



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

**PROCESO DE CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO
TIPO RESPUESTA PARA LA MEDICIÓN DEL IRI,
DENOMINADO EMIRI UMICH 001**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

CRISTÓBAL URIEL MAGAÑA DÍAZ

ASESOR:

DR. JORGE ALARCÓN IBARRA

MORELIA MICH. JUNIO 2019





Agradecimientos

A **DIOS**, por permitirme estar en esta etapa de mi vida, espero me conceda lograr todo lo que tengo en mente.

A la **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO** y **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**, por brindarme la oportunidad de formarme como ingeniero dentro de sus aulas.

A mi asesor de tesis, **DR. JORGE ALARCÓN IBARRA**, por su gran apoyo antes, durante y después de elaborar la misma. Por su dedicación, entrega como profesor, y excelente trato hacia el alumnado.

A mis **AMIGOS**, que no me es posible mencionarlos a todos, pero que fueron parte esencial dentro del salón de clase y fuera de él, resolviendo dudas y apoyándome siempre en cualquier aspecto, en especial a **César Andrade Salado** y **José Francisco Ramos Herrera** por su apoyo durante todo el proceso de esta tesis y sobre todo por su amistad.



Dedicatorias

A mis padres, **RAMÓN MAGAÑA IBARRA** y **MARÍA GUADALUPE DÍAZ DÍAZ**, por su dedicación y esfuerzo incansable para conmigo, por sus regaños y sus consejos que me hacen ser una mejor persona a diario, **LOS AMO**.

A mis hermanos, **NOEL MAGAÑA DÍAZ** y **ANDREA MAGAÑA DÍAZ** por aguantarme y apoyarme en todo momento. **LOS AMO**.



Índice de contenido

Agradecimientos	I
Dedicatorias.....	II
Índice de contenido.....	III
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
Introducción	1
Justificación	3
Objetivos.....	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos.....	5
Capítulo I.....	6
La Regularidad Superficial en los Pavimentos.....	6
1.1 La regularidad superficial en pavimentos carreteros.....	6
1.2 Antecedentes	8
1.3 Definición de IRI.....	9
1.4 Influencia de IRI en un pavimento	10
1.5 Equipos para la medición de la regularidad superficial.....	10
1.5.1 Perfilógrafos.....	11
1.5.2 Perfiladores de peso ligero	11
1.5.3 Perfiladores de inercia de alta velocidad o perfilómetros	12
1.5.4 Dispositivos manuales.....	13
1.5.5 Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta	14
1.6 Experiencia internacional en el análisis de la regularidad superficial.....	17
1.6.1 Valores comunes de IRI en algunos países	18
1.6.2 Regularidad inicial de los pavimentos	19
Capítulo II.....	22
Desarrollo de modelos matemáticos para la obtención del IRI	22



2.1	Definición	22
2.2	Técnicas de aprendizaje.....	22
2.2.1	Regresión del árbol de decisión (<i>Decision Tree Regression</i>)	23
2.2.2	Máquina de Soporte Vectorial (<i>Support Vector Machines</i>).....	24
2.2.3	Redes neuronales artificiales (<i>Artificial Neural Networks</i>)	25
2.2.4	Bosques aleatorios (<i>Random Forests</i>).....	25
2.2.5	Vecinos más cercanos (<i>Nearest Neighbors</i>)	26
2.3	Técnicas de procesamiento de señales	27
2.3.1	Transformada de coseno discreta (<i>Discrete Cosine Transform</i>).....	27
2.3.2	Densidad espectral de potencia (<i>Power Spectral Density</i>)	29
2.4	Resultados	30
Capítulo III.....		36
Definición de tramos de calibración		36
3.1	Definición de calibración	36
3.2	Requisitos de calibración.....	37
3.3	Medición de la carretera San Luis Potosí - Matehuala.....	38
3.4	Traslado del EMIRI UMICH 001 a San Luis Potosí.....	40
Capítulo IV		43
Presentación de resultados.....		43
Conclusiones y trabajo a futuro.....		47
Referencias		49



Índice de figuras

Capítulo I

Figura 1. Perfilógrafo de estructura tipo California	11
Figura 2. Perfilador de equipo ligero	12
Figura 3. Perfilómetro de alta velocidad	13
Figura 4. Walking Profiler	14
Figura 5. Vista lateral del May's de la Unidad Regional de Servicios Técnicos.....	16
Figura 6. Rugosímetro BPR	17

Capítulo III

Figura 7. Carretera San Luis Potosí – Matehuala	38
Figura 8. Perfilógrafo Láser	39
Figura 9. Equipo EMIRI UMICH 001	41
Figura 10. Equipo EMIRI UMICH 001	41
Figura 11. Salida a carretera San Luis Potosí - Matehuala	42



Índice de tablas

Capítulo I

Tabla 1. Valores de IRI en Uruguay	19
Tabla 2. Regularidad Inicial vs Regularidad Final.....	20
Tabla 3. Regularidad Inicial vs. Costo de Mantenimiento.....	21
Tabla 4. Resultado de sensibilidad según la regularidad inicial	22

Capítulo II

Tabla 5. Componente de baja frecuencia a la señal IRI original.	29
Tabla 6. Parámetros de los Regresores.	31
Tabla 7. Aproximaciones de los reguladores con diferentes IRI.	32
Tabla 8. Errores de los Regresores (MSE).....	32
Tabla 9. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 2.8	33
Tabla 10. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 3.9	34
Tabla 11. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 5.1	34
Tabla 12. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 5.4	35
Tabla 13. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 5.5	35

Capítulo IV

Tabla 14. Respuesta Promedio EMIRI UMICH 001 vs IRI Promedio Perfilógrafo Láser a la velocidad de 40 km/h.....	44
Tabla 15. Respuesta Promedio EMIRI UMICH 001 vs IRI Promedio Perfilógrafo Láser a la velocidad de 80 km/h.....	45
Tabla 16. Promedio de los regresores y los datos reales a 80 km/h.....	46



Resumen

El IRI (Índice de Rugosidad Internacional) es un parámetro que se utiliza para medir la rugosidad de un pavimento y determinar su regularidad. Esta medición es importante para mantener las vialidades en buen estado y asimismo contar con costos de operación bajos. Esto se refiere a que los pavimentos tengan un confort y una seguridad aceptable para los usuarios.

Actualmente, México no cuenta con el desarrollo de equipos especializados de bajo costo para llevar a cabo la medición del IRI, sin embargo, el país cuenta con un gran porcentaje de pavimentos en malas condiciones. Para esto, en el Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Michoacana se construyó un equipo de tipo respuesta, con una inversión muy baja y de operación sencilla.

El equipo, es un vehículo de tipo respuesta de un solo eje, basado en un dispositivo de medición que permite percibir la rugosidad tal cual lo siente un vehículo estándar, el cual puede circular a diferentes velocidades y en cualquier condición del camino.

Una vez construido el vehículo, es necesario calibrar su respuesta para poder obtener el IRI correspondiente, para conseguir esto, el vehículo fue trasladado a la ciudad de San Luis Potosí y se pasó en repetidas ocasiones por la carretera San Luis Potosí – Matehuala a velocidades de 40 km/h y 80 km/h, obteniendo así la información necesaria para poder realizar tablas comparativas y a su vez observar la correlación entre las mismas lecturas realizadas con un Perfilógrafo Láser y el equipo tipo respuesta.

Es así, que en esta tesis se describe el proceso de “Calibración” del equipo tipo respuesta denominado EMIRI-UMICH-001.

Palabras clave: IRI, CALIBRACIÓN, PERFILÓGRAFO, PERFILÓMETRO, RUGOSÍMETRO.



Abstract

IRI (International Roughness Index) is a parameter that's used to the measurement of the pavement Roughness and establish the regularity. To keep the ways in a good condition, and likewise, the lower operating costs. That means, pavements has acceptable comfort and security for the users.

Currently, in Mexico doesn't has the specialized tools at low cost to do the IRI measurement, although, most of the pavements in the country are in deplorable conditions. For these cases, a device was constructed at Postgraduate of School of Civil Engineering of Universidad Michoacana, with an investment at low cost and simply.

The device, it's a vehicle with a uniaxial response, which it's based on a measurement device which allows perceive the roughness as if feels an standard vehicle, that can circulate at differents speeds and any way condition.

Once the device constructed, it's necessary to calibrate the response to can get the IRI corresponding, to obtain this, the vehicle (device) was moved to San Luis Potosí, and was ran many times by San Luis Potosí – Matehuala road at 40km/h and 80km/h, getting the necessary information to can do comparative tables, and in the same time, shows the correlation between the same measurements with a Laser Profiler and the divice with the response type.

For this, is the main reason cause the thesis describes the “calibration” process of the device with response type called EMIRI-UMICH-001.



Introducción

Actualmente, el transporte terrestre es el más utilizado para trasladar personas y mercancías. Teniendo esto en cuenta esto, es de suma importancia tener los pavimentos en buen estado, ya que si estos no lo están, las condiciones de servicio para las personas no serán óptimas.

Un pavimento, a lo largo de su vida útil, requiere de mantenimiento para que este llegue al final del diseño esperado. Si las condiciones no se cumplen, quien resulta afectado es el usuario y repercutirá en su economía por algunas de las siguientes razones: combustible, lubricantes, llantas, reparaciones, refacciones, costos del operador, depreciación y reposición del vehículo, seguros y tiempo de transporte de las mercancías. Para esto, existen diferentes parámetros que evalúan el estado de los pavimentos, uno de ellos es el *International Roughness Index* (Índice de Rugosidad Internacional IRI).

El IRI fue el resultado de un estudio que realizó el Banco Mundial en los años 80's. Este índice es un valor numérico que puede expresarse en m/km o mm/m, el cual indica las condiciones en que se encuentra un pavimento, es decir, si éste se encuentra en condiciones de circulación óptimas o si presenta deterioros que afecten el transitar y la velocidad de circulación de dicho vehículo.

[Vargas, 2010].

Existen distintos tipos de equipos para la obtención del IRI, estos se clasifican en 5 categorías diferentes: perfiladores de inercia de alta velocidad o perfilómetros, perfilógrafos, perfiladores de peso ligero, dispositivos manuales y sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta.

El proyecto que a continuación explico, es sobre la calibración de un equipo tipo respuesta para la adquisición de datos y medición del IRI. Desarrollado y construido en la Universidad Michoacana De San Nicolás De Hidalgo como tema de maestría, en el cual



se desarrollaron modelos matemáticos que me permitieron tomar diferentes lecturas en la carretera San Luis Potosí – Matchuala, tomando como referencia datos obtenidos con un perfilógrafo láser calibrado y certificado por el Instituto Mexicano del Transporte y posteriormente comparar dichos datos con los obtenidos por el EMIRI UMICH 001. Una vez obtenida esta información, se compararon los resultados obtenidos entre ambos equipos y se hicieron tablas comparativas que permitieron apreciar la correlación que hay entre las dos velocidades (40km/h y 80km/h) a las que se pasaron los equipos por dicha carretera.



Justificación

Actualmente la red carretera en México no se encuentra en las mejores condiciones de servicio, ya que la mayoría de los pavimentos se proyectaron, diseñaron y construyeron entre 1920 y 1980, teniendo como resultado caminos que actualmente se encuentran en regulares y malas condiciones y que presentan un bajo nivel de servicio, señaladas así por las propias autoridades.

