

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



**Estimación del IRI en el Extendido de  
Pavimentos Asfálticos Mediante  
Modelización Basada en la  
Transformación del Perfil Longitudinal**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Rodrigo Díaz Torrealba**

Ingeniero Civil, MSc.

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos

**Doctorado en Sistemas de Ingeniería Civil**

**Estimación del IRI en el Extendido de  
Pavimentos Asfálticos Mediante  
Modelización Basada en la  
Transformación del Perfil Longitudinal**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Rodrigo Díaz Torrealba**

Ingeniero Civil, MSc.

Bajo la dirección de:

Dr. José Ramón Marcobal Barranco

Madrid, 2024

Título: Estimación del IRI en el Extendido de Pavimentos Asfálticos Mediante Modelización Basada en la Transformación del Perfil Longitudinal

Autor: Rodrigo Díaz Torrealba

Programa de Doctorado: Sistemas de Ingeniería Civil

Dirección de tesis:

Dr. José Ramón Marcobal Barranco (Director)

Profesor Titular de Universidad. Departamento de Ingeniería del Transporte, Territorio y Urbanismo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

Esta tesis ha sido parcialmente financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) / Programa de Becas / Doctorado en el Extranjero Becas Chile / 2020 – 72210439.



*A Solange y Florencia*



# Agradecimientos

La presente tesis doctoral no habría sido posible sin la colaboración desinteresada de muchas personas que de una u otra forma han contribuido a su desarrollo y culminación.

En primer lugar, agradezco a mi esposa Solange, cuyo apoyo y comprensión incondicional han sido fundamentales para el cumplimiento de esta meta. A mi hija Florencia, por el tiempo que hemos dejado de compartir. De ellas es en gran parte el mérito de esta tesis.

Agradezco a mi director de tesis José Ramón Marcobal, por la confianza depositada en mí desde el primer momento, por su apoyo, dedicación y preocupación permanente sin los cuales este trabajo no habría sido posible.

Agradezco también a los profesores del Programa de Doctorado en Sistemas de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), a los profesores miembros de la comisión evaluadora de esta tesis, y en particular al profesor Juan Gallego, por su disponibilidad y apoyo fundamentales para mi formación doctoral.

A mis compañeros del programa de doctorado Federico, Freddy y Gustavo; gracias por vuestra ayuda desinteresada, compañía, y por los momentos compartidos durante estos seis años. Gracias a mis hermanos, familiares, amigos y a todas aquellas personas que me han acompañado durante esta etapa.

Por último, agradezco a mis padres Jorge y Elizabeth, por el apoyo incondicional con el que me han alentado en el transcurso de la vida. Por ser mi ejemplo a seguir, y por creer en mí.



## Abstract

The smoothness achieved in pavement construction, or as-built roughness, has great importance in road engineering since it serves as an indicator for both the level of service provided to users and the overall standard of construction quality. Pavements with increased initial smoothness will have a longer service life, will provide a better quality of service to the user over time, and the highway agency will spend less time and resources on their maintenance. Therefore, being able to predict as-built roughness is an important issue for supporting pavement design, construction and management decision-making.

Traditionally, as-built roughness has been studied in the literature from an empirical approach, based on the statistical correlation between the roughness IRI observed before and after the execution of paving works, leading to models of diverse natures and predictive capability.

Based on the review and analysis of both the available prediction models and the construction process, interactions that limit the predictive capacity of the traditional empirical approach have been identified; demonstrating, through the frequency response of the paver screed and the IRI model, that fitting a before-after IRI type regression is insufficient to explain the observed variability in real as-built roughness data.

In response to this research need, an original approach to as-built IRI prediction is proposed in this work, and a prediction model was developed based on the profile transformation resulting from the levelling response of the asphalt paver during the construction process. Formulation of the linear systems that constitute the model were developed for the case of a wheeled paver without using of automatic levelling. Longitudinal profile data from the Long-Term Pavement Performance (LTPP) SPS-5 experiment was used to calibrate the model, obtaining a mean error of 0.22 m/km for the predicted IRI.

