en fechas próximas, se integren en la plataforma al menos una nueva instrumentación geotécnica procedente de una obra en curso y otras dos de taludes en servicio con un largo historial de incidencias geotécnicas. En paralelo se trabaja en la elaboración de los estudios geotécnicos previos necesarios para la implantación de nuevas instrumentaciones en diferentes taludes que sufren patologías de forma clara y prolongada en el tiempo.



Figura 11. Emplazamiento general de la B-40 en la zona de Viladecavalls (Barcelona)



Figura 12. Vista general de las obras de la A-63, en el talud de Casazorrina (Asturias) en febrero de 2025

³ Los tramos son: B-40 Olesa de Montserrat-Viladecavalls que entró en servicio en febrero de 2024 y A-63 Cornellana-Salas, aún en fase de obra.

8. Conclusiones

Como cuestiones prácticas más relevantes, o lecciones provenientes de la instrumentación de Trabadelo, hay que señalar que, con el tiempo, hemos ido aprendiendo sobre un talud tan complejo como el que nos ocupa que, puede decirse que *nos ha ido hablando* a lo largo de tres lustros. Se ha adquirido un nivel de conocimiento en tiempo real de las diferentes variables que intervienen y cómo influyen en la explotación de la carretera.

En este caso, las principales cuestiones, propias de la ingeniería de taludes, en las que se ha ido ganando experiencia práctica son:

- Evaluación de la carga de los anclajes en relación con los umbrales previstos: Oscilaciones tanto en más como en menos indican que un anclaje está cogiendo o liberando tensión fuera de límites preestablecidos, lo que puede suponer problemas de estabilidad local.

Puede no ser suficiente con fijarse en un único anclaje. Dada la densidad de puntos de auscultación de esta variable en el talud, conviene ponerlo en relación, al menos, con los más próximos. Asimismo, resulta esencial comparar las lecturas instantáneas con su evolución temporal.

- Niveles piezométricos: Una de nuestras principales preocupaciones es el mantenimiento de los niveles piezométricos dentro de valores razonables, por su incidencia directa en la estabilidad del talud. Además de en los valores absolutos de la cota piezométrica, es necesario fijarse en su evolución temporal y en la meteorología.
- Interrelación de variables: El talud es un todo y difícilmente el

fallo global se produciría por un valor de un canal de lectura sin reflejo en los demás. La combinación espacial y temporal del conjunto de las variables medidas es un elemento de capital importancia a la hora de la toma de decisiones para la explotación.

En este caso la combinación de la cota piezométrica con la posición física de los bulbos de los anclajes y con la magnitud de la carga que soportan constituye un todo indisociable del que depende la seguridad del talud y, por ende, de la carretera.

A modo de ejemplos prácticos de cuanto se ha indicado, se han perforado nuevos drenes cuando se ha observado una subida prolongada en el tiempo de niveles piezométricos sin reflejo en la pluviometría, o se han revisado anclajes (retesado, perforación de otros nuevos) cuando la carga de algunos (o de un grupo) se encontraba fuera de niveles asumidos como admisibles. Después se ha comprobado, por los mismos u otros canales de lectura, la eficacia de dichas medidas.

Pero nunca se ha perdido de vista la componente humana, siempre ha habido un equipo de especialistas detrás, que analizase los datos, recorriera el talud y tomara decisiones in situ, pese a que el sistema, en sí mismo, es capaz de poner semáforos en rojo y hacer sonar sirenas de manera automática y en tiempo real.

Respecto a los otros dos emplazamientos más recientes (Viladecavalls y Casazorrina) aún es pronto para extraer conclusiones, si bien los poco más de dos años que llevamos recibiendo sus datos, nos están permitiendo empezar a entender su lenguaje propio. Queremos llamar la atención sobre la

inclinometría automática (muy poco frecuente en la ingeniería geotécnica), que proporciona información de capital importancia y que está funcionando por vez primera en la DGC en estos dos taludes.

Otra cuestión que es razonable plantear es la de si este tipo de monitorizaciones de taludes en tiempo real debe o no abordarse bajo la óptica de la inteligencia artificial. A día de hoy no podemos dar una respuesta clara, ni creemos que sea una cuestión a solventar con un monosílabo. Entendemos que la aplicación de la IA a este tipo de monitorizaciones puede resultar de utilidad, pero lo que también resulta muy claro es que la gran complejidad que entrañan estos taludes hace que se deba contar con un equipo humano integrado por especialistas que efectúen un seguimiento regular de su comportamiento.

Por último, yendo a una perspectiva más general indicar que resulta perfectamente viable extender las potencialidades de la plataforma a otro tipo de estructuras o elementos de la carretera (túneles, firmes...) siempre que se cumplan los principios que han guiado la integración de las estructuras (puentes y taludes) monitorizadas hasta la fecha, los cuáles han tratado de plasmarse en este artículo.

Creemos que el conocimiento de la plataforma *Celosía* por la comunidad carretera española e internacional, es un requisito previo y esencial para que pueda ser útil en muchos más emplazamientos. Esperamos contar con ustedes para trabajar juntos en su mejora continua, en el análisis de los datos que de ella se derivan y, en suma, para ser útiles a la sociedad mejorando la calidad del servicio y la seguridad de nuestras carreteras. ♦