Otro de los aspectos que influye directamente en el deterioro de los pavimentos, es que fueron diseñados y contruidos para cargas vehiculares de entre 6 y 8 toneladas. Teniendo en cuenta esto, se sabe que en la actualidad la cantidad de camiones que circulan por la red carretera se ha multiplicado y que estos han aumentado el peso que pueden transportar, teniendo así camiones de carga de más de 60 toneladas.

Es importante tener una infraestructura en buenas condiciones, ya que la productividad y competitividad en el país dependen de ello. Al no tener una red carretera en óptimas condiciones se impide el traslado de mercancías y materias primas en tiempo y forma, incluso en algunas ocasiones evitando que la mercancía llegue a su destino, ocasionando así el aislamiento de diferentes zonas del país y por ende el aumento en los costos de servicio y productos.

Existe un informe de Competitividad Global 2016-2017 © 2017 Foro Económico Mundial (*Schwab, 2017*) en el cual indica que México se encuentra en el lugar 51 de 148 países en cuanto a calidad de sus carreteras. Por este motivo, es de suma importancia hacer énfasis en la búsqueda de nuevas tecnologías y estrategias que permitan mejorar la calidad de los caminos en nuestro país.

Para esto se cuenta con una alternativa que permite ser utilizada como un parámetro para la evaluación de carreteras, el denominado Índice de Rugosidad Internacional (IRI). El



cual permite llevar a cabo una evaluación de las carreteras y saber en qué condiciones se encuentran.

Para realizar la medición del IRI existen múltiples equipos que cuentan con diferentes características y que son utilizados de acuerdo a su funcionamiento. En la actualidad en México no se cuenta con los suficientes equipos para llevar a cabo una medición exhaustiva a lo largo de toda la red federal, esto debido al alto costo en la adquisición de los mismos.

Para esto, en la presente tesis se llevará a cabo el proceso de “Calibración” de un equipo tipo respuesta de bajo costo denominado EMIRI-UMICH-001, que podrá ser utilizado para la obtención del IRI.



Objetivos

Objetivo general

- ✓ Desarrollar un procedimiento para la calibración de un equipo tipo respuesta para la medición del IRI denominado EMIRI-UMICH-001, utilizando modelos matemáticos en la carretera San Luis Potosí – Matehuala ubicada en el estado de San Luis Potosí.

Objetivos específicos

- ✓ Conocer el estado de arte de la medición de la regularidad superficial en pavimentos carreteros.
- ✓ Desarrollo matemático de ecuaciones que permitan transformar lecturas tomadas en valores de IRI.
- ✓ Trasladar el equipo EMIRI UMICH 001 a la ciudad de San Luis Potosí con el objetivo de tomar lecturas con diferentes valores de IRI a velocidades de 40km/h y 80km/h.
- ✓ Comparar las lecturas del EMIRI UMICH 001 con respecto a un Perfilógrafo Láser de alta tecnología.



Capítulo I

La Regularidad Superficial en los Pavimentos

1.1 La regularidad superficial en pavimentos carreteros

La regularidad es la característica que más influye en las sensaciones de confort y seguridad que experimenta un usuario al circular por un pavimento. Esta se puede definir como la distorsión de la superficie de la carretera y a su vez provoca aceleraciones verticales en el vehículo. Cabe mencionar que al existir baches o alguna otra deformación, estas sensaciones se pierden, por lo tanto es de suma importancia mantener siempre el interés por el buen estado de los pavimentos, ya que esto repercute de forma importante en los gastos de transporte y mantenimiento de la red vial y, además, en los gastos de operación del usuario. Este fenómeno depende principalmente del perfil longitudinal de la superficie del pavimento, aunque también depende de la velocidad de circulación y las características mecánicas del vehículo.

En México no ha sido práctica común la rehabilitación de caminos por problemas de regularidad superficial. Esta situación está cambiando y cada vez se le da mayor importancia a esta característica, debido a que tiene influencia sobre tres actores que intervienen en el tránsito. [Sayers, 2002].



- Vehículos
- Usuarios
- Carretera

México actualmente cuenta con alrededor de 374,000 km de caminos y red carretera. 40,600 km son de tránsito libre, mientras que 8,400 km son de cuota, haciendo una suma entre estos dos de 49,000 km de red federal. Las condiciones que estas carreteras y/o caminos brindan al usuario para transitar sobre ellos, es de un 80% de aceptabilidad.

En nuestro país, el medio de transporte más utilizado para el traslado de personas y mercancías es el medio terrestre, por lo que mantener la red nacional en buenas condiciones es de suma importancia para los usuarios.

[Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2013]

Existen algunas causas por las que algunos tramos carreteros se encuentran en deterioro o en malas condiciones, una de ellas es que están diseñados y construidos con criterios de diseño de hace más de 30 años, usando las especificaciones y materiales que mandan esos criterios. La cantidad de usuarios que transitan por estos tramos carreteros ha incrementado de manera significativa en relación con las décadas pasadas. Por lo que las necesidades han cambiado y se requiere una estrategia para la conservación y mantenimiento de los pavimentos.

Michael W. Sayers en su publicación de 1986, menciona que existe un gran número de factores que afectan de forma significativa la vida útil de un pavimento. Estos pueden ser generados por los siguientes:

- Factores del clima y/o medioambiente.
- Factores del tráfico.
- Espesor de las capas de la estructura del pavimento.



- Factores de construcción.
- Factores de mantenimiento.

1.2 Antecedentes

A lo largo de la historia han surgido necesidades para establecer un índice que permita evaluar las deformaciones verticales de un camino y así, establecer criterios de calidad y comportamiento de los pavimentos que indiquen las condiciones actuales y futuras del estado superficial de un camino y a su vez, la afectación dinámica de los vehículos que transiten sobre él.

En los años setentas, el banco mundial patrocinó diversos programas de investigación para conocer los distintos problemas que presentaban las vías de desarrollo en diferentes países. Muchos de ellos arrojaron que los pavimentos resultan costosos cuando se tiene poca inversión en infraestructura, debido a los altos costos que los usuarios pagan al circular por dichos pavimentos. Por este motivo la rugosidad de los pavimentos fue identificada como un factor primario en los análisis que involucran la calidad de los mismos. Al comparar resultados de diferentes países, se observó que éstos no eran iguales debido a que los datos se obtenían de diferentes métodos y por ende eran poco confiables. [Vargas, 2010].

El Índice de Rugosidad Internacional, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el banco mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino. Este índice tiene sus orígenes en un programa norteamericano llamado *Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP)* y está basado en un modelo llamado “*Golden Car*” descrito en el reporte 228 del NCHRP.

El objetivo era encontrar un índice de referencia al que posteriormente se le denominó Índice de Rugosidad Internacional. [Sayers, 1986].



1.3 Definición de IRI

El IRI es un parámetro que se utiliza para medir la regularidad de forma longitudinal en la capa de rodadura de un pavimento y así poder apreciar las irregularidades que pueden afectar al usuario que transite sobre él.

El IRI fue establecido como una unidad universal para medir la rugosidad de un pavimento, cuyas medidas se expresan en m/km. o pulg/milla. Esta unidad se determinó por un estudio del Banco Mundial realizado en Brasil en 1982. Este sistema funciona por medio de un modelo matemático que interpreta el comportamiento de un vehículo según el perfil longitudinal de un pavimento. Una vez establecido este punto, se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables.

Para realizar el cálculo matemático del Índice de Rugosidad Internacional, se debe hacer la acumulación de desplazamientos en valor absoluto, de la masa superior con respecto a la masa inferior de un modelo de vehículo (cuarto de carro), dividido entre la distancia recorrida sobre un camino que se produce por los movimientos al vehículo, cuando este viaja a una velocidad de 80 km/h.

[Vargas, 2009].

Cabe mencionar que los ingenieros que construyen autos miden la aceleración de los asientos para evaluar el rendimiento de la suspensión. La masa del vehículo es separada de las ruedas para aislar a los ocupantes de la vibración producida por las imperfecciones de la superficie de rodadura. La irregularidad del pavimento produce elevaciones verticales, las cuales son experimentadas por los pasajeros como vibraciones.

[Sayers, 1986].



1.4 Influencia de IRI en un pavimento

Según estudios realizados por *Ronald Collins* en los últimos 15 años, el IRI que se obtiene durante la construcción de un pavimento influye en:

- El costo de mantenimiento vial; los costos de mantenimiento se reducen considerablemente en pavimentos con un IRI inicial de 1.2 m/km.
- La vida útil del pavimento; reduciendo el IRI en un 50%, se incrementa la vida útil del pavimento en 27%.
- Las vibraciones percibidas por los conductores y pasajeros; lo cual afecta la percepción de confort de los usuarios según las condiciones del pavimento.
- Los accidentes de tránsito; hay un incremento de accidentes de 1.6 veces más cuando el IRI pasa de 1.56m/km a un rango de 1.61m/km – 3.20m/km.
- El consumo de combustible; para una operación constante de velocidad, el consumo de combustible se incrementa de 0.6 a 2.5% por cada unidad de IRI.
- Los costos de operación de los autos, estos se incrementan en 3% para vehículos y 5.5% para camiones para cada unidad de IRI.

1.5 Equipos para la medición de la regularidad superficial

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de equipos capaces de llevar a cabo la medición del perfil longitudinal de un camino y poder así determinar la regularidad superficial. Las lecturas que se obtienen con los equipos, varían en la toma de lecturas, esto quiere decir que algunos cuentan con mayor precisión que otros. Estos se clasifican de la siguiente manera:

- 1) Perfilógrafos.
- 2) Perfiladores de peso ligero.
- 3) Perfiladores de inercia de alta velocidad o perfilómetros.
- 4) Dispositivos manuales.
- 5) Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta.



1.5.1 Perfilógrafos

Los perfilógrafos (Figura 1) tienen una rueda sensible, montada al centro del marco que puede mantener libre el movimiento vertical. La desviación sobre el plano de referencia, establecido por el marco del perfilógrafo, se registra (automáticamente en algunos modelos) en papel según el movimiento de la rueda sensible. Se pueden encontrar en una gran variedad de formas, configuraciones y marcas.

[*Department of Transportation*, 2002].



Figura 1. Perfilógrafo de estructura tipo California

[Fuente: Revista TC Technologies, 2010]

1.5.2 Perfiladores de peso ligero

En la actualidad son cada vez más los equipos de este tipo (Figura 2) que se utilizan para evaluar las nuevas construcciones carreteras. Estos equipos cuentan con un sistema de perfilamiento que se instala en un vehículo ligero, tales como un vehículo todo terreno o un carrito de golf, entre otros.

El sistema de perfiles, es parecido al que se utiliza en perfiladores de alta velocidad. Una vez obtenidos estos datos, se utilizan para generar un IP e identificar los baches existentes,



los cuales pueden ser utilizados también para calcular otros índices, como el Número de Recorrido (RN) o el mismo IRI.

[Rodríguez, 2016].



