

SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE VÍAS PAVIMENTADAS

AUTOMATIC SYSTEM FOR IMAGES ACQUISITION OF ROADS PAVEMENT



AUTOR

HERNÁN PORRAS DÍAZ
 Doctor en Ingeniería Telemática
 *Universidad Industrial de Santander
 Director, Grupo Geomática, gestión y optimización de sistemas
 hporras@uis.edu.co
 COLOMBIA

AUTOR

DUVÁN YAHÍR SANABRIA ECHEVERRY
 Estudiante de Maestría en Ingeniería, área Sistemas e Informática
 *Universidad Industrial de Santander
 Investigador, Grupo Geomática, gestión y optimización de sistemas
 duvanyse@gmail.com
 COLOMBIA

AUTOR

YURI HERCILIA MEJÍA MELGAREJO
 Estudiante de Maestría en Ingeniería, área Electrónica
 *Universidad Industrial de Santander
 Investigadora, Grupo Geomática, gestión y optimización de sistemas
 ymejia43@gmail.com
 COLOMBIA

INSTITUCIÓN

*UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 UIS
 Universidad Pública
 Carrera 9, calle 27
 vacadem@uis.edu.co
 COLOMBIA

INFORMACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN O DEL PROYECTO: Este trabajo se desarrolló como uno de los productos de los proyectos de maestría *Algoritmo para clasificación de daños en pavimentos flexible de vías urbanas y Reconstrucción tridimensional de superficies pavimentadas por medio de la técnica de escaneo láser como apoyo a la detección de daños* de los ingenieros Duván Y. Sanabria Echeverry y Yuri H. Mejía Melgarejo, respectivamente. El proyecto inició su realización en el mes de febrero del año 2012, y su primera versión se finalizó en noviembre del mismo año. Se efectuó dentro de los desarrollos del grupo de investigación *Geomática, gestión y optimización de sistemas*, adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

RECEPCIÓN: 21 de Enero de 2013

ACEPTACIÓN: 26 de Febrero de 2013

TEMÁTICA: Ingeniería Electrónica.

TIPO DE ARTÍCULO: Artículo de Investigación Científica y Tecnológica.

RESUMEN ANALÍTICO

En este documento se propone un sistema automático para la adquisición de imágenes del pavimento, que integra tecnología avanzada, como primera etapa de un proyecto encaminado a la gestión eficiente del pavimento en Colombia. El sistema tiene como componente principal una cámara de escaneo por línea Piranha 2 marca Dalsa, con resolución de 4096 píxeles, interfaz de comunicación Camera Link y una tasa de líneas de hasta 36 kHz. Para el manejo de la recolección de datos se emplea una tarjeta de captación de imágenes conectada directamente a un computador portátil robusto y a un codificador relativo que genera una señal relacionada con la velocidad del vehículo. El sistema realiza un escaneo por carril de hasta 4 m de ancho, con una precisión de 1 mm/píxel. El montaje se hizo en una camioneta Toyota Hilux 4x4. La velocidad de escaneo varía entre 20 y 60 km/h. Finalmente, para comprobar la efectividad del sistema, se realizaron dos rutas dentro de la ciudad de Bucaramanga con diferentes condiciones climáticas para captar 1212 y 1616 imágenes, que ocupan espacio en disco de 3,18 GiB y 5,51 GiB, respectivamente. Las imágenes captadas son procesadas para la segmentación de daños. Adicionalmente, se presenta las ventajas del sistema automático mediante una comparación del método manual con el automático.

PALABRAS CLAVES: Instrumentación de un sistema automático para adquisición de imágenes, Sistemas automáticos de captación de imágenes, Procesamiento digital de imágenes

ANALYTICAL SUMMARY

This paper proposes a new automatic system for imaging pavement, which integrates advanced technology; it will be the first stage of a project aimed for the efficient management of pavement in Colombia. The principal component of the system is a line scan camera Piranha 2 of Dalsa, with a resolution of 4096 pixels, with the communication protocol Camera Link and a line rate of 36 kHz. A frame grabber is used for capturing data; it is connected directly to a rugged notebook computer and to a relative encoder, which generates a signal related to vehicle speed. The system scans up to 4 m wide with an accuracy of 1 mm/pixel. The instrumentation is done in a Toyota Hilux 4 x 4. The scanning speed varies between 20 and 60 km/h. Finally, to test the effectiveness of the system, two routes were done within the city of Bucaramanga in different climatic conditions for capturing 1212 and 1616 images that occupy disk space of 3.18 and 5.51 GiB, respectively. The captured images are processed for damages segmentation. Additionally, it presents the advantages of the automatic system through a comparison of the manual method with the automatic.

KEYWORDS: Instrumentation of an automated image collection system, Automated image collection systems, Digital images processing

INTRODUCCIÓN.

Un factor importante en la movilidad en un país es el buen estado de sus carreteras, y para conservarlo se han desarrollado los Sistemas de Gestión de Pavimentos (PMS, de su sigla en inglés). El PMS originalmente empezó a usarse a finales de los años sesenta, a partir de los primeros trabajos de investigación realizados por la *American Association of State Highway Officials (AASHO)*, la *University of Texas* y el *Texas Transportation Institute of Texas A&M University*.

Según Zhen y acca [1], la mayoría de PMS constan de cuatro procesos: recolección de datos, modelado/ análisis, criterios/optimización y consecuencias/ implementación. La etapa de recolección de datos es de gran importancia dentro de la gestión eficiente de pavimentos, debido a que: la calidad de los datos tiene un efecto crítico en la toma de decisiones, la recolección de datos es una de las tareas más costosas dentro de los PMS y la gestión de la calidad es necesaria para asegurar que los datos cumplan los requisitos que imponen los PMS [2].

Dentro de los datos que implican los PMS se encuentran los relacionados directamente con la inspección del deterioro del pavimento, considerados como la información más valiosa para el análisis de rendimiento, que permiten anticipar las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, establecer prioridades y asignar fondos [3].

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; un método que se destaca por ser lento, tedioso, subjetivo y peligroso [4–6]. Debido a esto, se han venido implementando sistemas para captación y análisis de datos de manera automática o semiautomática, que agilizan los procesos de inspección.

Los procesos automáticos cuentan con la última tecnología de cada época, que inician con cámaras de video de 35 mm, siguen con captación de imágenes digitales a partir de cámaras de escaneo por área, captación de imágenes con cámaras de escaneo por línea y, finalmente, se utilizan sensores sin contacto como apoyo a los procesos de inspección [7].

En Colombia, los tres métodos más utilizados para la evaluación de defectos en pavimentos flexibles son de tipo manual [8]. El primero es el manual para la inspección de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías, Inviás, que implica recolección de datos mediante formatos en los que se realiza una descripción minuciosa y detallada del estado de la vía y su información geográfica [4]; el segundo es la metodología índice de condición del pavimento (PCI, de su sigla en inglés) y el formato internacional SHRP.

Sin embargo, ya se están dando los primeros pasos en la implementación de métodos de inspección automática con sistemas de adquisición de imágenes de alta calidad que disminuyen los tiempos de recolección e incluyen una georreferenciación de los datos integrada con *software* para el procesamiento de datos [9].

En este trabajo se propone un sistema automático para la captación de imágenes del pavimento llamado Sicaipav para iniciar la implementación de sistemas que permitan la gestión eficiente del pavimento en Colombia. Este sistema se implementó a partir de la selección adecuada de equipos de captación y sincronización, acoplados por medio de una estructura a un vehículo de inspección. Luego, se puso en marcha y se implementaron algoritmos para el acondicionamiento de las imágenes captadas.

Este documento muestra el desarrollo de este sistema mediante las siguientes secciones: En primer lugar, los antecedentes, que incluyen sistemas en el ámbito mundial. Luego una sección de generalidades del sistema propuesto en la que se plantean los requisitos iniciales que se tuvieron en cuenta, seguida de la selección de dispositivos; en esta sección, se argumenta el porqué de la elección de los elementos que hacen parte del sistema. Luego, en la sección implementación, se muestran las conexiones del sistema y el montaje de la estructura en el vehículo. En la sección de resultados, la efectividad, el acondicionamiento de las imágenes captadas como etapa previa para la detección y la clasificación de daños y las ventajas del sistema propuesto mediante una comparación del método manual con el automático. Por último, se plantea el trabajo futuro y se presentan las conclusiones.