From the base prediction model results, an enhanced model was developed to incorporate the effect of automatic screed control on the paver levelling response. Formulation of linear systems that constitute the model was carried out for the case of wheeled pavers using an automatic control system through levelling beam (long reference averaging). The model was calibrated with profile data from the database prepared for this purpose, obtaining a mean error of 0.17 m/km for the predicted as-built IRI.

The model developed provides a tool for study the effectiveness on roughness correction of a certain overlay design, so project adjustments can be made before the works take place. For instance; to analyse the effects on roughness of an increase or decrease in overlay thickness, evaluate the cost/benefits of laying the overlay in one or more lifts, assist decision making on paver type and size selection, or evaluate smoothness effect of using automatic levelling systems. The research work conducted involve a novel methodological approach for the prediction of as-built IRI, and the results obtained represent an improvement with respect to the available models in the literature, demonstrating the potential of the proposed approach as a valuable modelling alternative.

# Resumen

La regularidad inicial conseguida en la construcción de pavimentos, o regularidad de construcción, es de enorme importancia en la ingeniería vial. Es un indicador tanto del nivel de servicio ofertado a los usuarios como del estándar de calidad constructiva en general. Los pavimentos que inicialmente cuenten con mejor regularidad tendrán una mayor vida útil, brindaran una mejor calidad de rodado a lo largo del tiempo, y la agencia vial gastará menos tiempo y recursos en su mantenimiento. En este sentido, la predicción de la regularidad de construcción es un aspecto importante a considerar para la toma de decisiones en el ámbito del diseño, construcción y gestión de pavimentos.

Tradicionalmente, el estudio de la regularidad de construcción ha sido abordado en la literatura desde un enfoque empírico, basado en la correlación estadística entre la regularidad IRI observada antes y después de la ejecución de obras de pavimentación, dando origen a una serie de modelos de diversa naturaleza y capacidad predictiva.

A partir de la revisión y análisis tanto de los modelos de predicción disponibles como del proceso constructivo, se han identificado interacciones que limitan la capacidad predictiva del enfoque empírico tradicional; demostrando, a partir de la respuesta en frecuencias de la regla de la pavimentadora y del modelo de IRI, que el ajuste de una regresión del tipo IRI antes-después resulta insuficiente para explicar la variabilidad observada en datos reales de regularidad de construcción.

En respuesta a esta necesidad de investigación, en este estudio se propone un enfoque original para la predicción del IRI de construcción, desarrollando un modelo de predicción basado en la transformación del perfil como resultado de la respuesta de nivelación de la pavimentadora durante el proceso constructivo. Se realizó la formulación de los sistemas lineales que constituyen el modelo para el caso de extendedoras sobre ruedas y sin el uso de nivelación automática. El modelo fue calibrado con datos de perfilometría longitudinal del experimento SPS-5 del programa *Long-Term Pavement Performance* (LTPP), obteniendo un error medio de 0.22 m/km en la estimación del IRI de construcción.

A partir de los resultados del modelo base, se abordó el desarrollo de un modelo ampliado que incorpora el efecto del control automático de la regla en la respuesta de nivelación de la extendedora. Se realizó la formulación de los

sistemas lineales que constituyen el modelo para el caso de pavimentadoras sobre ruedas con el uso de un sistema de control automático mediante viga de nivelación (promediación de larga referencia). El modelo fue calibrado con datos de perfilometría de la base de datos preparada para tal fin, obteniendo un error medio de 0.17 m/km en la estimación del IRI de construcción.

