



UN ESTUDIO SOBRE LAS VENTAJAS Y LA RENTABILIDAD DEL USO DE LA ALTA TECNOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE CARRETERAS A NIVEL DE RED

Iván LUGO¹, Herman VISSER²,
Paul GARNICA³

¹ PCI, Proyecto Civil Integral, México, ivanlugo@proyectocivil.com

² ARRB Systems, South Africa

³ CIID, Centro de Investigación e Innovación en Infraestructura, México

Resumen

Este estudio investiga y cuantifica los beneficios económicos del ciclo de vida del uso de dispositivos multifuncionales, el Deflectómetro de impacto (FWD) y el Deflectómetro a Velocidad de Tráfico, TSD. Este dispositivo mide el estado estructural y funcional del pavimento e incluyen parámetros como la rugosidad, la profundidad de la textura, la profundidad de las roderas, la deflexión, la imagen digital y la detección automática de grietas. El resultado del estudio muestra que el coste de la tecnología más avanzada de evaluación de carreteras utilizada para evaluar el estado de la red se justifica por el beneficio o el ahorro en el gasto de las agencias de carreteras. Aunque este estudio se ha realizado en Sudáfrica, sus resultados y conclusiones son aplicables en todo el mundo.

Palabras Clave: Pavimentos, Evaluación, TSD, Gestión, Alta Tecnología

1 Introducción

La gestión del patrimonio vial depende en gran medida de la exactitud y la frecuencia de los datos sobre el estado de la red de carreteras. Estos datos se analizan en un PMS (Sistema de Gestión de Pavimentos) para clasificar el estado que guardan, determinar las medidas correctoras adecuadas y asignar los fondos disponibles de tal forma que se utilicen de la forma más eficaz.

Este documento se centra en las formas más rentables de obtener estos datos esenciales; compara las técnicas utilizadas actualmente en Sudáfrica, que se basan principalmente en evaluaciones visuales del estado, con otros métodos desarrollados más recientemente, que permiten una obtención de datos mucho más exhaustiva y, en gran medida, automatizada.

En este documento se comparan tres escenarios: en primer lugar, la recopilación de datos mediante una evaluación visual únicamente; en segundo lugar, la inclusión de la deflexión medida por el deflectómetro de impacto (FWD) junto con la rugosidad automatizada, la profundidad de las roderas, las mediciones de textura y las imágenes digitales de alta resolución de un vehículo de inspección de la red (NSV); y, en tercer lugar, el uso de un deflectómetro a velocidad de tráfico (TSD), que captura datos de estado integrados, incluidas las mediciones continuas de deflexión, rugosidad, profundidad de las roderas, detección automática de grietas, imágenes y textura en una sola pasada a velocidades de operación.

En este estudio se compara la capacidad de estos tres escenarios para proporcionar la solución más económica y rentable para la gestión de una red de carreteras utilizando el Sistema de Gestión del Desarrollo y Mantenimiento de Autopistas (HDM-4), una herramienta de toma de decisiones desarrollada por el Banco Mundial para verificar la viabilidad económica y de ingeniería de las inversiones en proyectos de carreteras.



2 Detalles de la red carretera seleccionada

Para este estudio se creó una "red de carreteras" simulada formada por varias carreteras, con una longitud total de aproximadamente 66 kilómetros, situadas en las provincias de Kwa-Zulu Natal y Eastern Cape. Los datos necesarios para analizar el ciclo de vida económico de estas carreteras en HDM-4 son el volumen de tráfico, la estructura del firme, diversos parámetros de estado y propiedades geométricas. Los detalles de la red de carreteras se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalles de la red carretera considerada

Road Description	Surfacing Type	Length (km)
P 21 Primary lane	Asphalt	35.6
R72 Eastbound Slow lane	Asphalt	7.65
R72 Eastbound Fast lane	Asphalt	7.65
R72 Westbound Slow lane	Asphalt	7.65
R72 Westbound Fast lane	Asphalt	7.65

La estructura y el estado del firme de estas carreteras son obviamente variables, mientras que el HDM-4 requiere uniformidad para definir y analizar con precisión los efectos económicos del ciclo de vida. El proceso de división de la red de carreteras en secciones uniformes se analiza en detalle más adelante en el documento.

