



II Congreso Virtual sobre Historia de la Caminería

Del 15 al 30 de Septiembre de 2014



La conservación de las carreteras en el siglo XXI. Proyecto "SITEGI": una aproximación a las nuevas técnicas de inspección de infraestructuras.

F.J. Prego Martínez, R. Caride Coello, P. Arias Sánchez, H. González Jorge, I. Puente Luna, M. Solla Carracelas, X. Núñez Nieto.

La conservación de las carreteras en el siglo XXI. Proyecto “SITEGI”: una aproximación a las nuevas técnicas de inspección de infraestructuras.

F.J. Prego Martínez⁽¹⁾, R. Caride Coello⁽²⁾, P. Arias Sánchez⁽³⁾, H. González Jorge⁽³⁾, I. Puente Luna⁽³⁾, M. Solla Carracelas⁽⁴⁾, X. Núñez Nieto⁽⁴⁾

(1) Programa de Doctorado en Geotecnologías Aplicadas. E.T.S. Ingenieros de Minas. Universidad de Vigo (Pontevedra). Responsable del Dpto. de I+D+i de MISTURAS, S.A. Ourense

(2) Dpto. de I+D+i de EXTRACO, S.A. Ourense

(3) Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad de Vigo (Pontevedra)

(4) Centro Universitario de la Defensa. Escuela Naval Militar de Marín (Pontevedra)

javiprego@gmail.com

central@misturas.es

central@extraco.es

1. INTRODUCCIÓN: La conservación de las infraestructuras públicas en la antigüedad.

La historia de las obras públicas es también, en cierto modo, la historia de su mantenimiento. Sin las labores de conservación que muy probablemente tuvieron mientras estuvieron en servicio, seguramente muchas de ellas no habrían sobrevivido, ni tan siquiera como yacimientos arqueológicos o como ruinas conservadas con mayor o menor fortuna, dándonos a conocer vestigios de la antigüedad que nos permiten su análisis y estudio a día de hoy.

Sea por motivos político-religiosos (como, por ejemplo, las pirámides del antiguo Egipto), militares y de conquista (caso de la Roma Antigua y su red de calzadas) o de otra índole, **las sociedades más avanzadas de la antigüedad crearon en sus organizaciones cuerpos de funcionarios y burócratas destinados al mantenimiento y a la conservación de esas infraestructuras.**

El ejemplo más claro e ilustrativo, podría decirse que paradigmático, lo encontramos en las **obras públicas romanas**: si inicialmente la creación de

redes viarias dependía del ejército, y suponía un elemento de conquista y dominación con fines principalmente militares, a medida que los territorios conquistados pasaban a formar parte del Imperio Romano, los conquistadores se preocupaban de dejar su impronta en las nuevas posesiones. La conquista traía parejas muchas novedades, y no todas negativas: además de la lengua y la religión oficiales, **la ingeniería y la técnica romanas llegaron a multitud de territorios bárbaros**, mejorando en algunos casos las expectativas vitales de sus habitantes (al menos, las de aquellos que alcanzaban el estatus de ciudadano romano -otra cosa eran los esclavos y siervos-). Calzadas, puentes, caminos de carros, puertos y faros mejoraron sensiblemente la accesibilidad del territorio y las comunicaciones, haciendo florecer el comercio y fomentando la creación de nuevos asentamientos urbanos, con la demanda de nuevos servicios. Acueductos, cloacas, redes de alcantarillado, baños y fuentes públicas contribuyeron también a mejorar el acceso a los recursos hidráulicos y sentaron las bases de la ingeniería sanitaria y ambiental.

La existencia de tantos tipos de obras e infraestructuras públicas fue motivo suficiente para que el engranaje burocrático romano se ocupase de ellas, desarrollando cuerpos más o menos especializados que se encargaron de su conservación, mejora y mantenimiento. Así, en la **Roma Republicana** (a partir del año 502 a.C.) se sabe que existían ya las figuras de cónsules, censores y ediles (ediles *plebeii* y ediles *curules*), cuya labor consistía en el mantenimiento y explotación de puentes y templos, la reparación de edificios públicos y la supervisión, construcción e inspección de edificios privados, redes de agua, calles, tierras públicas y burdeles, atribuyéndoseles, incluso, labores de índole policial.

El llamado **Período Imperial Romano** supone un grado más en la especialización de los funcionarios imperiales destinados a estos trabajos, que poco a poco se van separando de labores de índole religiosa o espiritual. Así, la reforma impulsada por **Marco Vipsanio Agripa** (12 a.C.) consagra la creación de un cuerpo de curatores, organizados en *operum publicorum* (destinados al cuidado de las obras públicas en general, salvo aquellas en las que existía otro curador), *viarum* (para el mantenimiento de las calzadas), *cloacarum* (para las redes de sumideros), *navicularum mari* (para la navegación

marina), *aquarum* (para las redes de aguas) y curatores *alvei et riparum* (encargados de la navegación por el río Tíber). Se trata de una organización compleja, que en nada tiene que envidiar a la de los Servicios de Conservación de Infraestructuras dependientes del Ministerio de Fomento o de las respectivas Consejerías de las Comunidades Autónomas de nuestro país.

La organización aquí pergeñada constata, por tanto, **la importancia que estas labores de mantenimiento tuvieron para los gobernantes romanos**, conscientes de que constituían una herramienta eficaz a la hora de preservar los avances tecnológico-constructivos materializados en las obras construidas en este período histórico. La caída del Imperio Romano (año 476) supone la desaparición de la organización territorial y político-administrativa instaurada hasta entonces y, con ella, la llegada del declive urbano y la decadencia y desaparición de muchas de las obras construidas. La Edad Media se convierte así en un período oscuro en cuanto a la construcción y mantenimiento de nuevas infraestructuras, que no se recuperará hasta el advenimiento del Renacimiento.

