

# SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA LA AUSCULTACIÓN DE LA CALIDAD Y EL DETERIORO DEL PAVIMENTO A BAJO COSTE Y LA GESTIÓN AUTOMÁTICA DE SU MANTENIMIENTO (PAV-DT)

### **PABLO ÁLVAREZ TRONCOSO**

Director Laboratorio de BECSA  
palvarez@becsa.es

### **MIREIA BALLESTER RAMOS**

Directora Proyectos de BECSA  
mballester@becsa.es

### **M<sup>a</sup> DEL PILAR PEIRÓ TORRES**

Técnico Innovación de BECSA  
mppeiro@becsa.es

### **FRANCISCO JOSÉ VEA FOLCH**

Director Innovación y Nuevas Tecnologías de BECSA  
fjvea@becsa.es

### **ERNESTO COLOMER ROSELL**

Técnico de Investigación de la UPV  
erco1@cam.upv.es

### **MIRIAM LABRADO PALOMO**

Técnico de Investigación de la UPV  
milabpa@alumni.upv.es

### **JULIA IRENE REAL HERRAIZ**

Profesora Titular de la UPV  
jureaher@tra.upv.es

---

# SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA LA AUSCULTACIÓN DE LA CALIDAD Y EL DETERIORO DEL PAVIMENTO A BAJO COSTE Y LA GESTIÓN AUTOMÁTICA DE SU MANTENIMIENTO (PAV-DT)

---

## RESUMEN

Uno de los criterios más extendidos que determinan el estado de mantenimiento de la carretera es el denominado IRI (International Roughness Index ratio). Sin embargo, si este índice no es tomado con un rendimiento adecuado, supone un alto coste. Así, surge el proyecto denominado PAV-DT, que persigue la identificación y cuantificación de los daños que presenta la carretera mediante el análisis y filtrado del perfil de rugosidad, incorporando localizadores GPS y acelerómetros.

La solución se basa en la instrumentación de un nodo inercial en las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo convencional. El análisis de estos registros inerciales mediante una plataforma digital cloud-based automatiza el funcionamiento y muestra el perfil de rugosidad del pavimento así como un levantamiento de defectos existentes. El rendimiento de toma de datos es de más de 100km/h con una suficiente precisión para ser clasificados como Clase I.

Por otro lado, el equipo investigador trabaja en incorporar modelos predictivos de evolución del IRI que permitan no sólo visualizar el histórico de datos de un tramo, sino también predecir cuál será su evolución a futuro para prever labores de mantenimiento en el momento más ventajoso, posibilitando planes de mantenimiento predictivo.

Así, PAV-DT consistirá en un novedoso dispositivo, sencillo y de bajo coste que, instalado sobre un vehículo convencional, transformará a éste en un vehículo de auscultación de Clase I y ofrecerá al

mercado un producto de auscultación con menor coste de implantación y que ofrece altos rendimientos de toma de datos. La solución ofrece a los gestores de las infraestructuras una plataforma digital que les permitirá visualizar datos de IRI actuales, la evolución del mismo a lo largo del tiempo, e incluso prever su evolución a futuro. PAV-DT constituirá una herramienta fundamental para la gestión de infraestructuras viarias.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto que requiere especial atención en el ámbito de las carreteras es el **estado actual de su pavimento**, ya que está directamente relacionado con los **costos de circulación** (costo del combustible y costo de mantenimiento de los vehículos) y con la **seguridad** y la **comodidad** de la conducción. Por lo general, el estado del pavimento se mide por su **rugosidad**, que se ve incrementada como consecuencia de la erosión y aparición de defectos.

La rugosidad del pavimento se define como la cantidad de irregularidades en la superficie del mismo, que afectan negativamente a la calidad de circulación de los vehículos, así como a los **costes del retraso de los vehículos**, al consumo de combustible y a los costes de mantenimiento. Hoy en día, la rugosidad se cuantifica habitualmente utilizando diferentes índices, como pueden ser el *Present Serviceability Rating (PSR)*, *Mean Panel Rating (MPR)*, *Profile Index (PI)*, *Ride Number (RN)* o *Root Mean Square Vertical Acceleration (RMSVA)*, siendo el **Índice Internacional de Rugosidad (IRI)** el más prevalente.