Figura 2. Perfilador de equipo ligero

[Fuente: Revista de ingeniería en construcción n.6, El IRI: Un indicador de la regularidad superficial]

1.5.3 Perfiladores de inercia de alta velocidad o perfilómetros

Los perfiladores de inercia (Figura 3) trabajan a altas velocidades para recopilar datos suficientes y observar el perfil del pavimento detectando el estado del mismo. Un perfilador de alta velocidad está compuesto por un sistema de medición de distancia precisa, a su vez cuenta con acelerómetros y sensores láser de altura.

Los sensores registran la altura que existe entre el vehículo y la superficie del pavimento. La función de los acelerómetros es registrar la aceleración vertical del sensor, estos se encuentran en la parte superior de los sensores de altura. Para determinar el perfil longitudinal se utilizan las dos mediciones de altura mencionadas.

[Rodríguez, 2016].



Figura 3. Perfilómetro de alta velocidad

[Fuente: <http://www.geocisa.com>]

1.5.4 Dispositivos manuales

Este tipo de dispositivos se utilizan para validar o verificar datos generalmente recogidos por los perfiladores de alta velocidad. Los perfiladores de nivel-estadal utilizan por lo general un inclinómetro entre dos patas de apoyo o varias ruedas para calcular el perfil de la superficie. Para verificar la salida de los perfiladores se utilizan dispositivos manuales para obtener los datos de perfil en las secciones de prueba, posteriormente se calcula un índice de rugosidad a partir de los datos y así comparar el resultado con el obtenido de los perfiladores de alta velocidad.

Existe un instrumento preciso de medición llamado *Walking Profiler* (Perfilómetro móvil) (Figura 4), que se utiliza para recopilar y presentar información continua de la superficie pavimentada. El *WP* cumple con los requisitos del Perfilómetro del banco mundial y proporciona resultados que incluyen información de perfil, pendiente y distancia. El parámetro es el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

[Rodríguez, 2016].



Figura 4. *Walking Profiler*

[Fuente: <http://www.megmar.pl>]

1.5.5 Sistemas de medición de rugosidad de tipo respuesta

Los equipos tipo respuesta (RTRRMS) miden los movimientos verticales que tiene el eje trasero del vehículo. Estos evalúan la rugosidad del camino mediante la respuesta dinámica al circular por un pavimento a una velocidad establecida. Existen diferentes tipos de vehículos tales como un simple automóvil o un remolque con un solo eje.

[James, 1990].

Estos sistemas de medición normalmente se componen de tres partes: el vehículo o remolque con el que se realizarán las mediciones, un sensor que se encarga de medir los movimientos que ejerce la suspensión en el equipo, y por último un aparato que tiene la función almacenar los datos registrados por el sensor, a este aparato se le conoce como monitor. La parte del sistema que está compuesta por el monitor y el sensor se le denomina “*Road meter*”. Este equipo obtiene un cociente que es proporcional a la velocidad vertical de la suspensión del vehículo en el tramo correspondiente.

[Ignacio Sánchez, 1989].



Algunas de las ventajas que menciona *James Woodstrom* en su publicación del año 1990 y que ofrecen este tipo de equipos son:

- Costos de operación bajos.
- Obtención de datos a velocidades altas. La mayoría de los vehículos transitan a 80km/h, por lo que permiten medir grandes distancias en poco tiempo.
- Los datos obtenidos con los equipos están dentro de un rango exacto.

Cada vehículo obtiene datos distintos debido a las características del mismo, tales como la suspensión del vehículo o remolque que se esté utilizando, además de la velocidad con la que se esté llevando a cabo la medición.

Algunos de los equipos más conocidos de tipo respuesta con los que se cuentan son el *May's Ride Meter* y el rugosímetro del *Bureau of Public Roads (BPR)*.

El *May's Ride Meter* (Figura 5) es un equipo que utiliza dos sensores, uno para la obtención de la rugosidad y otro para obtener la velocidad. El sensor que obtiene la velocidad está conectado al velocímetro del vehículo que lo está remolcando. Para la obtención de la rugosidad, el sensor utiliza un codificador óptico que va conectado a una gráfica para producir pulsos eléctricos que automáticamente acumula un motor de un paso. [Montenegro, 1999].



Figura 5. Vista lateral del May's de la Unidad Regional de Servicios Técnicos

[Fuente: <http://rl.aviationpros.com>]

El Rugosímetro del *Bureau of Public Roads* (Figura 6) mide la deformación longitudinal de los pavimentos, es del tipo respuesta dinámica. Consiste en un cuarto de carro que durante la medición es remolcado a una velocidad constante de 40km/h, la rueda de medición copia las irregularidades de la superficie, integrando las alteraciones producidas por las crestas y los valles.

[Montenegro, 1999].

La unidad de medida es m/km o mm/m. Obteniéndose los valores en unidades B.P.R. e I.R.I. al mismo tiempo.



Figura 6. Rugosímetro BPR

[Fuente: <http://www.intranet.vialidad.gov.ar>]

1.6 Experiencia internacional en el análisis de la regularidad superficial

La gran variedad de equipos utilizados para medir la regularidad superficial y los numerosos índices y escalas que existen para establecer los criterios de aceptación de la funcionalidad de una carretera, llevaron a considerar la conveniencia de adoptar un “índice único”. Debido a que cada país contaba con un equipo propio, no se podía imponer un solo equipo a todos y tampoco se podía impedir futuras mejoras de los equipos existentes o el desarrollo de nuevos equipos.

El banco mundial, que es una fuente de asistencia financiera y técnica para los llamados países en desarrollo, patrocinó varios programas de investigación en los años setentas para conocer los principales problemas en las naciones en vías de desarrollo.

Algunos de estos programas de investigación comprobaron que los caminos con poca inversión de infraestructura resultan costosos a estos países debido a los costos de operación. La rugosidad de las carreteras fue identificada como un factor primario en los análisis que involucran la calidad del camino en función de los costos de los usuarios. Se comprobó que los datos de la rugosidad de las diferentes partes del mundo no podían ser



comparados, debido a que los datos, aún de un mismo país, eran poco confiables, ya que las mediciones estaban basadas en métodos diferentes.

[*Mellins*, 1992]

En 1982, el Banco Mundial inició un experimento en Brasil para establecer correlaciones y un estándar de calibración para las mediciones de rugosidad. Se observó que los valores de los equipos de medición de la rugosidad superficial existentes eran correlacionables. Una vez establecido este punto, uno de los objetivos de las investigaciones fue encontrar un índice de referencia al que posteriormente se denominó Índice de Regularidad Internacional (IRI).

[*Vargas*, 2010].

1.6.1 Valores comunes de IRI en algunos países

En los Estados Unidos, la Federal Highway Administration ha reportado en sus estudios que los rangos típicos del IRI evaluados en diferentes tramos de carreteras están entre 0.8 a 4.7m/km (50 y 300in/mi). Los tramos de pavimentos con valores menos de 2.4m/km (150in/mi) son considerados como superficies en buen estado y confortables; mientras que los valores de 4.7m/km o más, son considerados como rugosos y no confortables.

En España, la Orden Circular 308/89C y E de 1989, fijaba el valor de 2 m/km como la umbral para recibir una carretera, más tarde se modificó para admitir el IRI de 2.5 m/km en todo el tramo, siempre que en el 80% del tramo se alcance como máximo el IRI de 2 y debiendo comenzar además del IRI de 1,5 en la mitad de tramo. Actualmente se fija un valor de 1.85 de IRI para recibir nuevas carreteras. Para carreteras en servicio con Intensidad Media Diaria (IMD) mayor de 2,000 vehículos fijan un porcentaje de la longitud de calzada con un valor mínimo de 3.5 m/km y para valores de $IMD < 2,000$ vehículos el IRI mínimo de 4.5 m/km.

En Uruguay hacen una diferencia de valores de IRI para pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico que se presenta a continuación:



Tabla 1. Valores de IRI en Uruguay

[Fuente: <http://www.vialidad.ec>]

Condición del camino	Pavimento asfáltico IRI (m/km)	Pavimento hidráulico IRI (m/km)
Muy bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 - 3.9	2.8 - 3.5
Regular	4.0 - 4.6	3.6 - 4.3
Malo	> 4.6	> 4.3

Se observa que el criterio es más exigente en los pavimentos de concreto hidráulico que en los de concreto asfáltico.

En Chile se considera un valor del IRI entre 0 y 3m/km, como un camino bueno, entre 3 y 4 como uno regular y para un IRI mayor que 4m/km, como un camino malo.

Mientras que en honduras su clasificación es la siguiente: para $IRI < 3.5$ m/km, se considera el camino como bueno, entre 3.5 y 6 m/km como regular y finalmente cuando el IRI es mayor que 6m/km, indica que el camino es malo.

1.6.2 Regularidad inicial de los pavimentos

A finales de 1988, *Michael S. Janoff*, estudió el efecto de la regularidad inicial sobre el rendimiento del pavimento durante los años posteriores a su construcción. *Janoff* presentó los resultados obtenidos de sus hallazgos en la reunión anual de la NAPA que se celebró en enero de 1990. Luego de recolectar distintos datos de 400 diferentes secciones de carreteras y su comportamiento de 10 años, obtuvo múltiples resultados que posteriormente mencionó en su publicación titulada “*The Effect Of Increased Pavement Smoothness On Long Term Pavement Performance & Annual Pavement Maintenance Cost*”.



Los principales resultados de los estudios de *Janoff* son los siguientes:

- 1) Los pavimentos con una menor regularidad tienen niveles más bajos de regularidad en los diez años siguientes de haber sido construidos.

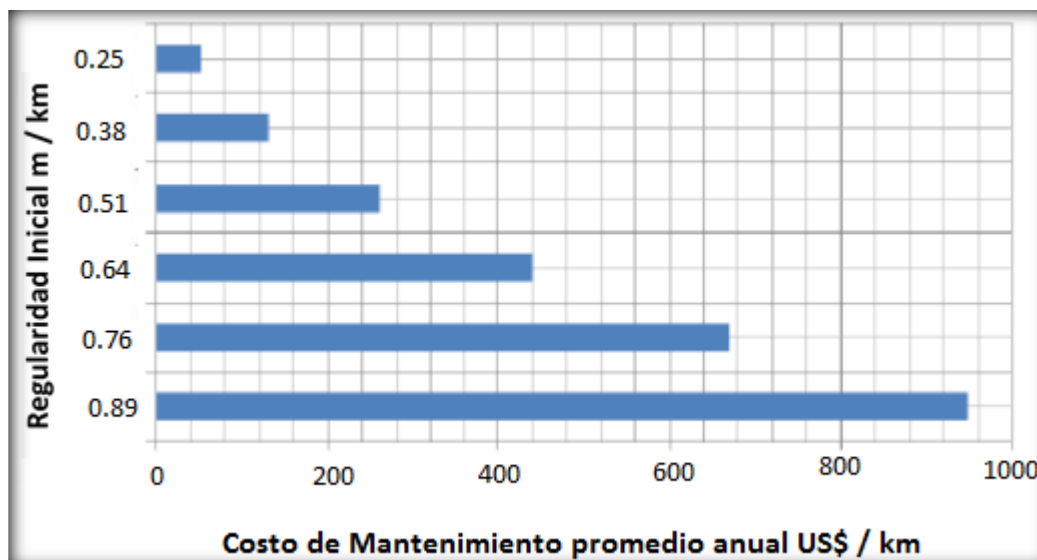
Tabla 2. Regularidad Inicial vs Regularidad Final



- 2) Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen costos anuales promedios de mantenimiento más bajos en comparación a una regularidad inicial alta durante los diez años siguientes a su construcción.



