

Detección automática de grietas de pavimento asfáltico aplicando características geométricas y descriptores de forma¹

Artículo de Investigación - Fecha de recepción: 10 de agosto de 2012 - Fecha de aceptación: 20 de septiembre de 2012

Hernán Porras

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Telemática, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, hporras@uis.edu.co

Eduardo Alberto Castañeda

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, eduardo.castaneda@outlook.com

Duván Yahír Sanabria

Ingeniero de Sistemas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, duvanyahir@yahoo.es

Gepthe Manuel Medina

Estudiante de Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, lordmanuel.7@gmail.com

RESUMEN

Las grietas son el principal daño en la superficie del pavimento, porque de estas se derivan los demás tipos de deterioros. La mayoría de grietas en imágenes de pavimento se encuentran con objetos no deseados y desconectadas. Para resolver este problema, se aplica el filtro mediana, para el suavizado de la imagen; el ajuste de contraste, para realzar la grieta; la segmentación, aplicando la media y la desviación estándar de los niveles de gris, para delimitar las grietas; el procesamiento morfológico, para fusionar separaciones estrechas; la eliminación de grietas falsas, aplicando características geométricas y descriptores de forma; y la conexión de grietas, para obtener grietas continuas. Los resultados experimentales fueron obtenidos de las imágenes de pavimento captadas por el sistema semiautomático y el algoritmo generador implementado. Las pruebas demostraron que las grietas fueron detectadas, con una sensibilidad de 81,72% y una especificidad de 99,96% para las imágenes captadas.

Palabras clave

Ajuste de contraste, características geométricas y descriptores de forma, corrección de intensidad, detección de grietas, eliminación de ruido, operaciones morfológicas.

1. Artículo derivado del proyecto de investigación *Algoritmo para clasificación de daños en pavimento flexible de vías urbanas*, Universidad Industrial de Santander.

Automatic asphalt pavement crack detection using geometric features and shape descriptors

ABSTRACT

Cracks are the main damage in pavement surface as other damages are derived from these. Most cracks in pavement images are disconnected and accompanied by unwanted objects. However, some techniques such as median filter for image smoothing, contrast adjustment to enhance crack's definition, segmentation using mean and standard deviation of gray levels to delimit cracks, morphological processing to fuse narrow gaps, removal of false cracks using geometrical features and shape descriptors, and fissure connection to obtain continuous cracks are applied to solve this problem. Experimental results were obtained from pavement images captured by the semi-automated system and the implemented generator algorithm. Tests showed that cracks were detected with a sensitivity of 81,72 % and a specificity of 99,96 % for captured images.

Keywords

Contrast adjustment, Geometric features and shape descriptors, Intensity correction, Crack detection, Noise removal, Morphological operations.

INTRODUCCIÓN

El pavimento asfáltico presenta diferentes tipos de daños, agrupados según su causa en las siguientes categorías: agrietamiento, parcheo y baches, deformación de superficie (ahuellamiento y desplazamiento), defectos de superficie (exudación y desprendimiento, entre otras) y miscelánea de daños [1], [2]. Las características de cada deterioro se describen en el *Manual para la identificación de daños*, presentado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por su sigla en inglés), del Departamento de Transporte de los Estados Unidos [3].

Ahora bien, un indicador importante de la condición del pavimento es la aparición de grietas, porque de estas se originan los demás tipos de daños; por tanto, la detección de grietas en el pavimento es fundamental para la prevención y el mantenimiento de las carreteras. Dentro de los datos que implican conservar las vías se encuentran los relacionados directamente con la inspección del deterioro del pavimento.

Un método común para la adquisición de datos es la inspección visual de pavimentos, consistente en llenar formatos a mano. Este es un procedimiento que se caracteriza por ser lento, peligroso, subjetivo y de altos costos por mano de obra.

En Colombia los modelos de evaluación manuales más utilizados son: la inspección de pavimentos flexibles del Instituto Nacional de Vías - Invías [4], el Índice de Condición de Pavimentos (PCI, por su sigla en inglés) [5] y el Programa de Investigación Estratégico de Carreteras (SHRP, por su sigla en inglés). Sin embargo, ya se están

integrando tecnologías para contribuir a la gestión y a la intervención de carreteras [6]; además, en el ámbito mundial, se han venido desarrollando tecnologías para captación y análisis de datos de manera automática o semiautomática [7]-[11].

El procesamiento digital de imágenes posibilita crear métodos automáticos para la detección de grietas, que permiten apoyar los procesos de inspección de pavimentos [1], [8], [12], [13].

En la práctica de la inspección de pavimento, las grietas están desconectadas, presentan ruido y objetos no deseados, lo que causa que los métodos de detección fallen. Este trabajo se enfoca en la detección de daños tipo agrietamiento en imágenes de pavimento asfáltico, y para esto se abarcaron tres etapas principales del procesamiento de imágenes: adquisición, acondicionamiento y segmentación [14]. Además, se propone un método para eliminar grietas falsas, conectar grietas adyacentes con similar orientación y reducir a un grafo la forma estructural de la grieta, que constituye la base para la extracción de características y la clasificación. Cada imagen captada y generada fue procesada a través de los algoritmos implementados, utilizando el entorno de desarrollo de Matlab.

El documento está organizado de la siguiente manera: En *Antecedentes* se presentan las investigaciones orientadas a la detección de daños en pavimentos. En *Captación de imágenes* se presenta el sistema semiautomático implementado para este propósito, seguida de un algoritmo propuesto para generar imágenes artificiales. En *Acondicionamiento de la imagen* se describe el procedimien-

to para el acondicionamiento de las imágenes captadas. En *Segmentación* se señala el método de segmentación seleccionado. En *Procesamiento morfológico* se muestran las operaciones morfológicas usadas para fusionar separaciones estrechas entre grietas. En *Detección de grietas* se presentan los detalles del método de detección de grietas. En *Representación de grieta* se muestra la forma para representar la estructura de una grieta. Luego, en *Resultados*, se aprecian las pruebas de sensibilidad y especificidad del método de detección. Por último, las conclusiones y las recomendaciones.

ANTECEDENTES

Desde la década de los setenta, diferentes investigadores en el mundo han desarrollado diversos métodos y técnicas para la detección de daños en el pavimento de carreteras usando procesamiento digital de imágenes [10], [15], [16]. A continuación se realiza un resumen de las principales investigaciones orientadas a la segmentación, la conexión y la detección de grietas en vías pavimentadas.

El Centro de Investigación en Transporte de la Universidad de Texas, en Austin, creó un algoritmo de procesamiento de imágenes para detectar grietas en el pavimento. Los pasos que sigue el algoritmo son: ecualización de la imagen, para uniformar el brillo y el contraste de la imagen; división de la imagen en celdas de 8 x 8 píxeles, para localizar las semillas de grieta; filtrado de las semillas, comparando su contraste y su distribución; conexión de semillas, revisando sus direcciones y distribuciones en su vecindad, con base en plantillas predefinidas;

conexión de segmentos de grietas, según su distancia y su dirección; remoción de segmentos conectados que están por debajo del umbral preestablecido, de acuerdo con las directrices del PMIS (del inglés *Pavement Management Information System*) y de AASHTO (del inglés *American Association of State Highway*) [16].