El modelo desarrollado proporciona una herramienta para estudiar la efectividad de un determinado diseño de refuerzo en la corrección de rugosidad, de modo que se puedan realizar ajustes en el proyecto antes del inicio de las obras. Por ejemplo; analizar los efectos en la regularidad de aumentar o disminuir el espesor de refuerzo, evaluar el costo/beneficio de colocar la sobrecarpeta en una o más capas, asistir la toma de decisiones en la selección del tipo y tamaño de pavimentadora, o evaluar el efecto en la regularidad del uso de sistemas de nivelación automáticos. El trabajo de investigación realizado supone un enfoque metodológico original para la predicción del IRI de construcción, y los resultados obtenidos constituyen una mejora respecto de los modelos disponibles en la literatura, demostrando el potencial del enfoque propuesto como una valiosa alternativa de modelación.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Importancia de la regularidad de construcción .....	1
1.2. Estimación del IRI de construcción .....	3
1.3. Necesidad de investigación .....	5
1.4. Objetivos .....	6
1.5. Plan de investigación .....	7
1.5.1. Etapa 1: Estudio de antecedentes .....	7
1.5.2. Etapa 2: Formulación conceptual del modelo .....	8
1.5.3. Etapa 3: Preparación base de datos para calibración .....	8
1.5.4. Etapa 4: Desarrollo del modelo de predicción .....	8
1.6. Estructura de la tesis .....	9
<b>2. Revisión bibliográfica y análisis de antecedentes</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción .....	11
2.2. Revisión bibliográfica .....	11
2.2.1. Factores que afectan el IRI de construcción .....	11
2.2.2. Modelos de predicción del IRI de construcción .....	15
2.2.3. Análisis de modelos empíricos .....	23
2.2.4. Limitaciones en la aplicación de modelos empíricos .....	25
2.2.5. Conclusiones de la revisión de modelos empíricos .....	26
2.3. Extendido de la capa asfáltica .....	27
2.3.1. Descripción de la pavimentadora .....	27
2.3.2. Unidad tractora o tractor .....	29
2.3.3. La regla de enrasado .....	39
2.3.4. Sistemas de nivelación asistida .....	58
2.3.5. Compactación final e influencia en el IRI .....	68
2.4. Eficiencia de nivelación y regularidad IRI .....	70
<b>3. Metodología</b>	<b>73</b>
3.1. Introducción .....	73
3.2. Formulación del modelo .....	73
3.2.1. Enfoque de modelización .....	73
3.2.2. Sistemas dinámicos .....	74
3.2.3. Aspectos a modelizar .....	76
3.2.4. Formulación conceptual del modelo .....	78
3.3. Calibración del modelo .....	79

3.3.1.	Base de datos para calibración .....	80
3.3.2.	Pre-Selección de secciones para calibración .....	80
3.3.3.	Discriminación por sistema de nivelación .....	82
<b>4.</b>	<b>Desarrollo del modelo base .....</b>	<b>85</b>
4.1.	Introducción .....	85
4.2.	Formulación del modelo base.....	85
4.2.1.	Modelización del rodado para extendedoras sobre ruedas .....	86
4.2.2.	Modelo cinemático de respuesta vertical de la regla .....	88
4.2.3.	Modelo dinámico de vibración de la regla .....	90
4.2.4.	Corrección por compactación: Espesor suelto y factor de esponjamiento .....	92
4.2.5.	Acoplamiento del modelo base .....	94
4.3.	Calibración del modelo base .....	94
4.3.1.	Parámetros de calibración modelo base .....	95
4.3.2.	Datos para calibración del modelo base .....	95
4.3.3.	Procedimiento de simulación modelo base.....	98
4.4.	Resultados calibración del modelo base .....	100
4.4.1.	Análisis considerando todas las secciones .....	100
4.4.2.	Análisis descartando secciones inconsistentes .....	102
4.4.3.	Modelo base: Visualización del perfil .....	105
4.4.4.	Comparación con modelos empíricos.....	106
<b>5.</b>	<b>Desarrollo del modelo ampliado: Nivelación automática .....</b>	<b>109</b>
5.1.	Introducción .....	109
5.2.	Formulación del modelo ampliado.....	109
5.2.1.	Modelización del Perfil de Referencia: Viga de Nivelación .....	110
5.2.2.	Modelo de la unidad de control.....	111
5.2.3.	Modelización válvula de control .....	114
5.2.4.	Modelo de respuesta cilindro hidráulico .....	124
5.2.5.	Modelo del sistema válvula-cilindro.....	127
5.2.6.	Acoplamiento del modelo ampliado .....	128
5.3.	Calibración del modelo ampliado.....	129
5.3.1.	Parámetros de calibración modelo ampliado .....	129
5.3.2.	Datos para calibración del modelo ampliado .....	130
5.3.3.	Procedimiento de simulación modelo ampliado.....	133
5.4.	Resultados calibración del modelo ampliado .....	135
5.4.1.	Sensibilidad y posición optima del sensor .....	135
5.4.2.	Modelo ampliado: Evaluación secciones 100 m.....	137
5.4.3.	Comparación con modelo base .....	138
5.4.4.	Modelo ampliado: Visualización del perfil .....	139
<b>6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>143</b>
6.1.	Del análisis de antecedentes .....	143
6.2.	Del desarrollo de los modelos .....	146