Para su medición, en este artículo se desarrolla el sistema **PAV-DT**, basado en un **software de mantenimiento predictivo**. Dicho software es capaz de procesar y analizar toda la interacción inercial entre la carretera y el vehículo para obtener los parámetros del **IRI**, los datos de rugosidad y la regularidad longitudinal; pudiendo además **localizar y evaluar los defectos** del pavimento, así como determinar automáticamente **planes de mantenimiento**.

## 2. METODOLOGÍA

En esta sección se explica la metodología seguida en el desarrollo del sistema PAV- DT, que cuenta con los siguientes **algoritmos**:

- Algoritmo para la obtención del perfil de rugosidad (IRI) de una carretera en tiempo real (i).
- Algoritmo para la detección de defectos específicos, como es el caso de grietas, así como su clasificación (ii).
- Algoritmo para predecir la evolución del IRI a lo largo del tiempo (iii).
- Algoritmo para el plan de mantenimiento (iv).

En los siguientes apartados se desarrollan de forma extensa cada uno de ellos.

### 2.1 Algoritmo para la obtención del perfil de rugosidad (IRI) de una carretera en tiempo real (i)

En primer lugar, la principal característica del sistema es la estimación del IRI (i), que se obtiene a partir de los **datos de posición y aceleración** del vehículo. Para ello, los acelerómetros se instalan en las masas suspendidas y no suspendidas del vehículo, y la posición se obtiene mediante la interfaz OBD (o a partir del sensor GPS), referenciando los resultados a una sección de la carretera.

El algoritmo se basa en el **modelo de Cuarto de Coche**, que obtiene el perfil de la carretera para a continuación, hallar el IRI. El modelo Cuarto de Coche simula la mitad del eje de un vehículo, es decir,

la interacción entre la rueda (y su sistema de amortiguación) y la superficie de la carretera.

Así pues, el primer paso es la diferenciación de **masas del vehículo**:

- Masa de resorte ( $M_s$ ).
- Masa no suspendida ( $M_u$ ).

Por un lado, la unión de masas está modelada por un **muelle y un amortiguador**.

- Constante de rigidez ( $K_s$ ).
- Constante de amortiguación ( $C_s$ ).

Por otro lado, en la unión del vehículo y la superficie de la carretera, el neumático está modelado por medio de una **unión elástica** formada, exclusivamente, por un muelle.

- Constante de rigidez ( $K_t$ ).

El esquema de todo ello puede apreciarse en la siguiente imagen:

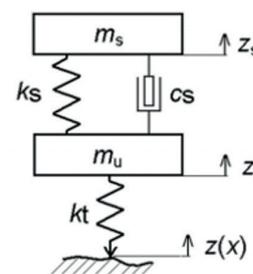


Figura 1 Esquema del modelo de Cuarto de Coche.

Una vez definido el modelo físico de Cuarto de Coche, mediante **ecuaciones dinámicas**, se pueden extraer las fórmulas que definen su comportamiento. En las ecuaciones,  $Z$  representa el desplazamiento ( $s$  - con muelles;  $u$  - sin muelles) y  $W$  el perfil del pavimento.

$$M_s \cdot \ddot{Z}_s + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_s(Z_s - Z_u) = 0$$

$$-M_u \cdot \ddot{Z}_u + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_s(Z_s - Z_u) + K_t(W - Z_u) = 0$$

Considerando la combinación de las ecuaciones del Modelo de Cuarto de Coche, se puede alcanzar la siguiente expresión del **perfil del pavimento**:

$$W = Z_u + \frac{M_s \cdot \ddot{Z}_s + M_u \cdot \ddot{Z}_u}{K_t}$$

El desplazamiento de masa no suspendido,  $Z_u$ , se obtiene de la doble integración de la aceleración. La aceleración, obtenida de los sensores del vehículo, ha sido previamente filtrada para eliminar el componente gravitatorio. Este filtro se ha realizado utilizando un algoritmo basado en la **Transformada rápida de Fourier (FFT)**.

$$Z_u = \iint_0^T \ddot{Z}_u dt$$

Una vez que se obtiene el perfil del pavimento,  $W$ , se suaviza utilizando un **filtro de media variable**:

$$h_{ps} = filter(W)$$

Adicionalmente, para obtener la misma medición de IRI independientemente del vehículo usado, es necesario utilizar una referencia del modelo del vehículo, comúnmente denominado modelo **“Golden Car”**. Este Golden Car cuenta con los siguientes parámetros:

Tabla 1 Parámetros del Golden Car.