Liu, Xu, Yang, Niu y Pan [17] plantean un nuevo enfoque para la conexión y la identificación automática de grietas, basado en la extensión del segmento. El procedimiento comienza aplicando el POSHE (del inglés, *Partially Overlapped Subblock Histogram Equalization*) y un filtro espacial, para mejorar la imagen. Luego, remueve el ruido estableciendo condiciones basadas en características geométricas. Posteriormente, para unir las grietas correctas, analiza la relación entre los dominios conectados respecto a su posición, su distancia y su dirección. Finalmente, basado en las características extraídas, clasifica el dominio conectado en dirigido y no dirigido, para reconocer los diferentes tipos de grietas [17].

Sun, Salari y Chou [18] proponen un método para la extracción y la conexión de puntos de ruptura de grietas en imágenes de pavimento. El procedimiento inicia aplicando un filtro no lineal, que remueve la intensidad de fondo no uniforme; un umbral adaptativo, para la segmentación de la imagen; y la operación morfológica de cierre y remoción de puntos aislados. Posteriormente, para la conexión de grietas, el algoritmo comienza buscando el píxel inicial de la grieta y la recorre hasta el píxel final en las direcciones derecha, arriba y abajo; luego, ubicado en el píxel final y establecida un área de búsqe-

da, verifica en la vecindad la presencia de los puntos de ruptura. Por último, el algoritmo traza la línea conectando los puntos de ruptura, y repite el proceso a toda la imagen hasta que no se encuentren más puntos de ruptura por conectar [18].

Hu, Zhao y Wang [20], de la Universidad NUST de China, proponen un nuevo enfoque para la detección automática de grietas en pavimento, basados en el análisis de texturas y descriptores de forma. El estudio se basa en: a) la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris propuesta por Haralick [19], para extraer las características de textura; los descriptores de forma, compacidad y eje principal, como características invariantes a la traslación para discriminar la iluminación desigual; y b) la técnica de máquinas de soporte vectorial, para clasificar como grieta o no grieta las regiones segmentadas en la imagen, con base en las características extraídas de textura y forma [20].

Li, Zou y Liu [21] proponen una metodología para determinar la dirección y la densidad de las grietas, como características de distribución espacial de una fisura. Esta metodología inicia con el hallazgo de los puntos de singularidad que se dividen en los siguientes grupos: los puntos finales, presentes en grietas longitudinales y transversales; y los puntos de intersección, presentes en grietas bloque y piel de cocodrilo. Luego presentan un algoritmo de codificación de dirección derivada de la codificación de Freeman para determinar las características de dirección de las grietas. Finalmente, la técnica de triangulación de Delaunay ana-

liza la estructura de cada grieta y extrae su densidad [21].

Castillo y Mesa [22], de la Universidad Industrial de Santander, plantean un algoritmo para el reconocimiento de fallas tipo fisura en pavimento de concreto mediante el procesamiento digital de imágenes. El método inicia segmentando la imagen por la técnica de crecimiento por regiones, seguida de un procedimiento para eliminar las juntas de las losas y el ruido junto con la conexión de fisuras. Posteriormente, describe las propiedades de las fisuras y determina las clases que han de ser reconocidas. Por último, para clasificar por tipo de grieta, se aplica una red neuronal perceptrón multicapa, que emplea el método supervisado de retropropagación de Levenberg-Marquardt [22].

La mayoría de los métodos mencionados anteriormente puede obtener cierta precisión bajo determinadas condiciones de iluminación e imágenes sin ruido. Por tanto, se propone un método de detección de grietas invariante a la iluminación no uniforme y al ruido, que no descarte detalles de fisura indispensables y conecte las grietas discontinuas. Los pasos del procedimiento se muestran en la Fig. 1.

CAPTACIÓN DE IMÁGENES

En este estudio, las imágenes con grietas de pavimento asfáltico fueron captadas con una cámara de escaneo por área sostenida en un trípode acondicionado. Esta cámara fue configurada con resolución de 1920 x 1080 y representación de color RGB, con



Fig. 1 Procedimiento propuesto

profundidad de color de 8 bits; permite ajustar la nitidez, la saturación y el contraste; integrada con GPS para etiquetar geográficamente las imágenes; con un sensor tipo CMOS, que permite mejorar la sensibilidad, reducir el ruido y obtener imágenes con poca iluminación [23].

Se implementó un sistema semiautomático para la captación de imágenes con el fin de controlar la altura, el ángulo de visión y el área de captación de la cámara. Los elementos que constituyen el sistema son: cámara, nivel de burbuja, trípode y perfiles de aluminio. El sistema empleado para la captación de imágenes se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2 Sistema para la captación de imágenes

Procedimiento de captación de imágenes

La cámara fue fijada a un extremo del brazo adaptado al trípode, y se ubicó en posición perpendicular al pavimento, a una altura de 1,60 m, para alcanzar un detalle de menos de 2 mm/píxel, y su obturación se realizó con la configuración en modo temporizador. Se utilizó un nivel de burbuja para poner el sistema en la posición horizontal apropiada.

Las imágenes fueron captadas en las vías vehiculares de pavimento asfáltico de la Universidad Industrial de Santander, de manera que el sistema se iba trasladando a la zona previamente detectada con grietas. Se captaron 95 imágenes en formato JPEG, con diferentes tipos de grietas y fondos de textura compleja. Cada imagen abarca aproximadamente un área de superficie de pavimento de 1,26 m de largo por 2,24 m de ancho.

Generador de imágenes con grietas sintéticas

Para aumentar el número de imágenes con grietas y verificar la correcta funcionalidad

del procedimiento propuesto, se implementó un generador de imágenes con grietas sintéticas y se aplicó un nuevo enfoque del código de la cadena de Freeman [21], [24].

Aunque generalmente los códigos de la cadena son una forma de representar el contorno o píxeles contenidos de una región en una imagen binaria [14], el algoritmo propone un nuevo enfoque para generar grietas sintéticas, con base en las directrices y en las características de los tipos de grieta descritas en el *Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles*, presentado por el Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica [25], [26]. El algoritmo genera aleatoriamente grietas longitudinales, transversales, bloque y piel de cocodrilo de diferente tipo, longitud y grosor.

Ahora bien, el método consiste en aplicar el código de ocho direcciones de Freeman, que asigna valores de 0 a 7 a la vecindad de un píxel, como se muestra en la Fig. 3.

3	2	1
4		0
5	6	7

Fig. 3 Código de Freeman de ocho direcciones

La codificación empleada para generar el esqueleto y el sentido de las grietas transversales y longitudinales se muestra, respectivamente, en la Fig. 4(a) y 4(b). Los valores de cada dirección se generan aleatoriamente y se almacenan en un vector, y la combinación de las codificaciones forman los otros tipos de grietas, teniendo en cuenta que las de piel de cocodrilo y bloque, al generarse, forman rectángulos interconectados que se diferencian en su separación,

con tamaños de 0,1 a 0,3 m y 0,1 a 2 m de lado [3], respectivamente.