1. ANTECEDENTES.

Desde la década de los setenta, diferentes investigadores y agencias de transporte en el mundo han desarrollado sistemas automáticos para la captación de imágenes (AICS, de su sigla en inglés) de pavimento, que han remplazado los métodos tradicionales y han disminuido perturbaciones en el tráfico vehicular, costos de la inspección y riesgos de los inspectores. A continuación, se realiza un resumen de los principales AICS orientados a la inspección de pavimentos.

El sistema *PASCO Roadrecon* fue el primer AICS usado para la captación de imágenes de pavimento. Este sistema usaba una cámara de 35 mm montada en una estructura en la parte delantera de una furgoneta para generar una grabación continua de la superficie del pavimento. Las imágenes se tomaban en la noche con un sistema de iluminación artificial; el vehículo podía conducirse hasta 80 km/h, y la imagen cubría un área de 4,87 m de ancho y hasta 15,24 m de largo, en este caso se analizaban las imágenes de manera visual [10].

A finales de los años ochenta, el consorcio japonés Komatsu diseñó un sistema de adquisición e inspección de daños en las superficies del pavimento, que podía medir simultáneamente las fisuras, el ahuellamiento y el perfil longitudinal. La exactitud de las medidas dependía de la velocidad del vehículo, con una máxima resolución adquirida a 10 km/h. Para medir las fisuras, se usaban imágenes en escala de grises a 8 bits, con una resolución de 1 mm. Aunque el sistema determinaba automáticamente los daños, no los clasificaba por tipo [11].

El primer sistema en usar cámaras de escaneo por línea para adquirir datos fue el *Pavement Condition Evaluation Services* (PCES), de la *Earth Technology Corporation*, a finales de los años ochenta y principio de los noventa. Contaba con cuatro cámaras de 512 píxeles de resolución para realizar una medida de 2,43 m de ancho. Además, realizaba procesamiento de señales digitales en tiempo real para el análisis de las imágenes [12].

Roadware Corporation desarrolló un AICS denominado *Automated Road Analyzer* (ARAN). Este vehículo es capaz de realizar hasta 15 mediciones diferentes en un solo escaneo a velocidades de tráfico. Puede usarse como perfilómetro, captador de video, mapeo móvil o sistema de recolección de datos a gran escala. Este sistema es modular y permite al cliente una configuración específica [13].

El *RoadCrack*, de la compañía australiana CSIRO, es un AICS que incluye cámaras y herramientas de procesamiento de imágenes para detectar, clasificar y hacer un reporte de fisuras en el pavimento. Este sistema es capaz de detectar grietas tan finas como un milímetro de ancho, a una velocidad hasta de 105 km/h, y cuenta con un sistema de iluminación propio [14].

Desde 1999 hasta 2006, Huang y Xu desarrollaron para el Departamento de Transporte de Texas un sistema APSDI (del inglés *automated pavement surface distress inspection*) llamado VCrack. El sistema fue diseñado para circular a una velocidad de entre 5 y 112 km/h y caracterizar las grietas en tiempo real. El formato de los datos es compatible con el protocolo del sistema de gestión de pavimento de Texas y AASHTO (del inglés *American Association of State Highway Transportation Officials*). El sistema VCrack consiste en una cámara de escaneo por línea con sensor tipo CCD (del inglés *Charge-coupled device*), una tarjeta de captación de imágenes y un computador personal [15].

El sistema *Crackscope* es un proyecto de investigación desarrollado por el Centro de Investigación en Transporte de la Universidad de Texas en Austin. El sistema está compuesto por una cámara de escaneo por línea marca Dalsa, con una resolución de 2048 píxeles, interfaz de comunicación *Gigabit Ethernet*, tasa de datos de hasta 36 kHz, que permite cubrir hasta un ancho de 3,6 m de carril; y un proyector láser lineal para mantener las condiciones de luz uniforme [16].

2. GENERALIDADES DEL SISTEMA.

Uno de los objetivos del grupo de investigación *Geomática, gestión y optimización de sistemas* es el desarrollo de sistemas de adquisición de datos que complementen el análisis de daños en superficies

pavimentadas; por tanto, se emprendió la labor de diseñar e implementar un sistema que permita obtener imágenes digitales de estas superficies.

Se establecieron unos requerimientos básicos a partir de las investigaciones anteriores. Según la literatura, un sistema APSDI debe ser capaz de detectar grietas finas menores o iguales a 2 mm de ancho en diversas texturas de fondo sobre un carril de 4 m, mientras viaja a velocidad de autopista [9], [14–17].

A continuación, se presentan los requerimientos básicos del sistema:

- Tener una precisión en resolución de 1mm/píxel.
- Longitud transversal de escaneo máxima de 4m, para abarcar un carril.
- Adquisición de datos a una velocidad de entre 40 km/h y 60 km/h, con el fin de no disminuir el tráfico vehicular.
- Altura de la cámara con respecto al pavimento menor o igual a 3 m.
- Consumo de potencia adecuado, para suministrarse en un vehículo en movimiento.
- Escaneo vial mínimo de 1 km en movimiento.
- Posibilidad de variar el ángulo y la altura de la cámara con respecto al pavimento.

3. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS.

Los dispositivos fueron seleccionados con base en los requerimientos descritos en la sección 2. A continuación, se detallan las características que se tuvieron en cuenta en el proceso de selección de cada equipo.

3.1 CÁMARA DE ESCAÑO POR LÍNEA.

Los sistemas APSDI difieren en sus dispositivos de captación de imágenes. Estos pueden ser cámaras de escaneo por área, cámaras de escaneo por línea y cámaras de escaneo por línea con TDI (del inglés *Time Delay Integration*).

Una cámara de escaneo por área requiere una larga extensión en el montaje para que su campo de visión no sea obstruido, lo que hace que el sistema sea vulnerable a las vibraciones del vehículo. Además, dificulta la iluminación uniforme del área de escaneo. Por otro lado, el tener sensores de escaneo por área reduce la tasa de captación de datos y limita la velocidad del vehículo. En cuanto a las cámaras de escaneo por línea con TDI, aunque son útiles para captación de imágenes

a alta velocidad, cuando el tiempo de exposición está limitado o cuando la iluminación es baja, son sensibles al alineamiento óptico con respecto al objetivo. Las vibraciones del vehículo podrían afectar la imagen y producir borrosidad [17].

La cámara de escaneo por línea facilita la sincronización entre la rata de escaneo y la velocidad del vehículo por medio de una señal de activación externa que permite la captación en movimiento de imágenes con alta resolución. Además, estas cámaras producen imágenes de longitud ilimitada a una rata de datos considerablemente más elevada que las cámaras de escaneo por área, debido a que una sola línea como dato puede ser transferida antes de la siguiente exposición [18]. Todo esto hace que las cámaras de escaneo por línea sean las apropiadas para los sistemas APSDI.

Los parámetros considerados para la selección de la cámara fueron: tipo de sensor, resolución, interfaz de comunicación, rata de datos, rata de líneas, configuración y tamaño físico del píxel.

Generalmente, las cámaras utilizan sensores tipo CCD (del inglés *Charge-coupled device*) y CMOS (del inglés *complementary metal-oxide-semiconductor*). Los recientes avances en estas tecnologías han mejorado la sensibilidad e incrementado la resolución y la rata de escaneo [16]; sin embargo, debe tenerse en cuenta que los sensores tipo CCD superan a los CMOS en los siguientes parámetros: rango dinámico, disminución del ruido y respuesta uniforme [19].

Con base en los requerimientos del Sicaipav, para escanear un ancho de carril de 4 m y alcanzar una precisión máxima de 1 mm/píxel se requiere una cámara con una resolución mayor o igual a 4000 píxeles. De acuerdo con (1) una resolución de 4096 píxeles por línea, alcanza la precisión máxima requerida.

$$A = \frac{L}{R} = \frac{4000mm}{4096 \text{ píxeles}} \cong 0,97 \frac{mm}{\text{píxel}} \quad (1)$$

En cuanto al protocolo de comunicación, existen dos interfaces destacadas. En primer lugar, la interfaz *Camera Link*, que requiere una tarjeta de captación de imágenes, pero proporciona un ancho de banda de hasta 5,44 Gb/s, con conexiones punto a punto de hasta 10 m y transferencia de datos dedicada; y, en segundo lugar, la interfaz *Gigabit Ethernet*, que tiene velocidades menores, pero se conecta directamente al computador [20].

Ahora, para cumplir el requisito de escanear a una velocidad de 60 km/h, conservando la resolución de 1 mm/píxel, se necesita una tasa de líneas de por lo menos 16,7 kHz; por tanto, teniendo en cuenta la transferencia total de datos, la interfaz de comunicación *Camera Link* es la apropiada.

