

SISTEMAS AUTOMÁTICOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADOS A EXAMINAR PAVIMENTOS FLEXIBLES

AUTOMATED SYSTEMS FOR DATA ACQUISITION ORIENTED TO EXAMINE FLEXIBLE PAVEMENTS

Hernán Porras Díaz¹, Jorge Hernando Ramón Suárez², Yuri Hercilia Mejía Melgarejo³,
Javier Mauricio Parra Rodríguez⁴

Fecha de recepción: 1 de mayo de 2013

Fecha de aceptación: 5 de mayo de 2014

Referencia: H. Porras Díaz, J.H. Ramón Suárez, Y.H. Mejía Melgarejo, J.M. Parra Rodríguez. (2014). Sistemas automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 24 (1), pp. 79 - 98.

RESUMEN

En este documento se hace una revisión de los principales métodos de recolección de datos para inspección de condición de pavimentos. Se muestra el contexto en el que surge la importancia de este tipo de datos, seguido de la descripción de cada metodología destacada en la literatura. Los métodos se clasifican fundamentalmente en manuales y automáticos. El desarrollo tecnológico ha permitido implementar sistemas automáticos que cumplen las características para realizar esta tarea. Sin embargo, actualmente la metodología manual sigue siendo la más común.

Palabras clave: sistemas automáticos de adquisición de datos para inspección de pavimentos, imágenes digitales, reconstrucción tridimensional.

1. Ing. Civil, Ph.D., Profesor titular, hporras@uis.edu.co, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, director del grupo Geomática, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

2. Ing. Electricista, MsE., Profesor titular, jramons@uis.edu.co, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, investigador del grupo CPS, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

3. Ing. Electrónica, estudiante de maestría en Ingeniería, ymejia43@gmail.com, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, investigadora en los grupos Geomática y CPS, Bucaramanga, Colombia.

4. Estudiante de Ing. Electrónica, jamp2106@gmail.com, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, investigador en los grupos Geomática y CPS, Bucaramanga, Colombia.

ABSTRACT

This paper is a review of the main methods of data collection for pavement condition survey. The context in which this kind of data acquires its relevance is shown, as well as the description of each methodology outlined in the literature. Methods are primarily classified as manual and automated. Technological development has made possible to implement automated systems that meet the requirements for this task. However, the manual methodology currently remains as the most common.

Keywords: automated data collection for pavement condition survey, digital images, three-dimensional reconstruction.

INTRODUCCIÓN

No es difícil imaginar los problemas que causa la falta de movilidad en un país: desde llegar tarde al trabajo, hasta la escasez de abastecimiento. Pero controlar los procesos que intervienen en mantener las vías en buen estado no es tarea fácil. Por ello, se han creado los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS, por su sigla en inglés), término que originalmente empezó a usarse a finales de los años sesenta, a partir de los trabajos de investigación de la American Association of State Highway Officials (AASHO), la University of Texas y el Texas Transportation Institute.

Dentro de las tareas importantes en los PMS se encuentra la recolección de datos, incluidos los relacionados con el deterioro del pavimento, considerados como la información más valiosa para el análisis de rendimiento [1]. Las primeras formas de recolectar datos se basan en inspecciones visuales, en las que una comisión de ingenieros se encarga de recorrer las carreteras llenando formatos a mano [2-4]. A partir del desarrollo tecnológico,

se han implementado sistemas para captación y análisis de datos que agilizan los procesos de inspección.

Los métodos automáticos cuentan con la última tecnología de cada época, que inician con imágenes analógicas, siguen con captación de imágenes digitales y, finalmente, se utilizan sensores sin contacto como apoyo a los procesos de inspección [5].

Este trabajo pretende determinar cuál es la tendencia en la implementación de sistemas automáticos para recolección de datos en pavimentos, teniendo en cuenta el balance entre información confiable y eficiencia. Para esto se presenta la metodología de desarrollo del trabajo, una revisión de los PMS, seguida de la descripción de la etapa de adquisición de datos, en que se exponen algunas metodologías y se hace un estudio sobre los principales sistemas de adquisición automática encontrados en la literatura. Finalmente, se presentan las conclusiones.

1. METODOLOGÍA

En la selección de la bibliografía se tuvo en cuenta una división en temas específicos. En cuanto a fuentes primarias los temas son: gestión de pavimentos, manuales de evaluación de pavimentos y sistemas automáticos de inspección. Para las fuentes secundarias los temas son: sistemas comerciales, revisiones de técnicas de reconstrucción tridimensional y revisiones de estado del arte en sistemas automáticos para recolección de datos. A partir de esta división se analizaron trabajos de investigación desarrollados en universidades y agencias de transporte, que son descritos en informes o artículos en revistas científicas de electrónica, óptica y procesamiento de imágenes. Además, se incluyeron desarrollos comerciales de sistemas automáticos de inspección de pavimentos, información expuesta en su mayoría en las páginas web de las empresas.

2. SISTEMAS DE GESTIÓN DE PAVIMENTOS

El término Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS, por su sigla en inglés) empezó a usarse haciendo referencia a todo el rango de actividades que envuelve la construcción y el mantenimiento de los pavimentos. Para la *Organization of Economic and Cooperative Development* (OECD) [6], un PMS se define como el proceso

de coordinar y controlar un conjunto de actividades de mantenimiento, con el mejor uso de recursos. En el informe *Guidelines for Pavement Management Systems* de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [7], un PMS es un enfoque sistemático que provee las herramientas de análisis económico e ingenieril requeridas para la toma de decisiones costo-efectivas con respecto a las estrategias de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.