3 Comparación de los métodos de adquisición de datos

En este estudio se utilizaron tres métodos diferentes para evaluar el estado de los tramos de carretera candidatos de la red, en primer lugar, mediante una evaluación visual manual, en segundo lugar utilizando una combinación de NSV, *Network Survey Vehicle*, y FWD y, por último, utilizando un TSD iPAVe (vehículo inteligente de evaluación de firmes) que, es capaz de medir de forma simultánea e integrada datos sobre el estado estructural y funcional.

El primer método incluido en este estudio se llevó a cabo mediante una inspección visual detallada basada en las normas sudafricanas de acuerdo con el COTO TMH9 2016 Parte B. Este manual proporciona un método estándar para la evaluación visual del estado de las carreteras pavimentadas flexibles a nivel de red para su uso en Sistemas de Gestión de Pavimentos. Se clasifican los diferentes tipos de deterioro y se ofrecen descripciones detalladas del grado y la extensión del deterioro. Las evaluaciones se basan en descripciones de los deterioros superficiales y estructurales, así como en elementos funcionales como la evaluación de la calidad de rodadura y el drenaje, etc.

Los modos de deterioro se definen como deformación, agrietamiento y desintegración del revestimiento. Por ejemplo, las grietas de cocodrilo, las grietas superficiales, las grietas en bloque, las grietas transversales y las grietas longitudinales se incluyen en el modo de agrietamiento, mientras que el ahuellamiento y la ondulación serían modos de deformación típicos. Durante la evaluación visual, los distintos tipos de problemas se definen en "grado" y "extensión". El grado 1 indica que no se requiere atención, el grado 3 indica que se requiere mantenimiento en un futuro próximo, mientras que el grado 5 indica que se requiere atención inmediata. Del mismo modo, la "extensión" se clasifica como Extensión 1, que indica una aparición aislada de problemas, Extensión 3 como aparición intermitente y Extensión 5 como aparición extensa.



Las longitudes de los segmentos en que se dividen las evaluaciones visuales pueden variar, pero normalmente se consideran longitudes de 5 kilómetros para las carreteras rurales y de 2 kilómetros para las carreteras periurbanas y las autopistas; las carreteras urbanas suelen segmentarse por intersecciones.

El segundo método para evaluar el estado de las carreteras candidatas consistió en analizar los datos captados por un NSV, así como por el análisis de las mediciones de deflexión realizadas con un FWD. El NSV, como se muestra en la Figura 1, tiene la capacidad de recoger datos de profundidad de roderas, profundidad de textura y rugosidad, junto con imágenes digitales a velocidades de tráfico. Los datos están vinculados a sistemas precisos de medición lineal y coordenadas GPS, lo que permite recopilar propiedades geométricas.



Figure 1. NSV, Network survey Vehicle

Introducido por primera vez en Europa, el FWD se utiliza en Estados Unidos desde la década de 1980 (Wang y Birken, 2014). Desde entonces, se ha convertido en el dispositivo de medición de la deflexión más utilizado en el mundo, incluida Sudáfrica, donde el FWD se utiliza desde los años 90 para evaluaciones a nivel de proyecto y de red. El dispositivo intenta simular una carga de rueda en movimiento dejando caer una breve carga de impulso sobre el pavimento. La respuesta del pavimento a la carga crea un cuenco de deflexión, como se muestra en la Figura 2, que se mide mediante geófonos situados a distintas distancias del centro de carga.

Históricamente, la FWD se ha considerado el dispositivo más adecuado para los estudios de deflexión. Sin embargo, la prueba estacionaria en cada punto de prueba plantea problemas de acomodación del tráfico y de seguridad, mientras que la naturaleza de parada-arranque de la prueba FWD significa que las deflexiones se suelen realizar con una frecuencia baja, normalmente a intervalos de 200 m para las evaluaciones a nivel de red.