2. Necesidades actuales de la conservación de infraestructuras.

A pesar de los más de 2.000 años transcurridos desde el apogeo de la Roma Clásica hasta el día de hoy, las infraestructuras de transporte del siglo XXI siguen presentando igualmente unas necesidades de conservación y mantenimiento que deben ser atendidas de manera eficiente.

En los estados modernos actuales el ciudadano de a pie asume que son las instituciones públicas, directamente o mediante el concurso público de contratos específicos de conservación, las que se ocupan de estos trabajos. Y en escenarios de escasez de recursos económicos como el actual, **es importante que las inversiones que en este ámbito se realicen se acometan priorizando unas actuaciones sobre otras**, apoyándose en mecanismos que faciliten la toma de decisiones siguiendo unos criterios objetivos. Los protocolos de inspección e inventario con los que cuentan los organismos públicos españoles han avanzado mucho en los últimos veinte años, tendiendo hacia la denominada gestión por indicadores, tal y como sucede en otros países del entorno. A pesar de ello, **los sistemas de**

inspección y control actuales presentan todavía importantes carencias, especialmente en lo que se refiere a su grado de tecnificación y a la calidad de la información suministrada. Es muy habitual que esta información provenga, principalmente, de inspecciones visuales, que en última instancia dependen, en multitud de casos, de criterios subjetivos aplicados por operarios que no siempre están preparados o que no poseen la formación más adecuada. La presente comunicación pretende resumir brevemente el **proyecto SITEGI**, un moderno sistema de inspección y gestión de infraestructuras desarrollado por investigadores del **Grupo de Geotecnologías Aplicadas de la Universidad de Vigo**, junto con las constructoras **EXTRACO, S.A.** y **Misturas, S.A.** (que aportan su experiencia en contratos de servicios de conservación de infraestructuras), las consultoras **Enmacosa** e **Insitu Ingeniería**, y la empresa de topografía **Lógica Equipamientos Integrales**. Se trata de un proyecto que abre caminos hacia la aplicación de nuevas técnicas en la conservación y el mantenimiento de las infraestructuras del transporte de nuestro país.

3. Nuevos sistemas de control de infraestructuras: proyecto SITEGI.

El proyecto **SITEGI** (acrónimo de “Sistemas Integrados de Tecnologías para la Gestión de Infraestructuras”) tiene como objetivo principal el **desarrollo, adaptación y puesta a punto de sistemas tecnológicos para la inspección, análisis y gestión de infraestructuras**, de gran utilidad también para el control geométrico y de ejecución de **todo tipo de obras de construcción de ingeniería civil**: grandes estructuras de hormigón, pavimentaciones, elementos de contención, puentes y viaductos de gran porte, desmontes y terraplenes, taludes... Los objetivos específicos del proyecto permiten también emplear las técnicas desarrolladas en el análisis y estudio de infraestructuras históricas o de interés patrimonial, como acueductos, canales o puentes.

El sistema de análisis e inspección permite una **toma de datos totalmente automatizada**, independiente de la subjetividad de los operarios, e introduce en una única **Unidad Móvil de Inspección** las últimas tecnologías para la adquisición de información, cuantitativa y cualitativa, de las infraestructuras

analizadas y del estado interno de sus materiales: en concreto, se han incorporado en la Unidad equipos **láser escáner móvil 3D, georradar (GPR), perfilometría láser, cámaras de termografía infrarroja, vídeo y sistemas de posicionamiento GPS de alta precisión**, que se complementan con **cámaras fotográficas y de vídeo de alta resolución**, para la toma instantánea de datos en campo, a medida que la Unidad Móvil se desplaza sobre la infraestructura que se desea analizar. La información adquirida se integra de manera conjunta en un **sistema experto de gestión con software específico**, que ayudará a priorizar las actuaciones de mantenimiento y conservación que demandan estas infraestructuras.

El proyecto SITEGI cuenta desde el año 2011 con financiación complementaria a la de las empresas participantes en el proyecto, aportada por el **Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI)**, dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad, a través del denominado Fondo Tecnológico.



Fig. 1: Esquema general del sistema de inspección y control SITEGI.

En los apartados que siguen se presentan, de forma resumida, las prestaciones que aporta cada uno de los equipos instalados en la Unidad Móvil de Inspección, para que el lector pueda apreciar la **potencialidad de estos equipos** y valore el inmenso panorama que se abre en el campo del control de las infraestructuras del transporte en los próximos años.

3.1. Sistema de Navegación con posicionamiento GPS: Permite la **localización exacta de los elementos de las infraestructuras estudiadas,**

así como el análisis de su evolución durante el proceso de construcción, si se emplea la Unidad Móvil para el control de la ejecución de una obra concreta.