El proceso de mantenimiento de pavimentos consta de cuatro pasos: recolección de datos, modelos/análisis, criterios/optimización e implementación, tal y como se muestra en la Figura 1 [8]. El objetivo de la recolección de datos es mantener un registro de la condición actual de las vías de manera precisa y objetiva. Estos datos, recolectados a través de varios años, pueden analizarse para hacer modelos que permiten predecir la condición futura del pavimento [9]. Cuando se evalúan estos modelos para decidir las acciones apropiadas, es necesario definir un conjunto de niveles de intervención, de acuerdo con los tipos de datos recolectados [8]. Diversas soluciones son posibles cuando se requiere un trabajo de mantenimiento, cada una con su propia curva de desempeño. Por tanto, el siguiente paso es analizar los costos y los beneficios de las posibles estrategias, dentro de un periodo, estimadas las consecuencias de cierta implementación [6].

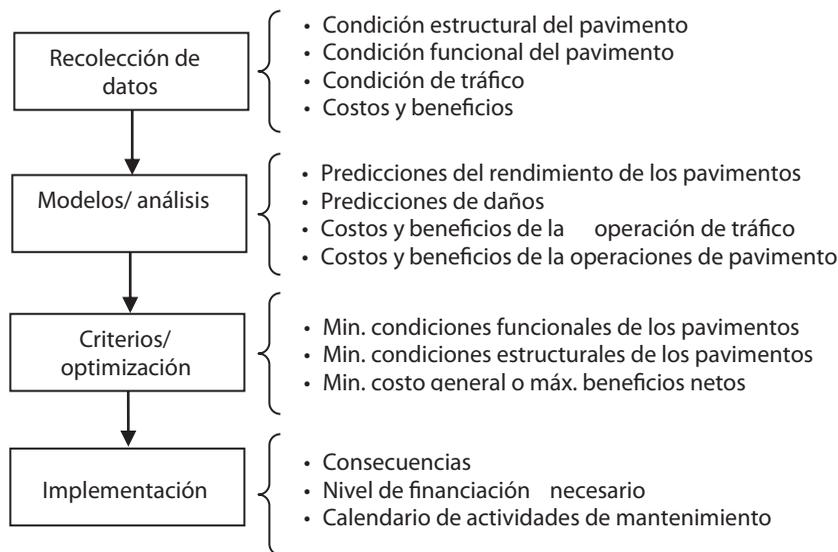


Figura 1. Etapas de un PMS.

Fuente: Adaptado del informe de Zheng et al. [8]

3. ADQUISICIÓN DE DATOS

La etapa de recolección de datos es de gran importancia dentro del ciclo de gestión de pavimentos, debido a que: es una de las tareas más costosas, la calidad de los datos tiene un efecto crítico en la toma de decisiones y la gestión de la calidad es necesaria para asegurar que los datos cumplan los requisitos que imponen los PMS [10].

Dentro de los datos concernientes a los PMS están los datos de inventario, que son de carácter permanente y solo cambian cuando se realizan actividades localizadas. Ejemplos de estos son la localización, el tipo de carretera, el tipo de pavimento, la geometría del pavimento y las secciones estructurales. También los datos de condición del pavimento, como rugosidad, agrietamiento, resistencia

antideslizamiento y otros defectos. Además, los datos de tránsito, que permiten conocer la distribución vehicular, el peso de los ejes de los vehículos y las velocidades de tránsito [11].

La recolección de datos de condición del pavimento es un componente clave en la gestión, pues proporciona la información más valiosa para el análisis de rendimiento del pavimento, lo que permite anticipar las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, establecer prioridades y asignar fondos [1]. Las primeras formas de recolectar datos se basan en inspecciones visuales, en las que una cuadrilla de ingenieros se encarga de recorrer las carreteras, observando, clasificando y llenando formatos específicos, de acuerdo con el método de evaluación que realice.

Por otro lado, los recientes avances en la tecnología informática en adquisición y procesamiento de imágenes digitales han proporcionado métodos para recopilar e interpretar la información requerida. En las siguientes subsecciones se expone cada metodología.

3.1. METODOLOGÍAS MANUALES

Hay dos métodos básicos para realizar una inspección manual de condición de pavimento, inspecciones a pie o a través del parabrisas [1]. En las inspecciones a pie, un evaluador camina por el lado de la vía y llena un formulario donde se registra la cantidad, la extensión y la gravedad de cada daño. Las inspecciones a través del parabrisas son efectuadas dentro de un vehículo que transita por la vía.

Mientras las inspecciones a pie son minuciosas e identifican de manera precisa los daños, tienen la dificultad del alto consumo de tiempo. Las inspecciones a través del parabrisas tienen la ventaja de inspeccionar un tramo mayor, sin el peligro que implica caminar por las vías. En los dos tipos de inspección manual se inspeccionan muestras del pavimento. Algunos de los tipos de selección de muestras son: una muestra con intervalo de distancia fijo, selección aleatoria predeterminada y que el evaluador seleccione una muestra representativa.

Para estandarizar la clasificación de los tipos de daños y su gravedad se ha elaborado una serie de manuales de inspección. En la

Tabla 1 se hace una comparación entre los principales manuales en la literatura. En todos los manuales se clasifican y describen los tipos de daños y se especifican las unidades de medida. Sin embargo, no todos ofrecen la recomendación de un índice de condición del pavimento ni la metodología para seleccionar muestras. La mayoría sugiere formularios para registrar los datos de evaluación y, por ejemplo, el manual del *South Dakota Department of Transportation-USA* explica la utilización de un *software* que funciona como formulario digital.

En Colombia, el método de inspección más utilizado es seguir el manual para la inspección visual de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías, Invías. Sin embargo, también se han usado el manual *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys* y el *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program* [12].

Un caso de estudio es el diagnóstico de pavimentos sobre la malla vial de Bogotá D.C. realizado entre los años 2002 y 2007. La información básica obtenida incluyó longitudes y anchos de calzadas, tipos de superficie del pavimento, fallas, información de IRI, asignación de tráfico, entre otros. En este caso, para la evaluación superficial, los contratistas debieron utilizar el cálculo del PCI, basado en los resultados de un estudio visual de la condición del pavimento, identificando el tipo, la extensión y la gravedad del daño, y a partir de este índice se representan la integridad estructural y la condición de operación superficial [13].