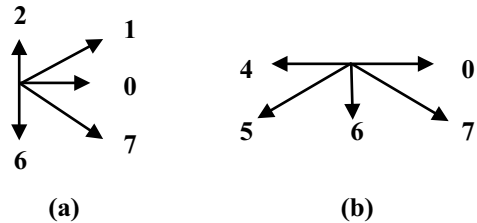


Fig. 4 Codificación empleada para generar las grietas: (a) Codificación de grieta transversal, (b) Codificación de grieta longitudinal

En primer lugar, se genera aleatoriamente el píxel semilla, para determinar el inicio de la grieta; en segundo lugar, según los valores del vector de dirección, se establece el sentido propuesto por el código de Freeman, para representar la grieta transversal o longitudinal; y, por último, se determina el grosor aleatoriamente para cada grieta en un rango entre 3 y 12 mm, según [4], tomando una precisión de 1 mm/píxel.

Finalmente, se generaron 50 imágenes de cada tipo de grieta con fondo parecido al pavimento asfáltico, para un total de 200 imágenes artificiales en escala de grises, con resolución igual a las imágenes captadas. La Fig. 5 muestra una imagen artificial con grieta de bloque generada en escala de grises, en que se considera que la zona de análisis es el tamaño de la imagen.

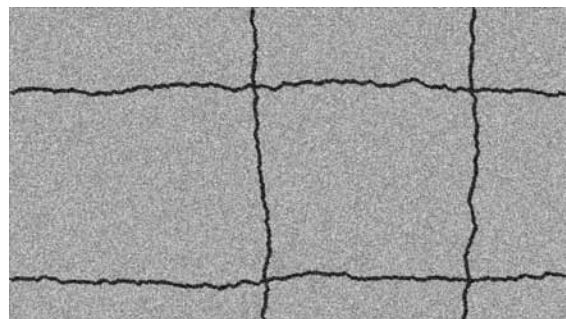


Fig. 5. Imagen artificial con grieta de bloque

ACONDICIONAMIENTO DE LA IMAGEN

Las imágenes de pavimento presentan ruido y objetos no deseados por causa de escombros y variabilidad de la iluminación. Por tanto, a continuación, se aplica el método de suavizado de la imagen y el ajuste de intensidades para corregir estos defectos.

Suavizado de la imagen

Para el método propuesto, los daños tipo grietas en la superficie del pavimento son defectos que no necesitan detalles de color; por tanto, las imágenes captadas y generadas se convirtieron a escala de grises para normalizar la diferencia de los valores en la intensidad de los píxeles y reducir el costo computacional del algoritmo.

Por otro lado, las imágenes de pavimento presentan un ruido similar al *salt and pepper*; causado principalmente por el dispositivo de captación. Además, la textura que tiene la superficie de pavimento asfáltico se asemeja a este tipo de ruido. Para minimizar este ruido, se aplicó el filtro de la mediana con una máscara de 3 x 3, que realizó la grieta y obtuvo mejores resultados, comparado con otros filtros [18], [27], [28].

Ajuste de contraste

La iluminación no uniforme y los objetos no deseados sobre la superficie del pavimento asfáltico, principalmente debido a sombras, señales horizontales y escombros, causa que los algoritmos de acondicionamiento y segmentación de la imagen fallen. Estas etapas son cruciales para obtener buenos resultados en la detección de grietas y

extracción de características; por tanto, una vez aplicado el suavizado de la imagen, se requiere aplicar un algoritmo que permita mejorar el contraste entre las grietas y el fondo de la superficie del pavimento.

La imagen de pavimento está compuesta por la intensidad del fondo, de la grieta y del ruido; el enfoque es hacer uniforme la intensidad de fondo de la imagen para resaltar las grietas. Para este estudio, el algoritmo implementado es una adaptación del descrito en [29], y propone la forma para mejorar la imagen de pavimento, y que sea invariable frente a la iluminación, sin descartar detalles de grieta [30].

Ahora bien, el algoritmo consiste en convertir la intensidad del fondo en una constante A , el valor asignado es la media de los niveles de grises de la imagen. Aplicando el concepto *tile partitioning*, cada imagen es dividida en ventanas de 120 x 120 píxeles, y en cada una de ellas se calcula la media ($G_{m,i}$), el valor máximo ($G_{máx,i}$) y el valor mínimo ($G_{mín,i}$) de las intensidades. Posteriormente, para cada ventana i -ésima se calculan los límites superior e inferior, según (1) y (2), respectivamente [30].

$$L_{sup,i} = G_{m,i} + (k)(G_{máx,i} - G_{m,i}) \quad (1)$$

$$L_{inf,i} = G_{m,i} - (k)(G_{m,i} - G_{mín,i}) \quad (2)$$

Donde k es una constante, cuyo valor asignado fue 0,6. Luego, para cada ventana, se calcula la media modificada $G'_{m,i}$ de los niveles de gris que se encuentran en el intervalo establecido por los límites superior e inferior, y con (3) se calcula el factor de ajuste. Los píxeles con niveles de gris que se encuentren por fuera del intervalo son

considerados puntos sospechosos de ruido y otros objetos de la vía.

$$f_i = \frac{A}{G'_{m,i}} \quad (3)$$

Finalmente, dado por (4), todos los píxeles de cada ventana se amplifican por el factor f_i , excepto aquellos cuya intensidad sea mayor o igual a la constante A . El resultado es una imagen completamente modificada por cada ventana amplificada [29].

$$G'_i = \begin{cases} (G_i)(f_i) & \leftrightarrow G_i < A \\ A & \leftrightarrow G_i \geq A \end{cases} \quad (4)$$

La imagen de pavimento con grieta y marca de señalización de tránsito se muestra en la Fig. 6, y el resultado de aplicar este método se aprecia en la Fig. 7.



Fig. 6 Imagen con grieta y marca de señalización

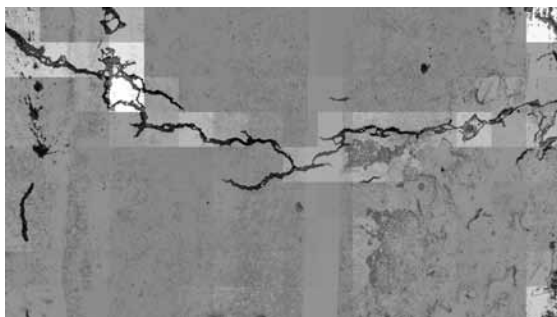


Fig. 7 Imagen homogeneizada

SEGMENTACIÓN

Generalmente, los algoritmos utilizados para la segmentación de daños en imágenes de pavimento son: el método de Otsu, el umbral global iterativo, la máxima entropía, el crecimiento por regiones y el NDHM (del inglés *Neighboring Difference Histogram Method*) [8], [17], [27], [30], [31]. Sin embargo, algunos de estos descartan detalles de grieta cuando la imagen presenta iluminación no uniforme por sombras. La Fig. 8 muestra los resultados obtenidos con estos métodos.

Por las razones anteriores, se optó por otro método de segmentación que utiliza la media y la desviación estándar de los valores de intensidad de la imagen en escala de grises, como parámetros base para calcular el valor umbral [32], porque de forma experimental con las imágenes captadas es invariable frente a la iluminación no uniforme y al ruido, y no descarta detalles de grieta indispensables [30], [32]. El resultado se muestra en la Fig. 8(f).