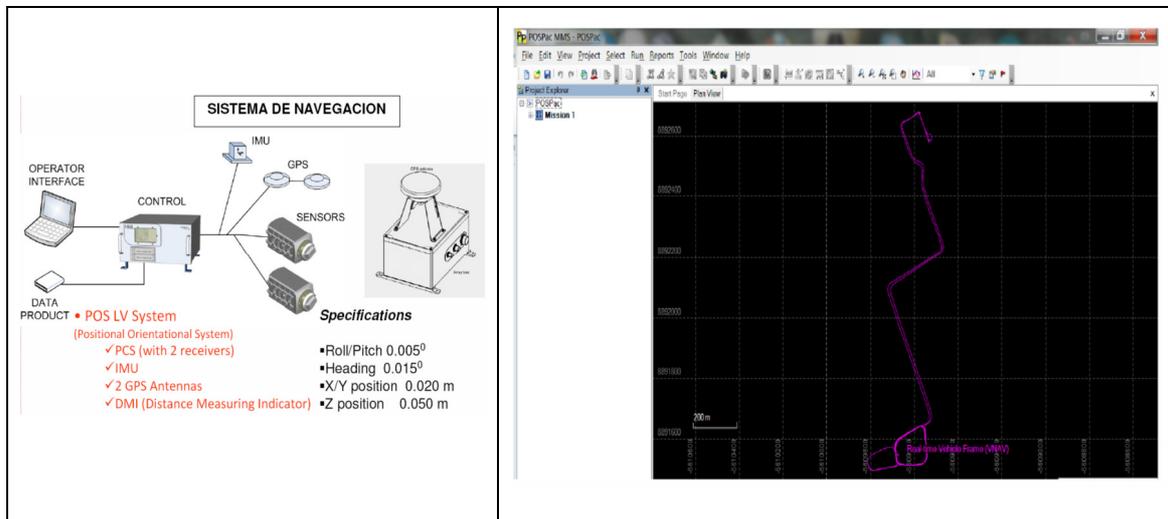


Fig. 2: Sistema de navegación implementado y ejemplo de trayectoria analizada.

3.2. Láser-escáner móvil (LiDAR): Permite realizar levantamientos fotogramétricos en 3D, obteniendo nubes de puntos a partir de las cuales generar **modelos tridimensionales de las infraestructuras escaneadas** y del terreno que las circunda. Con ello se mejora sensiblemente el seguimiento y control de las unidades de obra que componen las infraestructuras analizadas.

La adquisición de datos LiDAR móvil se realiza utilizando el **sistema Lynx Mobile Mapper**, situado sobre el techo del vehículo de transporte. Los parámetros de configuración principales consisten en una frecuencia de adquisición de pulsos LiDAR de 500 kHz y una frecuencia de rotación del espejo LiDAR de 200 Hz. El sistema de navegación (GPS) adquiere también datos a una frecuencia de 200 Hz. Se toman datos GPS estáticos durante 5 minutos antes y después del levantamiento LiDAR, con el fin de mejorar la precisión de la trayectoria de la Unidad de Inspección calculada. La precisión de los puntos obtenidos en el levantamiento LiDAR es superior a 3 cm en ejes XY, y a 5 cm en el eje Z. Este dato se calcula a partir de la acumulación de los errores del GPS, del propio LiDAR y de la calibración del sistema. Una vez

generada la nube de puntos del elemento de estudio, el procesado de la misma se realiza empleando el software QTModeler.

Para aquellos casos en los que el acceso de la Unidad Móvil de Inspección no es posible, el proyecto contempla la posibilidad de emplear un **LiDAR estático terrestre auxiliar**. La adquisición de datos con el LiDAR estático se lleva a cabo por medio del sistema **Riegl LMS Z390i**, con una frecuencia de adquisición de 10.000 puntos por segundo: como se intuye, se trata de equipos extremadamente modernos, con una precisión infinitamente superior a la que las técnicas de topografía convencional nos tenían acostumbrados en la construcción de obras de ingeniería civil. Finalmente, ambas nubes de puntos - las obtenidas con el LiDAR móvil y con el estático- se georregistran para su unificación, dando lugar a las trayectorias y a las nubes de puntos definitivas de aquellas estructuras que estamos analizando.

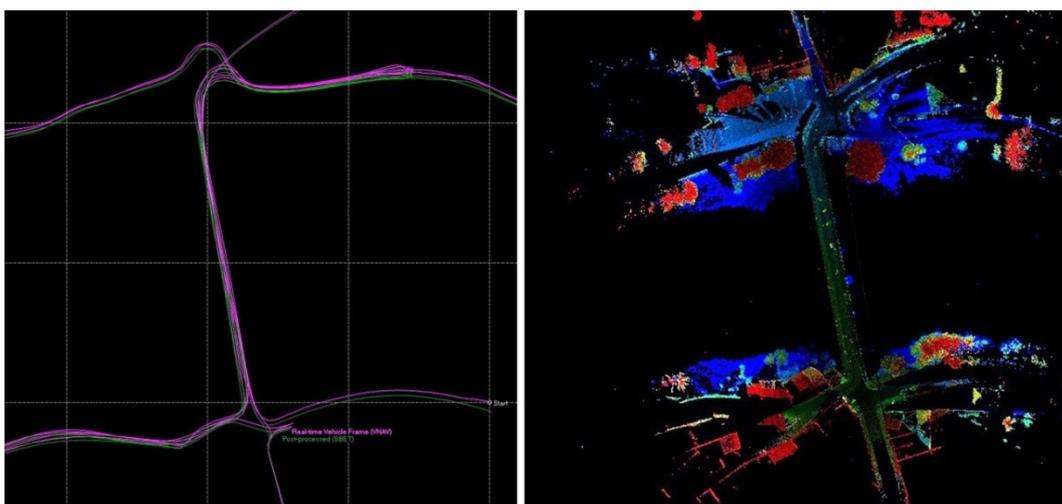


Fig. 3: Trayectoria y nube de puntos global a partir del empleo de los equipos LiDAR.

Los equipos LIDAR de SITEGI se han empleado con éxito en diversas obras de las empresas constructoras participantes en el proyecto. Así, por ejemplo, **Extraco, S.A.** empleó la Unidad Móvil de Inspección en la construcción de la **Autovía Ourense-Celanova**, en la que se realizó el **control geométrico de las capas de rodadura**, estimando además el **espesor de los firmes** colocados en obra por diferencias de medidas. Los equipos se probaron también para comprobar su potencialidad en cuanto a la **determinación de**

flechas y deformaciones en las pruebas de carga del Viaducto de Ourille,
en la misma Autovía.