Tabla 1. Principales manuales de inspección de daños en pavimentos

Manual	Registro de inspección	Muestras	Índices	Entidad que elaboró el manual	Ref.
Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (LTPP)	Formularios	No	No	US Department of transportation - Federal Highway Administration	[4]
Instructivo de inspección visual de caminos pavimentados	Formularios	Sí	No	Gobierno de Chile - Departamento de Gestión Vial	[14]
Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras	No	No	No	Consejo Sectorial de Ministros de Transporte de Centro América - Secretaría de Integración Económica Centroamericana	[15]
Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria	Formularios	No	No	Ministerio de transporte Colombiano - Pontificia Universidad Javeriana	[3]
Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles	Formularios	No	No. Descripción del análisis de los datos	Ministerio de Transporte - Instituto Nacional de Vías - Universidad Nacional de Colombia	[2]
Pavement distress survey manual	No	No	No	Oregon Department of Transportation - US A	[16]
Standard practice for roads and parking lots pavement condition index survey s	Formularios	No	PCI	American Society for Testing and Materials (ASTM)	[17]
SDDOT' s enhanced pavement management system visual distress survey manual	Formularios digitales y en papel	Sí	Pavement defitient index	South Dakota Departmet of Transportation - US A	[18]

3.2. SISTEMAS AUTOMÁTICOS

A partir del desarrollo tecnológico de diferentes sensores, se han implementado sistemas que permiten la recolección automática de datos relacionados con el estado del pavimento. En una inspección automática, los datos son captados por algún tipo de sensor acoplado a un vehículo. Posteriormente, pueden ser analizados por expertos en oficina: sistemas semiautomáticos o procesados

directamente por el sistema: sistemas completamente automáticos [19-20].

El primer enfoque en la adquisición de datos es el uso de imágenes con tecnología analógica. Con el auge de la tecnología digital, se incluyeron en los vehículos de inspección cámaras digitales de dos tipos: cámara de escaneo por área y cámara de escaneo por línea. Finalmente, se incorporan sensores sin contacto que proporcionan datos tridimensionales [5-20].

3.2.1. Captación de imágenes analógicas

En el proceso analógico las imágenes se graban en la superficie de una película por medio de cambios químicos, mecánicos o magnéticos. En la captación de imágenes de pavimentos, los procesos analógicos más utilizados son la película fotográfica de 35 mm y la cinta de video [5].

A pesar de que una señal analógica de video puede ser transmitida y copiada usando poco ancho de banda, es difícil de manipular sin que se introduzca ruido en la imagen original. Además, su integración con otro tipo de datos resulta compleja, a menos de que se cuente con un equipo de producción de video de gama alta. Por otro lado, la resolución de una señal de video analógico es baja comparada con algunas alternativas digitales [20].

El emplear películas fotográficas de 35 mm en inspección de pavimentos fue el método adoptado por el programa LTPP de la *Federal Highway Administration* (FHWA). En este caso, en lugar de captar un fotograma a la vez, la película usada es expuesta continuamente a la superficie del pavimento en movimiento. La frecuencia de muestreo usada en la digitalización de estas imágenes es de 2048 píxeles en dirección transversal y cuantificación de 8 bits [21]. Algunas agencias eligen el método de la cinta de video, por lo general del estándar S-VHS [5].

Las películas fotográficas o las cintas de video no tienen una resolución equivalente a una imagen digital. Para convertir la

información analógica, se requiere un proceso denominado digitalización. En el caso de las películas fotográficas, se emplea un escáner. Según la experiencia del LTPP, la resolución adecuada para digitalizar sus imágenes analógicas es de 2048 píxeles [20].

3.2.2. Captación de imágenes digitales

Con el avance de la tecnología digital, los computadores realizan complejos procesos y almacenan gran cantidad de datos, lo que origina el desarrollo de áreas como procesamiento de imágenes y visión por computadora. La representación de una imagen requiere millones de datos y sin la capacidad de almacenar o procesar esta información sería imposible hablar de imágenes digitales [22].

Una imagen digital es una foto electrónica conformada por una cantidad de elementos denominados píxeles. A cada píxel se le asigna un valor relacionado con el tono (matices de gris o color), y se representa por un código binario. Los dígitos binarios (bits) para cada píxel son almacenados en la computadora. Después, ésta interpreta la información para mostrar la imagen [23].

Generalmente, las cámaras digitales utilizan sensores tipo CCD (del inglés *Charge-coupled device*) y CMOS (del inglés *complementary metal-oxide-semiconductor*), que realizan una función de muestreo espacial a partir de la acumulación de carga proporcional a la intensidad de luz en cada píxel. En la Figura 2 se expone la diferencia entre las dos arquitecturas.

Cuando se completa la exposición, el sensor CCD transporta cada paquete de carga del píxel secuencialmente a una estructura de salida común; allí se orienta y envía fuera del chip. En el sensor CMOS, la conversión

de carga a voltaje se realiza en cada píxel. Estas diferencias en la lectura y en la salida de datos generan significantes cambios en la arquitectura, capacidades y limitaciones de cada tecnología [24].

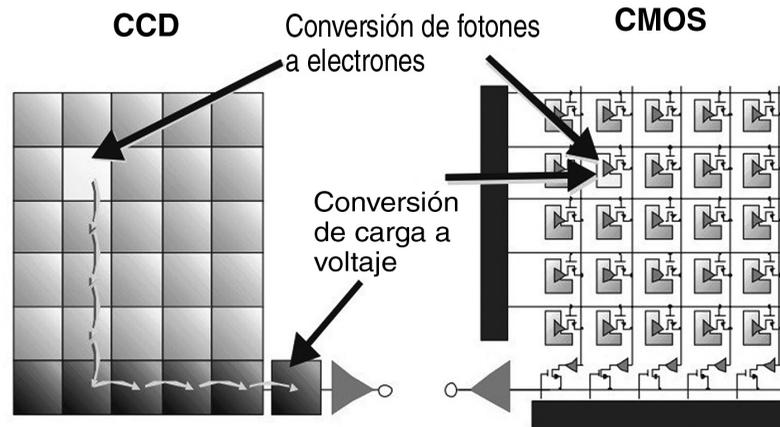


Figura 2. El sensor CCD mueve la carga generada de píxel en píxel y la convierte a voltaje en un nodo de salida. El sensor CMOS convierte la carga a voltaje dentro de cada píxel.