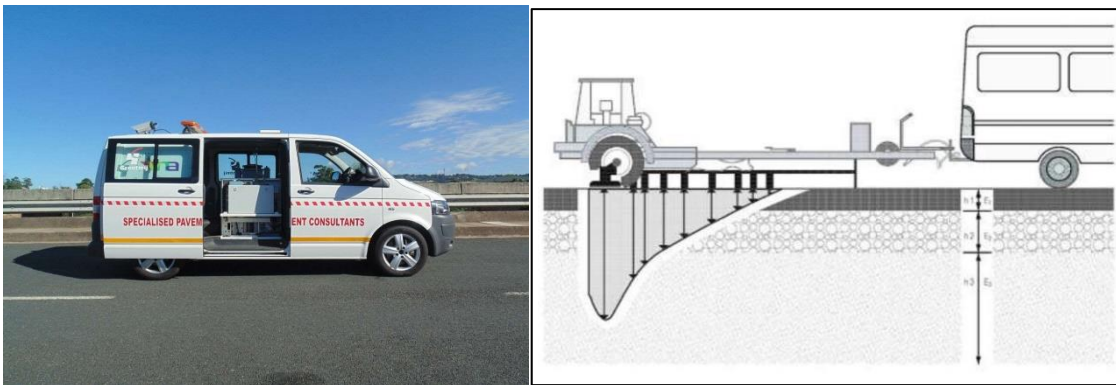


Figure 2. Falling Weight Deflectometer (FGSV, 2004)

El tercer método para evaluar el estado de las carreteras candidatas fue mediante un TSD que permite realizar mediciones continuas de la deflexión y otros parámetros de estado a velocidades de tráfico de hasta 80 km/h. En la figura 3 se muestra la versión iPAVe del TSDD utilizada en este estudio. Utiliza una tecnología patentada de rayo láser Doppler, que también se muestra en la Figura 3, para medir la velocidad de desplazamiento vertical a distintas distancias de la rueda cargada. El método de "área bajo la curva" de Muller y Roberts (2013) se utiliza para convertir las pendientes de deflexión en un cuenco de deflexión que representa la respuesta del pavimento a la carga de la rueda del TSDD. El dispositivo iPAVe concreto utilizado en este estudio cuenta con un rayo láser Doppler 7 delante de la rueda trasera izquierda. El iPAVe incluye detección láser de grietas integrada y georreferenciada espacialmente, imágenes digitales y un perfilómetro láser de clase 1, además del deflectómetro de velocidad de tráfico utilizado para las mediciones estructurales. Esto permite una evaluación completa del firme que proporciona simultáneamente datos integrados sobre el estado funcional y estructural. En comparación con el FWD, el TSDD tiene la capacidad de medir una frecuencia de medición de la deflexión mucho mayor (cada 25 mm) a la velocidad del tráfico, lo que permite mejorar significativamente la producción y la seguridad para el usuario y el operador de la carretera. En la figura 3 se muestra el iPAVe TSDD con un resultado típico de evaluación del estado.

4 Metodología de evaluación

En el caso de este estudio, cada una de las carreteras mostradas en la Tabla 1 se consideró una porción de una red de carreteras. En el primer escenario, los datos se limitaron a evaluaciones visuales llevadas a cabo por evaluadores formados y con experiencia, según lo estipulado en el TMH9, mientras conducían por las carreteras a 20 kilómetros por hora.

En el segundo escenario, las evaluaciones visuales se llevaron a cabo mediante la poscalificación de fotografías de alta definición tomadas por el NSV a intervalos de 20 metros a lo largo de las carreteras seleccionadas. Los datos de la evaluación visual se complementaron con mediciones de la deflexión del FWD cada 200 metros, así como con mediciones continuas de la rugosidad, la profundidad de la textura y las roderas obtenidas por el NSV.



Figure 3. iPAVe TSDD and Hawkeye Toolkit Condition Assessment Output

Los datos para el tercer escenario se basan en los resultados del iPAVe, que es similar al segundo escenario, con la excepción de que es recogido por un solo vehículo y es capaz de realizar mediciones continuas de la deflexión y detección automática de grietas de alta definición. Estas dos propiedades permiten la identificación de áreas exactas con problemas estructurales y la estimación precisa del tipo, gravedad y extensión de las grietas. De este modo, se proporciona información objetiva, en lugar de subjetiva, a los sensibles algoritmos de toma de decisiones del HDM-4.