$M_u/M_s$	0.15
$K_s/M_s$	63.3
$C_s/M_s$	6.0
$K_u/M_s$	653

El siguiente paso es obtener las **variaciones de elevación de las masas con y sin resortes** ( $\dot{Z}_s, \dot{Z}_u$ ) que ocurrirían con el paso del Golden Car por el perfil calculado. Para ello, es necesario resolver de nuevo el sistema de ecuaciones diferenciales definido en el

Modelo de Cuarto de Coche, esta vez, utilizando los parámetros de Golden Car.

$$\left. \begin{aligned} M_s \cdot \ddot{Z}_s + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_s(Z_s - Z_u) &= 0 \\ -M_u \cdot \ddot{Z}_u + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_s(Z_s - Z_u) + K_t(W - Z_u) &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow \dot{x} = Ax + B \cdot h_{ps}$$

Donde:

$$k_1 = \frac{K_t}{M_s} \quad k_2 = \frac{K_s}{M_s}$$

$$c = \frac{C_s}{M_s} \quad \mu = \frac{M_u}{M_s}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 + k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_1}{\mu} \end{bmatrix}^t$$

$$x = [Z_s \quad \dot{Z}_s \quad Z_r \quad \dot{Z}_r]^t$$

Por otro lado, el desplazamiento,  $L$ , se calcula integrando la velocidad del vehículo,  $v$ , y la posición GPS.

$$L = \int_0^t v dt + GPS_{correction}$$

Con las variaciones de elevación y el desplazamiento, el **IRI** se define como la suma de las distancias medidas, en módulo sobre la horizontal, para la distancia considerada. Es decir, el IRI es el **movimiento vertical acumulativo del asiento del conductor** del vehículo a lo largo de una distancia determinada.

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |\dot{Z}_s - \dot{Z}_u| dt$$

## 2.2 Algoritmo para la detección de defectos específicos, como es el caso de grietas, así como su clasificación (ii)

La segunda característica del sistema es la **localización y clasificación de los defectos** e imperfecciones de la carretera. Para ello, se han desarrollado dos algoritmos basados en la **Transformada de “Wavelet” (WT)**, utilizando la aceleración de masa no suspendida (ii). El primer algoritmo se utiliza para

**SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA LA AUSCULTACIÓN DE LA CALIDAD Y EL DETERIORO DEL PAVIMENTO A BAJO COSTE Y LA GESTIÓN AUTOMÁTICA DE SU MANTENIMIENTO (PAV-DT)**

localizar y limitar el rango del daño, mientras que el segundo permite su clasificación y evaluación de gravedad.

La Transformada de "Wavelet" de una función  $f(x)$ , es la descomposición en un conjunto de funciones  $\psi_{j,k}(x)$  que forman una base y se llaman "wavelets". El modelo discreto de WT se expresa de acuerdo con la siguiente expresión:

$$f(x) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \psi_{j,k}(x)W(j, k)$$

Donde:

- J es el número máximo de escalas de descomposición.
- K es la posición máxima en la escala de señal original.

Para la **identificación de defectos**, se desarrolla un **algoritmo basado en el Filtro Espacial a Escala (SSF)**. El filtro SSF logra eliminar eficazmente el ruido de la señal multiplicando los coeficientes de "wavelet" de diferentes niveles adyacentes.

$$\Omega_j(j, k) = \prod_{i=0}^{j-1} W(j + i, k)$$

También para la identificación de defectos, se propone la familia de **funciones Daubechey**, específicamente la **"wavelet" db2**, como la mejor función madre.

$$\Omega_2(j, k) = W(j, k) \cdot W(j + 1, k)$$

El algoritmo desarrollado sigue un proceso para obtener nuevos coeficientes de "wavelet" filtrados. Estos coeficientes se utilizan para identificar **cambios repentinos en la aceleración** debido a la presencia de baches en la carretera. Con los nuevos coeficientes obtenidos, a partir del algoritmo de detección de defectos, se pueden determinar los **puntos anómalos** estableciendo un umbral y un tamaño de ventana.