Fuente: DALSA Corp., 2002 [24]

En general, los sensores CMOS ofrecen una integración superior, menor disipación de potencia y tamaño del sistema a costo de menor calidad en la imagen. Este tipo de sensor se elige en condiciones de espacio reducido y cuando la imagen tiene bajos requerimientos en calidad. Por otro lado, los sensores CCD ofrecen mejor calidad en las imágenes, a expensas del tamaño del sistema. Son la tecnología preferida en aplicaciones como fotografía digital, industria e imágenes médicas y científicas [25].

Dentro de los parámetros que se tienen en cuenta para aplicaciones de tecnología

digital en pavimentos se encuentran: tiempo de integración, rango dinámico, profundidad de bit y resolución.

- Tiempo de integración: Se refiere al tiempo en el que los píxeles están acumulando carga (luz).
- Rango dinámico: Describe la relación entre la máxima y la mínima intensidad de luz medidas en el sensor (blanco y negro, respectivamente).
- Profundidad de bit: cantidad de bits utilizados para definir cada píxel. Es proporcional a la cantidad de tonos que pueden ser representados.

- Resolución: Es la frecuencia espacial con que se muestrea la escena. Se determina por el número de píxeles leídos en una longitud dada de la escena.

Cuando se emplea una cámara de alta resolución en inspección de pavimentos es necesario integrarla con lentes gran angulares. La desventaja de estos lentes es que pueden resultar imágenes con bordes oscurecidos y con aberraciones ópticas, problemas que pueden ser disminuidos con el uso de *software* de corrección o iluminando los bordes de la escena.

El parámetro de resolución está directamente relacionado con el ancho de las grietas que pueden ser detectadas. Así, por ejemplo, una cámara de 1300 píxeles en dirección transversal al pavimento podrá detectar

grietas de hasta 3 mm de ancho, mientras que una de 4096 píxeles, de hasta 1mm.

Existen dos tipos de cámaras empleadas para digitalizar las imágenes de pavimento, conocidas como cámara de escaneo por área y cámara de escaneo por línea. En la Tabla 2 se hace una descripción de cada enfoque. Debido a los problemas de iluminación, sincronización con la velocidad y montaje de las cámaras de escaneo por área, para las aplicaciones de pavimentos se han seleccionado en su mayoría cámaras de escaneo por línea. Este tipo de cámaras sincroniza la rata de escaneo y la velocidad del vehículo por medio de una señal de activación externa, produce imágenes de longitud ilimitada a una rata de datos más elevada que las cámaras de escaneo por área.

Tabla 2. Comparación de cámaras de escaneo por línea y por área.

	De escaneo por línea	De escaneo por área
Descripción general	El sensor está compuesto por una sola fila de píxeles . Las imágenes se construyen a partir de la secuencia de filas que capta al escanear la escena	El sensor tiene una gran matriz de píxeles, de manera que una imagen bidimensional puede ser generada en un solo ciclo de exposición
Características [26-28]	<ul style="list-style-type: none"> • No hay limitación de resolución vertical • Capta una nueva línea mientras se terminan de transmitir los datos de la anterior, lo que genera alta velocidad de adquisición • No tiene área de interés específica • Sincronización de velocidad de captación con velocidad de la escena 	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución fija para toma de imágenes en un área definida • Capta una nueva imagen hasta que termina de transmitir la anterior • Posibilidad de configurar la captación de regiones de interés en la escena • Utilizada principalmente por su alta resolución en detalle y en conjunto
Aplicación en pavimentos [29]	<ul style="list-style-type: none"> • Facilita la sincronización entre la rata de escaneo y la velocidad del vehículo por medio de una señal de activación externa • Producen imágenes de longitud ilimitada a una rata de datos considerablemente más elevada que las cámaras de escaneo por área 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere una larga extensión en el montaje para que su campo de visión no sea obstruido • Reduce la rata de captación de datos y limita la velocidad del vehículo. • Dificultad debido a la iluminación no uniforme del área de escaneo

3.2.3. Captación de datos tridimensionales

La necesidad de modelar un objeto ha impulsado el desarrollo de técnicas para determinar su geometría por medio de reconstrucciones. Reconstruir tridimensionalmente un objeto es tomar información de su superficie, desde una o

varias posiciones en el espacio, y originar un modelo digital en un sistema específico de coordenadas. Hay diferentes métodos de captación de datos tridimensionales. Se destacan aquellos que no requieren contacto con el objeto y explotan fenómenos ópticos. La Tabla 3 presenta un resumen de algunos de ellos.

Tabla 3. Clasificación de algunos métodos de reconstrucción tridimensional

Característica principal	Método	Descripción		Principales dispositivos
Medida de fase	Moirè	Un objeto se reconstruye a partir de la proyección de patrones de Moirè sobre su superficie; se relaciona este patrón con la deformación que le causa el objeto. Estos patrones son formados por medio de la interferencia que se origina cuando se superponen dos rejillas de diferentes formas, con ángulos determinados.		Proyectores y cámaras digitales
	Interferometría	Hace uso del principio de superposición de ondas. Consiste en cambiar el camino óptico de una onda y obtener información de la interferencia		Fuente de ondas coherentes y receptores
Luz estructurada	Sistema de punto y línea	Se proyecta una rejilla de puntos, líneas verticales, matriz de líneas o de cuadros sobre el objeto, y se capta la deformación mediante cámaras fotográficas	Teniendo en cuenta la geometría entre la fuente y la cámara, se reconstruye la imagen, (principio de triangulación)	Cámaras digitales y proyectores
	Escaneo láser	Proyección de líneas láser sobre el objeto. Mediante una cámara, se capta la deformación que se produce en la línea láser		Láser y cámara digital
Estereoscopia		Consiste en tomar múltiples imágenes del objeto en diferentes posiciones, sin cambio de iluminación o sombra, con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, puntos que son una referencia importante a la hora de la reconstrucción		Cámaras digitales
Tiempo de vuelo		Se emiten ciertos tipos de onda sobre el objeto y se mide el tiempo que demora en rebotar la señal; con estos tiempos, se hace la reconstrucción a partir de las distancias		Fuentes, lectores infrarrojos, etc.