Las carreteras enumeradas en la Tabla 1 se dividieron a su vez en secciones uniformes para cada escenario en función de los datos sobre la estructura y el estado del firme. Una sección uniforme se identifica como un tramo de carretera uniforme en cuanto a rugosidad, medición de la deflexión y estructura del firme. Esto permite definir con precisión cada segmento de la red de carreteras para garantizar que las obras de reparación propuestas, tal y como se identifican en el HDM-4, sean pertinentes y aplicables al estado de la carretera. La longitud y el número de cada sección uniforme identificada difiere para cada escenario debido al alcance variable de los datos disponibles para cada



escenario, es decir, las secciones uniformes para el escenario 1 se basan únicamente en la evaluación visual, mientras que las de los escenarios 2 y 3 se basan también en la deflexión, el perfilado y, para el escenario 3, en la detección automática de grietas. Las secciones uniformes identificadas para los tres escenarios se muestran en la Tabla 2 y en la Tabla 3 se muestra un inventario de los datos de estado.

Tabla 2. Detalles de las secciones uniformes definidas en el modelo HDM-4

Uniform Section	Length (km)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
P21 Section 1	19.0	19.0	19.0
P21 Section 2	5.5	5.5	5.5
P21 Section 3	11.1	11.1	11.1
R72 Eastbound Fast Lane Section 1	1.3	1.5	1.0
R72 Eastbound Fast Lane Section 2	1.6	2.4	2.4
R72 Eastbound Fast Lane Section 3	0.6	1.6	1.3
R72 Eastbound Fast Lane Section 4	4.2	2.2	1.1
R72 Eastbound Fast Lane Section 5	N/A	N/A	1.8
R72 Eastbound Slow Lane Section 1	1.2	1.4	1.4
R72 Eastbound Slow Lane Section 2	1.6	1.9	1.6
R72 Eastbound Slow Lane Section 3	0.6	1.7	3.3
R72 Eastbound Slow Lane Section 4	4.3	1.3	1.5
R72 Eastbound Slow Lane Section 5	N/A	1.4	N/A
R72 Westbound Fast Lane Section 1	6.0	6.0	6.0
R72 Westbound Fast Lane Section 2	1.6	1.6	1.6
R72 Westbound Slow Lane Section 1	5.7	5.7	5.7
R72 Westbound Slow Lane Section 2	1.9	1.9	1.9
Total	66.2	66.2	66.2

Tabla 3. Inventario de los datos disponibles en cada escenario

Uniform Section	Length (km)		
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Visual Condition Assessment	Yes	Yes	Yes
Roughness	No	Yes	Yes
Rutting Measurements	No	Yes	Yes
Cracking* ²	No	No	Yes
Deflection Measurements	No	Yes	Yes
Texture Depth	No	Yes	Yes
Structural Number*	Yes*	Yes	Yes

Note: *¹ The structural number (SN) is derived from layer thickness and coefficients for Scenario 1 whilst this is calculated from actual data for scenario 2 and 3. *² Cracking from post rated visual assessment in Scenario 2 and from automated crack detection in Scenario 3

El escenario 1 tiene una clasificación del grado y la extensión de varios problemas como el agrietamiento (cocodrilo, longitudinal y transversal), la formación de surcos, el ahuellamiento, los baches, el parchado, la rotura de bordes, la ondulación, el estado del ligante, el sangrado, etc. Los tipos de deterioro necesarios para la introducción de datos en el HDM-4 son las grietas, la formación de surcos, las roderas, los baches, la textura y la zona de rotura de bordes. Las limitaciones de la



utilización de datos de evaluación visual del estado, como se hizo en el escenario 1, es que la calificación del alcance y el grado (de 1 a 5) es subjetiva y no proporciona una determinación precisa de estos problemas, tal y como requiere HDM-4. Un método básico de estimación para convertir los datos de evaluación visual del estado en datos de evaluación visual del estado es el siguiente Se utilizó un método de estimación básico para convertir la extensión y el grado en superficie para rellenar y definir la red de carreteras HDM-4 para el escenario 1. Estos parámetros se estiman con mayor precisión para el escenario 2. Estos parámetros se estiman con mayor precisión para los escenarios 2 y 3 utilizando el equipo láser adicional y las imágenes del NSV y el iPAVe.