Este método utiliza la media y la desviación estándar como parámetros base para calcular el umbral apropiado. El umbral es calculado según (5), dividiendo la imagen en dos categorías: la región de estudio y el fondo.

$$T = \bar{G} - B * S \quad (5)$$

Donde T es el umbral calculado, \bar{G} es la media, S es la desviación estándar y B es una constante en la que el valor asignado fue 1,6. Cuando el valor de B es menor a 1,6, aparece demasiado ruido, y si es mayor que 2,2, algunas grietas cortas y delgadas son descartadas [30].

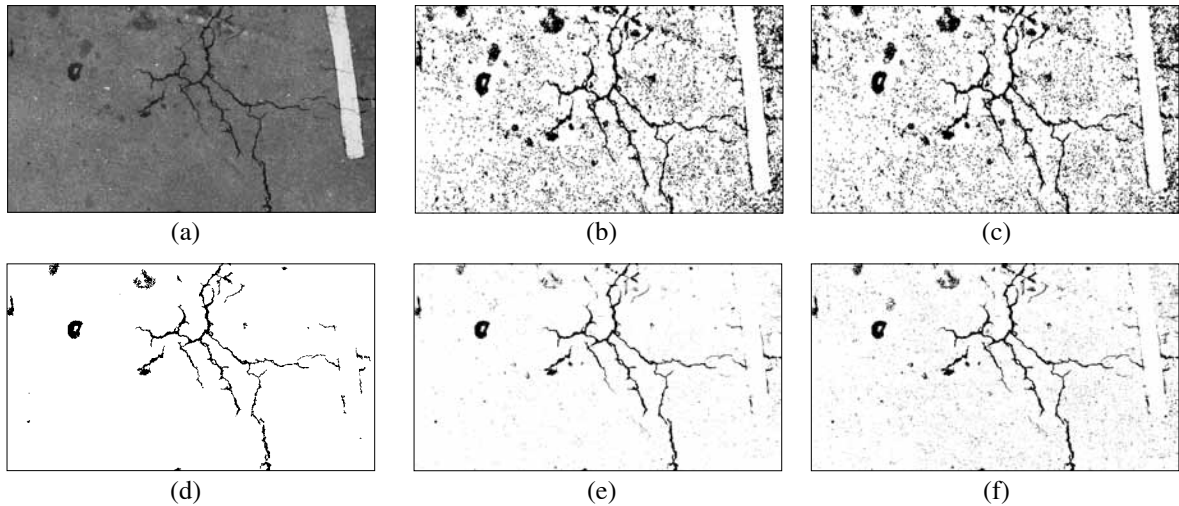


Fig. 8 Métodos de segmentación: (a) Imagen original, (b) Método de Otsu, (c) Umbral global iterativo, (d) Crecimiento por regiones, (e) Máxima entropía, (f) Umbral utilizando la media y la desviación estándar

PROCESAMIENTO MORFOLÓGICO

Las imágenes de pavimento binarias necesitan de procesamientos adicionales para fusionar separaciones estrechas entre grietas, remover ruido y ajustar las fisuras. Para resolver este problema, se aplicaron operaciones morfológicas.

Operación morfológica

La imagen binaria presenta separaciones estrechas entre las regiones de interés y algunos puntos aislados por ruido, lo que puede resolverse con la operación morfológica de cierre, que consiste en aplicar la dilatación y la erosión, que tienden a suavizar los contornos de las regiones, fusionar separaciones estrechas entre regiones, eliminar huecos pequeños y rellenar agujeros del contorno de la región [14].

La operación de cierre se aplicó con un elemento estructural tipo disco de radio 2. La Fig. 9 muestra una mejora en el trazo de la

grieta cuando se aplica esta operación morfológica a la imagen segmentada.

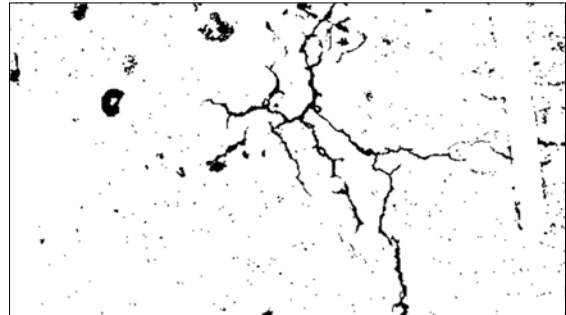


Fig. 9 Resultado de la operación morfológica de cierre

DETECCIÓN DE GRIETAS

En las etapas anteriormente mencionadas, las imágenes aún presentan ruido. Para detectar correctamente las grietas, a continuación se describe el método para la eliminación de grietas falsas y la conexión de grietas.

Eliminación de grietas falsas

En la inspección del deterioro del pavimento, la detección de las grietas es una etapa

importante en la clasificación por tipo de grietas transversales, longitudinales, bloque y piel de cocodrilo [3].

Generalmente, las grietas piel de cocodrilo están compuestas de polígonos interconectados que forman ángulos agudos, y el lado máximo de las piezas no supera los 0,3 m. Las grietas en bloque son piezas interconectadas, aproximadamente rectangulares, con un área entre 0,1 y 10 m²; las grietas longitudinales son paralelas al eje del pavimento y las transversales son perpendiculares a la dirección de construcción [2], [3]. Diversas investigaciones definen las grietas en imágenes como un conjunto de píxeles más oscuros que el fondo y segmentos de línea con diferentes orientaciones [33].

Ahora bien, considerando las características geométricas y de forma, y aplicando el análisis estadístico descriptivo a las imágenes captadas, se determinaron diversos parámetros para detectar las grietas. Para esto, se clasificaron visualmente las imágenes captadas y se agruparon en tres clases: transversales, longitudinales y diagonales.

En primer lugar, se estableció el rango del eje mayor de la elipse circunscrita², la relación del ancho RF_W y el alto RF_H del rectángulo frontera³, la razón entre el eje mayor E_M y el menor E_m de la elipse circunscrita y la orientación del eje mayor respecto al eje horizontal, para detectar las regiones longitudinales y transversales; en segundo lugar, la relación del área de la región de estudio, o conexas A_{RC} , del rectángulo frontera A_{RF} y de la elipse circunscrita A_{EC} , para

identificar las regiones diagonales. Por último, se aplicaron los descriptores de forma excentricidad⁴ y compacidad⁵, descritos en [14], para detectar las grietas.

Para detectar las regiones transversales y longitudinales, se determinó que la longitud del eje mayor de la elipse circunscrita debe ser mayor o igual a 50 píxeles; de lo contrario, pertenece a puntos aislados. Según [13], una grieta es significativa cuando tiene longitud mayor a 7 mm. La razón entre el eje mayor respecto al eje menor de la elipse debe ser mayor o igual a 1, con el fin de remover las manchas presentes en la imagen.

Luego se determina el descriptor de alargamiento de las regiones transversales y longitudinales, teniendo en cuenta si la dirección que predomina es paralela o perpendicular al eje de la vía; para esto, se establece que el ancho del rectángulo frontera debe ser mayor o igual al doble de su altura, y la altura del rectángulo frontera debe ser mayor o igual al doble de su ancho, respectivamente.