Fig. 4: Control geométrico de firmes con la Unidad Móvil de Inspección en las inmediaciones del PK 0+200 de la Autovía Ourense-Celanova.

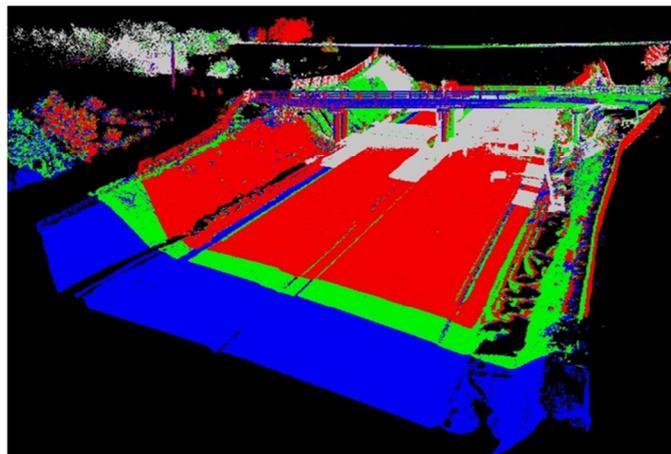


Fig. 5: Estimación de espesores de firmes en capas superpuestas, a partir de modelos geométricos obtenidos con los equipos LiDAR de SITEGI en la Autovía Ourense-Celanova.

Otro de los aspectos analizados por **Extraco, S.A.**, fue la **monitorización de taludes inestables** en diversas carreteras en las que esta empresa desarrolla labores de conservación y mantenimiento: así, por ejemplo, se realizaron diversos perfiles de alta precisión con técnicas LiDAR de los taludes situados en el Alto do Rodicio (**carretera OU-105**), para comprobar la evolución de sus movimientos en el tiempo, y determinar el riesgo de futuros desprendimientos.



Fig. 6: Análisis geométrico y de estabilidad de **taludes** en la carretera OU-105 con LiDAR. Ortoimágenes 3D obtenidas con técnicas LiDAR.

Por su parte, la empresa **Misturas, S.A.** hizo uso de los equipos LiDAR de SITEGI en las obras de **rehabilitación del puente romano de Lugo**, terminadas a finales del año 2013. En esa obra se analizaron diferentes levantamientos fotogramétricos en 3D, a partir de los cuales se documentó de manera exhaustiva la geometría de la obra, antes y después de la intervención.



Fig. 7: Unidad Móvil SITEGI sobre la ataguía provisional de obra construida en el lecho del río Miño, para las obras de rehabilitación del puente romano de Lugo.

Los trabajos realizados por **Misturas, S.A.** durante la rehabilitación permitieron el acceso a ciertos elementos del puente que no están visibles en circunstancias normales: así, con la construcción de una ataguía provisional quedaron a la vista **restos de la fábrica original del antiguo puente romano** (cimientos de las pilas nº 2, 3 y 4), normalmente sumergidas bajo varias capas de cieno y bajo las aguas del río Miño. La geometría de precisión obtenida mediante sistemas LiDAR proporcionó información de interés a la hora de realizar un **análisis de estabilidad de la estructura**, principalmente: ortofotografías de los diferentes planos de la estructura (planos principales y secciones) y un modelo 3D de la infraestructura, del cual se pueden derivar análisis de diferente índole, como por ejemplo un **análisis morfométrico** de los arcos o un **análisis de asimetría** de las luces de los arcos.

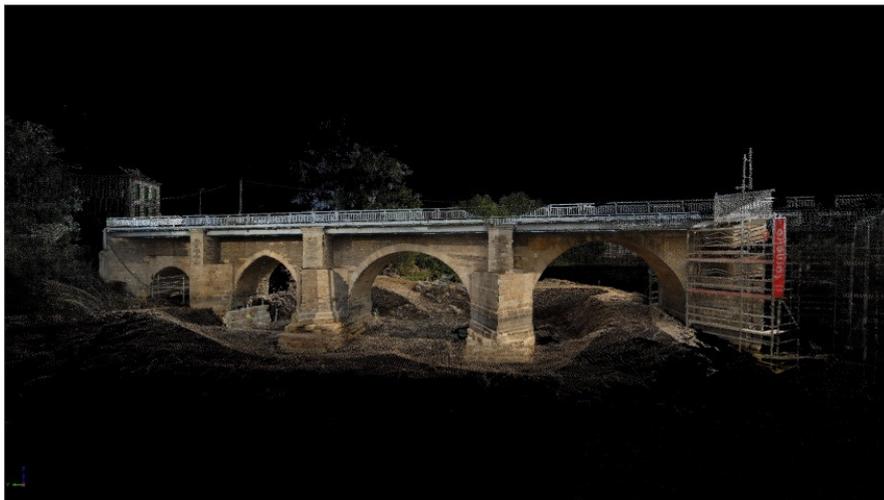


Fig. 8: Modelo tridimensional del puente romano de Lugo, a partir de las nubes de puntos obtenidas con los equipos LiDAR de la Unidad Móvil de Inspección.



Fig. 9: Documentación precisa de la **geometría de la pila nº 2 del puente romano de Lugo**, obtenida con los equipos LiDAR. Detalle de un modelo 3D: se aprecia el estado de socavamiento en el que se encontraba antes de los trabajos de rehabilitación.

3.3. Cámaras de control RGB: Situadas en diversos puntos del vehículo, permiten controlar, en tiempo real, el estado y la evolución de la construcción de las infraestructuras, tanto en ejecución como una vez terminadas.