6.2.1. Conclusiones del modelo base .....	147
6.2.2. Conclusiones del modelo ampliado.....	149
6.3. Contribución original de la tesis.....	151
6.4. Limitaciones y futuras líneas de investigación.....	152
<b>Referencias</b>	<b>155</b>
<b>Anexo A. Revisión de modelos empíricos</b>	<b>161</b>
<b>Anexo B. Proceso base de datos LTPP</b>	<b>175</b>
<b>Anexo C. Resultados modelo base</b>	<b>183</b>
<b>Anexo D. Resultados modelo ampliado</b>	<b>211</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Evaluación Resultados de Modelos – Preparación superficial mínima.....	23
Figura 2.2: Evaluación Resultados de Modelos – Preparación superficial intensiva.....	24
Figura 2.3: Evaluación Resultados de Modelos – Preparación superficial intensiva.....	26
Figura 2.4: Pavimentadora Barber-Greene – Modelo 879 (año 1936) .....	28
Figura 2.5: Tractor y Regla de la Extendedora.....	29
Figura 2.6: Tractor – Componentes Principales.....	30
Figura 2.7: Sistema de Alimentación de Material Asfáltico.....	30
Figura 2.8: Tractor – Tolva Basculante .....	31
Figura 2.9: Pavimentadora – Alimentación desde el Camión .....	32
Figura 2.10: Tractor – Cintas transportadoras .....	33
Figura 2.11: Tractor – Cintas transportadoras y Compuertas de Flujo .....	33
Figura 2.12: Tractor – Sinfín de Distribución.....	34
Figura 2.13: Vista Trasera del Tractor. Los Sinfines de Distribución .....	35
Figura 2.14: Compuertas muy Altas – Tornillos Sinfín Sobrecargados.....	37
Figura 2.15: Compuertas muy Bajas – Flujo de Material Insuficiente .....	38
Figura 2.16: Ajuste Correcto – Cantidad o Flujo Uniforme de Material.....	38
Figura 2.17: Regla de Extendido.....	40
Figura 2.18: Regla de Extendido – Elementos Principales .....	40
Figura 2.19: Regla de Extendido – Principio de Flotación Libre .....	41
Figura 2.20: Regla de Extendido – Fuerzas Actuantes.....	41
Figura 2.21: Regla de Extendido – Compensación de Irregularidades.....	42
Figura 2.22: Regla de Extendido – Ángulo de Ataque Inicial .....	43
Figura 2.23: Regla de Extendido – Punto de Tiro.....	44
Figura 2.24: Longitud Base de la Extendedora .....	45