En cuanto al descriptor orientación, este fue calculado para cada región transversal y longitudinal de las imágenes captadas, donde los valores variaron en un rango de -90° a 90°. El ángulo es el que forma el eje mayor de la elipse circunscrita con el eje horizontal. Se tomaron los ángulos de 232 regiones transversales y 1073 regiones longitudinales presentes en las imágenes y se representaron en los diagramas de dispersión que se muestran en la Fig. 10 y la Fig. 11, al deducir que el valor absoluto de la

2 Elipse de menor área que encierra toda la región de estudio.

3 Rectángulo que encierra o limita la región de estudio.

4 Relación de la distancia entre los focos de la elipse y la longitud del eje mayor.

5 Describe la densidad de la región de estudio.

orientación para las grietas transversales debe estar en un rango de 0° a 25°, y para las grietas longitudinales, de 65° a 90°.

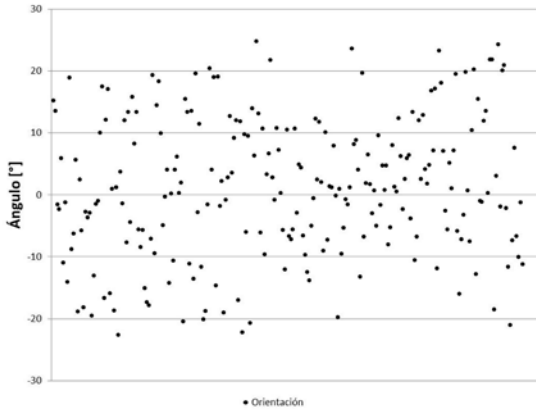


Fig. 10 Dispersión de la orientación de las grietas transversales

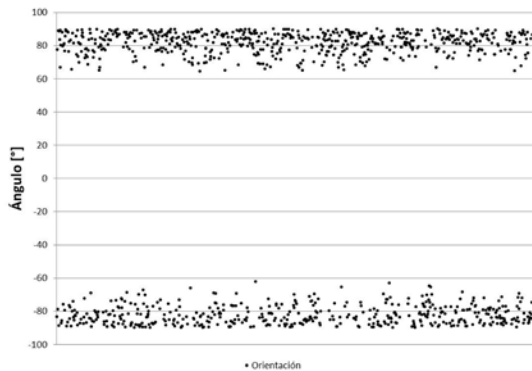


Fig. 11 Dispersión de la orientación de las grietas longitudinales

En la Tabla I se resumen las características descritas anteriormente para la selección de las regiones transversales y longitudinales.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE GRIETAS TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL

Descriptor	Grieta transversal	Grieta longitudinal
Eje mayor (E_M)	≥ 50	≥ 50
Razón (E_M/E_m)	≥ 1	≥ 1
Alargamiento	$RF_W \geq 2RF_H$	$RF_H \geq 2RF_W$
Orientación (θ)	$ \theta \in [0^\circ, 25^\circ]$	$ \theta \in [65^\circ, 90^\circ]$

Por otra parte, para identificar las regiones diagonales, se tomaron 443 regiones de las imágenes captadas. En primer lugar, se calculó la media geométrica de las áreas A_{RC} , A_{RF} y A_{EC} , y resultó que el área de la región conexas es 24% del área del rectángulo frontera y 46% del área de la elipse circunscrita, y el área de la elipse circunscrita es 52% del área del rectángulo frontera. En segundo lugar, se removieron los puntos aislados. Estas características se muestran en la Tabla II.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE GRIETA DIAGONAL

Descriptor	Grieta diagonal
Eje mayor (E_M)	≥ 50
Área región conexas (A_{RC})	$A_{RC} \leq \frac{6}{25} A_{RF} \wedge A_{RC} \leq \frac{23}{50} A_{EC}$
Área elipse circunscrita (A_{EC})	$A_{EC} \leq \frac{13}{25} A_{RF}$

Respecto a las grietas de bloque y piel de cocodrilo, estas se componen de la combinación de las regiones longitudinales, transversales y diagonales detectadas, y se diferencian por la separación entre regiones.

Finalmente, con base en la excentricidad de la elipse circunscrita, que tiene los mismos momentos de segundo orden de la región de estudio y determina que si es 0 se considera círculo y si es 1 se define como línea [14], [26], se realizó el análisis estadístico descriptivo de este parámetro a 1361 regiones que cumplieron las características determinadas, y 771042 regiones consideradas como ruido. Calculando la desviación estándar para las grietas y el ruido, se determinó que los segmentos de grieta varían en

un rango mayor de 0,75 a 1; de lo contrario, pertenecen a ruido.

Adicionalmente, con (6) se calculó la compacidad para cada grieta y ruido, y, aplicando el procedimiento inmediatamente anterior, se determinó un rango de 0,03 a 0,41 para las grietas y 0 a 0,03 para el ruido.

$$C = \frac{2 * \sqrt{\pi * A_{RC}}}{P} \quad (6)$$

Donde C es la compacidad y P es el perímetro de la región de estudio. La Tabla III resume el rango de valores de los descriptores de forma establecidos.

TABLA III
DESCRIPTORES DE FORMA

Descriptor	Grietas
Excentricidad (e)	(0,75 - 1]
Compacidad (C)	(0,03 - 0,41]

A partir de las características determinadas, se establecen las condiciones (7), (8) y (9) para detectar las grietas; de lo contrario, es considerado como no grieta o ruido.

$$Si E_M \geq 50 \wedge \frac{E_m}{E_m} \geq 1 \wedge RF_W \geq 2RF_H \wedge 0^\circ \geq \theta \leq 25^\circ \wedge 0,75 < e \leq 1 \wedge 0,03 < C \leq 0,41 \quad (7)$$

$$Si E_M \geq 50 \wedge \frac{E_m}{E_m} \geq 1 \wedge RF_W \geq 2RF_H \wedge 65^\circ \geq \theta \leq 90^\circ \wedge 0,75 < e \leq 1 \wedge 0,03 < C \leq 0,41 \quad (8)$$

$$Si E_M \geq 50 \wedge A_{RC} \leq \frac{6}{25} A_{RF} \wedge \left[(A)_{RC} \leq \frac{23}{50} A_{EC} \mid A_{EC} \leq \frac{13}{25} A_{RF} \right] \wedge 0,75 < e \leq 1 \wedge 0,03 < C \leq 0,41 \quad (9)$$

En la Fig. 12, en (a), (b) y (c), se muestran las regiones resaltadas que cumplen con cada criterio, respectivamente, y se resalta en rojo la elipse circunscrita y en azul el rectángulo frontera de cada región, y la Fig. 12 (d) muestra el resultado de aplicar estas condiciones.