CAMARAS RGB		
Specifications	RM-5000-08 / RM-5000-08	Connector pinout
Sensor	20" progressive scan CCD	
Pixel Clock	60 MHz	
Frame rate full frame	15 frames/second	
Active area	8.45 (H) x 7.02 (V)	
Cell size	3.45 (H) x 3.45 (V)	
Active pixels	2856 (H) x 2952 (V)	
Color (CCD vs. GE)	Raw Bayer output, host board interpolation	
Read-out modes		
Full	2456 (H) x 2952 (V) 15 fps	
3/4 partial scan	2456 (H) x 2214 (V) 15 fps	
1/2 partial scan	2456 (H) x 1476 (V) 15 fps	
1/4 partial scan	2456 (H) x 738 (V) 15 fps	
Vertical blanking	2456 (H) x 1476 (V) 15 fps	
Region of interest (ROI)	User definable. Memory read-out *Note: RM-5000-GE only	
Sensitivity (RM-5000-GE)	0.2u Lux (On sensor, max. gain, shutter off, 50% video)	
Sensitivity (RM-5000-GE)	1.0 Lux (On sensor, max. gain, shutter off, 50% video)	
SNR ratio	30:1 @ 0 dB gain	
Video output	Genie Vision, 8-bit, 10-bit or 12-bit	
Auto-on sensor video output	0.7 Vp-p, available on internal switch	
Gain	Manual/Automatic Range: 1 to 12 dB	
Synchronization	Internal K60, External hardware trigger via GEV Software trigger via Genie Vision	

DC In / SPI0

RM5000-08-usb-08-08-08

Camera Pinout

Pin: 1 GND
2 +5V DC (VCC)
3 GND (GND)
4 +5V DC (VCC)
5 GND (GND)
6 GND (GND)
7 GND (GND)
8 GND (GND)
9 GND (GND)
10 +5V DC (VCC)
11 GND

* Pins 3 and 4 can be reconfigured by internal switch selection

Cámara A

Cámara C

Cámara B

Cámara D

Fig. 10: Sistema de **cámaras RGB** implementadas en la Unidad Móvil de Inspección y ejemplo de recogida de datos.

3.4. Cámaras termográficas: Permiten el estudio de humedades y detectar la presencia de agua, difícilmente identificable en inspecciones visuales, y que puede poner en peligro la integridad de las infraestructuras estudiadas.

3.6. Georradar (Ground Penetrating Radar –GPR-): se ha orientado en este proyecto especialmente hacia el **estudio de las capas de firme en carreteras**, lo que nos permite emplear estas técnicas de inspección en el análisis de espesores de las capas de rodadura y la presencia de diversas patologías, como son grietas, roderas y fisuras que no se detectan a simple vista en la superficie de la vía. Este equipo nos permite abordar también el estudio del **estado interno de los materiales presentes en las infraestructuras analizadas y en el terreno**, detectando fallos no identificables en inspecciones visuales, o estudiando los suelos en los que se realizará la obra, previniendo así posibles problemas que puedan surgir durante su ejecución y que no estaban recogidos en el proyecto constructivo inicial.

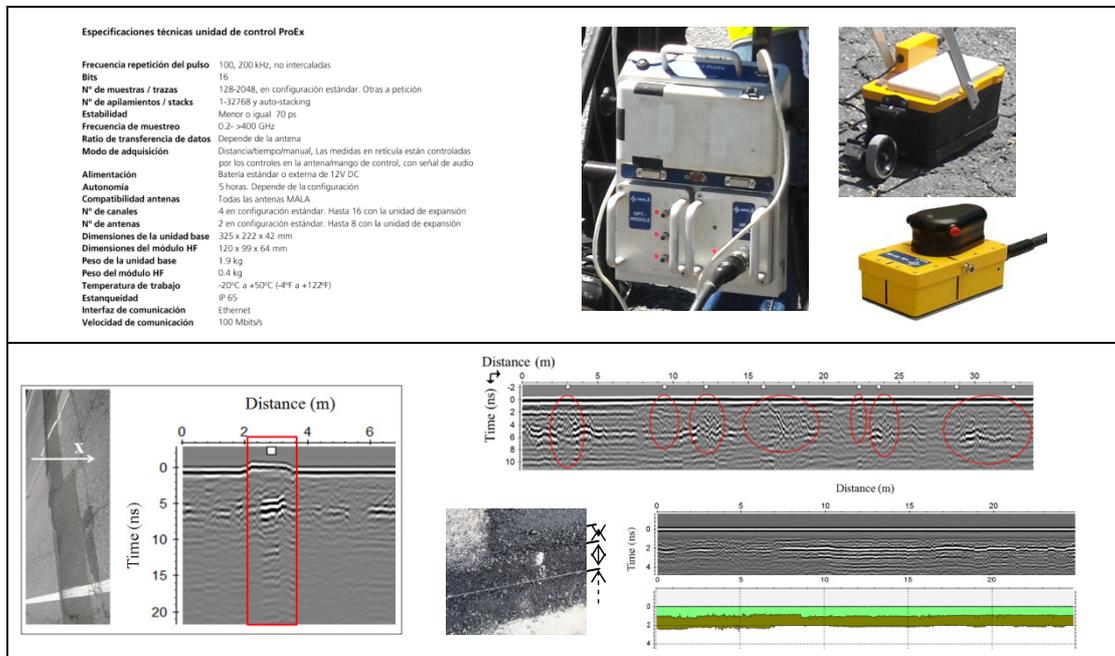


Fig. 13: Especificaciones técnicas de georradar (unidad de control ProEx), antenas de 2.3 y 1 GHz, y ejemplos de radargramas obtenidos a partir del análisis con GPR de un firme de carreteras: detección de grietas y fallos en el sellado de capas de firme, y determinación de espesores.