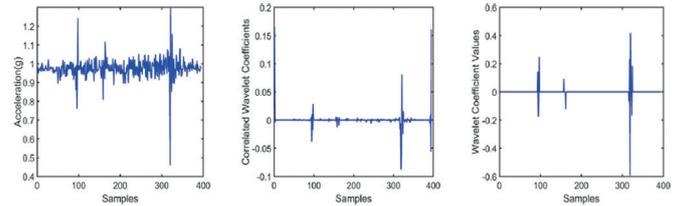


Figura 2. Señal del acelerómetro original (izquierda) y coeficiente de onda correlacionadas  $\Omega_{2(1,k)}$  y  $W_{new(j,k)}$  (derecha).

Una vez identificados los defectos, se clasifican entre **baches y resaltos** teniendo en cuenta la evolución de las señales.

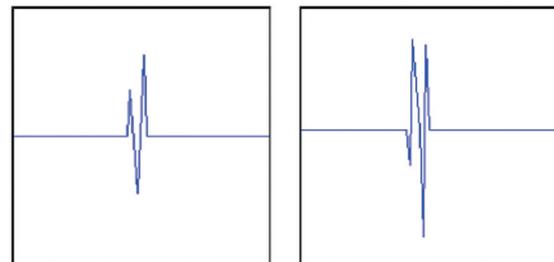


Figura 3. Patrón de bacheo en la carretera (izquierda) y patrón de resalto en la carretera (derecha).

**2.3 Algoritmo para predecir la evolución del IRI a lo largo del tiempo (iii)**

Otra característica de PAV-DT es que permite **predecir la evolución del IRI** a lo largo del tiempo (iii).

Existen numerosos **modelos matemáticos** empíricos para predecir la evolución de los IRI en un pavimento. Un tipo de modelos se basa en la caracterización del tipo de carretera: tipo de asfalto, clima y flujo, tipo de tráfico rodado, etc. Otros estudios, hacen una comparación entre los modelos matemáticos y las redes neuronales artificiales, que también se basan en la caracterización del pavimento. Los modelos basados en redes neuronales tienen mejores resultados que los modelos empíricos.

Por otra parte, también hay estudios que no se basan en la caracterización del tipo de vía, como se ha considerado en la evolución anterior de los IRI. Esto quiere decir que son capaces de predecir los valores futuros de IRI tomando sólo los valores

históricos de IRI que se han dado. Para obtener las ventajas de ambos modelos, se ha implementado en el software desarrollado una **red neuronal artificial** basada en ambos métodos. Esta red neuronal contará con los siguientes inputs:

Tabla 2 Inputs seleccionados para la red neuronal desarrollada.

Zona	1	Clima frío y húmedo y subsuelo pobre o muy pobre	N/A
	2	Clima cálido y subsuelo pobre o muy pobre	N/A
	3	Clima frío y seco y una buena o muy buena subrasante	N/A
	4	Clima cálido y seco y una buena o muy buena subrasante	N/A
Familia de pavimento	A	Hormigón asfáltico grueso	> 139.7 mm
	B	Hormigón asfáltico de espesor medio	63.5-139.7 mm
	C	Hormigón asfáltico delgado	< 63.5 mm
Cargas de tráfico	L	Equivalente bajo de carga de un solo eje-ESAL (promedio de 20 años)	< 1 millón
	M	Equivalente medio de carga de un solo eje-ESAL (promedio de 20 años)	1-10 millón
	H	Equivalente pesado de carga de un solo eje-ESAL (promedio de 20 años)	> 10 millones
Sistema funcional	R	Rural	N/A
	U	Urbana	N/A
Valores IRI	IRI <sub>t</sub>	Datos históricos de IRI y tiempo en años	N/A

La red neuronal ha sido entrenada utilizando bases de datos históricas, de forma que, a partir de los inputs de la tabla, se van obteniendo predicciones del IRI de la carretera (output). Estos outputs a su vez retroalimentan la red hasta conseguir valores del IRI que se ajustan a la realidad.

### 2.4 Algoritmo para el Plan de Mantenimiento (iv)

Por último, se ha creado la **Biblioteca de Operaciones de Mantenimiento** (iv). En esta biblioteca se recogen las operaciones de mantenimiento necesarias para cada estado posible del pavimento, así como la

aproximación de sus costes. De esta manera, a través de la biblioteca desarrollada y de la predicción de la evolución del estado del pavimento, se pueden proponer **planes de mantenimiento** para asegurar las mejores condiciones de conducción, minimizando los costos.