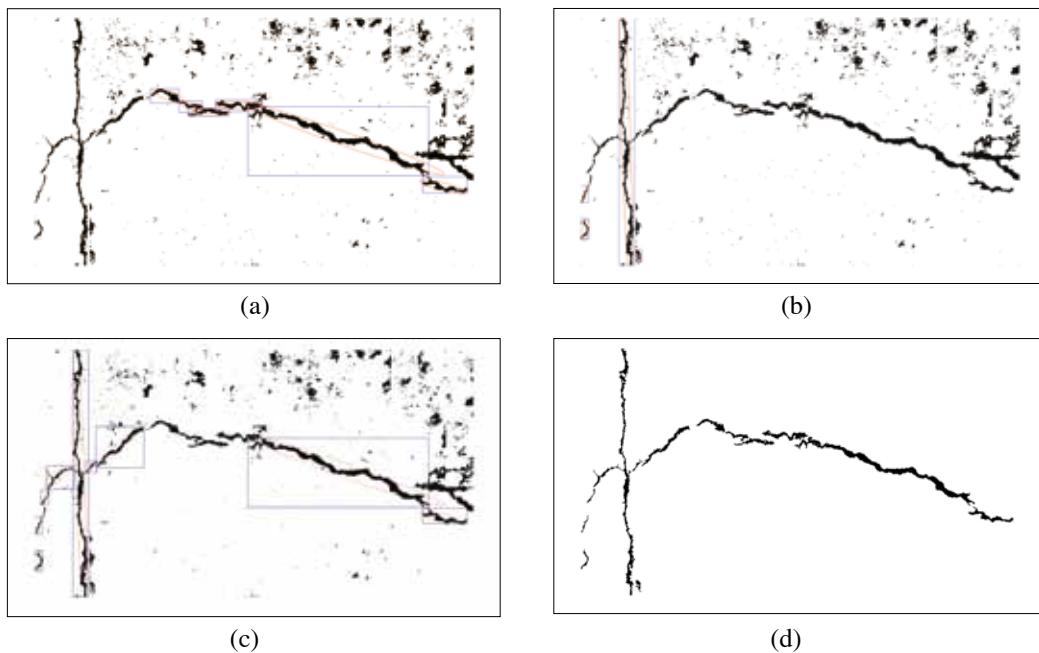


Fig. 12 Detección de grietas: (a) Identificación de grietas transversales, (b) Identificación de grietas longitudinales, (c) Identificación de regiones diagonales, (d) Resultado de aplicar las condiciones

Conexión de grietas

La mayoría de grietas en las imágenes de pavimento están desconectadas, lo que causa que fallen los métodos para la clasificación y la medición de grietas. Para resolver este problema, se propone el algoritmo de conexión de grietas, que se resume a continuación:

1. Iniciar con el último píxel $P_n (px_n, py_n)$ de la primera región conexa RC_1 .
2. Determinar el píxel más cercano $P_c (px_c, py_c)$ de las siguientes regiones conexas adyacentes que tienen el mismo sentido u orientación, según los siguientes criterios:
 - a) $\sqrt{(px_n - px_c)^2 + (py_n - py_c)^2} \leq 150$
 - b) La razón angular que forman las distancias de P_n y P_c es:
 $\theta = \text{Arcocoseno}(dst_H / dst) \in [0^\circ, 25^\circ]$
 - c) $dst_H \geq 0$

Donde dst y dst_H son la distancia diagonal y horizontal, respectivamente, entre P_n y P_c .

3. Conectar las regiones conexas RC_1 y RC_c y repetir el proceso para toda la imagen. La Fig. 13 muestra la conexión entre grietas.

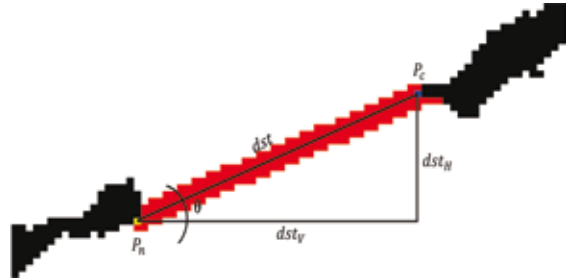


Fig. 13 Conexión entre regiones de grietas

El propósito del criterio (a) es unir solamente regiones conexas cercanas entre sí. El criterio (b) asegura que la conexión se realice a las regiones conexas que tengan el mismo rango de orientación; en este caso, también se aplica para la orientación establecida de las grietas transversales. Sin embargo, cuando se hace una rotación de -90° a las grietas longitudinales, el valor absoluto de esta orientación pasa a estar entre 0° y 25° . Respecto al criterio (c), evita que la RC_c se encuentre atrás de la RC_1 . En la Fig. 14 se muestran los resultados de la conexión de grietas.

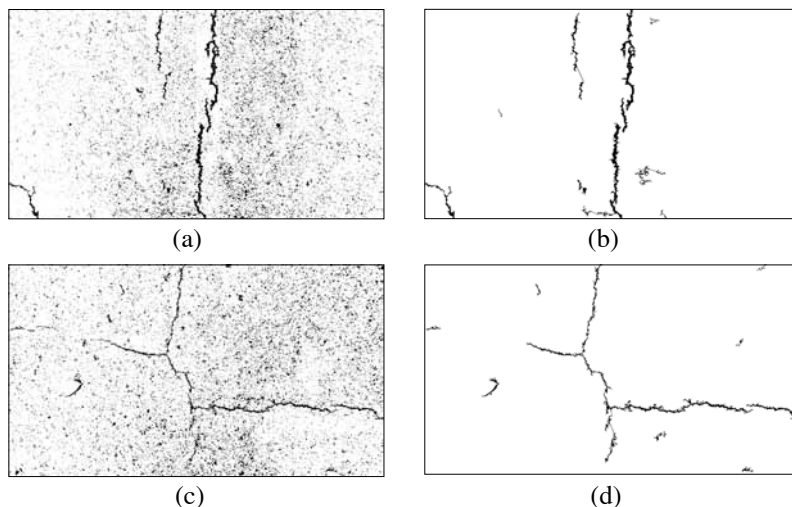


Fig. 14 Conexión de grietas: (a) y (b) Imágenes segmentadas con ruido, (c) y (d) Imágenes sin ruido y con unión de grietas

REPRESENTACIÓN DE GRIETA

Adelgazamiento y remoción de bifurcaciones

Un enfoque importante para representar la forma estructural de una grieta es reducirla a un grafo; para esto, se aplica la operación morfológica de adelgazamiento, que puede ser expresado en términos de la operación *hit-and-miss* [14]. Posteriormente, se aplica la operación morfológica *spur* para remover las ramificaciones del esqueleto. La Fig. 15 muestra el resultado de estas operaciones para obtener el esqueleto de las grietas.



Fig. 15 Esqueleto de las grietas de una imagen

RESULTADOS

En la implementación se consideraron diferentes tipos de grietas: longitudinal, transversal o múltiples. Los resultados experimentales en cada etapa del procesamiento, para cuatro imágenes seleccionadas del conjunto de imágenes captadas, se muestran en la Fig. 16, donde se señalan en recuadros las grietas detectadas y las líneas de conexión.

Los resultados experimentales muestran que la imagen segmentada después del acondicionamiento no descarta detalles de grieta,

pero presenta ruido. Sin embargo, en la etapa de eliminación de grietas falsas, se nota que las grietas son más claras y gran parte del ruido es removido. Además, se aprecia una reducción del número de recuadros o grietas detectadas, al comparar las imágenes desde la etapa de eliminación en adelante. Esto indica que las grietas adyacentes que cumplen los criterios de conexión forman una sola región, que constituye la base para cuantificar la longitud de grieta en toda su extensión.