Los escenarios 2 y 3 no utilizan los datos de la evaluación visual manual para introducirlos en el HDM-4, sino que utilizan los datos del estudio instrumentado de precisión superior recogidos por el NSV y el iPAVe para todos los datos de estado necesarios mencionados anteriormente. El escenario 2 hace uso de la clasificación de agrietamiento obtenida a partir de los datos de evaluación visual del estado para estimar la entrada de agrietamiento. En el Escenario 3, la funcionalidad de detección automática de grietas del iPAVe, en combinación con el ARRB Systems Hawkeye Toolkit, se utiliza para calcular con precisión el porcentaje de grietas de la carretera a partir de la inspección láser. Los datos NSV e iPAVe utilizados para los Escenarios 2 y 3 respectivamente, utilizan la misma tecnología y equipamiento que da como resultado mediciones similares de IRI, profundidad de textura y formación de roderas.

Las deflexiones de la FWD se registran como una única medición cada 200 metros (5 por km), lo que proporciona una cobertura de apenas el 2,5% si se asume una cobertura de 5 m por punto de deflexión, mientras que el iPAVe proporciona mediciones continuas de deflexión procesadas a intervalos de 5 metros (200 por km). Esto permite una cobertura del 100% y una identificación precisa de los lugares donde se producen cambios en las condiciones estructurales. También permite identificar zonas localizadas de fallo o de mal estado estructural. Las deflexiones máximas de la FWD y la iPAVe se utilizan para calcular la SN mediante la función HDM-4 integrada.

Tabla 4. Resumen del estado de la red de carreteras según el modelo HDM-4

Uniform Section	Scenario 1				Scenario 2				Scenario 3			
	Rut (mm)	IRI (mm /m)	Y _{max} (mm)	SN	Rut (mm)	IRI (mm /m)	Y _{max} (mm)	SN	Rut (mm)	IRI (mm /m)	Y _{max} (mm)	SN
P21 Section 1	5	1.5	N/A	4.6	2.6	1.9	0.21	8.5	2.6	1.9	0.21	8.4
P21 Section 2	10	3	N/A	4.2	8.4	3.4	0.72	3.9	8.4	3.4	0.65	4.2
P21 Section 3	5	2	N/A	4.6	3.8	2.4	0.23	8.1	3.8	2.4	0.21	8.5
R72 EB FL S1	10	2.5	N/A	3.9	4.5	2.3	0.56	4.6	4.4	1.8	0.64	4.2
R72 EB FL S2	15	3	N/A	3.9	6.7	3.4	0.34	6.4	6.3	3.3	0.39	5.8
R72 EB FL S3	10	3.5	N/A	5.5	5.3	3.3	0.32	6.6	5.5	3.0	0.33	6.5
R72 EB FL S4	15	3.5	N/A	4.7	12.1	3.8	0.31	6.7	12.0	3.3	0.43	5.5
R72 EB FL S5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	13.0	4.2	0.19	9.0
R72 EB SL S1	15	2.5	N/A	4.4	5.3	2.0	0.77	3.8	5.3	2.0	0.77	3.8
R72 EB SL S2	20	3	N/A	2.8	12.0	4.2	0.59	4.7	11.8	3.7	0.62	4.4
R72 EB SL S3	15	3.5	N/A	4.9	7.9	3.5	0.61	4.4	9.0	3.7	0.53	4.8
R72 EB SL S4	15	3.5	N/A	6.5	9.4	3.8	0.42	5.5	9.5	3.8	0.35	6.2
R72 EB SL S5	N/A	N/A	N/A	N/A	19.8	4.6	0.35	6.2	N/A	N/A	N/A	N/A
R72 WB FL S1	5	2.5	N/A	4.5	4.5	2.7	0.33	6.5	4.5	2.7	0.31	6.7
R72 WB FL S2	10	4.5	N/A	4.8	7.1	4.4	0.32	6.6	7.1	4.4	0.31	6.7
R72 WB SL S1	10	3	N/A	4.5	5.5	3.3	0.58	4.5	5.8	3.3	0.60	4.4
R72 WB SL S2	5	5	N/A	4.8	5.3	5.4	0.38	5.9	5.6	5.4	0.44	5.4



Como se observa en la Tabla 4, existe una discrepancia significativa entre el ahuellamiento y el IRI evaluados visualmente en comparación con los valores medidos. Los cálculos del número estructural para el Escenario 1 se basan en suposiciones y no en mediciones, como en los Escenarios 2 y 3, y la diferencia es significativa para el resultado del HDM-4.