Los anchos de banda que maneja la interfaz *Camera Link* dependen de su configuración. La configuración base transmite datos por una sola conexión, que alcanza velocidades de 2,04 Gb/s. En la configuración media se incluye una segunda conexión que proporciona una velocidad de hasta 4,08 Gb/s. Por último, las configuraciones completa y extendida siguen teniendo dos conexiones, pero llegan a una transferencia de datos de hasta 5,44 Gb/s y 6,8Gb/s, respectivamente [20]. En esta aplicación se prefiere contar con una configuración media o completa.

Ahora bien, considerando calidad y disponibilidad de este dispositivo en el mercado, y que cumpla los requerimientos del Sicaipav, la Tabla 1 muestra una comparación de las cámaras que proveen los fabricantes Dalsa, Basler y Takex.

TABLA 1. Características de cámaras de escaneo por línea

	Dalsa	Basler	Takex
Modelo	Piranha 2	Racer ral4096- 80km	TL- 4096UCL
Tipo de sensor	CCD	CMOS	CCD
Resolución (píxeles)	4096	4096	4096
Interfaz de comunicación	<i>Camera Link</i>	<i>Camera Link</i>	<i>Camera Link</i>
Tasa de datos (MHz)	160	83,5	50
Tasa de líneas (kHz)	36	80	11,9
Configuración	Media	Media	Base
Sincronización	Señal externa	Señal externa	Señal externa
Representación de color	Mono	Mono	Mono
Tamaño físico del píxel (µm)	7/10	7	10
Profundidad de color (bpp)	8/10	8/10/12	8/10
Montura para el sistema óptico	M72 x 0,75/ Montura F	Montura frontal con rosca C o F	Montura C y F

FIGURA 1. Cámara de escaneo por línea sin sistema óptico

Con base en la Tabla 1, la cámara Dalsa 2 (Figura 1) fue seleccionada porque, además de ser de escaneo por línea y sensor tipo CCD, provee una resolución por píxel de aproximadamente un milímetro. También, porque es *Camera Link* en configuración media, y la tasa de líneas es de 36 kHz, lo que permite que el vehículo alcance velocidades de hasta 120 km/h. Además, esta cámara utiliza 4 canales, cada uno con un reloj de píxel de 40 MHz, que origina una tasa de datos más elevada, comparada con las otras marcas [21].

En el mercado, esta cámara presenta variaciones en el tamaño físico del píxel, una con un tamaño de píxel de $7 \mu\text{m}$ y otra con uno de $10 \mu\text{m}$. Este parámetro influye directamente en el cálculo de la altura de la cámara con respecto al pavimento dada por (2), en donde β es la amplificación y f es la distancia focal del lente [22].

$$OO' = \left(\beta + \frac{1}{\beta} + 2 \right) f \quad (2)$$

La amplificación β es la relación entre el tamaño del sensor S y la región que ha de medirse L , según (3), en donde S se determina multiplicando la resolución del sensor por el tamaño físico del píxel ps .

$$\beta = \frac{S}{L} = \frac{(4096) \cdot ps}{4000} \quad (3)$$

Según la ecuación (3), para tamaños de píxel de $7 \mu\text{m}$ y de $10 \mu\text{m}$ se tiene una amplificación de $\beta_{7\mu\text{m}} = 0,00717$ y $\beta_{10\mu\text{m}} = 0,01024$, respectivamente. Con estos valores, y considerando una distancia focal f constante, la proporción $OO'_{7\mu\text{m}} / OO'_{10\mu\text{m}}$ es aproximadamente 1,42, lo que indica que un tamaño físico del píxel de $10 \mu\text{m}$ requiere que la cámara esté a una altura 1,42 veces menor que la demandada por la de $7 \mu\text{m}$. Por tanto, se selecciona la cámara con tamaño físico de píxel de $10 \mu\text{m}$.

3.2 SISTEMA ÓPTICO.

El sistema óptico está compuesto por lentes, adaptadores, anillos de extensión y otros accesorios. Para definirlo, se consideraron las especificaciones de la cámara y los requerimientos del sistema, que se resumen en la Tabla 2.

Con base en los valores de la Tabla 2, y siguiendo la guía para selección de lentes [22], se calcularon los siguientes parámetros: distancia focal f , ángulo de campo w , intensidad en los bordes E , número- f y profundidad de enfoque $2z$.

TABLA 2. Requerimientos del sistema y especificaciones de la cámara

Cámara	Resolución (píxeles)	4096
	Longitud del sensor CCD (mm)	40,96
	Tamaño físico del píxel (μm)	10
	Montura para el sistema óptico	M72 x 0,75 o montura F
Sistema	Distancia máxima de trabajo (mm)	3000
	Campo de visión (mm)	4000
	Resolución (mm/Píxeles)	1

La distancia focal es definida por (4), donde β es la amplificación y OO' es la distancia entre la región de interés y la cámara.

$$f = \frac{OO'}{\left(2 + \frac{1}{\beta}\right)} = \frac{3000}{\left(2 + \frac{1}{0,01024}\right)} = 30,1\text{mm} \quad (4)$$

La ecuación (4) indica que el lente debe tener una distancia focal de aproximadamente 30 mm para cumplir con el requerimiento de la distancia máxima de trabajo. Sin embargo, los lentes disponibles en el catálogo de los fabricantes Rodenstock, Nikon y Carl Zeiss tienen distancia focal de 15, 28, 50 y 100 mm; por tanto, se opta por un lente con una distancia focal de 28 mm.

Ahora bien, el ángulo de campo se calcula según (6) para determinar la intensidad en los bordes dada por (5). Este porcentaje E es corregido por el algoritmo *Flat Field Correction*, que se encuentra embebido en la cámara [21].

$$E = 100\cos^4 w = 100\cos^4(0,6266) = 43,05\% \quad (5)$$

$$\begin{aligned} w &= \arctan\left(\frac{S}{2f(1+\beta)}\right) \\ &= \arctan\left(\frac{40,96}{(2)(28)(1+0,01024)}\right) \\ &\approx 0,6266 \text{radianes} \approx 35,9051^\circ \end{aligned} \quad (6)$$

Se realizó una búsqueda en el mercado considerando la disponibilidad, el tamaño máximo del sensor, el número-f y el tipo de montaje compatible con la cámara. La Tabla 3 muestra una comparación de los parámetros de los lentes de 28 mm de los principales fabricantes.

TABLA 3. Comparación de lentes

Lente	f [mm]	Diagonal del sensor [mm]	Núm. f	Montura
Distagon	28	43	f/2	F
Nikon	28	43	f/2,8	F
Rodagon	28	30	f/4	M30,5 x 0,5

Para soportar la velocidad de la cámara, se requiere un lente con un número-f lo suficientemente pequeño para que permita el paso de la mayor cantidad de luz, y de esta manera captar buenas imágenes, aunque haya poca iluminación.

Se optó por el lente *Distagon T*2/28 ZF* (Figura 2) porque tiene una focal de 28 mm, que establece una distancia de trabajo de 2,8 m; soporta el tamaño máximo del sensor, que es de 40,96 mm; tiene el número-f más pequeño y es compatible con el tipo de montura de la cámara.

FIGURA 2. Sistema óptico con lente *Distagon T*2/28 ZF*



3.3 CODIFICADOR ROTATORIO RELATIVO.

Para sincronizar la velocidad de captación de imágenes con la del vehículo, se necesita un dispositivo que genere una señal relacionada con el movimiento. Se encuentran diversas opciones en el mercado; en primer lugar, los odómetros y los tacómetros, que no son recomendados por el retardo de su señal; y, en segundo lugar, los codificadores rotatorios, dispositivos electromecánicos que convierten la posición angular de un eje directamente a un código digital.

Los tipos de codificadores rotatorios son absolutos o relativos; el primero genera mensajes digitales que representan la posición, la velocidad y la dirección del movimiento del dispositivo, mientras que el segundo tiene como salida una señal de pulsos equitativamente espaciados por revolución (PPR). Se seleccionó un codificador rotatorio relativo porque no se requiere una codificación especial para la posición y la velocidad del vehículo, sino tener una señal de pulsos que active la obturación de la cámara.

Ahora bien, para determinar la cantidad indicada de pulsos por revolución, se tuvo en cuenta que la llanta del vehículo tiene un diámetro aproximado de 75 cm, es decir, que recorre 235,62cm en una revolución; por tanto, si se desea tener una resolución de 1mm/píxel, el codificador debe generar mínimo 2356 PPR. Con base en los requerimientos, se revisaron las especificaciones que ofrecen estos dispositivos en el mercado, que se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4. Especificaciones básicas para selección del codificador rotatorio.