Figura 2.25: Línea de Arrastre.....	45
Figura 2.26: Regulación Ángulo de ataque .....	47
Figura 2.27: Regla de Extendido – Manivelas de Profundidad .....	47
Figura 2.28: Regla de Extendido – Manivela, Aumento Ángulo de Ataque.....	48
Figura 2.29: Regla de Extendido – Ratio de Profundidad.....	49
Figura 2.30: Regla de Extendido – Tiempo de Respuesta .....	50
Figura 2.31: Regla de Extendido – Posición Correcta Placa de Corte .....	51
Figura 2.32: Regla de Extendido – Efecto Placa de Corte .....	52
Figura 2.33: Mecanismos de Compactación – Extrusión y Gradiente.....	54
Figura 2.34: Regla de Extendido – Dispositivos de Compactación .....	54
Figura 2.35: Dispositivos de Compactación – Sistema Vibratorio .....	55
Figura 2.36: Dispositivos de Compactación – Barra Tamper .....	56
Figura 2.37: Dispositivos de Compactación – Recorrido Vertical del Tamper .....	57
Figura 2.38: Dispositivos de Compactación – Barras de Presión .....	58
Figura 2.39: Principio de Funcionamiento del Sistema de Nivelación .....	60
Figura 2.40: Referencia Fija – Cable.....	61
Figura 2.41: Referencia Fija – Juntas o Bordillos .....	62
Figura 2.42: Referencia Móvil – Viga con Zapatas de Apoyo.....	64
Figura 2.43: Referencia Móvil – Viga Flotante con Sensores Múltiples .....	65
Figura 2.44: Posición del Sensor en Relación a la Regla .....	68
Figura 2.45: Respuesta en Frecuencias – IRI vs Regla de la Extendedora .....	71
Figura 3.1: Formulación Conceptual del Modelo.....	79
Figura 3.2: PSD de Pendientes Sin Nivelación Asistida – Antes y Después de Obra .....	82
Figura 3.3: PSD de Pendientes Con Nivelación Asistida – Antes y Después de Obra .....	83
Figura 4.1: Esquema de cálculo trayectoria punto de tiro .....	86
Figura 4.2: Respuesta cinemática – Trayectoria de la regla .....	89
Figura 4.3: Respuesta dinámica – Vibración de la regla .....	91

Figura 4.4: Método de Calibración Modelo Base – Minimización del SSE.....	95
Figura 4.5: Calibración Modelo Base – Todas las Secciones.....	100
Figura 4.6: Calibración Modelo Base – Comparación IRI 100 m (todas las secciones).....	101
Figura 4.7: Calibración Modelo Base – Solo Secciones Consistentes .....	103
Figura 4.8: Calibración Modelo Base – Comparación IRI 100 m .....	104
Figura 4.9: Calibración Modelo Base – Evaluación IRI 20 m.....	105
Figura 4.10: Calibración Modelo Base – Visualización Gráfica de Modelización.....	106
Figura 4.11: Comparación Modelo Base vs Modelos de Regresión.....	108
Figura 5.1: Referencia Móvil – Cálculo del Perfil de Referencia .....	110
Figura 5.2: Ubicación del Punto de Control de la Regla.....	112
Figura 5.3: Unidad de Control – Visualización de la Banda Muerta y Banda Proporcional..	114
Figura 5.4: Principio de Funcionamiento de la Válvula Solenoide .....	115
Figura 5.5: Sistema de Control Válvula-Cilindro .....	124
Figura 5.6: Diagrama de Bloques – Modelo Final de Respuesta de la Regla .....	129
Figura 5.7: Método de Calibración Modelo Ampliado – Minimización del SSE .....	130
Figura 5.8: Calibración Modelo Ampliado – Minimización del SSE .....	136
Figura 5.9: Calibración Modelo Ampliado – Comparación IRI 100 m .....	137
Figura 5.10: Calibración Modelo Ampliado – Evaluación IRI 20 m.....	138
Figura 5.11: Comparación de Modelos – Con y Sin Nivelación Asistida.....	139
Figura 5.12: Modelo Ampliado – Visualización Gráfica de Modelización.....	140

## Lista de Tablas

Tabla 1.1: Regularidad de Construcción vs Coste Anual de Mantenimiento .....	2
Tabla 2.1: Resumen modelos empíricos de la revisión bibliográfica .....	19
Tabla 4.1: Secciones LTPP SPS-5 Para Calibración del Modelo Base .....	96
Tabla 4.2: Caracterización de las Extendedoras – Calibración Modelo Base .....	98
Tabla 5.1: Configuración de Sensibilidad para Servo-válvulas y Válvulas Proporcionales ...	113
Tabla 5.2: Secciones LTPP SPS-5 Para Calibración del Modelo Ampliado .....	131
Tabla 5.3: Caracterización de las Extendedoras – Calibración Modelo Ampliado .....	133