5 Análisis económico

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de este estudio es determinar las diferencias en el coste para la agencia de carreteras al hacer uso de diferentes métodos de evaluación del estado de las carreteras, es decir, evaluación visual manual básica, recopilación de datos semiautomática y evaluación totalmente automatizada. Los datos de mejor calidad y mayor precisión/frecuencia utilizados como entrada en el PMS permiten tomar decisiones de gasto mejor informadas para optimizar el ciclo de vida de una red de carreteras (Zhang et al., 2010). Se ha utilizado un análisis económico y una comparación de los tres escenarios para cuantificar el coste de capital y recurrente a lo largo de un ciclo de vida típico de la red de carreteras simulada. En este estudio se asume un periodo de análisis de 20 años y una tasa de descuento del 8%, según la práctica estándar sudafricana, para los tres escenarios.

En este estudio se utiliza HDM-4 para definir la red de carreteras, las normas de trabajo y el análisis estratégico de cada escenario. El programa aplica cada norma de trabajo durante el periodo de análisis de cada sección uniforme para optimizar y determinar qué norma de trabajo es más económica. Las alternativas de normas de trabajo y sus intervalos máximos utilizados para este estudio se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Alternativas de conservación disponibles en cada escenario

Work Standards	Interval (years)
Do Nothing (Minimum maintenance)	annually
Single Seal Surfacing	5
Double Seal Surfacing	5
Asphalt Overlay	7
Light Rehabilitation	10
Rehabilitation	15

El coste unitario de cada alternativa se estimó utilizando los costes de construcción actuales relacionados con la industria. El coste unitario de la alternativa económicamente preferida se aplica a cada sección uniforme a lo largo del periodo de análisis y se descuenta a un valor actual. Este coste total descontado para cada escenario consta de un coste recurrente y de un coste de capital. El coste recurrente representa el coste de mantenimiento a lo largo del periodo de análisis, mientras que el coste de capital representa el coste inicial de la intervención correctora seleccionada que se aplica en los tramos de carretera.

La función del método de optimización "Maximizar el valor actual neto" (VAN) del análisis estratégico HDM-4 se utilizó para realizar el análisis económico del ciclo de vida de la red de carreteras para cada uno de los tres escenarios. Esta función de optimización permite seleccionar el conjunto de normas de mantenimiento y mejora más rentables a lo largo del periodo de análisis.

Los índices económicos que revisten importancia para este estudio son los costes descontados de cada hipótesis. Estos permiten determinar el posible ahorro en gastos de agencia en la red de carreteras,



que puede compararse con el coste operativo de la recogida de datos para cada alternativa. Los costes descontados se muestran en la Tabla 6, y se expresan en rands sudafricanos (ZAR) por km, para poder compararlos con el coste de la recogida de datos.

Tabla 6. Costes de capital y recurrentes descontados para cada hipótesis

Scenario	Overall cost for 66.2km ² 's	Discounted Cost (ZAR) per km			Savings per km relative to Scenario 1
		Recurring	Capital	Total Cost	
1. Visual Assessment	R 94,076,118	R 665,284	R 756,020	R1,421,304	-
2. FWD & NSV	R 87,111,265	R 576,033	R 740,046	R1,316,079	R 105,225
3. iPAVe TSDD	R 86,108,129	R 567,904	R 733,020	R1,300,924	R 120,381

El ahorro por kilómetro en relación con el coste total descontado para el Escenario 1 es de 105.225 R y 120.381 R por kilómetro para los Escenarios 2 y 3 respectivamente.