Tabla 3. Regularidad Inicial vs. Costo de Mantenimiento



- 3) Los niveles de agrietamiento en un pavimento con una regularidad inicial menor, disminuyen considerablemente en los diez años siguientes a su construcción.

Los estudios fueron conducidos por el estado de Arizona usando el medidor de *May's* para determinar la regularidad durante varios periodos y confirmados por un estudio realizado por la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), donde se indica que una menor regularidad inicial incrementa la vida útil de los pavimentos.

La siguiente tabla muestra el contenido del estudio y dando como resultado la sensibilidad según la regularidad inicial:



Tabla 4. Resultado de sensibilidad según la regularidad inicial

[Fuente: <https://www.tfher.gov>]

Reducción de Regularidad Inicial	% Promedio de Incremento de la vida útil del pavimento	
	Asfalto	Concreto
10%	5%	7%
25%	13%	18%
50%	27%	36%

Capítulo II

Desarrollo de modelos matemáticos para la obtención del IRI

2.1 Definición

Un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables de las operaciones, para estudiar comportamientos de sistema complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

[Ríos, 1995].

2.2 Técnicas de aprendizaje



Dado que las deflexiones de la suspensión del remolque (EMIRI UMICH 001) no producen una imagen de la condición de la carretera, si no la respuesta del sistema dinámico que incluye el propio remolque y la suspensión a la alteración que las condiciones del pavimento producen en ese sistema, y a su vez, la señal observada contiene una cantidad considerable de ruido. El propósito es encontrar un modelo matemático que sea capaz de producir una aproximación del IRI de un camino. El sistema resultante se puede implementar como un módulo para el remolque. Ese módulo es capaz de aprender la compleja función que traduce la señal en diferentes condiciones y velocidades de circulación.

Hay una serie de técnicas que se pueden utilizar para ese fin. Desde el área de aprendizaje automático, se eligió probar **Árboles de decisión, Máquina de soporte vectorial, Redes neuronales artificiales, Bosques aleatorios y Vecinos cercanos**. Los modelos producidos se compararon con otros dos métodos del área de procesamiento de señales: la **Transformada de Coseno Discreta** y la **Densidad Espectral de Potencia**. El sistema completo se puede usar para crear mapas de condiciones de caminos. La información obtenida, permitirá a las autoridades municipales, estatales y federales, priorizar las necesidades de mantenimiento de los diferentes segmentos del camino.

2.2.1 Regresión del árbol de decisión (*Decision Tree Regression*)

Este método de aprendizaje es utilizado para la clasificación y regresión. El objetivo de la *DTR* es crear un modelo que prediga el valor de una variable objetivo mediante el aprendizaje de reglas simples de decisión inferidas a partir de las características de los datos. Los modelos de árbol, donde la variable objetivo puede tomar un conjunto discreto de valores, se denominan árboles de clasificación, en estas estructuras de árbol, las hojas representan etiquetas de clase y las ramas representan conjunciones de características que conducen a esas etiquetas de clase, los árboles de decisión donde la variable objetivo puede tomar valores continuos (típicamente números reales) se llaman árboles de regresión. Los árboles de clasificación y regresión (CART) producen árboles de



clasificación o de regresión, dependiendo de si la variable dependiente es categórica o numérica, respectivamente.

[Rokach, 2008]

Algunas de las ventajas que menciona en su libro *Lior Rokach* de utilizar árboles de decisión son las siguientes:

- Las personas son capaces de comprender los modelos de árboles de decisión después de una breve explicación.
- Requiere poca preparación de los datos. En cambio otras técnicas a menudo requieren la normalización de datos, utilización de variables ficticias y eliminación de valores en blanco.
- Es posible validar un modelo utilizando pruebas estadísticas. Eso hace que sea posible tener en cuenta la fiabilidad del modelo.
- Funciona con grandes conjuntos de datos, por lo tanto pueden ser analizados utilizando recursos informáticos estándar en un plazo razonable.

2.2.2 Máquina de Soporte Vectorial (*Support Vector Machines*)

Las máquinas de vectores de soporte (SVM) abarcan un conjunto de métodos de aprendizaje utilizados para la detección de clasificación, regresión y valores atípicos. El modelo producido por una regresión vectorial de soporte solo depende de un subconjunto de los datos de entrenamiento, porque la función de costo para construir el modelo ignora cualquier información de entrenamiento cercana a la predicción del modelo.

Su formulación matemática consiste en construir un hiperplano o un conjunto de hiperplanos en un espacio dimensional alto o infinito, que puede usarse para la clasificación y regresión de otras tareas. Intuitivamente, una buena separación se logra mediante el hiperplano que tiene la distancia más grande a los puntos de datos de entrenamiento más cercanos de cualquier clase (llamado margen funcional), ya que en



general, cuanto mayor sea el margen, menor será el error de generalización del clasificador.

[Smola, 2004].

2.2.3 Redes neuronales artificiales (*Artificial Neural Networks*)

Una Red Neuronal Artificial (ANN) es un modelo computacional basado en un gran conjunto de unidades neuronales (neuronas artificiales), de forma aproximadamente análoga al comportamiento observado en axones de las neuronas en los cerebros biológicos. Cada unidad neuronal está conectada con muchas otras y los enlaces entre ellas pueden incrementar o inhibir el estado de activación de las neuronas adyacentes. Cada unidad neuronal, de forma individual, opera empleando funciones de suma. Puede existir una función limitadora o umbral de cada conexión y en la propia unidad, de tal modo que la señal debe sobrepasar un límite antes de propagarse a otra neurona. Estos sistemas aprenden y se forman a sí mismos, en lugar de ser programados de forma explícita, y sobresalen en áreas donde la detección de soluciones o características es difícil de expresar con la programación convencional.

[Haykin, 1995].

2.2.4 Bosques aleatorios (*Random Forests*)

La regresión aleatoria de bosques (RFR) es un método de conjunto. El objetivo de los métodos de conjunto es combinar las predicciones de varios estimadores de base contruidos con un algoritmo de aprendizaje dado para mejorar la generalización sobre un único estimador.

El método RFR se considera un método de promedio, es decir construye varios estimadores de forma independiente y luego promedia sus predicciones. En promedio, el estimador combinado es generalmente mejor que cualquiera de los estimadores de base única porque su varianza es reducida.



En bosques aleatorios, se hacen varios árboles de decisión, y cada árbol en el conjunto se construye a partir de una muestra extraída con reemplazo (es decir, una muestra de arranque) del conjunto de entrenamiento. Además, al dividir un nodo durante la construcción del árbol, la división que se elige ya no es la mejor división entre todas las características. En cambio, la división que se selecciona es la mejor división entre un subconjunto aleatorio de las características. Como resultado de esta aleatoriedad, el sesgo del bosque generalmente aumenta ligeramente (con respecto al sesgo de un solo árbol no aleatorio) pero, debido al promedio, su varianza también disminuye, generalmente más que compensando el aumento en el sesgo, lo que arroja un modelo global mejor.

[Breiman, 2001].

Las ventajas de utilizar bosques aleatorios en las que *Leo Breiman* hace hincapié son las siguientes:

- Es uno de los algoritmos de aprendizaje más certeros que hay disponibles.
- Corre eficientemente en bases de datos grandes y puede manejar cientos de variables de entrada sin excluir ninguna.
- Tiene un método eficaz para estimar datos perdidos y mantener la exactitud cuándo una gran proporción de los datos está perdida.
- Computa las proximidades entre los pares de caso que pueden usarse en los grupos, localizando valores atípicos, o (ascendiendo) dando vistas interesantes de los datos.
- Ofrece un método experimental para detectar las interacciones de las variables.

2.2.5 Vecinos más cercanos (*Nearest Neighbors*)

El método de los Vecinos más cercanos (*KNR*) es un método de clasificación supervisada (aprendizaje, estimación basada en un conjunto de entrenamiento y prototipos) que sirve para estimar la función de densidad $F(\mathbf{x}/C_j)$ de las predictoras $\mathbf{x}$ por cada clase C_j .



Este es un método de clasificación no paramétrico, que estima el valor de la función de densidad de probabilidad o directamente la probabilidad a posteriori de que un elemento x pertenezca a la clase C_j a partir de la información proporcionada por el conjunto de prototipos. En el proceso de aprendizaje no se hace ninguna suposición acerca de la distribución de las variables predictoras.

En el procesamiento de patrones, el algoritmo **k-nn** es usado como método de clasificación de objetos, (elementos) basado en un entrenamiento mediante ejemplos cercanos en el espacio de los elemento. **k-nn** es un tipo de aprendizaje vago, donde la función se aproxima solo localmente y todo el cómputo es diferido a la clasificación.

[Fix, 1989]

2.3 Técnicas de procesamiento de señales

Existen diversas técnicas de procesamiento de señales. En este caso se utilizaron dos técnicas que consideran los datos como una señal $x(n)$ y los procesan para ajustarlos a un modelo de regresión de valores de IRI en los resultados de procesamiento. La primera técnica se basa en la **Transformada de Coseno Discreta**, mientras que la segunda se basa en la **Función de Densidad Espectral de Potencia**.

2.3.1 Transformada de coseno discreta (*Discrete Cosine Transform*)

La DCT (*Discrete Cosine Transform*) es una función lineal e invertible del dominio real R^N al dominio real R^N , que expresa una secuencia finita de N puntos en términos de una suma de funciones Coseno a diferentes frecuencias.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left[\frac{\pi}{N} \left(n + \frac{1}{2} \right) k \right]$$



$$x'(n) = \begin{cases} x(n) & 0 \leq n \leq N-1 \\ x(-n-1) & -N \leq n \leq -1 \end{cases}$$

A continuación se presentan algunas de las ventajas de utilizar la Transformada de Coseno Discreta:

- La DCT tiene una buena capacidad de compactación de la energía al dominio transformado, es decir, que la transformada coseno discreta consigue concentrar la mayor parte de la información en pocos coeficientes transformados.
- La transformación es independiente de los datos. El algoritmo aplicado no varía con los datos que recibe, como si sucede en otros algoritmos de compresión.
- Produce pocos errores en los límites de los bloques imagen. La minimización de los errores a los bloques imagen permite reducir el efecto de bloque en las imágenes reconstruidas.
- Tiene una interpretación frecuencial de los componentes transformados. La capacidad de interpretar los coeficientes en el punto de vista frecuencial permite aprovechar al máximo la capacidad de compresión.

De acuerdo a un estudio en los últimos años, DCT se ha convertido en la transformación más utilizada en sistemas visuales y se ha utilizado para el desarrollo de estándares de codificación actuales como *MPEG*, *JPEG*, etc.

Si los valores consecutivos de $x(n)$ están correlacionados positivamente, la DCT concentra la energía en unas pocas muestras de $X(k)$ y las correlaciona. Esta propiedad se usará para crear un filtro de paso bajo de la señal dada.