PPR	Salida de fase	Tipo de salida	Alimentación (VDC)
>2356	2: A, B	1: Totem pole	5: 5 24: 12-24
	3: A, B, Z	2: NPN open collector	
	4: A, A', B, B'	3: Voltage output	
	6: A, A', B, B', Z, Z'	L: Line driver output	

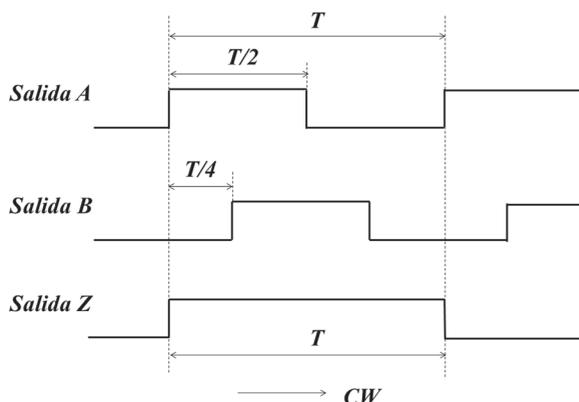
Finalmente, se seleccionó un codificador rotatorio de 2500 PPR, con una salida de fase tipo 3 (estándar), alimentación de entre 12 y 24 V y salida tipo *Totem pole*, caracterizada por baja disipación de potencia. Sus dimensiones son 5 cm de diámetro, con un eje de 8 mm

de diámetro que facilita el acople con la llanta. En la Figura 3, se muestra el codificador seleccionado y, en la Figura 4, la forma de onda de sus salidas; en esta última, se observa que la salida B está desfasada un cuarto de período de la salida A, característica de cuadratura que permite identificar la dirección del movimiento del eje [23].

FIGURA 3. Codificador rotatorio relativo, referencia E50S82500-3-T-24, [23].



FIGURA 4. Forma de onda de las salida, [23].



3.4 TARJETA DE CAPTACIÓN DE IMÁGENES.

Aunque la mayoría de tarjetas de captación de imágenes compatibles con la cámara es de conexión PCIe, el conocer la existencia de la tecnología *Express Card* guio la búsqueda hacia una tarjeta que permitiera la conexión de la cámara a un portátil, con lo que se obtiene mayor flexibilidad en el sistema.

Ante este nuevo requerimiento, la empresa EPIX Inc. ofrece como opción la tarjeta de video PIXCI EC1, Figura 5, que soporta cámaras con *Camera Link* en configuraciones base, media y completa, a tasas de transferencia de datos de hasta 191 MiB/s para *laptops*, y de hasta 204 MiB/s para *notebooks*, y compatible con un computador que tenga puerto *Express Card* de 54 mm [24]. Además, puede ser controlada por una señal externa de entrada.

FIGURA 5. Tarjeta de captación de imágenes PIXCIEC1



Si bien la velocidad de esta tarjeta es hasta diez veces menor que la velocidad de las tarjetas con conexión PCIe, los resultados de las ecuaciones (7) y (8) indican que la velocidad de datos requerida por la cámara, con respecto a su resolución, tasa de líneas y profundidad de color, es soportada por la tarjeta PIXCI EC1.

$$\left(\frac{4096 \text{ píxeles}}{\text{línea}}\right) \left(\frac{1 \text{ byte}}{\text{píxel}}\right) \left(\frac{36000 \text{ líneas}}{\text{segundo}}\right) \quad (7)$$

$$= 140,625 \frac{\text{MiB}}{\text{s}}$$

$$\left(\frac{4096 \text{ píxeles}}{\text{línea}}\right) \left(\frac{10 \text{ bits}}{\text{píxel}}\right) \left(\frac{1 \text{ byte}}{8 \text{ bits}}\right) \left(\frac{36000 \text{ líneas}}{\text{segundo}}\right) \quad (8)$$

$$= 175,781 \frac{\text{MiB}}{\text{s}}$$

Por otro parte, esta tarjeta de captación fue modificada para que sea compatible con el codificador rotatorio seleccionado. Además, se cuenta con el *software* XCAP, que permite configurar la conexión entre la tarjeta de captación, la cámara, el codificador y el computador.

3.5 SOFTWARE XCAP.

XCAP es el *software* que ofrece la empresa EPIX para integrarse, junto con sus tarjetas de captación a diversos tipos de cámaras. De acuerdo con la versión del *software* y las características del *hardware*, XCAP ofrece un amplio rango de funciones, entre las que se destacan: captación de imágenes individuales y secuencias, tanto en modo libre como con señal externa; visualización de imágenes y secuencias; mejora de video y pseudocolor; procesamiento de imágenes; y capacidad para adaptar la resolución, según la aplicación [25].

La versión por defecto es la XCAP-Lite, que permite cargar, ver y guardar imágenes con una capacidad de almacenamiento limitada de 64 MiB; la siguiente versión es la XCAP-Ltd, que suma la posibilidad de cargar y guardar secuencias de imágenes en formatos

adicionales a una capacidad máxima de 4 GiB de memoria RAM asignada, en un sistema de 32 bits y hasta 8 GiB en uno de 64 bits. Las siguientes versiones, la XCAP-Std y la XCAP-Plus, agregan funciones en cuanto al procesamiento de imágenes y permiten el almacenamiento directamente al disco duro. En la Tabla 5, se muestran las características tenidas en cuenta para la selección de la versión del XCAP.

TABLA 5. Comparación entre versiones de las características del *software* XCAP [25].

Característica	Plus	Std	Ltd	Lite
Cargar y guardar una imagen	Sí	Sí	Sí	Sí
Cargar y guardar una secuencia de imágenes	Sí	Sí	Sí	No
Limitaciones de memoria -Express Card 54 & 32 bits SO -Express Card 54 & 64 bits SO	No	No	4GiB 8GiB	64MiB
Almacenar directamente en el disco duro	Sí	Sí	No	No

Como se muestra en la Tabla 5, todas las versiones permiten cargar, visualizar y guardar imágenes individuales. En cuanto a la secuencia de imágenes, que es un archivo de formato .vif propio del XCAP con una cantidad específica de imágenes guardadas por medio de una sola operación, a partir de la versión Ltd se puede almacenar, cargar y convertir en una serie de imágenes en cualquier formato industrial (JPEG, BMP, TIFF, etc.). Este tipo de almacenamiento brinda la mayor velocidad de adquisición.

Ahora bien, para estimar la cantidad de líneas que han de almacenarse con una limitación de 8 GiB, se consideró una profundidad de color de 8 bpp con resolución máxima de 4096 píxeles/línea, lo que resulta, según (9), en 2'097.122 líneas, equivalente a 2,097 km de escaneo vial, sin detener el vehículo, con una precisión de 1 mm/píxel. Por tanto, con la versión Ltd pueden cubrirse aproximadamente 2 km de vía, conveniente para la primera fase del proyecto.

$$\frac{8'388.608KiB}{4KiB / línea} = 2'097.122línea \quad (9)$$

Por otro lado, aunque existe la restricción de la versión XCAP-Ltd de no permitir captación de video directamente

al disco, es posible hacerlo después de haber almacenado la secuencia en la memoria RAM del computador; en este caso, el XCAP-Ltd divide la memoria RAM en partes iguales para almacenar las imágenes. Finalmente, se seleccionó la versión XCAP-Ltd, debido a que permite captar imágenes a alta velocidad y su limitación de almacenamiento se ajusta a los requisitos del sistema.

3.6 COMPUTADOR PORTÁTIL ROBUSTO.

Aunque generalmente los sistemas APSDI utilizan computadores de escritorio para la captación y el procesamiento de las imágenes en tiempo real [15–17], [26], los recientes avances han permitido que los computadores portátiles incrementen las velocidades de procesamiento, situación que los hace aptos para su uso en sistemas APSDI; por tanto, se concibe tener un computador portátil para el Sicaipav.

Para determinar el tipo de computador portátil, en primer lugar, este debe incluir una ranura de expansión *Express Card* de 54 mm que permita la conexión con la tarjeta PIXCI EC1, y, en segundo lugar, deben tenerse en cuenta las velocidades de transferencia de datos de la tarjeta y de la cámara.

En cuanto a la tarjeta, la velocidad real de transferencia de datos es 191 MiB/s para *laptops* y 204 MiB/s para *notebooks*; por otro lado, aunque la velocidad de datos de la cámara con respecto a la imagen es aproximadamente 176 MiB/s, existe otro tipo de datos encargados de la sincronización y la configuración; por tanto, para no limitar la velocidad de transferencia, se opta por un computador portátil *notebook*.