## Abreviaturas y Acrónimos

IRI	Índice de Regularidad Internacional
IRI-sim	IRI resultante de la simulación
IRI-pre	IRI real antes de obras
IRI-post	IRI real después de obras
LTPP	Long Term Pavement Performance Program
SPS	Specific Pavement Studies
HDM	Highway Development and Management Model
SHRP	Strategic Highway Research Program
SE	Error Cuadrático (Squared Error)
SSE	Suma de los Cuadrados del Error (Sum of squared Errors)
RMSE	Raíz del Error Cuadrático Medio (Root Mean Squared Error)
MAPE	Error Porcentual Absoluto Medio (Mean Absolute Percentage Error)
PSD	Densidad Espectral de Potencia (Power Spectral Density)
EDO	Ecuación Diferencial Ordinaria
SEN	Sensibilidad del sistema de nivelación

# 1. Introducción

En este capítulo se presenta el contexto bajo el cual se desarrolló la tesis, así como la metodología general de trabajo empleada. Se comienza con una breve descripción de los aspectos generales que motivan el trabajo, para posteriormente describir la necesidad de investigación, identificando la contribución original de esta tesis al estado del arte. Luego, se presentan los objetivos de la tesis y el plan de investigación, constituido por las etapas desarrolladas e hitos de cumplimiento. Finalmente, se describen los alcances y la estructura del documento de tesis.

## 1.1. Importancia de la regularidad de construcción

La importancia de la regularidad superficial para la circulación de los vehículos es indiscutida. Desde la perspectiva del usuario, los pavimentos que permiten un desplazamiento suave y regular proveen un alto nivel de servicio y un movimiento eficiente de los vehículos sobre la vía. Pavimentos con elevada rugosidad no solo generan molestias al usuario, sino que también reducen la velocidad de circulación, interrumpen el flujo de tráfico y propician riesgos a la seguridad vial. Además, una mala calidad de rodado puede causar daño a los vehículos e incrementar el consumo de combustible, factores que conllevan a un aumento del costo de viaje de los usuarios de la vía (Smith et al., 1997).

Desde el punto de vista del pavimento, el movimiento vertical de los vehículos al transitar sobre una superficie irregular se traduce en oscilaciones de las cargas dinámicas que incrementan su valor en forma directamente proporcional con la irregularidad (Ervin et al., 1983), fenómeno que acelera el proceso de deterioro del firme ocasionando una reducción en la vida de servicio de pavimento (Cebon, 1986, Collop and Cebon, 1995, Bilodeau et al., 2017).

Estudios de investigación en el pasado han demostrado también la importancia de la regularidad inicial conseguida como resultado del proceso constructivo, o regularidad de construcción, tanto para la progresión futura de la rugosidad como para el desempeño general del pavimento en su ciclo de vida.

Janoff, M. S. (1991) (Stroup-Gardiner et al., 2004) encontró una correlación positiva entre la regularidad inicial de construcción y el desempeño del pavimento a largo plazo. A partir del análisis histórico de 10 años de datos de rugosidad para 400 secciones diferentes de carreteras concluyó que los pavimentos con menor rugosidad inicial de construcción tendrán tasas de incremento de rugosidad y agrietamiento significativamente menores durante la vida de servicio respecto de aquellos pavimentos con mayor rugosidad inicial. También tendrán costos de mantenimiento anual menor; estimando que una reducción de 0.15 m/km en la regularidad de construcción, medida en Índice de Perfil (*Profile Index*, PI), se traduce en un ahorro promedio anual en mantenimiento del orden de \$1,200 USD/milla por carril en los próximos 10 años. En la Tabla 1.1 se presenta una adaptación de las estimaciones propuestas por Janoff, M. S. para el incremento en el coste anual de conservación en función de la regularidad inicial de construcción.