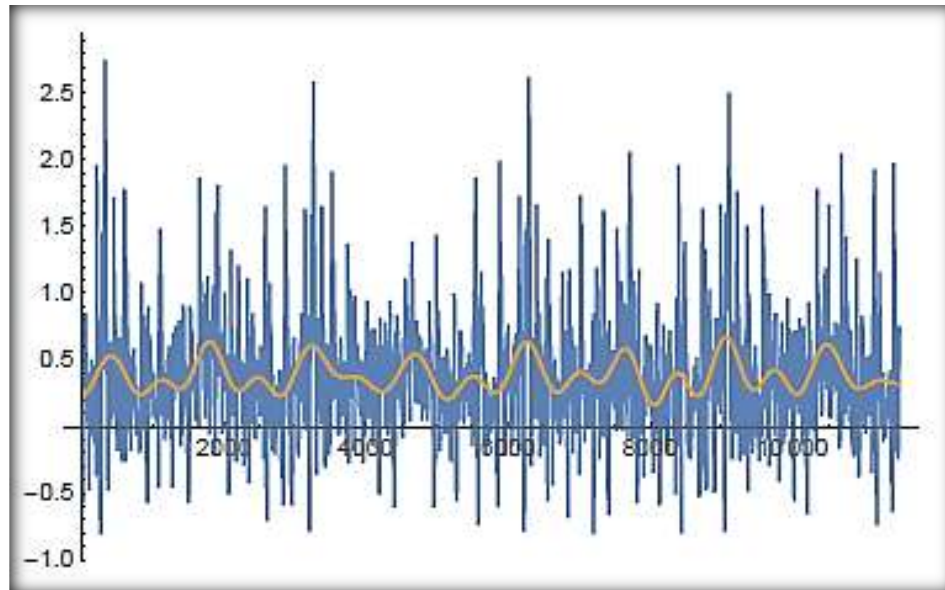
[*Khayam*, 2003].

La figura muestra la respuesta de baja frecuencia en amarillo y la señal original en azul. La señal de baja frecuencia se mantuvo con los 40 términos de la frecuencia más baja DCT.



Tabla 5. Componente de baja frecuencia a la señal IRI original.

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]



2.3.2 Densidad espectral de potencia (*Power Spectral Density*)

La función espectral de potencia (*PSD*) se ha utilizado desde el comienzo de la investigación del IRI, porque proporciona un método eficaz para describir las variaciones en el perfil del camino en términos de amplitudes de onda de una señal de perfil original.

De acuerdo a un estudio, existe una relación lineal entre el IRI y la raíz cuadrada de la función *PSD* del camino. En este estudio, desarrollaron un sistema de medición basado en acelerómetros *Z-axis* y dispositivos *GPS*. Los datos utilizados obtenidos de este sistema sirven para adaptarse a una regresión lineal del valor de IRI en la raíz cuadrada media de la *PSD* de la señal de aceleración *Z*. En el presente caso, los datos experimentales obtenidos del remolque son directamente, elevación *Z* para el modelo cuarto de carro, y dado que la función *PSD* en esta señal es aproximadamente igual, se ajusta a una correlación lineal con la función *PSD* en la elevación real del camino. El valor de IRI y la raíz cuadrada *PSD* en la señal de elevación *Z* registrada por el remolque se ajustan también a una relación lineal.



Una aplicación se codificó en Python 3.5 con el fin de aprovechar el módulo de señal *Scientific Python (SciPy)* para calcular la función *PSD* (versión de *Welch*) en los datos obtenidos del remolque. Luego los promedios de los valores de raíz cuadrada de la función *PSD* se utilizaron para ajustarse a un modelo lineal en los valores de IRI declarados inicialmente, las serie construidas con el 75% inicial de las clases magistrales se utilizaron como conjuntos de prueba para los modelos de regresión.

[Mitra, 2011].

2.4 Resultados

Con los métodos descritos anteriormente, se realizó una prueba de capacidad para determinar el IRI de un camino dado por los regresores. Para realizar esta prueba, el remolque EMIRI UMICH 001 se utilizó en carreteras con diferentes puntajes de IRI.

Los puntajes de IRI se determinaron mediante la observación directa de la carretera y una estimación de la irregularidad mediante un método empírico. Luego, el remolque se rodó sobre las carreteras a cuatro diferentes velocidades (20 km/h, 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h) cuatro veces de forma independiente.

Las mediciones recopiladas por el remolque se almacenaron en archivos categorizados por velocidades, IRI y un ID (1-4), haciendo 80 diferentes archivos. Para poner a prueba al regresor, se utilizaron tres datos (seleccionados al azar) obtenidos en cada velocidad e IRI como conjunto de entrenamiento. Mientras que el cuarto dato obtenido de cada combinación de IRI y velocidad se usaron como conjunto de validación.

Los vectores característicos usados para poner a prueba y validar los modelos tenían la forma $[R, S]$, donde R es la suma de las lecturas del amortiguador derecho y S es la velocidad a la que se tomaron las lecturas.

Los regresores utilizados en este trabajo son los siguientes: Árboles de Decision (*DT*), Máquina de Vectores de Soporte (*SVM*), Red Neuronal Artificial (*ANN*), Bosques



Aleatorios (*RF*), Vecinos más cercanos (*KNN*) and *Welch's*. Sus parámetros se definen en la siguiente tabla:

Tabla 6. Parámetros de los Regresores.

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

Regressor	Parameters
Decision Trees	criterion='mse' minimum samples split=2 minimum samples leaf=1 minimum impurity split= 1×10^{-7}
Support Vector Machines	kernel='rbf' penalty parameter $C=1 \times 10^3$ kernel coefficient $\gamma = 0.1$ tolerance= 1×10^{-3}
Artificial Neural Network	neurons in hidden layer=100 activation function='relu' solver for weight optimization='lbfgs' tolerance= 1×10^{-4} maximum number of iterations=500
Random Forests	number of trees in the forest=10 criterion='mse' minimum samples split=2 minimum samples leaf=1 minimum impurity split= 1×10^{-7}
K-Nearest Neighbors	number of neighbors=5 no weighted neighbors distance metric=euclidian

Se proponen dos métricas diferentes para evaluar el rendimiento de los regresores. El primero es simplemente el puntaje IRI que predice el regresor en comparación con el puntaje IRI real de los datos. La otra métrica es el error cuadrático medio (*MSE*), que es una medida que calcula el error entre un estimador y un valor esperado.

La ecuación *MSE* se describe de la siguiente forma:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$$

Dónde *n* es el número de muestras, *y_i testada* es el valor predicho y *y_i* es el valor real.

La tabla muestra el rendimiento de los diferentes métodos de regresión aplicados a los datos adquiridos:



Tabla 7. Aproximaciones de los reguladores con diferentes IRI.

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

IRI	Speed	IRI						
		DT	SVM	ANN	RF	KNN	Welch	DCT
2.8	20	2.8000	5.3628	3.3099	2.8000	3.8400	3.5295	2.8000
	40	2.8000	2.8102	2.8656	2.8000	3.7200	3.0949	2.3259
	60	2.8000	1.9339	2.3778	2.8000	3.7800	3.2247	2.8000
	80	2.8000	-3.2341	8.2181	2.8000	2.8000	3.1849	2.7999
3.9	20	3.9000	3.0414	4.1153	4.0500	3.9000	3.8897	3.4764
	40	3.9000	3.7864	3.8743	3.9000	3.9000	3.5187	3.4750
	60	3.9000	3.8938	3.9403	4.0600	4.2200	3.3191	3.4750
	80	3.9000	3.8960	3.8916	4.0600	4.2200	3.5091	3.4723
5.1	20	5.1000	4.8225	4.9648	4.8700	4.1800	5.4342	5.4422
	40	5.4000	4.0069	2.4986	5.1600	3.7200	5.4845	5.5427
	60	5.4000	4.9408	5.1664	5.3700	5.2800	5.4942	5.6139
	80	5.5000	5.3937	4.8521	5.5000	5.0600	5.2353	5.4663
5.4	20	5.4000	5.5003	5.4512	5.4000	4.3600	4.3479	5.0390
	40	5.4000	5.2628	5.4406	5.4200	5.2800	4.7197	5.2222
	60	5.1000	4.9952	5.1993	5.1600	5.2800	4.5866	5.2939
	80	5.4000	5.4947	5.1171	5.4000	5.1200	4.8676	5.1181
5.5	20	5.1000	5.4992	5.4254	5.3400	5.4600	5.5107	5.5000
	40	5.5000	5.6218	5.6092	5.2400	5.4600	5.7936	5.5000
	60	5.1000	5.4748	4.5311	5.0600	5.1000	5.1275	5.5000
	80	5.5000	5.3525	6.1922	4.7000	5.4400	5.4062	5.5000

El MSE de cada regresor para cada puntaje de IRI probado y su MSE total, lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 8. Errores de los Regresores (MSE).

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

IRI	DT	SVM	ANN	RF	KNN	Welch	DCT
2.8	0.0000	10.9321	7.4497	0.0000	0.7221	0.2369	0.0562
3.9	0.0000	0.1875	0.0122	0.0184	0.0512	0.1590	0.1809
5.1	0.0850	0.3459	1.7129	0.0723	0.6962	0.1083	0.1778
5.4	0.0225	0.0504	0.0311	0.0145	0.2972	0.6287	0.0632
5.5	0.0800	0.0093	0.3588	0.2317	0.0417	0.0585	0.0000
Total	0.0375	2.3050	1.9129	0.0674	0.3617	0.2383	0.0956



Los modelos producidos son capaces de arrojar una aproximación del IRI al pasar el remolque EMIRI UMICH 001 por un camino determinado.

Las técnicas implementadas para este fin fueron: Árboles de decisión, Máquinas de vectores de soporte, Redes Neuronales Artificiales, Bosques Aleatorios y Vecinos más cercanos. Los modelos producidos se compararon con otros dos métodos del área de procesamiento de señales: La Transformada de Coseno Discreta y La Densidad Espectral de Potencia.

A continuación se presentan las gráficas con las regresiones para todos los modelos con los diferentes IRI.