Analizando los escenarios de trabajo del Sicaipav, se dedujo que el computador debe tener la capacidad de funcionar en condiciones de exposición a polvo y vibraciones. Normalmente, los portátiles robustos son usados en estos escenarios. De manera comercial, para clasificar este tipo de portátiles, como *Fully Rugged*, *semi-Rugged* o *Business Rugged*, se emplean los estándares MIL-STD-810F/G y los códigos IP (del inglés *Ingress Protection Rating*).

El *software* adquirido para el control de la tarjeta de captación de imágenes y de la cámara lineal fue el XCAP-Ltd, con acceso total a 4 GiB de RAM en sistemas de 32 bits, pero está limitado a 8 GiB de RAM para sistemas de 64 bits [25]. Por esta razón, la RAM seleccionada para el computador es de 8 GiB.

En cuanto al almacenamiento, los discos de estado sólido (SSD, de su sigla en inglés) son los adecuados porque son menos susceptibles a golpes, son inaudibles y tienen un menor tiempo de acceso y de latencia [27]. Además, este tipo de disco no es afectado por la vibración mecánica que tiene el vehículo y por la oscilación generada por el estado de la carretera; por tanto, dentro de las especificaciones del equipo, se incluyó como unidad de almacenamiento un disco de estado sólido.

Después de plantear las especificaciones que han de tenerse en cuenta, se realizó un estudio de mercado en que se destacan los principales computadores portátiles tipo *notebook* y completamente robustos. En la Tabla 6, se presenta una comparación entre cuatro equipos disponibles en el mercado con especificaciones similares. Sin embargo, el Getac B300 cuenta con un procesador Intel Core i7 a diferencia del Toughbook 19 de Panasonic, que tiene un Intel Core i5; tiene un disco de estado sólido de 160 GiB de almacenamiento, en comparación con una capacidad de 256 GiB de los otros; y con respecto a las interfaces de comunicación, tiene mayor velocidad en transmisión de datos con los protocolos USB 3,0 e IEEE 1394A, a diferencia de los otros tres.

Por lo anterior, se seleccionó el computador Getac B300 (Figura 6), con un procesador Intel Core i7 e interfaces de conexión para futuros proyectos, pero a costo de una menor capacidad de almacenamiento [28].

FIGURA 6. Notebook Robusto Getac B300



4. IMPLEMENTACIÓN.

Para cumplir los requisitos establecidos al inicio de la investigación, se seleccionaron algunos dispositivos específicos. El sistema general está compuesto por los siguientes elementos:

- Cámara de escaneo por línea Dalsa Piranha 2.
- Sistema óptico Distagon de 28 mm.
- Tarjeta de captación de imágenes PIXCI EC1.
- Codificador rotatorio relativo de 2500 PPR.
- Computador Notebook robusto Getac B300.
- *Software* XCAP.

El siguiente paso, después de la selección de los dispositivos, fue hacer la integración tecnológica entre ellos. Las siguientes subsecciones establecen los procedimientos para captar imágenes a partir de las señales externas generadas por el codificador, la conexión entre todos los dispositivos y el montaje en la camioneta.

TABLA 6. Comparación entre los cuatro equipos más destacados del mercado

Características	Notebook Getac Modelo B300	Dell Latitude E6420 XFR	Panasonic TOUGHBOOK 19	HP 8470P
Procesador	Intel Core i7 (2,3 GHz)	Intel Core i7 (2,4 GHz)	Intel Core i5-2520M 2,5GHz Caché 3MB	Intel® Core™ i7-3720QM (2,60 GHz, caché L3 de 6 MB, 4 núcleos)
Unidad de estado sólido	SSD (160 GiB)	SSD (256 GiB)	SSD (256 GiB)	SSD (256 GiB)
RAM	8 GiB DDR3	8 GiB DDR3	8 GiB DDR3	8 GiB DDR3
Interfaces de comunicación	HDMI, VGA, USB 3,0, RJ45-11, IEEE 1394A	HDMI, VGA, USB 2,0, RJ45-11	VGA, USB 2,0, PC Card II, SD Card, RJ45-11, IEEE 1394A	USB 3,0, <i>DisplayPort</i> , RJ11-45
Ranura de expansión	<i>Express Card</i> de 54 mm	<i>Express Card</i> de 54 mm	<i>Express Card</i> de 54 mm	<i>Express Card</i> de 54 mm
Sistema operativo	Windows 7 Professional de 64 bits	Windows Professional 7 - 64 bits	Windows Professional 7 - 64 bits	Windows Professional 7 - 64 bits
Estándares de robustez	MIL-STD-810G e IP65	MIL-STD 461F para interferencia electromagnética y MIL-STD-810G e IP65	MIL-STD-810G e IP65	MIL-STD 810G

4.1 ADQUISICIONES CON SEÑALES DEL CODIFICADOR RELATIVO.

Para que la tarjeta de captación de imágenes aceptara las señales generadas por el codificador rotatorio, se le adaptaron tres registros que cumplen la función de contar pulsos de entrada (registro INGCC, descrito en la Tabla 7), controlar la frecuencia de captación de líneas (registro INGCR, descrito en la Tabla 8) y contar las líneas de escaneo (registro INGTC, descrito en la Tabla 9), en cuyo caso las señales de entrada a la tarjeta son las salidas *Aa* y *Ba*, señales acondicionadas de las señales *A* y *B* generadas por el codificador rotatorio.

Al hacer funcionar el codificador, el registro INGCC lleva el conteo de las señales de entrada. Cuando este valor sea igual al escrito en los bits [31:3] del registro INGCR, aumenta el registro de conteo INGTC, se envía una señal de activación a la cámara para captar una línea, y el registro INGCC se reinicia.

En el caso del registro de conteo actual INGCC, si las señales *Aa* y *Ba* están en la dirección opuesta a la que indica el bit CRC del registro INGCR, la cuenta en el registro INGCC disminuye. Por otro lado, existe otra forma de reiniciar el registro INGCC, y es escribiendo 1 en el bit CRR del registro de control. Una vez las imágenes se hayan almacenado en la memoria RAM, puede guardarse la secuencia en el formato deseado por medio de la opción 'guardar secuencia de imágenes' en el menú 'archivo' del *software*.

TABLA 7. Descripción del registro INGCC

Registro 0x0068 INGCC, <i>Current Count</i>	
Tipo	Solo lectura
Número de bits	32
Función	Contar el número de veces que los pulsos del codificador generan un período en sus salidas A y B en la dirección indicada por el bit CRC del registro de control.

TABLA 8. Descripción del registro INGCR

Registro 0x0064 INGCR, <i>Control Register</i>	
Tipo	Lectura / escritura
Número de bits	32
Bits [31: 3]	Indica el número de pulsos que han de contarse por el registro INGCC antes de que la tarjeta genere un pulso para escanear
Bit 2, CRT	Permite generar la señal a la cámara cuando el contador de bits INGCC[28:0] coincide con los bits [31:3] del registro de control (<i>enable</i>)
Bit 1, CRD	Indica la dirección de conteo para el codificador rotatorio
Bit 0, CRR	Reinicia la cuenta actual del registro INGCC

TABLA 9. Descripción del registro INGTC

Registro 0x0060 INGTC, <i>Trigger Count</i>	
Tipo	Solo lectura
Número de bits	32
Función	Contar el número de veces que se ha enviado una señal para la captación de una línea

4.2 CONEXIÓN FINAL.

Como el codificador y la cámara requieren alimentación a 12 V DC y la batería del vehículo varía su tensión de 7 V a 13,8 V, de acuerdo con su carga y el estado del motor, se conectó un circuito intermedio que toma la energía directamente de la batería, la regula a tensión de 12 V DC y cuenta con protección a altas corrientes.

Por otro lado, la señal generada por el codificador relativo tiene una tensión 1,5 V menor a la de alimentación, es decir, que genera pulsos de 10,5 V, si se alimenta a 12 V DC. Esta tensión de salida es mayor a la admitida por la tarjeta de captación, de 3,3 V; por tanto, se realizó un circuito de acondicionamiento de estas señales. El codificador se conecta a este circuito y las dos señales

acondicionadas *Aa* y *Ba* son salidas hacia la tarjeta. Además, en esta etapa se recibe la tensión regulada a 12 VDC y se suministra alimentación a la cámara y al codificador.

La Figura 7 muestra el esquema general del sistema, en que las señales *CLb* y *CLm* indican la conexión *Camera Link* base y media entre la tarjeta y la cámara. La Figura 8 muestra el montaje que se realizó en laboratorio para hacer las pruebas de funcionamiento.