Los equipos GPR de la Unidad de Inspección se emplearon de forma desacoplada en la rehabilitación del puente romano de Lugo por parte de **Misturas, S.A.**, a lo largo del año 2012, con la finalidad de conocer el **estado**

de los materiales de relleno situados entre los tímpanos, y antes de acometer la ejecución de la obra.

Para llevar a cabo el estudio georradar en este puente se utilizó una **antena apantallada de 250 MHz**, buscando un compromiso entre la penetración de la señal electromagnética y su resolución. Se adquirieron dos perfiles georradar, en configuración “common-offset-mode”, a lo largo de la calzada que discurre sobre el tablero del puente. Con el propósito de analizar la probable heterogeneidad interna en cuanto a materiales de construcción, dichos perfiles fueron registrados en direcciones contrarias: uno a lo largo del extremo hacia aguas arriba y el otro hacia el extremo aguas abajo. Como parámetros de ajuste para la toma de datos, se estableció una distancia mínima entre trazas (o impulsos) de 5 cm, una ventana de tiempos (tiempo de retardo) de 200 ns y 550 muestras por traza.

Antes de interpretar cualquier tipo de datos de georradar es necesario realizar un **procesamiento** de los mismos mediante distintas técnicas de filtrado, con objeto de mejorar la “imagen” obtenida. En el caso particular del estudio del puente romano de Lugo, los datos fueron procesados con el software **ReflexW v.6.1**, y la **secuencia de filtrado** que se utilizó fue la siguiente:

1. Establecimiento del tiempo cero. Es necesario para el cálculo correcto de la profundidad a la que se sitúan los diferentes eventos registrados.
2. Filtros de frecuencia horizontales y verticales. Con ellos se pretende eliminar el “ruido” (interferencias), tanto interno como externo, que se superpone a los datos registrados por el equipo. En concreto, los filtros empleados fueron: un filtro temporal “dewow”, un filtro espacial “subtracting average” y un filtro paso-banda “butterworth”.
3. Ganancia. Se busca contrarrestar el efecto producido por la atenuación de la señal radar en los distintos medios a través de los cuales se propaga la señal georradar.

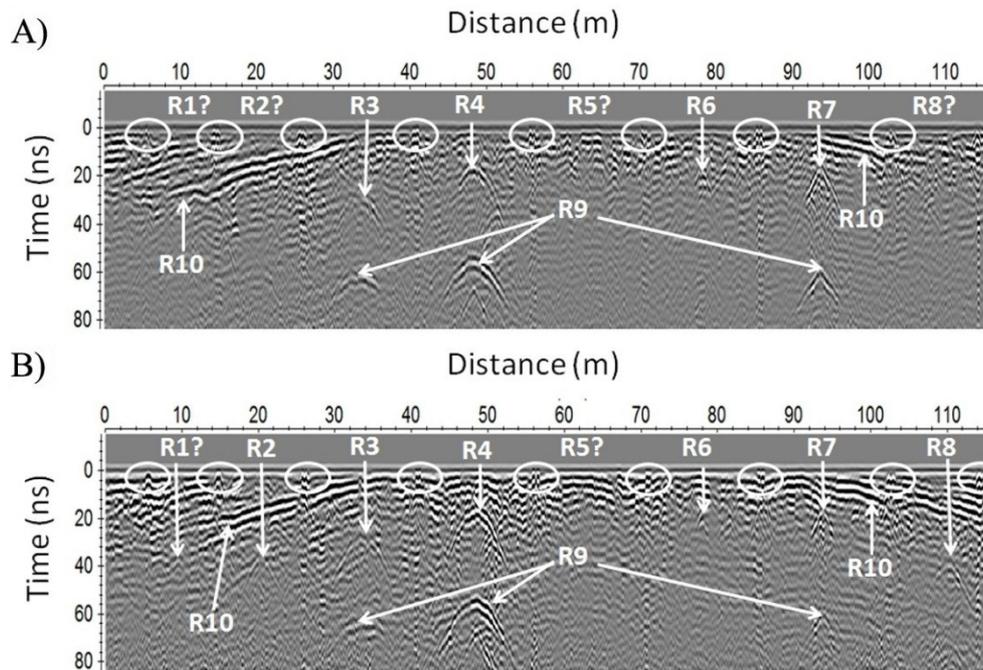


Fig. 14: Resultados GPR. Diversos radargramas obtenidos con la antena de 250 MHz en el puente romano de Lugo, señalando las diferentes respuestas o reflectores identificados (Arcos numerados de izquierda a derecha desde aguas arriba).

En la Figura 14 se puede apreciar el **distinto comportamiento de la señal radar en los arcos** del puente romano de Lugo (reflexiones de la R1 a la R8). Se observa una atenuación severa de la señal sobre algunos de los arcos, siendo las reflexiones producidas por la interfaz arco/aire únicamente identificadas con claridad para el caso de los arcos 3, 4 y 7 (en ambos radargramas). Las reflexiones debidas a la interfaz aire/agua también fueron identificadas bajo esos arcos (R9, en la Figura 14). La señal se muestra atenuada prácticamente por completo en el caso de los arcos 1, 2 y 5. Las reflexiones hiperbólicas señaladas en los círculos blancos indican la presencia de vigas de sustentación, entre las pilastras a ambos lados aguas arriba y abajo del puente, que fueron utilizadas para la ampliación de la plataforma de la carretera durante unas obras de rehabilitación llevadas a cabo en 1893. Se observa también un reflector constante que deja entrever el antiguo perfil alomado del puente, ligeramente inclinado (a ambos lados del puente, reflexión R10).