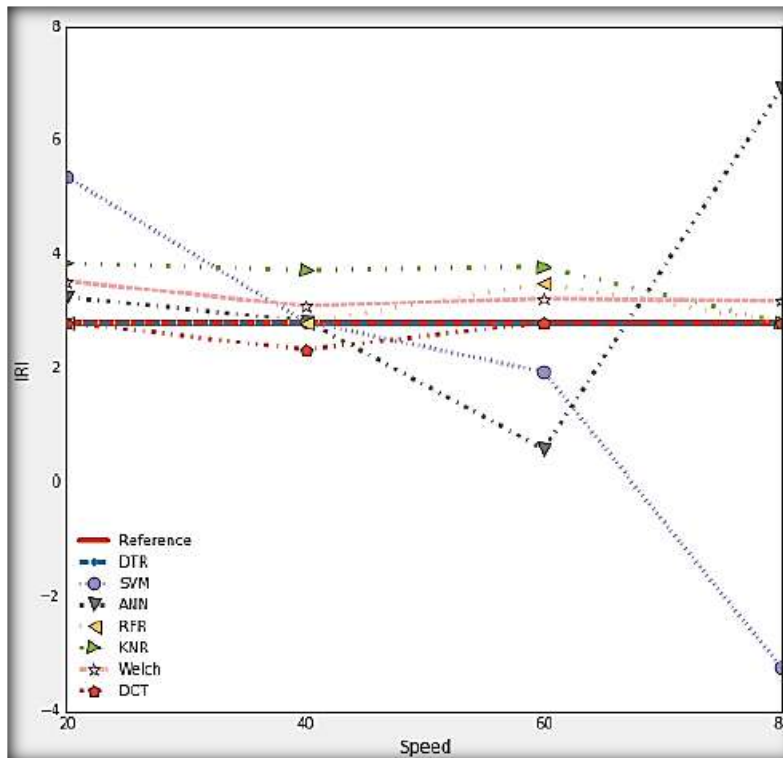


Tabla 9. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 2.8

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

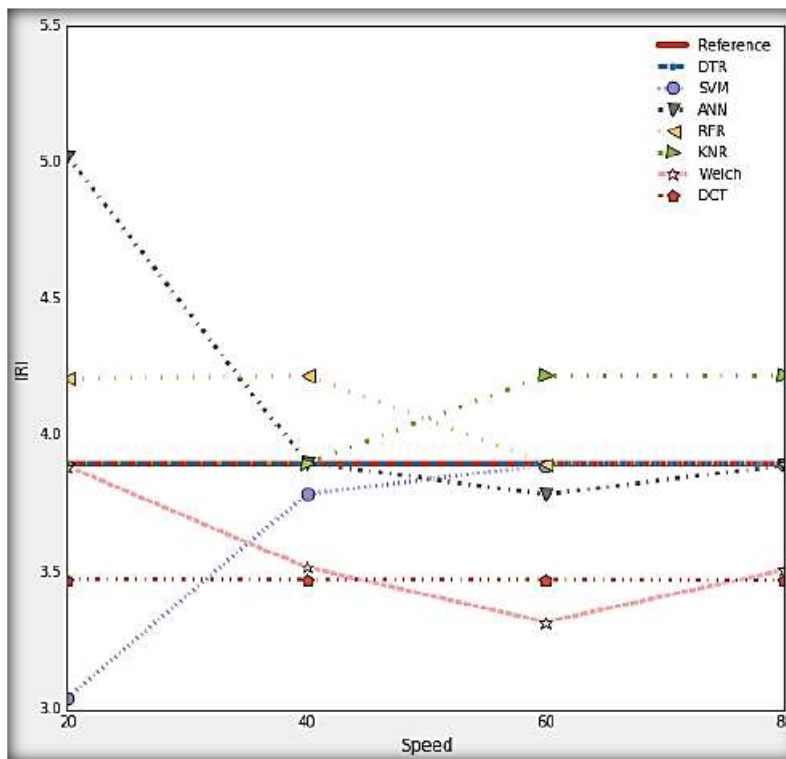


Tabla 10. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 3.9

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

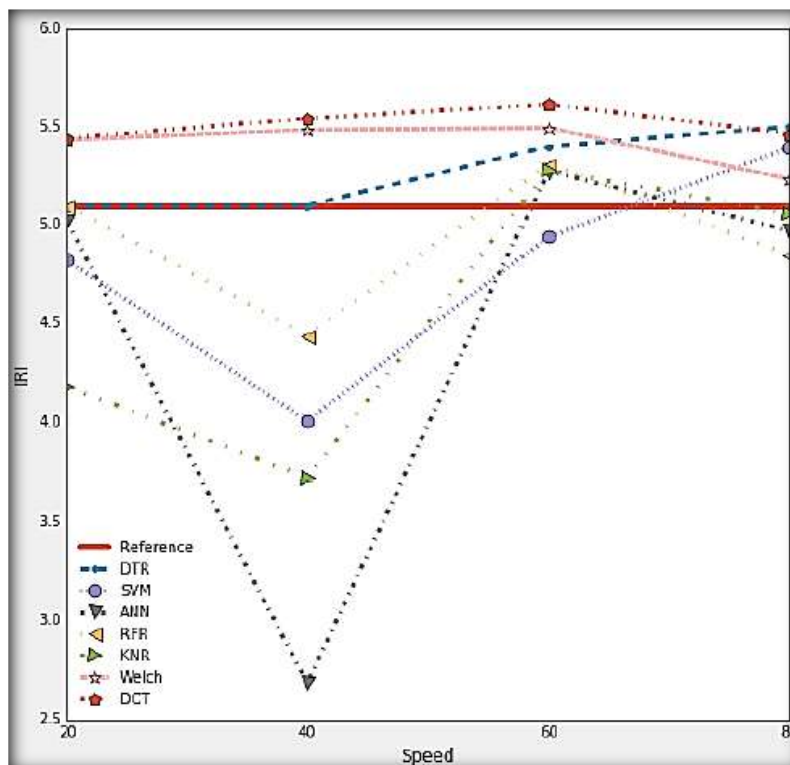


Tabla 11. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 5.1

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

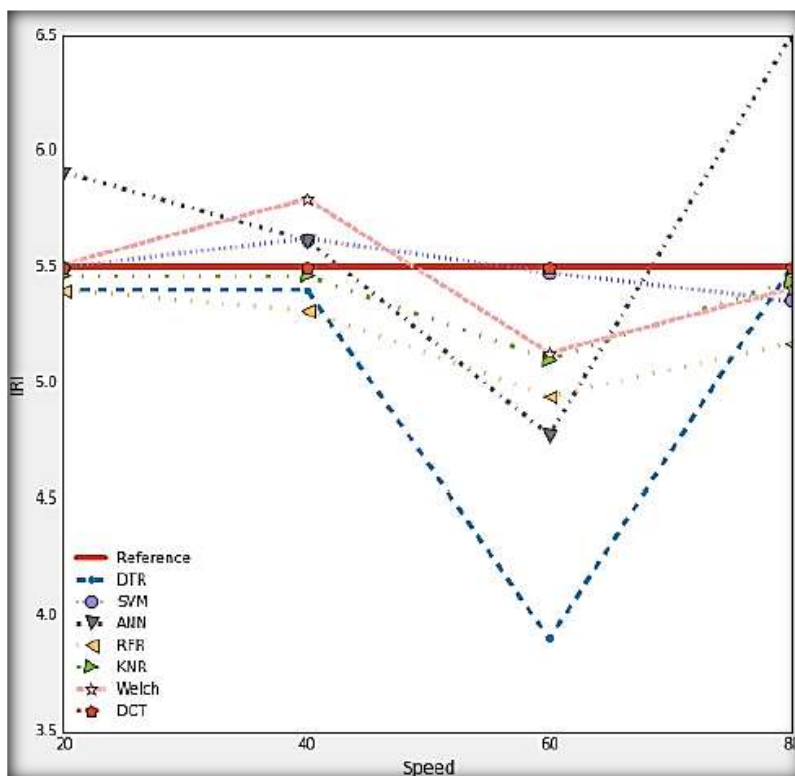


Tabla 12. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 5.4

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]

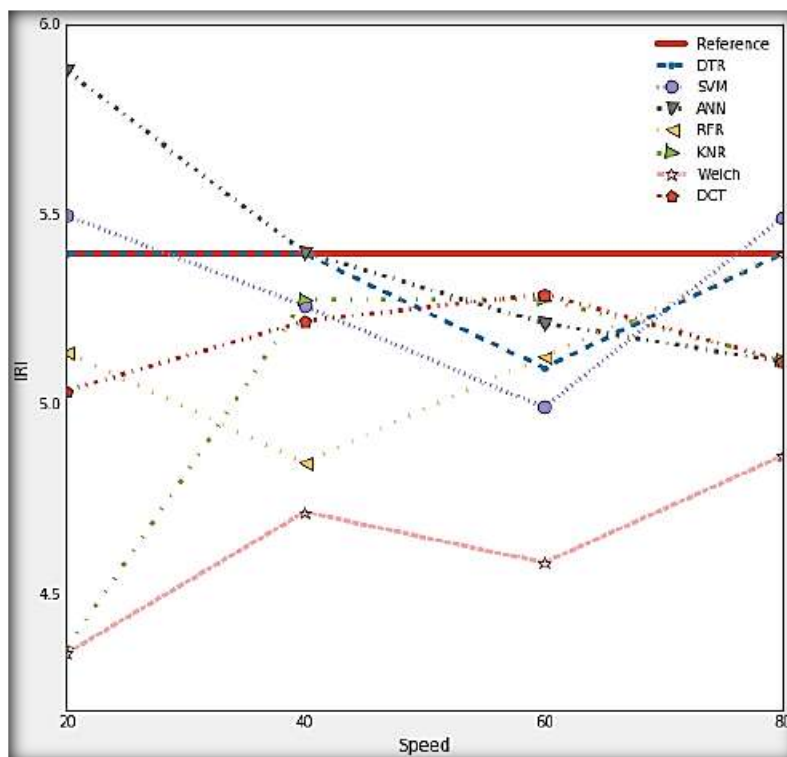


Tabla 13. Regresiones para todos los modelos cuando IRI = 5.5

[Fuente: Artículo “*Machine Learning Methods to Predict International Roughness Index on Mexican Roads*” DEP-FIE, UMICH, Morelia, Michoacán 2017]



De los métodos probados, la técnica que produjo los mejores resultados de regresión, es decir, el error mínimo, fue **Vecinos Cercanos**. Los resultados presentados fueron producidos con datos recopilados en tramos de calibración ubicados en:

- Carretera Morelia – Pátzcuaro (antiguo camino), Morelia.
- Av. Miguel Hidalgo y Costilla, Morelia.
- Carretera Michoacán Los Cerritos – Huaniqueo de Morales, Morelia (dos tramos).

Con los datos recopilados y los valores de IRI determinados por inspección, el sistema se encuentra en condiciones de obtener información de carreteras con referencias estandarizadas y poder ajustar todo el sistema.

Capítulo III

Definición de tramos de calibración

3.1 Definición de calibración

La calibración es el proceso de comparar los valores obtenidos por un instrumento de medición, con la medida correspondiente de un patrón de referencia (o estándar). Según la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, la calibración es “una operación que, bajo condiciones específicas, establece en una primera etapa una relación entre los valores y las incertidumbres de medida provistas por estándares e indicaciones correspondientes con la incertidumbre de medidas asociadas y, en un



segundo paso usa esta información para establecer una relación y obtener un resultado de la medida a partir de una indicación”.

[*Metrology*, 2008].

Tomando como referencia la definición anterior, se deduce que para llevar a cabo la calibración de un equipo o instrumento, es necesario contar con otro instrumento de mayor precisión, es decir, un patrón, que arroje un valor que pueda ser comparable con el valor del instrumento en calibración. Es importante mencionar que se deben realizar una serie de comparaciones ininterrumpidas hasta llegar al patrón primario. El objetivo de calibrar un instrumento, es el de verificar el buen funcionamiento del mismo, que trabaje de acuerdo a las normas de calidad y garantizar que se tratan de medidas confiables.