El mayor coste del escenario 1 está directamente relacionado con los datos de entrada recopilados durante la evaluación del estado visual. Estos parámetros de entrada requeridos por HDM-4 se estiman a partir de clasificaciones de grado y extensión y suelen ser menos precisos (como se ilustra en la Tabla 4) debido a que se basan en la observación humana subjetiva y no en hechos reales de medición. A menudo se sigue un enfoque conservador para contrarrestar el riesgo de que unos datos de medición inexactos provoquen un gasto excesivo en la red de carreteras o, lo que es más probable, una reducción de la capacidad de mantenimiento si los presupuestos son limitados.

El escenario 2 proporciona un importante ahorro de costes descontados de 105.225 R por kilómetro en comparación con el escenario 1 debido a la precisión de las mediciones de roderas, IRI, textura y deflexión obtenidas de los dispositivos FWD y NSV. La mayor contribución al ahorro de costes procede de los costes recurrentes, lo que pone de relieve la importancia de obtener datos precisos de los instrumentos para las futuras decisiones de mantenimiento a nivel de red.

El ahorro de costes descontado de 120.381 R por kilómetro para el Escenario 3 es aproximadamente un 15% superior al del Escenario 2, con un ahorro de costes de 105.225 R por kilómetro. La alta precisión de la tecnología láser de detección automática de grietas permite medir con precisión el agrietamiento de la carretera e identificar el porcentaje de grietas anchas. Este último es un dato muy sensible y crítico para el HDM-4.

Basándonos en los resultados de este estudio, existe un claro y significativo beneficio o ahorro de costes al utilizar la última tecnología de evaluación del estado de las carreteras para obtener datos que introducir en el PMS. Sin embargo, el uso de los dispositivos NSV, FWD e iPAVe conlleva un coste. El coste de la recogida de datos para los tres escenarios se ha estimado utilizando precios relacionados con el mercado. El escenario 1 implica que dos evaluadores visuales certificados en un vehículo de pasajeros conduzcan a 20 km/h y se detengan ocasionalmente para inspeccionar el estado de la carretera y rellenar los formularios de evaluación visual o el dispositivo electrónico. Para el escenario 1 se ha calculado un coste operativo global de 163 rands por kilómetro.

El coste del escenario 2 incluye el funcionamiento de un vehículo FWD y un vehículo NSV, así como los operadores de cada dispositivo. También se ha incluido en el coste un vehículo de seguridad detrás del FWD debido a la naturaleza de parada y arranque de la prueba. También incluye una evaluación visual de la carretera posterior a la prueba. El coste operativo total estimado del Escenario 2 es de 2.250 R por km. La tasa de producción de la FWD, que es el factor limitante de este escenario, se



estima en aproximadamente 200 km al día. La prueba FWD se realiza cada 200 metros o 5 veces por km.

En el escenario 3 sólo participan el iPAVe TSDD y los operadores, sin que sea necesario un vehículo de seguridad debido a la velocidad de prueba de 60-80 km/h. El coste operativo total estimado del escenario 3 es de 3.500 R por km. La tasa de producción del iPAVe se estima en aproximadamente 400 km al día.

6 Resultados principales

En la Tabla 7 se comparan los ahorros de costes descontados por kilómetro y los costes operativos de cada hipótesis con los de la hipótesis 1.

Tabla 7. Comparativa de beneficios y costos para cada alternativa

Scenario	Cost incl. Data Collection for 66.5km's	Discounted Cost per km (ZAR)	Operation cost per km (ZAR)	Total Cost per km (ZAR)	Total Savings per km (ZAR)
1. Visual Assessment	R 94,086,907	R 1,421,304	R 163	R 1,421,467	-
2. FWD & NSV	R 87,223,788	R 1,316,079	R 1,700	R 1,317,779	R 103,688
3. iPAVe	R 86,339,794	R 1,300,924	R 3,500	R 1,304,424	R 117,043

Está claro que existe un beneficio o ahorro significativo en los gastos de las agencias de carreteras, incluso con el coste comparativamente alto de los equipos de evaluación del estado de las carreteras en comparación con los métodos convencionales.