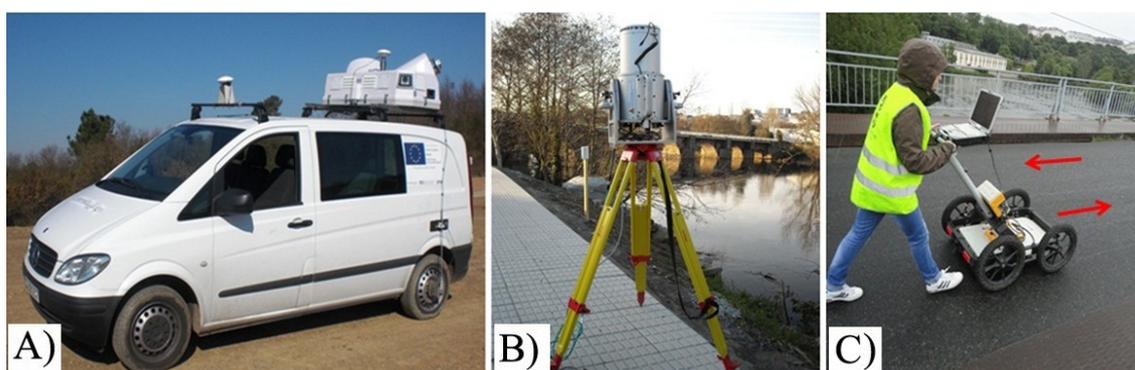


Fig.15: Adquisición multidisciplinar de datos en campo con los equipos de SITEGI, en diferentes configuraciones: Lynx Mobile Mapper (A), Láser escáner terrestre Riegl LMS-Z390i en el puente romano de Lugo (B) y Georadar Malå -antena de 250 MHz y unidad de control CU-II (C) -también en Lugo-.

3.7. Software de control SITEGI:

El proyecto SITEGI se completa con un **software específico de control y sincronización de todos los sistemas indicados**, que permite el **almacenamiento de los datos generados en una base de información georreferenciada (Sistema de Información Geográfica - GIS)**, la cual posibilita posteriores consultas y un análisis pormenorizado de los datos obtenidos. Se consigue con ello una **gestión adecuada del estado de las infraestructuras** y, en caso de ser empleado en obras en ejecución, de su grado de avance.

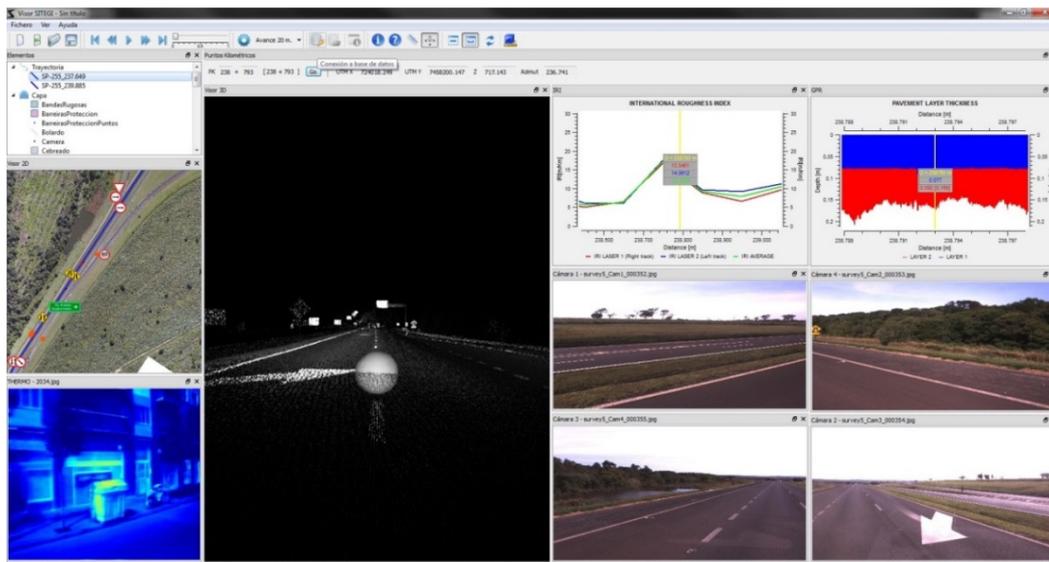


Fig.16: Ejemplo de **sincronización de datos provenientes de los distintos sensores de SITEGI** en base GIS, todos ellos referidos a la misma trayectoria.

El programa específico desarrollado *exprofeso* para el proyecto permite trabajar con las nubes de puntos obtenidas con el LiDAR, manipulándolas hasta reflejar en perfiles reales e imágenes 3D con propiedades fotogramétricas el estado de las infraestructuras monitorizadas. Entre otras ventajas, el empleo de los equipos de SITEGI posibilita disponer de:

- **Protocolos muy completos para el inventario detallado de infraestructuras:** Almacenamiento de la información obtenida en un completo GIS para la gestión de datos, visualización y análisis espacial, que incluye su localización, elementos y componentes, dimensiones, materiales, formas y período de construcción, datos de uso, historial de sobrecargas, inspecciones e intervenciones, propietarios o entidades gestoras, entre otros datos.
- **Las últimas metodologías de auscultación y documentación de infraestructuras,** mediante los sensores no destructivos integrados en la Unidad de Móvil de Inspección antes indicados.
- **Desarrollos y metodologías de evaluación estructural,** capaces de cuantificar la capacidad portante de las estructuras, detectando y localizando zonas críticas de daño y valorando su gravedad, con el uso de métodos específicos que también se han implementado en el software de control (método de los estados límite, programa de elementos finitos, etc.).