FIGURA 7. Esquema general del sistema

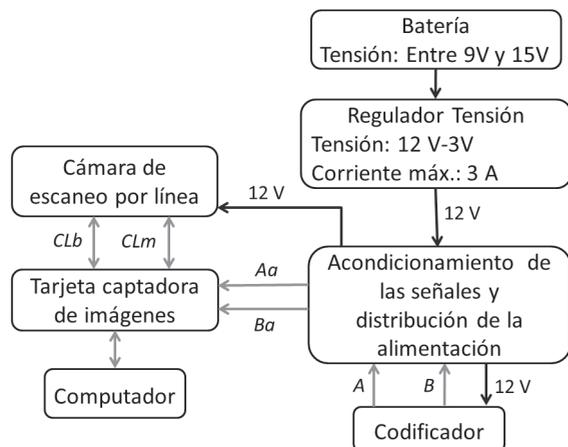


FIGURA 8. Montaje de la conexión en laboratorio, con fuente de alimentación.



4.3 MONTAJE EN LA CAMIONETA.

El montaje del sistema Sicaipav se realizó en una camioneta Toyota Hilux 4x4 perteneciente al grupo de investigación.

4.3.1 Acople del codificador rotatorio relativo.

El codificador seleccionado se acopló a la llanta trasera derecha de la camioneta, teniendo en cuenta que su precisión depende de factores mecánicos y eléctricos.

En primer lugar, se alineó el eje del codificador al eje de la llanta y se acopló a un disco metálico empalmado a la llanta del vehículo; y, en segundo lugar, se sujetó la base del codificador por medio de un soporte anclado al eje trasero del vehículo, para impedir la rotación y soportar el codificador. El montaje final se muestra en la Figura 9.

FIGURA 9. Montaje del codificador en la llanta de la camioneta



4.3.2 Diseño y montaje de la estructura.

Los AICS cuentan con diferentes configuraciones de estructuras para su montaje, de acuerdo con el vehículo de inspección utilizado. A continuación, se presentan los requerimientos básicos de la estructura del Sicaipav:

- Permitir regular el ángulo de inclinación de la cámara.
- Permitir modificar la altura de la cámara entre 2 y 3 m.
- Proteger la cámara de la lluvia y los impactos.
- Acoplar un sistema de amortiguación para la estructura.
- Instalar las medidas de precaución y señalización básicas de tránsito.
- Facilitar el montaje y el desmontaje en la camioneta.

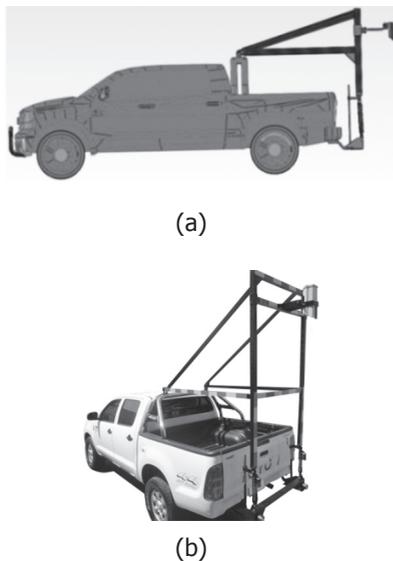
Teniendo en cuenta los requerimientos de la estructura y la estabilidad del sistema, se realizó el diseño que se muestra en la Figura 10 (a).

La estructura está elaborada de hierro, recubierta con pintura electrostática. La parte trasera cuenta con un marco que alcanza una altura de 3 m, que se sostiene a una defensa provisional por medio de dos amortiguadores de gas. Esta defensa es una réplica de la original y tiene topes en goma.

Por la parte superior, el marco se sostiene a la barra antivuelco de la camioneta por medio de dos perfiles fijos en las esquinas superiores del marco y con dos acoples basculantes en el antivuelco, lo que permite imprimirle rigidez a la estructura hacia los lados, pero no les resta acción a los amortiguadores.

Por otro lado, para sujetar la cámara, se utiliza una estructura en forma de H, que puede moverse entre 2 y 3 m de altura respecto al pavimento. La cámara está alojada en un *housing* junto con un ventilador anclado a la estructura, y puede rotar. Además, para la señalización, se instalaron cintas reflexivas. Finalmente, se instaló la estructura en la camioneta, como se muestra en la Figura 10 (b).

FIGURA 10. Montaje en la camioneta: (a) Diseño, (b) Instalación



5. RESULTADOS.

A continuación se presentan los resultados de la puesta en marcha del sistema en campo, la metodología de acondicionamiento de las imágenes captadas y las ventajas del sistema propuesto.

5.1 ADQUISICIONES EN CAMPO.

Para comprobar la efectividad en campo del Sicaipav se realizaron dos rutas diferentes. La ruta 1, dentro

de las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, y la ruta 2, en una zona urbana de la ciudad de Bucaramanga. En la Figura 11 se muestran los recorridos en una fotografía aérea de la ciudad de Bucaramanga, adquirida previamente por el grupo de investigación Geomática.

FIGURA 11. Recorridos de prueba del Sicaipav, ruta 1 (blanco) y ruta 2 (negro)-



Las características de estos recorridos se muestran en la Tabla 10. La distancia se determinó por medio de la herramienta Google Earth ®; por tanto, es un estimativo de la distancia que recorrió el vehículo. En general, se escanearon aproximadamente 6,6 km con 2828 imágenes en tan solo 5 horas, este tiempo incluye la conversión de formatos para guardar las imágenes en disco. Cabe aclarar que los recorridos se hicieron en condiciones climáticas diferentes para revisar cómo afecta a las imágenes.

TABLA 10. Características de los recorridos de prueba

	Ruta 1	Ruta 2
Distancia recorrida	3 km	3,6 km
Cantidad de fotos	1212	1616
Resolución de cada imagen	4096 x 2048	4096 x 2048
Espacio en disco (formato JPEG)	3,18 GiB	5,51 GiB
Tiempo empleado en la captación	2,15 h	2,85 h
Condiciones climáticas	Nublado	Soleado

5.2 ACONDICIONAMIENTO DE LA IMAGEN.

En las imágenes captadas se evidencia la presencia de ruido y la carencia de homogeneidad en la iluminación, que disminuye el contraste de la imagen y dificulta la segmentación de los daños. Por ende, fue necesario implementar técnicas para acondicionar las imágenes.

Las imágenes de pavimento presentan principalmente ruido tipo "salt and pepper"; por tanto, el primer paso en el acondicionamiento es usar un filtro de mediana con una máscara de 3x3 para minimizar este ruido, lo que realiza los daños y obtiene mejores resultados, comparado con otros filtros [29–31].

Luego se realiza un proceso para corregir las variaciones de intensidad, principalmente por causa de sombras y señales horizontales. El algoritmo implementado es una adaptación del descrito por Ying [32]. Este método consiste en convertir la intensidad del fondo en una constante A , cuyo valor asignado fue la media de la imagen. Inicia dividiendo la imagen en ventanas de 120x120 píxeles; a cada ventana se le calcula la media, el valor máximo y mínimo de intensidades, se establece un límite superior e inferior y se recalcula a cada ventana la media de los niveles de gris que cumplen los límites establecidos. Luego cada ventana es amplificada por un factor de ajuste, exceptuando las que son mayor o igual a la constante A [32].

Posteriormente, para segmentar los daños del pavimento, se aplica el método umbral de la máxima entropía [33]. Este método se basa en el valor estadístico de la distribución de probabilidad de los niveles de gris y consiste en encontrar el umbral óptimo que maximice la entropía entre el fondo y la región de interés. Este umbral no descarta detalles de daños indispensables y reduce la segmentación errónea causada por bajos niveles de gris. Por estas razones, diversos trabajos en el área de procesamiento de imágenes de pavimentos lo han aplicado [10], [30].

Finalmente, debido a que la imagen segmentada presenta separaciones estrechas entre las regiones de interés y algunos puntos aislados por ruido, se aplica la operación morfológica de cierre con un elemento estructural de radio 2. Esta tiende a suavizar los contornos de las regiones, fusionar las separaciones estrechas y rellenar agujeros de la región [34]. Adicionalmente, se calculó el eje mayor de la elipse circunscrita de cada región y se eliminaron las que fueran menores a 20 píxeles, por ser considerados puntos aislados. Los resultados de cada etapa del acondicionamiento, para tres imágenes seleccionadas de la ruta 1, se muestran en la Figura 12.