La biblioteca considera las **técnicas de reparación y mantenimiento** en función de la clasificación de los defectos y su gravedad, ofreciendo el mejor tratamiento posible a realizar. Las siguientes características de la carretera están disponibles como entradas al sistema:

- Valor medio del IRI.
- Valor máximo del IRI.
- Nº de baches y de intensidad media inferior a 5 cm de largo.
- Nº de baches y de intensidad media inferior a 20 cm de largo.
- Nº de baches y una intensidad media superior a 20 cm de largo.
- Nº de resaltos e intensidad media inferior a 20 cm de largo.
- Nº de resaltos e intensidad media superior a 20 cm de largo.

Con todo ello, el sistema es capaz de detectar el **tipo de deterioro de pavimento** que se ha producido. A continuación, se muestran los principales problemas detectados en los pavimentos:

Tabla 3. Ejemplos de los principales problemas detectados en el pavimento.



**SOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARA LA AUSCULTACIÓN DE LA CALIDAD Y EL DETERIORO DEL PAVIMENTO A BAJO COSTE Y LA GESTIÓN AUTOMÁTICA DE SU MANTENIMIENTO (PAV-DT)**

Y seguidamente, se muestran algunos procedimientos de **mantenimiento y reparación** recogidos en la biblioteca:

Tabla 4. Ejemplos de diferentes técnicas de mantenimiento.



Además, la biblioteca también recoge el **precio medio de cada uno de los tratamientos**, así como la **duración prevista** de los mismos.

Tabla 5 Precios y vida útil esperada de los tratamientos.

Tratamiento	Coste/m <sup>2</sup>	Vida útil esperada del tratamiento (años)		
		Min.	Medio	Max.
Sellado de grietas	0.60	2	3	5
Riego pulverizado	0.54	2	3	4
Slurry Seal	1.08	3	5	7
Microcapas	1.50	3	7	9
Chip Seal	1.02	3	5	7
Capa fina de mezcla asfáltica en caliente	2.09	2	7	12
Capa fina de mezcla asfáltica en frío	1.5	2	5	10

**2.5 Validación del sistema**

Para la validación del sistema, se definió un **plan de pruebas** con diferentes escenarios considerando los distintos algoritmos que conforman el software para tener los datos necesarios en cada una de las validaciones.

En primer lugar, para la **validación del cálculo del IRI**, se identificaron **23 rutas** por las que se ha conducido el sistema PAV-DT. Para todas las rutas, el

valor del IRI se calculó con nuestro sistema y con un sistema comercial de clase I.

Para la validación de la **identificación y clasificación de los defectos**, se realizó una **inspección visual** de las rutas. En este caso, la identificación y clasificación de los defectos se hizo manualmente. Los resultados de la inspección visual se compararon con nuestros resultados. Se instaló una cámara visual en el vehículo para facilitar la identificación manual. Esta cámara enfocaba al camino de las ruedas donde se había instalado el sistema.

En cuanto a la **validación de la predicción del IRI**, se llevó a cabo de dos maneras:

- Las **mediciones históricas de IRI** se consideraron en 3 rutas diferentes.
- Las **mediciones mensuales** se llevaron a cabo usando el sistema desarrollado en 5 rutas distintas.

Por último, para la **validación del plan de mantenimiento**, los resultados fueron evaluados por **técnicos especializados** en la materia.

**3. RESULTADOS**

En primer lugar, para la **validación del algoritmo de cálculo del IRI (i)**, se comparan las **curvas IRI obtenidas con el sistema desarrollado** y con el **sistema comercial**. La comparación entre el sistema (naranja) y el teórico (rojo) se muestra a continuación para la carretera A-3.

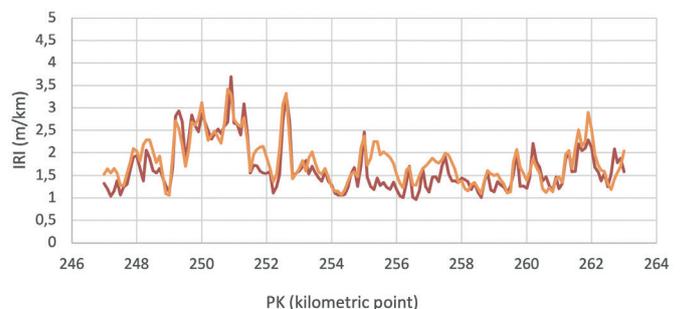


Figura 4 .Comparación entre IRI teórico e IRI calculado con el sistema para la A-3 dirección Valencia. Fuente: elaboración propia.