3.2 Requisitos de calibración

Para llevar a cabo el proceso de calibración del equipo EMIRI UMICH 001, se requiere lo siguiente:

- Tramos carreteros de distintas condiciones (buenas, regulares y malas).
- Dichos tramos deben ser rectos y sin interrupciones (topes, vías de ferrocarril, puentes, etc.) que puedan alterar el valor del IRI.
- Longitud mínima de 300 m, contando además con una distancia de aproximación de 50 m entre uno y otro como mínimo, esto debido a que el equipo llevará la velocidad estipulada antes de llegar al inicio del tramo.
- Los valores de IRI de los tramos seleccionados deben estar actualizados.
- Se recomienda que sean de dos carriles por sentido para no entorpecer la circulación del tránsito.



3.3 Medición de la carretera San Luis Potosí - Matehuala

Tomando en cuenta los requisitos para llevar a cabo la calibración, se buscaron varios caminos con las condiciones necesarias para llevar a cabo dicho trabajo. Teniendo en cuenta esto, se optó por un camino con diferentes valores de IRI a lo largo del mismo. En este caso se definió la carretera San Luis Potosí – Matehuala, con una longitud total de 115 kilómetros (Figura 7) por sus características apropiadas para realizar la medición, ya que a lo largo de esta se encuentran las diferentes condiciones requeridas para llevar a cabo la calibración.

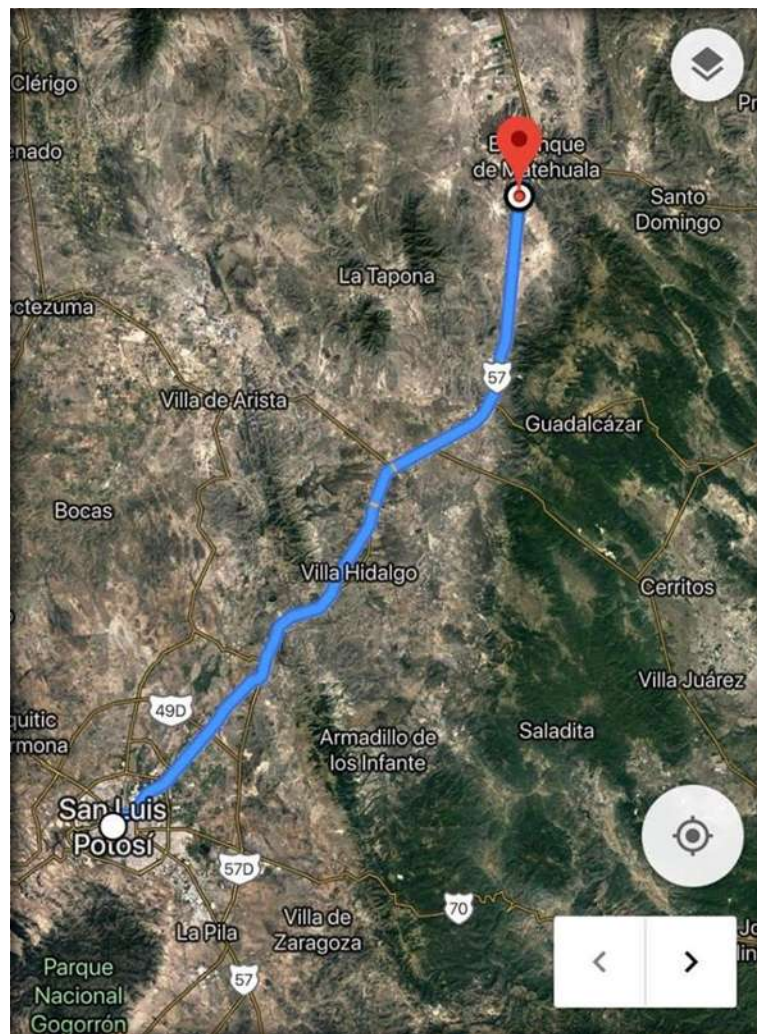


Figura 7. Carretera San Luis Potosí – Matehuala

[Fuente: Google Maps]



El equipo con el cual realizó dicha medición, fue un Perfilógrafo Láser calibrado y certificado por el IMT (Instituto Mexicano Del Transporte), el cual está montado sobre un bastidor en la parte delantera de una camioneta *Express Van* automática marca Chevrolet color blanco y cuenta con las siguientes características:

- ✓ Considerado como un “equipo de alto rendimiento”, ya que cuenta con una serie de láser y acelerómetros que trabajan en conjunto para la obtención del IRI.
- ✓ Adicionalmente cuenta con un Sistema de Posicionamiento Global (*GPS*) para georreferenciar la vía en estudio.
- ✓ Realiza mediciones entre 30 km/h y 90 km/h sin obstruir el tráfico.
- ✓ Cuenta con varias cámaras que van obteniendo una serie de fotografías y video de las condiciones a lo largo del camino.



Figura 8. Perfilógrafo Láser



El proceso de medición con el perfilógrafo láser consistió en recorrer dicha carretera en ambos sentidos a las velocidades de 40 km/h y 80km/h para obtener los datos necesarios y posteriormente analizarla en gabinete. Primeramente se ubicó el inicio de la carretera y se preparó el equipo en cuestión, tomando en cuenta las necesidades pertinentes para que este no tuviese ningún problema al momento de realizar la medición.

Una vez ubicado el inicio y estando listo el equipo, se comenzó la medición a 40km/h hasta llegar al final de la carretera, concluyendo satisfactoriamente el recorrido y obteniendo la información requerida. Posteriormente se llevó a cabo una revisión del equipo y asimismo corroborar que se encontrara en óptimas condiciones para realizar la medición a 80km/h y así obtener los resultados esperados a esta velocidad.

Un par de semanas después se me entregó la información obtenida con el Perfilógrafo láser para posteriormente analizarla detalladamente y elegir el tramo por el cual se pasaría el EMIRI UMICH 001.

3.4 Traslado del EMIRI UMICH 001 a San Luis Potosí

Una vez obtenida y analizada la información, se seleccionó el tramo para realizar las mediciones y se trasladó el EMIRI UMICH 001 a la ciudad de San Luis Potosí. Para llevar a cabo la medición con el equipo, se seleccionó el tramo del km 20+000 al km 60+000, ya que este tramo cuenta con las características necesarias para la obtención de datos, teniendo para su estudio un total de 40 km de longitud.

Para el traslado se desconectaron los sensores, evitando así algún percance o descompostura durante el trayecto. Teniendo el equipo en dicha ciudad, se revisó que todo estuviera en condiciones y trabajando correctamente (Figura 9). Posteriormente se ubicó el km de inicio (Figura 11) y una vez estando ahí se procedió a realizar la calibración de los sensores desde la computadora y a su vez el llenado de datos en el programa encargado de almacenar la información. (Figura 10).



Figura 9. Equipo EMIRI UMICH 001



Figura 10. Equipo EMIRI UMICH 001



Figura 11. Salida a carretera San Luis Potosí - Matchuala

Teniendo el equipo en condiciones para medir, se pasó a lo largo del tramo seleccionado a las velocidades de 40 km/h y 80 km/h. Únicamente se realizaron mediciones en el sentido “A” (hacia Matchuala) dado que los datos que se obtendrían serían más que suficientes para llevar a cabo la comparación de los datos obtenidos con el Perfilógrafo Láser y el EMIRI UMICH 001.

Durante tres días se realizaron las mediciones en la mencionada carretera y se estuvieron observando los datos para descartar cualquier error en la medición. Una vez obtenidos todos los datos a las dos diferentes velocidades, se procedió a realizar el análisis de la información y posteriormente realizar el traslado del EMIRI UMICH 001 de regreso a la ciudad de Morelia, Michoacán.



Capítulo IV

Presentación de resultados

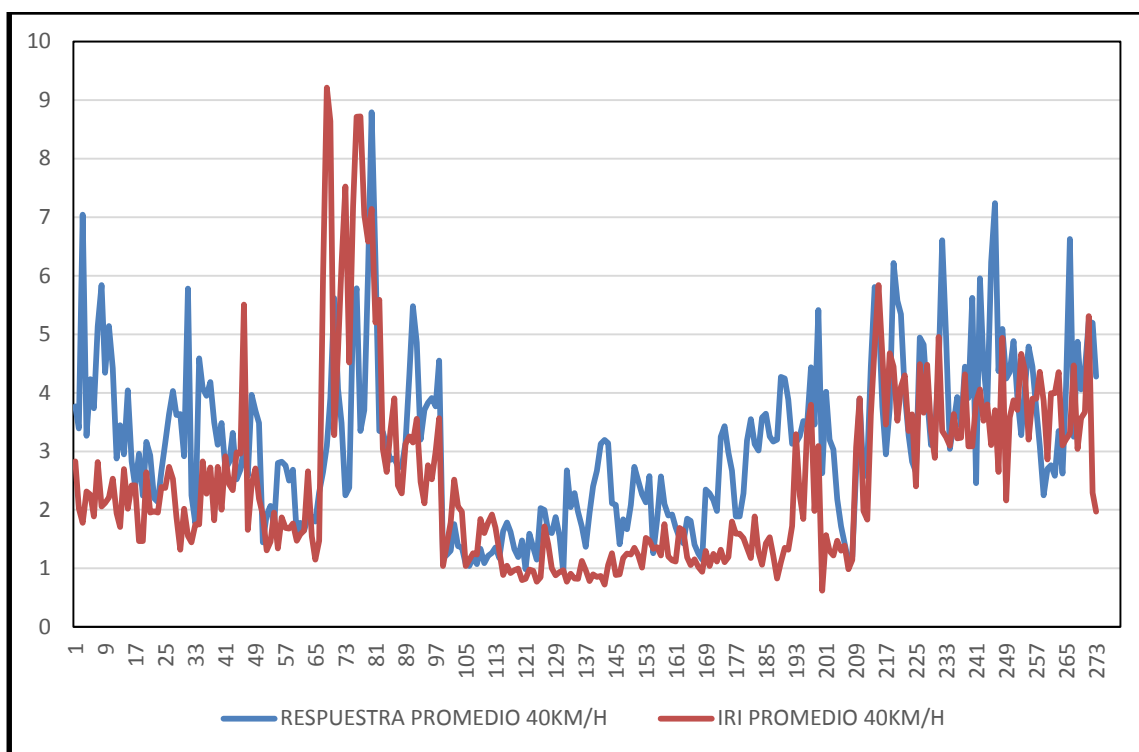
Una vez que se analizaron los resultados obtenidos con el Perfilógrafo Láser y el EMIRI UMICH 001, se procedió a realizar tablas comparativas con la ayuda de un software entre el IRI que arrojó el perfilógrafo y la respuesta que obtuvo el EMIRI, teniendo así los resultados con los que se procedió a tomar decisiones sobre los modelos matemáticos a utilizar para la culminación de la calibración del equipo tipo respuesta.

La primera velocidad a la que se pasó el EMIRI fue a 40 km/h, ya que es una velocidad moderada a la que normalmente circulan vehículos de carga y por ende es importante realizar la prueba a esta velocidad. Posteriormente se realizó la medición a 80 km/h, que es la velocidad a la cual circulan gran parte de los vehículos en una carretera y es la velocidad definida por el Banco Mundial para la medición del IRI.