5.3 MÉTODO MANUAL FRENTE MÉTODO AUTOMÁTICO.

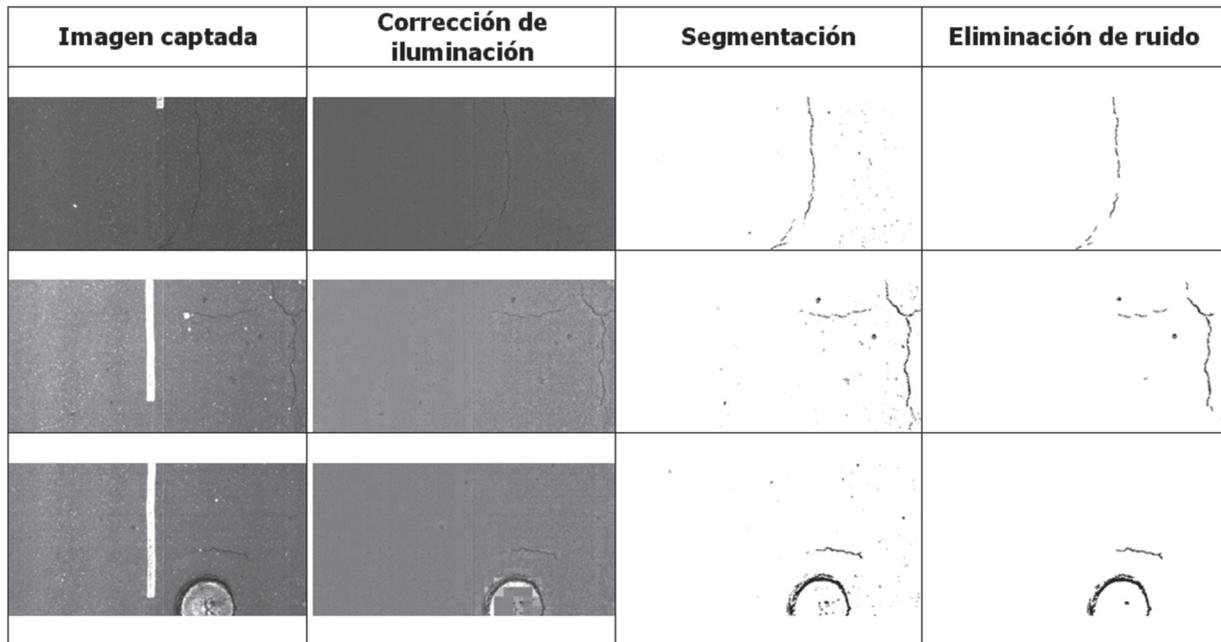
El método manual es el más común para hacer recolección de datos sobre daños en pavimentos. Este consiste en recorrer a pie o en carro la vía, identificar visualmente las fallas en el pavimento siguiendo las instrucciones de un manual específico, en la literatura se identifican varios de estos manuales [4–6], [35–39]; luego, los datos de tipo de daño, gravedad y área son consignados en formularios; por último, esta información es digitalizada para que un *software* genere un índice de condición del pavimento.

Con el método manual es complejo registrar todo el pavimento, debido al consumo de tiempo que implica, por lo tanto se realizan selecciones de muestras. Algunos de los tipos de selección de muestras son: una muestra a un intervalo de distancia fijo, hacer una selección aleatoria predeterminada o que el evaluador seleccione una muestra representativa.

En la Tabla 11 se hace una comparación entre los parámetros de adquisición de datos del método manual que se realiza en el grupo de investigación Geomática y el sistema automático propuesto, en un recorrido de 1 km. Ahora, si por ejemplo se quisiera hacer la recolección de datos de la malla vehicular de la ciudad de Bucaramanga, que implica un recorrido de 544 km/calzada [40], con el método manual se necesitarían 2176 horas equivalente a 272 días de trabajo en horas laborales, con un gasto básico en personal de \$60'928.000, por otro lado, con el método automático se requerirían 408 horas equivalente a 51 días laborales con un gasto en personal de \$3'264.000.

TABLA 11. Características de los recorridos de prueba

	Manual	Automático
Cantidad de personas	1 Ing. Experto 1 Técnico	1 Técnico
Costo Personal	\$20000/hora \$8000/hora	\$8000/hora
Tiempo empleado	4 horas	0,75 horas
Tipo de datos recolectados	Formatos en papel	Imágenes digitales

FIGURA 12. Secuencias de imágenes producto del acondicionamiento

La reducción en costos y en tiempo es significativa con el uso del método automático, además este método no requiere detener el tráfico debido a que el vehículo sigue la velocidad regular de circulación; no implica riesgos para el personal en campo; y permite recolectar datos de toda la malla vial ahorrando recursos. Por estas razones diversas agencias de transporte o entidades están interesadas en la implementación del sistema para el soporte de decisiones y gestión del pavimento, iniciando con la fase de recolección de datos que constituye en información valiosa para la toma de decisiones [40].

Un caso de estudio real, es el del Sistema de administración de pavimentos sobre la ciudad de Bogotá, donde el inventario y diagnóstico de la malla vial se realizó por el costo \$3.489"780.237 [41]. En este caso para evaluar la condición superficial, los contratistas debieron utilizar la metodología *Pavement Condition Index* (PCI). El cálculo del PCI se basa en los resultados de un estudio visual de la condición del pavimento con formatos en papel, para luego identificar el tipo, la extensión y la gravedad del daño [39], [42].

6. TRABAJO FUTURO.

Un sistema de inspección de pavimentos está basado principalmente en dos etapas: adquisición y análisis

de datos [7], [17], [43]. El trabajo futuro consiste en la detección y la clasificación de los daños de manera automática, para generar resultados que puedan ser usados en sistemas de gestión de pavimentos.

Otros retos importantes son la implementación de módulos de inspección dentro del vehículo, la integración de un sistema de iluminación artificial, el almacenamiento y el procesamiento eficiente de la información. La Figura 13 muestra los módulos de estos sistemas.

FIGURA 13. Elementos de un sistema de inspección de pavimentos por imágenes

7. CONCLUSIONES.

Se propone un sistema de captación de imágenes de vías pavimentadas, Sicaipav, que permite recolectar imágenes sin afectar la circulación del tránsito y mejorar el rendimiento, en comparación con los métodos manuales. Se logró que con una sola cámara de escaneo por línea se adquieran imágenes que cubran 4m de ancho, con una precisión de 1 mm y escaneos de hasta 1 km sin detener el vehículo.

Se comprobó la efectividad del Sicaipav con dos recorridos de prueba. En total, se escanearon aproximadamente 6,6 km en 5 horas, es decir, alrededor de 45 minutos por cada kilómetro. En contraste, una inspección visual de un kilómetro tarda aproximadamente 4 horas. Por lo tanto, la implementación de este tipo de sistemas involucra ahorro de recursos.

Las condiciones climáticas pueden afectar la calidad de las imágenes, debido a que este sistema usa iluminación natural. Al realizarse los recorridos en climas diferentes (soleado y nublado), se observó que el día nublado tiene la iluminación suficiente para la captación de imágenes adecuadas. Por otro lado, el día soleado genera imágenes con alto niveles de grises. Sin embargo, se realizó la corrección de iluminación y contraste de las imágenes captadas para una eficiente segmentación de los daños como etapa previa para la detección y la clasificación de daños.

8. AGRADECIMIENTOS.

Esta investigación fue patrocinada por el grupo de investigación *Geomática, gestión y optimización de sistemas*, adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

9. REFERENCIAS

- [1] ZHENG, Qingbo and RACC, David. Support of Pavement Management Systems at the Delaware Department of Transportation (en línea). (Newark, USA), nov. 1999. <http://dspace.udel.edu:8080/dspace/handle/19716/766>
- [2] FLINTSCH, Gerardo and McGHEE, Kevin. Quality Management of Pavement Condition Data Collection. A Synthesis of Highway Practice. Washington D.C. Transportation Research Board, 2009. 144 p.
- [3] TIMM, David and MCQUEEN, Jason. A Study of Manual vs. Automated Pavement Condition Surveys. Auburn, 2004, 141 p. Report. Auburn University. Highway Research Center. Alabama Department of Transportation.
- [4] Invías y UNAL. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles (en línea). (Bogotá D.C., Colombia), Oct. 2006. http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portalIG/home_1/recursos/informacion_institucional/20122007/documento_tecnico.jsp
- [5] FIGUEROA, Ana S. y otros. Manual para el Mantenimiento de la Red Vial Secundaria Pavimentada y en Afirmando (en línea). (Bogotá D.C., Colombia), 2007. <http://web.mintransporte.gov.co/PLANVIAL/images/stories/documentos/pavimentos1>
- [6] MILLER, John and BELLINGER, William. Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. Virginia, 2003, 154 p. Report. Federal Highway Administration. US Department of Transportation.
- [7] TOWNES, Michael S. y otros. Automated Pavement Distress Collection Techniques. A Synthesis of Highway Practice. Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies, 2004. 85 p.
- [8] SUÁREZ ORDÓÑEZ, Jhon Jairo. Análisis comparativo de los métodos para la evaluación de defectos de los pavimentos y su aplicabilidad en carreteras colombianas (en línea). (Bucaramanga, Colombia), feb. 2012. http://apuntesdeinvestigacion.upbbga.edu.co/?page_id=289
- [9] Gevial SAS, Ingeniería y Gestión Vial. Tecnología aplicada a la ingeniería (en línea). (Bogotá D.C., Colombia). (Accedido: 05-Dic-2012). <http://gevia.co/brochure.pdf>
- [10] YU, Xinren. Pavement Surface Distress Detection and Evaluation Using Image Processing Technology. Toledo, 2011, 72 p. Thesis (Master of Science Degree in Electrical Engineering). The University of Toledo. Graduate Faculty. The Department of Electrical Engineering and Computer Science.