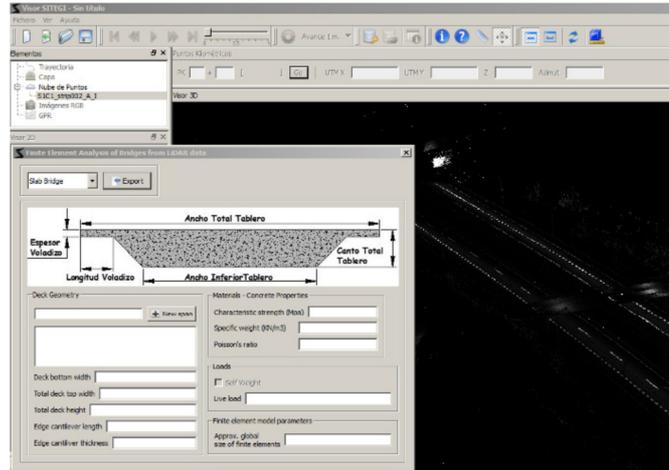


Fig.17: Integración de un módulo de modelización de puentes en el Visor SITEGI, junto con la representación de la nube de puntos de un paso elevado en la Autovía Ourense-Celanova.

- **Sistemas de identificación de requisitos de mantenimiento**, al recoger las patologías más habituales en este tipo de obras, que nos permiten priorizar las intervenciones de conservación futura y disminuir los costes asociados a ellas.

4. CONCLUSIONES.

Las tecnologías mostradas en este artículo, la mayor parte de ellas desarrolladas en los últimos 20 años, abren sin duda **nuevos horizontes en el campo del control y de la monitorización de las infraestructuras del transporte.**

Si ahora mismo el control por indicadores es lo último en los contratos de servicios de conservación y explotación de carreteras, creemos que las unidades de toma de datos automatizadas como la desarrollada en el proyecto SITEGI constituyen el futuro del sector. Y no solo por la automatización y alta productividad en la toma de datos, sino por la objetividad absoluta en cuanto a su captación.

De las tecnologías presentadas, los autores destacan especialmente dos, por las potencialidades que aportan:

- Los **equipos LiDAR** muestran una gran capacidad a la hora de proporcionar geometrías 3D de los objetos, sin necesidad de establecer un contacto directo con los mismos. El registro múltiple de diferentes tecnologías LiDAR (estática y móvil) permite obtener geometrías de precisión, como por ejemplo la correspondiente a la estructura completa del puente romano de Lugo. Además, el registro de diferentes nubes de puntos con imágenes de alta calidad permite la generación de documentación gráfica muy variada y precisa, como modelos 3D, planos 2D y ortofotografías, que representan un papel importante en lo que respecta a los propósitos de documentación y control de la vida útil de una infraestructura, o del patrimonio cultural histórico que suponen los puentes, viaductos, canales, etc. que pueblan nuestro territorio.
- Los resultados obtenidos con **georradar** confirman la efectividad de esta tecnología para la inspección no destructiva de infraestructuras del transporte, como son, por ejemplo, los puentes de arcos de fábrica (caso del puente romano de Lugo). Las técnicas de adquisición de datos GPR son capaces de revelar datos constructivos inéditos, no detectables a simple vista, y delimitar diferentes áreas atendiendo a las fábricas que constituyen estructuras como la mencionada, o zonas de daño situadas bajo la capa de rodadura de una carretera.



Fig. 18: Unidad Móvil de Inspección SITEGI con remolque definitivo para la implementación de antenas GPR.

5. BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA:

- **Annan, A.P.:** *Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications*, Mississauga: Sensors & Software Inc., (2003).
- **Armesto, J.; Roca-Pardiñas J.; Lorenzo, H.; Arias, P.:** *Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods*, *Engineering Structures* 32:607-615, (2010).
- **Daniels, D.J.:** *Ground Penetrating Radar, 2ª ed.* London: The Institution of Electrical Engineers, (2004).
- **De la Peña, J.M.:** *Alcance y organización de las obras públicas en el Imperio Romano. III Congreso de las Obras Públicas Romanas. Astorga, León (2006).*
- **González-Jorge, H.; González-Aguilera, D.; Rodríguez-Gonzálvez, P.; Arias, P.:** *Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners*, *Construction and Building Materials*, 31:119-128, (2012).
- **Lorenzo, H.; Rial, F.I.; Pereira, M.; Solla, M.:** *A full non metallic tráiler for GPR road surveys*, *Journal of Applied Geophysics* 75:490–497, (2011).
- **Martínez-Sánchez, J.; Nogueira, M.; González-Jorge, H.; Solla, M.; Arias, P.:** *SITEGI Project: Applying geotechnologies to road inspection. Sensor integration and software processing. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, 2013, ISPRS Workshop Laser Scanning. Antalya, Turkey (2013).*
- **Prego, F.J.; Caride, R.; Arias, P.; González-Jorge, H.; Puente, I.; Solla, M.:** *Aplicación de la unidad móvil de inspección "SITEGI" para el análisis y conservación del puente romano de Lugo. REHABEND-Congreso Latinoamericano, Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio. Santander (2014).*

- **Puente, I.; González-Jorge, H.; Riveiro, B.; Arias, P.:** *Accuracy of the Lynx Mobile Mapper system, Optics and Laser Technology 45:578-586, (2013).*
- **Puente, I.; Solla, M.; González-Jorge, H.; Arias, P.:** *Validation of mobile LiDAR surveying for measuring pavement layer thicknesses and volumes, NDT&E International 60:70–76, (2013).*
- **Solla, M.; Lagüela, S.; González-Jorge, H.; Arias, P.:** *Approach to identify cracking in asphalt pavement using GPR and infrared thermographic methods: Preliminary findings, NDT&E International 62:55–65, (2014).*
- **Vega-Avelaria, T.:** *El ejército y las obras públicas en el Imperio Romano. El desarrollo de las comunicaciones terrestres. Grupo Arqueológico Larouco (2008).*