Pruebas

Para verificar la correcta funcionalidad del método de detección de grietas, en primer lugar se eligieron 50 de las imágenes captadas, teniendo en cuenta que representaran los escenarios con sombras, señales horizontales, humedad y manchas y, además, se seleccionaron 100 imágenes de las generadas con grietas longitudinales y transversales por el algoritmo propuesto en la sección *Captación de imágenes*; y, en segundo lugar, se calcularon los índices de sensibilidad y especificidad que se aplican en otras investigaciones [20], [26].

Los indicadores se presentan en (10) y (11), donde los verdaderos positivos VP, denotan el número de grietas detectadas correctamente; los verdaderos negativos VN, regiones que no son grietas y no se detectaron como grieta; los falsos negativos FN, el número de regiones que no fueron detectadas, y los falsos positivos FP, regiones incorrectamente detectadas como grieta.

$$\text{Sensibilidad (S)} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (10)$$

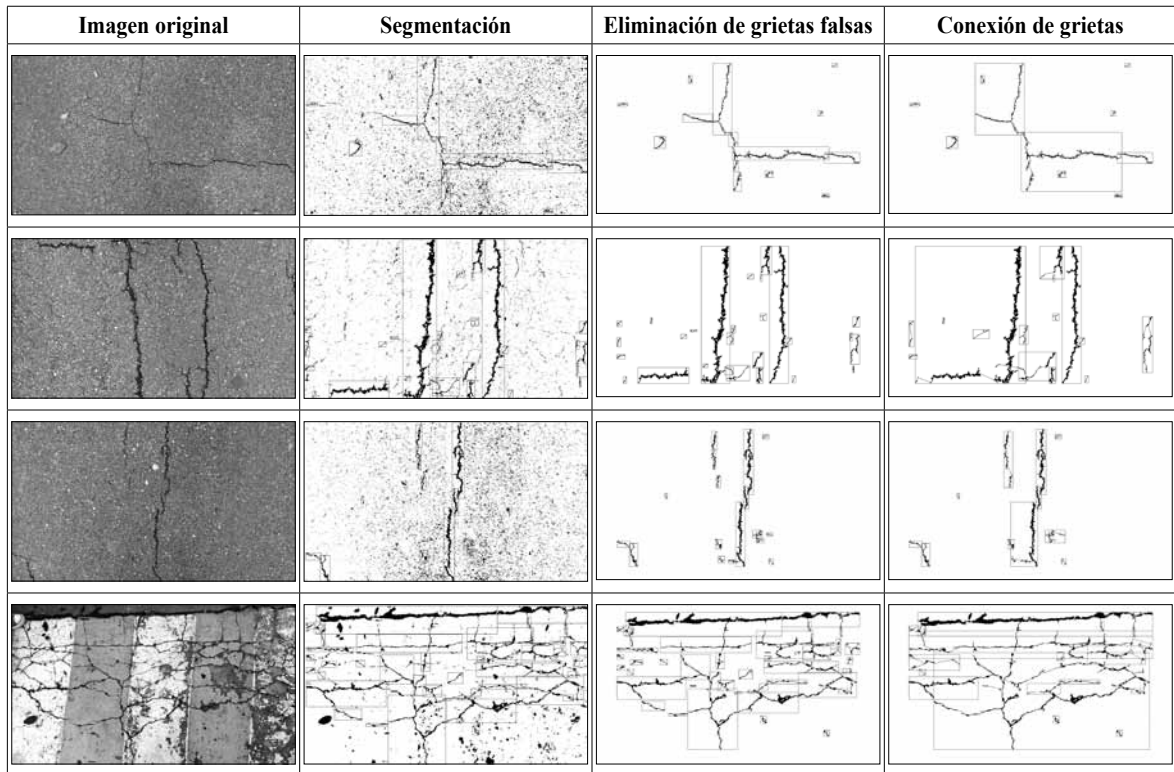


Fig. 16 Imágenes procesadas en cada etapa del procedimiento propuesto

$$Especificidad (E) = \frac{VN}{VN + FP} \quad (11)$$

La Tabla IV resume los indicadores calculados para el total de imágenes captadas y generadas.

TABLA IV
RENDIMIENTO DE LA DETECCIÓN

	VP	VN	FN	FP	S (%)	E (%)
Imágenes captadas	380	313697	85	124	81,72	99,96
Imágenes generadas	229	1359557	4	67	98,28	99,99

La sensibilidad indica la capacidad del método propuesto para detectar como grietas aquellas regiones que realmente lo son, es decir, la proporción de verdaderos positivos

VP; para esto, en cada una de las 50 imágenes seleccionadas, se realizó la verificación de las grietas detectadas correctamente y las regiones que no fueron detectadas FN, y también se realizó el cálculo para las 100 imágenes generadas. Al totalizar los valores de VP y FN, se obtuvo para las imágenes captadas 380 y 85 grietas, respectivamente, con una sensibilidad de 81,72%, y para las imágenes generadas, 229 VP y 4 FN, lo que dio una sensibilidad de 98,28%.

La especificidad denota la capacidad de no detectar como grietas las regiones que en realidad no lo son, es decir, la proporción de los verdaderos negativos: para su cálculo, se realizó la validación de las regiones que no eran grietas y que el algoritmo no detectó como tales, junto con aquellas regiones incorrectamente detectadas como

grietas. Al totalizar los valores de VN y FP, se obtuvieron 313697 y 124 regiones, respectivamente, que dieron una especificidad de 99,96% para las imágenes captadas; en cuanto a las imágenes generadas, se obtuvieron 1359557 VN y 67 FP, con una especificidad de 99,99%.

Un 81,72% de sensibilidad para las imágenes captadas evidencia que las zonas con humedad que aparecen con las grietas ocasionan que la región conexas ocupe en su mayor parte el rectángulo frontera y cause que las grietas no sean detectadas. Sin embargo, la especificidad de 99,96% indica que la mayoría de las regiones detectadas como grietas, en realidad lo eran.

Ahora bien, para las imágenes generadas resultó una sensibilidad de 98,28% que indica que la mayoría de grietas se detectaron correctamente, y 99,99% de especificidad indica que las regiones que no eran grietas no fueron detectadas como tal; todo esto debido a la uniformidad del fondo de las imágenes, la continuidad de cada región y el alto contraste existente en las imágenes.

CONCLUSIÓN

La finalidad del sistema semiautomático de captación implementado fue para obtener una mayor área de cobertura del pavimento y estabilizar la altura y el ángulo de visión de la cámara. Sin embargo, las condiciones de iluminación y las sombras afectaron las imágenes, pero fueron ajustadas en la etapa de acondicionamiento de la imagen, realzando las regiones consideradas como grietas.

Los resultados experimentales demuestran que el método puede detectar eficientemen-

te las grietas de las imágenes de pavimento. Futuros trabajos incluirán el cálculo de la longitud y el ancho de las grietas.

Los resultados de las pruebas realizadas determinan la combinación del filtro de la mediana, para el suavizado de la imagen; el ajuste de contraste, para hacer uniforme el fondo de la imagen y realzar la grieta; la aplicación de la media y la desviación estándar de los niveles de grises, para segmentar la imagen; la combinación de operadores de morfología matemática, para fusionar separaciones estrechas; la eliminación de grietas falsas usando características geométricas y descriptores de forma; y la conexión de grietas, para obtener grietas continuas: un método computacional efectivo para la detección de grietas en pavimento asfáltico.