Fuentes. [30-36]

El principio básico de estos métodos es la capacidad actual de los sistemas de procesamiento de imágenes que permiten realizar reconstrucciones basados en cambios en proyecciones, como el caso de la luz estructurada; fotografías a diferentes ángulos, como en estereopía; o medidas de interferencia, en interferometría o moirè.

La mayoría de defectos en la superficie del pavimento tienen características tridimensionales únicas, tanto en la

superficie como en profundidad. Por ello se ha prestado especial atención al desarrollo de sistemas que permitan realizar reconstrucción de pavimentos. A pesar de que se han implementado algunos sistemas, no se han conseguido detectar ni clasificar todos los daños de manera totalmente automática, pues aún se requiere una cantidad sustancial de posprocesamiento y de intervención manual [20]. En la Figura 3, se muestra un ejemplo de una imagen tridimensional de pavimento.

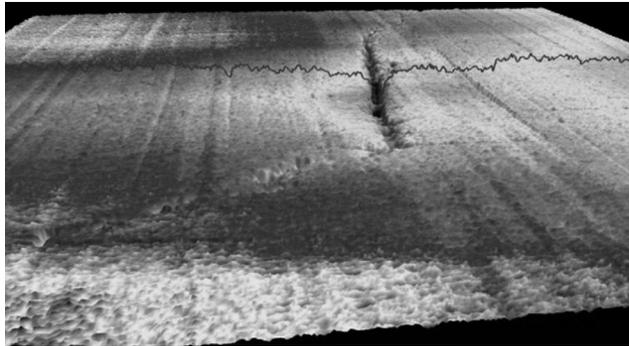


Figura 3. Ejemplo de reconstrucción tridimensional de una superficie pavimentada.

Fuente: Wang et al. [20].

Recientemente, se han realizado proyectos para escaneo láser de pistas en aeropuertos [37-38]. En estudio de suelos, específicamente del subsuelo de los pavimentos, se han implementado radares para indicar su estado y también el grosor del pavimento [39].

3.2.4. Sistemas comerciales

En diferentes países, el estudio y la prevención del estado de las vías es un tema muy importante y se han desarrollado sistemas automáticos para la inspección de pavimentos. En la Figura 4 se muestran algunas configuraciones

comerciales instaladas en vehículos tipo furgoneta, que permiten una adaptación sencilla de los instrumentos de inspección y la ubicación de elementos de sincronización o procesamiento en la zona de carga del vehículo.

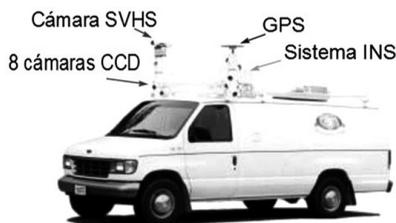
Los dispositivos que conforman este tipo de sistemas podrían dividirse de acuerdo a dos funciones: de localización y de inspección del estado de las vías. Dentro de los dispositivos de localización se destacan el sistema de posicionamiento global GPS, el codificador rotatorio, giróscopos, acelerómetros y sistemas de navegación inercial.



(a) Laser Road Imaging System (LRIS)



(b) ARAN 9000



(c) Mobile Mapping Technology for Road Network Data Acquisition



(d) Laser Crack Measurement System (LCMS)

Figura 4. Diversos sistemas automáticos de adquisición de datos en pavimentos.

Fuentes: [40-43]

Los sistemas cuentan con al menos uno de los dispositivos de posicionamiento, ya sea para sincronizar la toma de datos o para agregar metadatos de localización. En la Tabla 4 se presentan algunos sistemas comerciales. Los dispositivos declarados allí son solo una muestra, debido a que los desarrolladores no describen de manera detallada los elementos que utilizan. Estos sistemas tienen cámaras digitales para toma de imágenes y es evidente la inclusión de tecnología láser, en principio, para iluminación de la escena con el uso de cámara de escaneo por línea y, después, con el propósito de realizar reconstrucciones tridimensionales siguiendo la técnica de luz estructurada.

Dentro de los sistemas de reconstrucción tridimensional se destaca el sistema LCMS (por sus siglas en inglés, *Laser Crack Measurement System*), compuesto de dos perfilómetros láser tridimensionales capaces de medir los perfiles transversales de una carretera con una resolución de 1 mm. Este sistema recopila información de intensidad, así como información geométrica (tridimensional) de la superficie del pavimento, lo que permite caracterizar y mostrar imágenes junto con la forma (textura) del pavimento [43]. En Colombia la empresa Gevial [44] se destaca por acoplar a sus vehículos sensores comerciales como el LRIS para la toma de imágenes en superficies pavimentadas.

Tabla 4. Sistemas comerciales de adquisición de datos automático en pavimento.