El beneficio o ahorro por utilizar el iPAVe TSDD es de 13.355 R por km más que utilizando la combinación FWD y NSV, a pesar de que el coste de funcionamiento del iPAVe es el doble que el de la combinación NSV y FWD. Si este beneficio se aplicara a toda la red sudafricana de carreteras pavimentadas, se obtendría un ahorro de más de 2.000 millones de rands. Si se compara con la evaluación visual manual, el uso de iPAVe TSDD supondría un ahorro de 19 000 millones de rands. Además del ahorro en costes, el iPAVe TSDD proporciona mediciones de deflexión de alta frecuencia que pueden, en combinación con las imágenes digitales, identificar fallos localizados, localizar servicios subterráneos poco profundos y carreteras estructuralmente deficientes pero que no muestran problemas visuales.

7 Conclusiones y recomendaciones

El uso de tecnología punta de evaluación de carreteras para recopilar datos sobre su estado, en lugar de los métodos convencionales, no sólo tiene ventajas económicas, sino que garantiza un PMS con datos de estado muy precisos que permiten tomar decisiones mejor informadas sobre la estrategia de reparación más adecuada, tanto en términos de coste como de idoneidad técnica.

El objetivo de cualquier agencia de carreteras es optimizar el gasto en su red de carreteras minimizando el coste total del transporte y optimizando el gasto para garantizar el menor coste posible para el usuario de la carretera. Así pues, una disminución del gasto sin comprometer el estado de la red de carreteras ni aumentar el coste para el usuario puede considerarse un doble beneficio. Este estudio ha demostrado que el aumento de la calidad y la precisión de los datos sobre el estado de las carreteras supone un importante ahorro de costes para las autoridades viarias, los usuarios de las carreteras y, lo que es más importante, para el erario público.



La principal conclusión de este estudio es que unos datos precisos de evaluación del estado de las carreteras son cruciales para definir correctamente la red de carreteras y tomar las decisiones de gasto adecuadas para optimizar la gestión del ciclo de vida de las carreteras de la red. El beneficio de utilizar la combinación FWD y NSV o los dispositivos iPAVe se muestra claramente con un ahorro de costes de aproximadamente 103.688 R (+- 7.400 USD) y 117.043 R (+- 8.400 USD) por kilómetro, respectivamente. La TSDD iPAVe de espectro completo y cobertura del 100% proporciona datos superiores de evaluación del estado de las carreteras en comparación con la combinación de FWD y NSV, lo que permite una entrada más precisa en el análisis HDM-4 con un ahorro de costes resultante del orden de 13.355 R (+- 1.000 US \$) por kilómetro. Además, la alta frecuencia de deflexión del iPAVe elimina la necesidad de pruebas de deflexión rutinarias adicionales a nivel de proyecto, excepto para investigaciones localizadas.

Se recomienda que este estudio limitado se amplíe a una red de carreteras más extensa que incluya una mayor variedad de condiciones viarias. Debería investigarse el uso de segmentos de longitud fija, además de secciones uniformes como las utilizadas en este estudio.

8 Agradecimientos

Las siguientes personas han colaborado en la obtención y el análisis de los datos necesarios para este estudio y me gustaría darles las gracias. Francois van Aswegen, de GIBB, por proporcionar datos completos sobre la carretera R72 Settlers Way. Yeshveer Balaram, de ARRB Systems, por facilitar datos exhaustivos sobre la carretera P21.

9 Referencias

- [1] M.L. Wang, R. Birken (2014). Sensing solutions for assessing and monitoring roads. Sensor Technologies for Civil Infrastructures, Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring
- [2] Wayne B. Muller & Jon Roberts. (2013). Revised approach to assessing traffic speed deflectometre data and field validation of deflection bowl predictions, International Journal of Pavement Engineering, 14:4, 388-402, DOI: 10.1080/10298436.2012.715646
- [3] Committee of Transport Officials Manual for Visual Assessments of Road Pavements (2016) The South African National Roads Agency SOC Limited PO Box 415, Pretoria, 0001.
Research Society for Roads and Traffic. (2004) FGSV Working Paper "Load Capacity", Part C2 "FWD, Evaluation and Evaluation", AK 4.8.2, draft as of February 2004.
- [4] Zhang, Han & Keoleian, Gregory & Lepech, Michael & Kendall, Alissa. (2010). Life Cycle Optimization of Pavement Overlay Systems. Journal of Infrastructure Systems - J INFRASTRUCT SYST. 16. 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000042. SP 2 (3ra ed.). Lexington, KY, EUA: Asphalt