El mejoramiento de la imagen, la conexión de grietas y la representación estructural de la grieta constituyen la base para la extracción de características y la clasificación, orientados a la automatización de los procesos para la evaluación de pavimentos.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- [1] L. Hong, *Pavement Information System: Detection, Classification and Compression*. Thesis (Master of Science Degree in Engineering). The University of Toledo. College of Engineering. Toledo, 2009, 60 p.

- [2] H. Rababaah, *Asphalt Pavement Crack Classification: A Comparative Study of Three AI Approaches: Multilayer Perceptron, Genetic Algorithms, and Self-Organizing Maps*. Thesis (Master of Sciences). Indiana University South Bend. Graduate Faculty. Department of Computer and Information Sciences. South Bend, 2005, 120 p.
- [3] J. Miller and W. Bellinger, *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. Virginia, 2003. 164 p.
- [4] Invias y UNAL, *Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Bogotá D.C., Colombia, Oct. 2006. [Online] Disponible en: http://invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/doc_details/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles?tmpl=component
- [5] ASTM International, *Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. Estados Unidos, May. 2013. [Online] Disponible en: <http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/D6433.1210479-1.pdf>
- [6] Gevial SAS, *Ingeniería y Gestión Vial. Tecnología aplicada a la ingeniería*. Bogotá D.C., Colombia, 2012. [Online] Disponible en: <http://gevial.co/brochure.pdf>
- [7] M. S. Townes *et al.*, *National Cooperative Highway Research Program. Automated Pavement Distress Collection Techniques*. Washington D. C.: Transportation Research Board of the National Academies, 2004. 85 p.
- [8] X. Yu, *Pavement Surface Distress Detection and Evaluation Using Image Processing Technology*. Thesis (Master of Science Degree in Electrical Engineering). The University of Toledo. Graduate Faculty. The Department of Electrical Engineering. Toledo, 2011, 72 p.
- [9] K. Wang, “Designs and Implementations of automated systems for pavement surface distress Survey”. *Journal of Infrastructure Systems*. Vol. 6, No. 1. ASCE: Transportation & Development Institute, March, 2000, pp. 24-32.
- [10] M. Gunaratne, *Investigation of Automated and Interactive Crack Measurement Systems. Report*. The University of South Florida. College of Engineering. Department of Civil and Environmental Engineering. Tampa, 2008, 93 p.
- [11] X. Yao, M. Yao and B. Xu, “Automated Measurements of Road Cracks Using Line-Scan Imaging”. *Journal of Testing and Evaluation*. Vol. 39, No 4. ASTM: American Society for Testing and Materials, February, 2011, pp. 1-9.
- [12] S. Zhaoyun, W. Chaofan and S. Aimin, “Study of Image-Based Pavement Cracking Measurement Techniques”. *ICEMI: The Ninth International Conference on Electronic Measurements & Instruments*. IEEE, 2009, pp. 140-143.
- [13] S. Chambon and J. Moliard, “Automatic Road Pavement Assessment with Image Processing: Review and Comparison”. *International Journal of Geophysics*. Vol. 2011. Hindawi Publishing Corporation, June, 2011, pp. 1-20.
- [14] R. González, R. Woods and S: Eddins, *Digital Image Processing Using Matlab*. Third New Jersey: Prentice Hall, 2004, 609 p.
- [15] R. Haas, W. Hudson and J. Zaniewski, *Modern Pavement Management*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1994, 604 p.

- [16] B. Xu and Y. Huang, *Development of an Automatic Pavement Surface Distress Inspection System. Report*. The University of Texas. Center for Transportation Research. Texas Department of Transportation. Austin, 2003, 28 p.
- [17] F. Liu, G. Xu, Y. Yang, X. Niu and Y. Pan, "Novel Approach to Pavement Cracking Automatic Detection Based on Segment Extending". International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. IEEE, 2008, pp. 610-614.
- [18] Y. Sun, E. Salari and E. Chou, "Automated Pavement Distress Detection Using Advanced Image Processing Techniques". International Conference on Electro/Information Technology. IEEE, 2009, pp. 373-377.
- [19] R. Haralick, K. Shanmugam and I. Dinstein, "Textural Features for Image Classification". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-3, 1973, pp. 610-621.
- [20] Y. Hu, C. Zhao and H. Wang, "Automatic Pavement Crack Detection Using Texture and Shape Descriptors". *IETE Technical Review*. Vol. 27, No 5, September, 2010, pp. 398-405.
- [21] Q. Li, Q. Zou, and X. Liu, "Pavement Crack Classification via Spatial Distribution Features". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. Vol. 2011, No. 1. Hindawi Publishing Corporation, March, 2011, pp. 649-675.
- [22] M. Castillo Rangel y S. Mesar Ribero, *Algoritmo para reconocimiento de fallas tipo fisura en pavimento rígido mediante tratamiento de imágenes digitales*. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Industrial de Santander. Facultad Fisiomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga, 2011, 95 p.
- [23] SONY, Corp. DSC-HX9V Cámara Digital Compacta Sony. [Online] Disponible en: <http://www.sony.es/product/dsc-h-series/dsc-hx9v/caracteristicas#tab>
- [24] H. Freeman, "On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations". *IRE Transactions on Electronic Computers*. Vol. 10, 1961, pp. 260-268.
- [25] Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica. *Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles*. Vol. 11. México, 2002, 25 p.
- [26] S. Ramírez, *Detección de grietas en la cinta asfáltica mediante análisis de imágenes*. Tesis. Maestría en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Querétaro, 2012, 64 p.
- [27] C. Wang and A. Sha, "Pavement Crack Classification based on Chain Code". FSKD: Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Rochester, N.Y., 2010, pp. 593-597.
- [28] P. Zhang and H. Li, "Recognition of Pavement Surface Crack". ICNC: Sixth International Conference on Natural Computation, 2010, pp. 3393-3396.
- [29] L. Ying, *Beamlet Transform Based Technique for Pavement Image Processing and Classification*. Thesis. Master of Science Degree in Electrical Engineering. The University of Toledo. Graduate Faculty. The Department of Electrical Engineering. Toledo, 2009, 60 p.
- [30] H. Zhou, S. Yang and J. Zhu, "Illumination Invariant Enhancement and Threshold Segmentation Algorithm for Asphalt Pavement Crack Image". *Image Processing IEEE*. 2010. pp. 2-5.

- [31] Q. Zou, Y. Cao, Q. Li, Q. Mao and S. Wang, "CrackTree: Automatic Crack Detection from Pavement Images". *Pattern Recognition Letters*. Vol. 33, No. 3. February, 2011, pp. 227-238.
- [32] O. C. Puan, M. Mustaffar and T. C. Ling, "Automated Pavement Imaging Program (APIP) for Pavement Cracks Classification and Quantification". No. i. Image Rochester, N.Y., 1998, pp. 1-17.
- [33] A. Monem, A. Oloufa and H. Mahgoub, "Asphalt Crack Detection Using Thermography". *Inframation: Thermal Imaging's Leading Users Conference*, 2005. pp. 1-12.