Desarrollador, país	Nombre	Dispositivos
CSIRO, Australia [45]	<i>Automated detection of road cracks</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cámaras digitales de alta velocidad • Reflector especial de luz • Computadores a bordo para detección de daños en tiempo real
G.I.E. Technologies, Canadá [46]	<i>Image capture system</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara digital a color con máxima resolución de 1280x980 • Arreglos de filtros de color • Filtros que previenen la reflexión de la luz en las cámaras • <i>Software</i> para el control del sistema óptico
Inclusión del láser en los sistemas		
Fugro Roadware, Estados Unidos y Canadá [41]	ARAN	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 6 cámaras digitales de 1920x1080 píxeles • Cámara digital de escaneo por línea • Láseres
YZ Technology, India [47]	<i>Laser RST Portable System</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sensores láser • Fotocelda
Pathway Services Inc, Estados Unidos [48]	Pathway 3D	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara digital de escaneo por área de alta resolución para captación de imágenes y perfiles tridimensionales de la vía • Proyector de línea láser
Pavementrics, Canadá [40], [49]. International Cybernetics, Estados Unidos [50]	<i>Laser Road Imaging System (LRIS)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara digital de escaneo por línea • Sistema de proyección láser para iluminación
Pavementrics, Canadá [43]	<i>Laser Crack Measurement System</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara digital de escaneo por área de alta velocidad para captación de imágenes y perfiles tridimensionales de la vía • Óptica configurable • Proyector de línea láser
Vectra, Francia [51]	AMAC	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara digital de escaneo por línea • Sistema de proyección láser para iluminación • Sistema para medir un perfil transversal de 4m con 1280 puntos por sección y resolución vertical de 1 mm
W.D.M. Limited, Reino Unido [52]	<i>Road Assessment Vehicles (RAV)</i>	<p>No especifica los equipos que utilizan, sino las medidas que entregan, entre estas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rugosidad en la ruta de la rueda izquierda • Textura en la ruta de las ruedas y en el centro • Medida de profundidad por medio de 20 sensores que cubren 3,2m de ancho • Registro de video con imágenes cada 5m

3.2.5. Sistemas prototipo

La Tabla 5 presenta un recuento de sistemas prototipo. Se resalta que la mayoría de desarrollos realizan integración tecnológica de sensores, gran

parte en imágenes digitales del pavimento. Aunque se ha despertado el interés en la inspección tridimensional, son pocos los trabajos al respecto en comparación con el desarrollo en adquisición y procesamiento de imágenes.

Tabla 5. Sistemas prototipo de adquisición de datos automático en pavimento.

Desarrollador	Nombre	Descripción
Wang, K.C.P., Gong, W.G., Li, X.Y., Estados Unidos [53-54]	Digital Highway Data Vehicle (DHDV)	<ul style="list-style-type: none"> • Dos cámaras digitales con resolución de 1300x1024 píxeles • Cuatro luces estroboscópicas • Velocidad de recopilación y análisis de los datos por encima de 96,55km/h (60 mph) • Software de procesamiento de imágenes en tiempo real llamado <i>Automated Distress Analyzer (ADA)</i>
Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, México [55]	Detección de grietas en la cinta asfáltica mediante análisis de imágenes	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara lineal PiranhaP2-45-04K40-10E marca DALSA • Un sensor de posición angular • Sistema de posicionamiento global, GPS • Software de programación: MatLab R2008a o ImageJ 1,42q
Department of Civil and Environmental Engineering University of Catania, Italia [56]	Evaluation Of Pavement Surface Distress Using Digital Image Collection And Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara de video digital (sensor CMOS), resolución de 1288x1032 píxeles, frecuencia de adquisición en 9,3 fps • Sistema de posicionamiento global, GPS • Algoritmo de interpolación bilineal
Chang'an University Xi'an, China [57]	Pavement Crack Classification based on Chain Code	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara de escaneo por línea Basler L402k resolución 4080
The University of Texas at Austin. Xu, B. Huang, Y. [30]	TxDOT Pavement Inspection Vehicle	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara de escaneo por línea Dalsa Piranha2, con resolución de 2.048 píxeles • Tarjeta de captación de imágenes. • Sistema de posicionamiento global, GPS
University of Connecticut, Connecticut Transportation Institute [58]	A laser-based 3D data acquisition system for the analysis of pavement distress and roughness	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema láser tridimensional con método de interferometría
The University of Tennessee, Knoxville [59]	3D Modeling of Road Surface using an Integrated Multisensory Approach	<ul style="list-style-type: none"> • Sensor de rango Sick LMS 200 • Cámara de video digital • Unidad inercial de medida Xsens MT9 • GPS Leica 500
National Optics Institute [60]	Road surface inspection using laser scanners adapted for the high precision 3D measurements of large flat surfaces	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración óptica para escaneo con proyección de dos láseres
Universidad Industrial de Santander [61]	Automatic system for images acquisition of roads pavement	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara lineal Piranha 2, 4096 píxeles, marca DALSA • Sistema óptico Distagon de 28 mm • Tarjeta de captación de imágenes PIXCI EC1 • Codificador rotatorio relativo de 2500 PPR • Computador Notebook robusto Getac B300

En Colombia se destaca la iniciativa de Porras et al. [61] de implementar un sistema de toma de imágenes en una camioneta Toyota Hilux 4x4. Para esto, se realiza la integración de una cámara líneal, con un sistema óptico para captar 4 m de calzada; un codificador rotatorio, que se acopla a una llanta del vehículo; un computador portátil y una tarjeta de captación de imágenes. El resultado es un sistema que con una sola cámara de escaneo por línea adquiere imágenes que cubren 4m de ancho, con una precisión de 1 mm y escaneos de hasta 1 km sin detener el vehículo.

Los esfuerzos en la automatización del proceso de inventario de daños se han enfocado en el procesamiento de imágenes. El uso de proyectores láser (complementados con acelerómetros) permite tomar medidas del perfil longitudinal y transversal de la vía para evaluar la rugosidad y la profundidad de algunas de las patologías como el ahuellamiento.

Existe el reto de continuar explotando la información tridimensional con la implementación de sistemas confiables enfocados en una clasificación consistente de daños desde dos enfoques: la integración de sensores y el desarrollo de nuevas propuestas, como por ejemplo la adquisición compresiva de datos.

4. CONCLUSIONES

La etapa de recolección de datos es fundamental en los sistemas de gestión de pavimentos, pues es la que nutre todo el

ciclo. Debido a su importancia, ha sido difícil la aceptación de sistemas que reemplacen la recolección efectuada por expertos en campo. Por esto, actualmente la recolección manual es el método más común, a pesar de los beneficios en seguridad, eficiencia y objetividad que podrían proveer los métodos automáticos.