Puede observarse que existe una clara **correlación entre ambas curvas**, por lo que queda demostrado el correcto funcionamiento del algoritmo de cálculo del IRI.

En el siguiente cuadro, se resume la **comparación** entre el **número de defectos obtenidos visualmente** y los obtenidos mediante el **algoritmo (ii)**:

Tabla 6 Resumen de la validación de detección de defectos.  
Fuente: elaboración propia.

	Carretera	Inspección visual		Sistema desarrollado		Resultado %
		Nº Baches	Nº Resaltos	Nº Baches	Nº Resaltos	
1	A-3	18	12	19	12	95
2	A-54	11	13	13	13	85
3	A-7	22	3	22	2	95
4	CV-175.	12	6	13	4	85
5	CV-213.	3	8	3	8	100
6	CV-200.	2	0	2	1	75
7	CV-203.	1	3	2	2	60
8	CV-166.	0	8	0	8	100
9	CV-145.	5	3	5	2	85
10	CV-154	6	0	7	0	80

Por tanto, se puede afirmar que la clasificación de los defectos y el algoritmo de identificación coinciden con la inspección visual en un **grado de precisión superior al 80%**.

Por último, el **plan de mantenimiento (iv)** ha sido evaluado por un **técnico especializado**, dando su aprobación como una de las mejores soluciones para cada uno de los problemas propuestos, con una **validación totalmente consensuada del 80%** y una validación aceptable del 12%.

#### 4. CONCLUSIONES

Este artículo desarrolla un **sistema para el mantenimiento predictivo de pavimentos de carreteras** (PAV-DT) que contiene diferentes funciones:

- Obtención del perfil de rugosidad (IRI) de una carretera en tiempo real.
- Detección de defectos específicos y su calificación.

- Predicción de la evolución temporal del IRI.
- Elaboración de un plan de mantenimiento.

Así pues, el sistema fue validado con un amplio y elaborado plan de pruebas que contemplaba distintos escenarios. A la vista de los resultados obtenidos, el software de mantenimiento predictivo consigue una **gran precisión** gracias al algoritmo de cálculo del IRI y al algoritmo de detección de defectos. Además, PAV-DT proporciona una **nueva capacidad** respecto de otras soluciones existentes gracias al algoritmo para **predecir la evolución del IRI**. Por último, cabe destacar que también cuenta con una **gran biblioteca** que relaciona cada operación de mantenimiento con cada tipo y gravedad del defecto del pavimento.

#### 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Eshkabilov, Sulaymon.** "Measuring and Assessing Road Profile by Employing Accelerometers and IRI Assessment Tools". (2018). Journal of Traffic and Transportation Engineering. 3. 10.11648/j.ajtte.20180302.12.
- **H.Bello-Salau, A.M. Aibinu, A.J. Onumanyi, J.J. Dukiya, H. Ohize.** "New road anomaly detection and characterization algorithm for autonomous vehicles". (2018) Applied Computing and Informatics.
- **H. Pérez-Acebo, A.** Linares-Unamunzaga, E.Rojí and H. Gonzalo-Orden. "IRI Performance Models for Flexible Pavements in Two-Lane Roads until First Maintenance and/or Rehabilitation Work".
- **Abouelsaad, Ahmed & El-Badwy, Sherif & Ibrahim, Murad.** "International Roughness Index Predictive Model for Rigid Pavements based on LTPP Data". (2019). صف الدولي الخشونة معايير توقع الصلب لل.
- **Georgiou, Panos & Plati, Christina & Loizos, Andreas.** "Soft Computing Models to Predict Pavement Roughness: A Comparative Study". Advances in Civil Engineering. 2018. 1-8. 10.1155/2018/5939806.

- **W. James Wilde.** “Cost-Effective Pavement Preservation Solutions for the Real World. Center for Transportation Research and Implementation Minnesota State University, Mankato”. September 2014.
- **Můčka, Peter.** “International Roughness Index Specifications around the World. Road Materials and Pavement Design”. (2016) 10.1080/14680629.2016.1197144.