- [11] FUKUHARA, Toshihiko, TERADA, Keiji, NAGAO, Makoto, KASAHARA, Atsushi and ICHIHASHI, Shigeki. Automatic Pavement-Distress-Survey System. *Journal of Transportation Engineering* No 3, vol. 116, p. 280-286. ASCE: Transportation & Development Institute, 1990.
- [12] WANG, Kelvin. Designs and implementations of automated systems for pavement surface distress survey. *Journal of Infrastructure Systems* No 1, vol. 6, p. 24-32. ASCE: Transportation & Development Institute, 2000.
- [13] FUGRO ROADWARE Inc.. ARAN 9000 (en línea). (Richmond, USA). (Accedido: 17-Ago-2012). http://www.fugroroadware.com/products/aran_9000/
- [14] CSIRO, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. CSIRO's Road Crack: Automated detection of road cracks (en línea). (Australia). (Accedido: 18-Ago-2012). <http://www.csiro.au/Outcomes/ICT-and-Services/People-and-businesses/RoadCrack.aspx>
- [15] GUNARATNE, M. Investigation of Automated and Interactive Crack Measurement Systems. Tampa, 2008, 93 p. Report. The University of South Florida. College of Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering.
- [16] YAO, Xun, YAO, Ming and XU, Bugao. Automated Measurements of Road Cracks Using Line-Scan Imaging. *Journal of Testing and Evaluation* No 4, vol. 39, 9 p. ASTM: American Society for Testing and Materials, 2011.
- [17] XU, Bugao and HUANG, Yaxiong. Development of an automatic pavement surface distress inspection system. Austin, 2003, 28 p. Report. The University of Texas. Center for Transportation Research. Texas Department of Transportation.
- [18] FEI, Xing H. and O. Nixon. Time Delay Integration Speeds Up Imaging. *Journal Photonics Spectra* No May, 4 p. Laurin Publishing, 2012.
- [19] CAMBRIDGE IN COLOUR. Understanding Digital Camera Sensors (en línea). (Cambridge, England). (Accedido: 27-Sep-2012). <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-sensors.htm>
- [20] PULNIX América, Inc. Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers (en línea). (Belgrade, Serbia), oct. 2000 (Accedido: 16-Jul-2012). <http://www.imagelabs.com/wp-content/uploads/2010/10/CameraLink5.pdf>
- [21] TELEDYNE DALSA. Line Scan CCD Cameras: Camera Piranha 2 User's Manual. Waterloo, 2011, 86 p. Manual. A Teledyne Technologies Company.
- [22] SCHÄFTER+KIRCHHOFF GMBH. Lenses for Line Scan cameras (en línea). (Hamburg, Germany), 2011 (Accedido: 19-Sep-2012). http://www.sukhamburg.com/onTEAM/pdf/zk-kat_e.pdf
- [23] AUTONICS, Sensors&Controllers. Encoderreference E50S8 (en línea). (Illinois, USA), 2012. (Accedido: 20-Oct-2012). http://www.autonics.com/products/products_detail.php?catecode=01/06/01&db_uid=59
- [24] EPIX Inc. PIXCI® EC1 Frame Grabber (en línea). (Chicago, USA), 2012 (Accedido: 08-Sep-2012). http://www.epixinc.com/products/pixci_ec1.htm
- [25] EPIX Inc. XCAP™ Image Processing Software (en línea).(Chicago, USA), 2012 (Accedido: 20-Sep-2012). <http://www.epixinc.com/products/xcap.htm>
- [26] RAMÍREZ JIMÉNEZ, Sandra. Detección de grietas en la cinta asfáltica mediante análisis de imágenes. Santiago de Querétaro, 2012, 69 p. Tesis (Maestría en Tecnología Avanzada). Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Posgrado. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada.
- [27] BETTS, Bryan. Solid State of the Art. *Journal Engineering & Technology* No 9, vol.7, p. 84-87. 2012.
- [28] GETAC TECHNOLOGY CORPORATION. Datasheet Getac B300: Fully Rugged Notebook (en línea). (Taipei, Taiwan), 2012. (Accedido: 08-Oct-2012) http://apac.getac.com/products/B300/B300_overview.html
- [29] SUN, Y., SALARI E. and CHOU E. Automated pavement distress detection using advanced image processing techniques. *International Conference on Electro/Information Technology*, p. 373-377. IEEE, 2009.

- [30] WANG, C., SHA, A. and SUN, Z. Pavement crack classification based on Chain Code. FSKD Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, p. 593-597. IEEE, 2010.
- [31] ZHANG, Pengyu and LI, Hong. Recognition of pavement surface crack. ICNC Sixth International Conference on Natural Computation, p. 3393-3396. IEEE, 2010.
- [32] YING, Liang. Beamlet Transform Based Technique for Pavement Image Processing and Classification. Toledo, 2009, 60 p. Thesis (Master of Science Degree in Electrical Engineering). The University of Toledo. Graduate Faculty. The Department of Electrical Engineering and Computer Science.
- [33] KAPUR, J., SAHOO, P. and WONG, A. A new method for gray level picture thresholding using the entropy of the histogram. Journal Computer Vision Graphics and Image Processing, vol. 29, p. 273-285. Academic Press Inc., 1985.
- [34] GONZÁLEZ, Rafael and WOODS, Richard. Digital Image Processing. 3rd Edition. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company Original, 1992, 773 p.
- [35] DEPARTAMENTO DE GESTIÓN VIAL. Instructivo de Inspección Visual de Caminos Pavimentados (en línea). (Chile), diciembre 2004. https://www.ucursos.cl/ingenieria/2006/2/CI62G/1/material_docente/objeto/105427
- [36] COMITRAN. Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras (en línea). (Guatemala), diciembre 2000. <http://www.entradas.zonaingenieria.com/2009/07/manual-centroamericano-de.html>
- [37] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Pavement Distress Identification Manual for the NPS Road Inventory Program (en línea). (Estados Unidos), 2009. <http://www.wistrans.org/mrutc/files/Distress-ID-Manual.pdf>
- [38] ODOT. Pavement Distress Survey Manual (en línea). (Oregon, Estados Unidos), junio 2009. http://www.oregon.gov/ODOT/hwy/construction/docs/pavement/distress_survey_manual.pdf
- [39] ASTM INTERNATIONAL. Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys (en línea). (Estados Unidos), 2008. <http://www.cee.mtu.edu/~balkire/CE5403/ASTMD6433.pdf>
- [40] PORRAS, Hernán y otros. Plan Maestro de Movilidad. Bucaramanga 2010 – 2030 (en línea). ISBN: 978-958-44-8645-5, Bucaramanga, 2010. 143 p. <http://albatros.uis.edu.co/eisi/eisi.jsp?IdServicio=S482&&IdReg=CG243#CG243>
- [41] RIOS, José y MARTÍNEZ, Iván. Sistema de Administración de Pavimentos sobre la Ciudad de Bogotá (en línea). p. 1-17. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2009. http://www.umng.edu.co/documents/10162/745281/V3N2_28.pdf
- [42] VÁSQUEZ, Luis. Pavement Condition Index (PCI) para Pavimentos Asfálticos y de Concreto en Carreteras (en línea). (Manizales, Colombia), febrero 2002. <http://www.camineros.com/docs/cam036.pdf>
- [43] OUYANG, Aiguo, LUO, Chagen and ZHOU, Chao. Surface distresses detection of pavement based on digital image processing. CCTA, p. 368-375. IFIP International Federation for Information Processing, 2011.