Los esfuerzos realizados en investigación para automatizar la adquisición de datos han llevado al desarrollo de sistemas completos y se destaca en su mayoría el uso de cámaras digitales para captación de imágenes. Aunque no se observa una tendencia clara en el uso de un tipo de cámara, se infiere que para inspección de pavimentos los desarrolladores han optado por adquirir imágenes digitales con cámaras de escaneo por línea, algunas veces con aumento de la calidad con el uso de láseres como fuente de iluminación.

Los problemas de sombras y aberraciones que se tienen con las imágenes y el contar con mayor información de la superficie ha despertado el interés de los investigadores en el desarrollo de sistemas que implementen métodos de reconstrucción tridimensional enfocados a la inspección de daños. Aunque existen desarrollos en el tema, no se ha obtenido la misma acogida que las imágenes digitales, probablemente por la mayor cantidad de datos por procesar y almacenar. Por lo tanto, investigaciones en compresión desde la adquisición de los datos son importantes para la evolución de los sistemas de inspección automática de pavimentos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias, especialmente a la convocatoria de jóvenes investigadores e innovadores, quienes apoyaron el trabajo de la ingeniera Yuri Hercilia Mejía, una de las autoras de este documento.

REFERENCIAS

- [1] Timm, D.H. & McQueen, J.M. (2004). A Study Of Manual Vs Automated Pavement Condition Surveys. Alabama, EE.UU: Auburn University.
- [2] Universidad Nacional de Colombia e Instituto Nacional de Vías. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá, Colombia: UNAL e INVÍAS.
- [3] Figueroa, A.S., Flórez, C.F., León M.P. & Muñoz E.E. (2007). Manual para el mantenimiento de la red vial secundaria (pavimentada y en afirmado). Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte y Pontificia Universidad Javeriana.
- [4] Miller, J.S. & Bellinger, W.Y. (2003). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program (4 ed.). Virginia, EE.UU.: Office of Infrastructure Research and Development y Federal Highway Administration.
- [5] Transportation Research Board. (2004). Automated Pavement Distress Collection Techniques, vol. 334. Washington, D.C, EE.UU.: Transportation Research Board National Research.
- [6] OECD Expert Group. (1987). Pavement Management Systems. París, Francia.
- [7] AASHTO. (1990). Guidelines for Pavement Management Systems. Washington, D.C., EE.UU.
- [8] Zheng Q. & Racca D. (1999). Support of Pavement Management Systems At The Delaware Department of Transportation. Delaware, EE.UU.: Center for Applied Demography & Survey Research.
- [9] Mills L., Attoh-Okine N. & McNeil S. (2012). Developing Pavement Performance Models For Delaware. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, D.C., EE.UU.
- [10] Flintsch, G. W. & McGhee, K. (2009). Quality management of pavement condition data collection, vol. 401. Washington, D.C., EE.UU.: Transportation Research Board National Research.
- [11] Leiva, F. (2005). Sistemas de soporte para la toma de decisiones en la administración de carreteras. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- [12] Suárez Ordoñez, J.J. (2005). Análisis comparativo de los métodos para la evaluación de defectos de los pavimentos y su aplicabilidad en carreteras colombianas. Bucaramanga, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- [13] Ríos, J. & Martínez, I. (2009). Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

- [14] Departamento de gestión vial. (2004). Instructivo de inspección visual de caminos pavimentados. Chile: Ministerio de obras públicas Gobierno de Chile.
- [15] Coronado, J. (2000). Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras. Guatemala: Consejo sectorial de ministros de transporte de Centro América y Secretaría de integración económica centroamericana.
- [16] Oregon Department of Transportation. (2010). Pavement Distress Survey Manual. Oregon.
- [17] ASTM. (2004). Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. EE.UU.: ASTM International.
- [18] South Dakota Department of Transportation. (2009). SDDOT'S Enhanced Pavement Management System, Visual Distress Survey Manual. South Dakota, EE.UU.: Department of Transportation.
- [19] Cline, G.D. & Shahin, M.Y. (2003). Automated data collection for pavement condition index survey. EE.UU.: Naval Facilities Engineering Service Center, USA ERDC Construction Engineering Research Laboratory.
- [20] Wang, K.C.P. & Smadi, O. (2011). Automated Imaging Technologies for Pavement Distress Surveys. Washington, D.C., EE.UU.: Transportation Research Board of the national academies. Circular número E-C156.
- [21] U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration. (2006). Study of Long-Term Pavement Performance (LTPP): Pavement Deflections. Recuperado en marzo de 2013, de <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/06109/paper2.cfm>
- [22] Umbaugh, S. (1998). Computer vision and image processing. EE.UU.: Prentice Hall PTR, pp. 3-35.
- [23] Universidad de Cornell. (s.f.). Tutorial de Digitalización de Imágenes. Recuperado en marzo de 2013, de <http://www.library.cornell.edu/preservation/tutorial-spanish/contents.html>
- [24] DALSA. (2002). Image Sensor Architectures for Digital Cinematography. Waterloo, Canadá: DALSA Corp.
- [25] Litwiller, D. (2001). CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. Photonics Spectra. Laurin Publishing Co. Inc.
- [26] Newton Labs. (s.f.). Comparing Line Scan and Area Scan Technologies. Recuperado en febrero de 2013, de http://www.newtonlabs.com/line_systems.htm
- [27] Industrial Control System. (s.f.). Area Scan Cameras and Line Scan Cameras. Recuperado en febrero de 2013, de <http://www.ics-uk.net/technology/technology3.asp>
- [28] Stemmer Imaging. (s.f.). Quality right down the line. Recuperado en febrero de 2013, de <http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/technical+tips/1100-Line-scan-cameras>