Una vez obtenidas las lecturas con el EMIRI UMICH 001, se realizaron tablas comparativas con las lecturas del Perfilógrafo Laser y el resultado fue el siguiente:



Tabla 14. Respuesta Promedio EMIRI UMICH 001 vs IRI Promedio Perfilógrafo Láser a la velocidad de 40 km/h

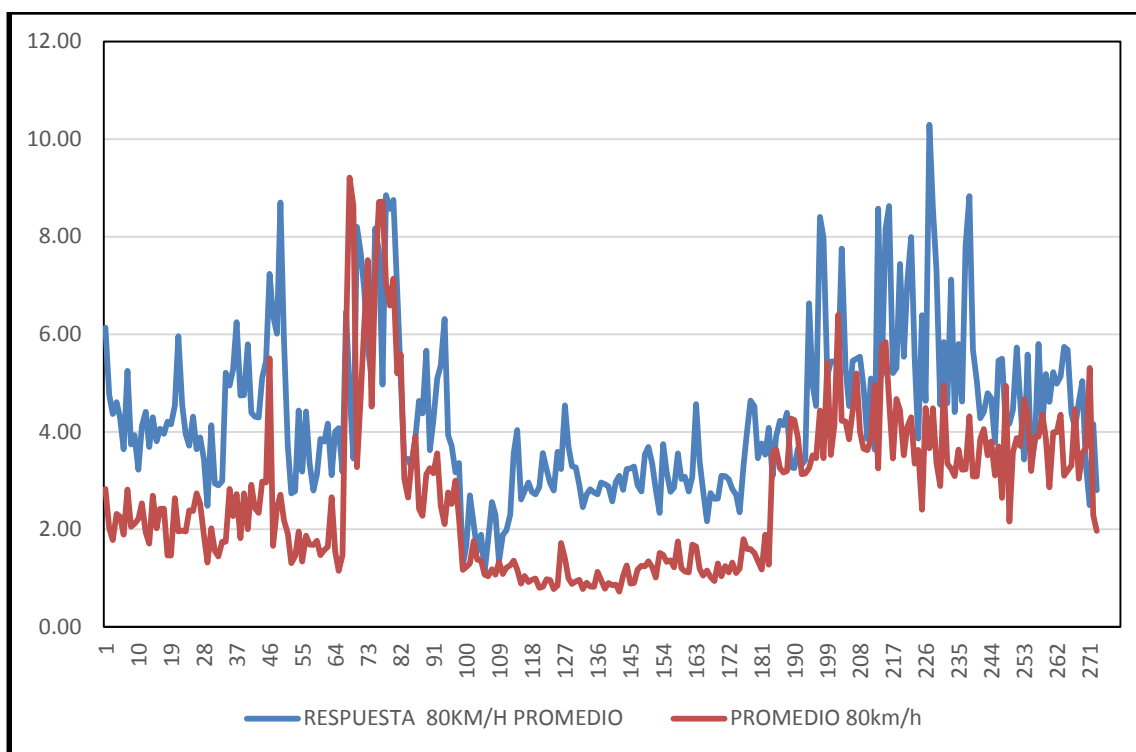


En la tabla comparativa se puede apreciar la respuesta promedio que arrojó el EMIRI UMICH 001 (color azul) con respecto al IRI promedio que generó el Perfilógrafo Láser (color guinda), esto a una velocidad de 40 km/h. Utilizando “**Vecinos cercanos**” (técnica que produjo los mejores resultados), se puede deducir que existe una gran correlación en los datos obtenidos a lo largo del tramo. Esto sin tomar en cuenta que los datos mencionados corresponden únicamente a la respuesta que genera el EMIRI y no al valor del IRI como tal.

A continuación se presenta la tabla comparativa de los datos obtenidos con los mismos equipos y en el mismo tramo, pero ahora a una velocidad de 80 km/h.



Tabla 15. Respuesta Promedio EMIRI UMICH 001 vs IRI Promedio Perfilógrafo Láser a la velocidad de 80 km/h



Una vez obtenidos los datos, se realizaron pruebas para transformar la respuesta del equipo a 80 km/h a valores de IRI, para lo cual se tomaron 273 lecturas del EMIRI UMICH, lo que conformó la variable dependiente, y como variable independiente se tomaron las lecturas provenientes del Perfilógrafo Láser. De estas 273 lecturas se tomaron 200 para conformar el conjunto para entrenar a los regresores (conjunto de entrenamiento) y los 73 restantes se usaron para validar la efectividad de los regresores para aproximarse a la variable independiente (conjunto de validación). Para medir la efectividad se comparó el valor promedio del conjunto de validación contra el valor promedio de los regresores.

De las pruebas se observó que **“Vecinos Cercanos”** logra aproximarse mejor al valor promedio esperado, seguido de **“Bosques Aleatorios”** y de **“Máquina de soporte vectorial”**. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos.



Tabla 16. Promedio de los regresores y los datos reales a 80 km/h

IRI REAL	IRI KNR	IRI RFR	IRI SVR
3.8395	3.9360	3.7359	3.1055

Utilizando la técnica de regresión **Vecinos Cercanos** y realizando la comparación de los datos obtenidos por el Perfilógrafo Láser y el EMIRI a la velocidad de 80 km/h, se puede deducir que los resultados cumplen con los objetivos planteados. Esto teniendo en cuenta que el Perfilógrafo es un equipo de alto rendimiento y de un costo de adquisición elevado. Por lo tanto podemos observar que los datos arrojados por el EMIRI tienen una correlación muy alta con respecto a los del Perfilógrafo y por ende se puede deducir que el EMIRI está funcionando de manera correcta al hacer las mediciones.



Conclusiones y trabajo a futuro

Como es sabido, los pavimentos en México no se encuentran en las mejores condiciones, esto debido a varios factores, sin embargo, el poder medir algunos parámetros de servicio como el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) se convierte en una herramienta para determinar las condiciones en las que se encuentran los pavimentos y de esta manera tomar acciones que propicien una mejora significativa en los mismos.

Por esta razón, se desarrolló en la Universidad Michoacana un equipo tipo respuesta de bajo costo denominado **EMIRI UMICH 001** que permita medir dicho parámetro y poder identificar de manera rápida el estado que guarda cualquier camino.

Para lograr su correcto uso, fue necesario calibrarlo, para lo cual, se realizó el traslado del equipo a la ciudad de San Luis Potosí donde se realizaron las pruebas necesarias a las velocidades de 40 km/h y 80 km/h para la obtención de los datos, esto sin tener ningún problema para la adquisición de los mismos y comparar la respuesta del EMIRI con un Perfilógrafo Láser de alto rendimiento.

El problema de convertir los valores de respuesta del remolque a IRI se conceptualizó como un problema de regresión, donde para un conjunto de valores (variable dependiente) se especifica un valor objetivo (variable independiente) proveniente de una fuente externa. Los regresores se expusieron a la variable dependiente en un proceso llamado entrenamiento y través de un algoritmo de aprendizaje se ajustaron los regresores para que, dada la muestra de la variable dependiente correspondiente, el regresor devolviera una aproximación a la variable independiente.

Al analizar el planteamiento sobre cómo llevar a cabo la transformación de los datos que arrojaría el EMIRI UMICH 001, se pensó en varias técnicas de aprendizaje y en desarrollar modelos matemáticos que permitieran llevar a cabo dicha labor. Las técnicas utilizadas fueron las siguientes: **Árboles de decisión, Máquina de soporte vectorial, Redes**



neuronales artificiales, Bosques aleatorios y Vecinos cercanos. Los modelos producidos se compararon con otros dos métodos del área de procesamiento de señales: la **Transformada de Coseno Discreta** y la **Densidad Espectral de Potencia**. Haciendo una comparativa entre estas, se dedujo que la técnica que produjo los mejores resultados de regresión, es decir, el error mínimo, fue **Vecinos Cercanos**.

Finalmente teniendo todos estos datos, fue posible realizar las tablas comparativas entre el Perfilógrafo Láser de alta tecnología y el EMIRI UMICH 001. Teniendo como resultado una muy buena correlación entre los dos equipos y así poder llegar a los resultados y objetivos planteados en un inicio.

Una vez finalizada la investigación, realizadas las mediciones y habiendo concluido con la comparación de los datos obtenidos entre el Perfilógrafo Láser y el EMIRI UMICH 001, se puede deducir que los resultados cumplen correctamente con el objetivo planteado inicialmente.



Referencias

A. J. Smola and B. Schlkopf. (2004). «A tutorial on support vector regression».

B. W. Silverman and M. C. Jones (1989). «International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique, Vol. 57, No. 3».

D. Pérez Madrigal. (2012). «Análisis de Índice de Perfil en Tramos Carreteros y Algunas Recomendaciones para Manejarlo» México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Department of Transportation, (2002), «California Test 526, Operation of California Profilograph and Evaluation of Profiles». Sacramento, California, EUA.

Dr. Manuel J. Mellins. (1992). «Cálculo del IRI de una carretera a partir de su perfil longitudinal». Revista Rutas.

E. Fix.; J.L. Hodges. (1989). «(1951): An Important Contribution to Nonparametric Discriminant Analysis and Density Estimation: Commentary on Fix and Hodges (1951)». International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique.

I.G. Badilla Vargas. (2009). -«Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad internacional (IRI)»- Infraestructura Vial, vol. 21 No.2.

Ignacio Sánchez, S. Y. (1989). «El IRI: Un indicador de la regularidad superficial». Revista de Ingeniería en construcción No.6



James. W. (1990). *«Measurements, specifications and achievement of smoothness for pavement construction. Washington, D.C»*. National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway practice 167.

Leo Breiman. (2001). *«Random Forest, Machine Learning»*.

Lior Rokach, Obed Maimon. (2008). *«Data mining with decision trees: theory and applications»*. World Scientific Pub Co Inc.

Metrology, I.V. (2008). *«Basic and general concepts and associate terms. (VIM) »*.

Michael S. Janoff. (1988). *«Pavement Roughness and Rideability Field Evaluation»*. (National Cooperative Highway Research Program Report).

Michael W. Sayers, T. D. (1986). *«The International Road Roughness Experiment. Washington, D.C. U.S.A»*. World Bank technical paper number 45.

Montenegro, J. J. (1999). *«Evaluación de las condiciones superficiales de una carretera por medio de un equipo tipo respuesta mecánica»*. Morelia.

National Research Council. (1994). *«Manual profile measurement: Operational field guidelines SHRPP-378»*.

Ronald Collins (2002). *«Pavement Smoothness Index Relationships»*. Final Report, FHWA.

S. A. Khayam. (2003). *«The discrete cosine transform (DCT): theory and application»*. Michigan State University, vol. 114.



Schwab, K. (2017). «*The Global Competitiveness Report. World Economic Forum*».

S. Haykin. (2004). «*A comprehensive foundation, Neural Networks, vol.2 no. 2004, p.41*».

S. K. Mitra. (2011). «*Digital Signal Processing: A Computer Based Approach*». McGraw Hill Higher Education.

Secretaria de comunicaciones y transportes. (2013). «*Infraestructura del transporte*».

Sixto Ríos. (1995). «*Modelización*». Alianza Universidad.

Vargas, G.A. (2010). «*Aspecto y consideraciones importantes en el cálculo de Índice de Regularidad Internacional (IRI)* ». Ingeniería.

Y. Rodríguez Méndez. (2016). «*Diseño y construcción de un equipo tipo respuesta de bajo costo para la medición de IRI basado en una tarjeta de adquisición de datos*». Morelia, Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.