- [29] Xu, B. & Huang, Y., (2003). Development of an automatic pavement surface distress inspection system. Texas, EE.UU.: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- [30] Nikolaidis, N. & Pitas, I. (2001). 3-D Image Processing Algorithms. EE.UU.:Wiley-Interscience, pp. 1-11 .
- [31] Chen, F., Brown, G.M. & Song, M. (2000). Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Optical Engineering*, 39, pp. 10-22.
- [32] Bradshaw, G. (1999). Non-contact surface geometry measurement techniques. Dublin, Irlanda: Image Synthesis Group, Trinity College.
- [33] Curless, B. (1997). New Methods for Surface Reconstruction from Range Images (Tesis doctoral inédita). Stanford University, Stanford, EE.UU.
- [34] Ramírez Rojas, J.C., (2011). Reconstrucción tridimensional de la sección transversal de perfiles extruidos utilizando triangulación láser (Tesis de maestría inédita). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- [35] Acosta, D., García, O. & Aponte, J. (2006). Laser triangulation for shape acquisition in a 3D scanner plus scanner. Conference in Electronics, Robotics and Automotive Mechanics. Cuernavaca, México.
- [36] Franca, J., Gazziro, M., Id,e A., & Saito, J. (2005). A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view. IEEE International Conference on Image Processing. Francia, pp. 3-6.
- [37] Pavemetrics. (2010). Laser FOD Detection System (LFOD). Recuperado en abril de 2013, de <http://www.pavemetrics.com/en/lfod.html>
- [38] LASEROPTRONIX. (2010). Fod detection system. Recuperado en abril de 2013, de <http://www.laseroptronix.se/airpor/foddetector.html>
- [39] GSSI. (s.f.). Ground Penetrating Radar for Road Structure Evaluation and Analysis. Recuperado en enero de 2013, de: <http://www.geophysical.com/roadinspection.htm>
- [40] Pavemetrics. (s.f.). LRIS - Laser Road Imaging System. Recuperado en noviembre de 2012, de <http://www.pavemetrics.com/en/lris.html>
- [41] Fugro Roadware Inc. (s.f.). ARAN 9000. Recuperado en enero de 2013, de <http://www.roadware.com/products/9000/>
- [42] Tao, C. (2000). Mobile mapping technology for road network data acquisition. *Journal of Geospatial Engineering*, 2(2), pp. 1-13.
- [43] Pavemetrics. (s.f.). LCMS - Laser Crack Measurement System. Recuperado en febrero de 2013, de <http://www.pavemetrics.com/en/lcms.html>
- [44] GEVIAL SAS. (s.f.). Ingeniería y Gestión Vial. Tecnología aplicada a la ingeniería. Recuperado en febrero de 2013, de <http://gevial.co/brochure.pdf>
- [45] CSIRO. (s.f.). RoadCrack system. Recuperado en abril de 2013, de <http://www.csiropedia.csiro.au/display/CSIROpedia/RoadCrack+system>

- [46] GIE Technologies. (s.f.). Image capture system. Recuperado en marzo de 2013, de http://www.gieinc.ca/main_en.html
- [47] YZ Technology. (s.f.). Laser RST System. Recuperado en noviembre de 2012, de <http://www.yztechnology.com/products4.html>
- [48] Pathway Services Inc. (s.f.). Pavement Surface Imaging With Depth for Rutting, Cracking and Faulting. Recuperado en marzo de 2013, de http://www.pathwayservices.com/3D_imaging.shtml
- [49] Oliveira, H. & Correia, P. (agosto, 2009). Automatic Road Crack Segmentation Using Entropy And Image Dynamic Thresholding. European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 17(24-28), Glasgow, Escocia, pp. 622-626.
- [50] International Cybernetics. (s.f.) International Cybernetics - Imaging Vehicle. Recuperado en febrero de 2013, de http://www.internationalcybernetics.com/imaging_vehicle.htm
- [51] Vectra. (2010). AMAC. Recuperado en abril de 2013, de <http://www.vectra.fr/sites/fr/materiels-et-solutions/auscultations-des-chaussees/amac.html>
- [52] WDM Limited. (2000). RAV/Scanner Surveys. Recuperado en abril de 2013, de <http://www.wdm.co.uk/surveying/4-surveying/5-rav-scanner-surveys>
- [53] Guanaratne, M., Amarasiri, S. y Nasser, S., (2008). Investigation of Automated and Interactive Crack Measurement Systems. Florida, EE.UU.: Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Florida.
- [54] Wang, K., (2007). Automation of Pavement Surface Distress Survey through Parallel Processing. Arkansas, EE.UU.: Mack-Blackwell Transportation Center.
- [55] Ramírez, S. (2012). Detección de grietas en la cinta asfáltica mediante análisis de imágenes (Tesis de Maestría inédita). Instituto Politécnico Nacional, Santiago de Querétaro, México, p.69.
- [56] Salvatore, A. & Battiato, S. (octubre, 2006). Evaluation of Pavement Surface Distress Using Digital Image Collection and Analysis. International Congress on Advances in Civil Engineering, 7(11-13), Estambul, Turquía: Yildiz Technical University, pp. 1-10.
- [57] Wang, C. & Sha, A. (agosto, 2010). Pavement crack classification based on chain code. International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 7(10-12), Yantai, China: IEEE, pp. 593-597.
- [58] Javidi B., Kim D. & Kishk S. (2004). A laser-based 3D data acquisition system for the analysis of pavement distress and roughness. Connecticut, EE.UU.: University of Connecticut, Transportation Institute.
- [59] Yu, S., Sukumar, S., Koschan, A., Page, D. & Abidi, A. (2007). 3D reconstruction of road surfaces using an integrated multi-sensory approach. Optics and Lasers in Engineering, 45(7), pp. 808-818.

- [60] Laurent, J., Talbot, M. & Doucet, M. (mayo, 1997). Road surface inspection using laser scanners adapted for the high precision 3D measurements of large flat surfaces. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, Canadá: IEEE, pp. 303-310.

- [61] Porras, H., Sanabria, D., & Mejía Y. (2013). Automatic System for Images Acquisition Of Roads Pavement. Informatics Technol. Manag., 12(32), pp. 61–78.