Tabla 1.1: Regularidad de Construcción vs Coste Anual de Mantenimiento

Regularidad Inicial		Mantenimiento	
Mays Ride Meter in/mile	IRI (*) in/mile (m/km)	Costo Promedio Anual por Carril US\$/mile (US\$/km)	Ahorro Promedio Anual por Carril US\$/mile (US\$/km)
35	98 (1.56)	949 (590)	0
30	95 (1.50)	670 (416)	280 (174)
25	91 (1.44)	440 (273)	509 (316)
20	88 (1.39)	261 (162)	689 (428)
15	84 (1.33)	131 (81)	818 (508)
10	81 (1.28)	52 (32)	898 (558)

(\*) IRI correlacionado a Mays Ride Meter

Fuente: Adaptado de Lavaud Aguirre (2006)

Smith et al. (1997) estudiaron el efecto de la regularidad inicial en la progresión de rugosidad futura y vida útil del pavimento, tanto en la construcción de nuevos pavimentos asfálticos y de hormigón, como en refuerzos asfálticos sobre pavimentos existentes. Para la evaluación utilizaron más de 200 proyectos de pavimentación de Alabama, Arizona, Georgia, Illinois, Kentucky, Michigan, Minnesota, Dakota del Sur, Washington y Wisconsin. Los autores realizaron regresiones estadísticas para cada proyecto, demostrando que la rugosidad inicial tiene un efecto significativo en la rugosidad futura de todo tipo de pavimentos en

servicio. Modelos predictivos indicaron que, en general, disminuciones del 25% y 50% en la rugosidad inicial de construcción resultan en incrementos del 9% y 15% respectivamente en la vida de servicio del pavimento.

Pierce et al. (2004) estudiaron 4 años de recolección de datos de rugosidad (IRI) en pavimentos asfálticos pertenecientes a la red vial del Departamento de Transporte del Estado de Washington (*Washington State Department of Transportation*, WSDOT). Los resultados obtenidos demostraron que pavimentos con un IRI inicial de construcción menor a 1.0 m/km presentaron incrementos de IRI menores a 0.2 m/km en los dos años siguientes a la construcción; sin embargo, pavimentos con un IRI inicial mayor a 1.4 m/km presentaron incrementos de IRI de 0.3 m/km o más. Los autores concluyeron que pavimentos que se construyen con menor rugosidad inicial, permanecerán con mejor regularidad superficial a lo largo del tiempo.

De acuerdo con lo anterior, los caminos que inicialmente tengan mejor regularidad superficial tendrán una mayor vida útil, brindaran una mejor calidad de servicio al usuario a lo largo del tiempo, y la agencia vial gastará menos tiempo y recursos en su mantenimiento, lo cual también se traduce en que los usuarios se verán menos expuestos a las incomodidades y riesgos inherentes a transitar durante obras de mantenimiento (Massucco and Cagle, 1999).

En este contexto, la caracterización de la regularidad del perfil longitudinal de la vía se ha vuelto indispensable tanto para asegurar el confort y seguridad de la flota vehicular como para reducir la carga dinámica en los vehículos y el pavimento. En consecuencia, para efectos de control y fiscalización, agencias viales alrededor del mundo han implementado especificaciones técnicas de rugosidad mínima del pavimento tanto en la recepción de obras de construcción y rehabilitación, como para la gestión de pavimentos en servicio. El indicador más empleado a nivel mundial para este fin es el Índice de Regularidad Internacional (IRI) (Múčka, 2017).

## **1.2. Estimación del IRI de construcción**

Al evaluar el mantenimiento y rehabilitación de un pavimento, la toma de decisiones sobre qué tipo de actuación realizar y cuando ejecutarla depende de diversos factores tales como la selección de alternativas de conservación técnicamente factibles, la disponibilidad de recursos y el efecto correctivo de la intervención sobre el pavimento existente; es decir, la estimación del efecto de

mejora inmediato y a largo plazo que puede ofrecer una determinada actuación. La progresión futura del deterioro luego de una obra de conservación ha despertado bastante interés de investigación, y diversos modelos de predicción han sido desarrollados, los cuales son empleados con frecuencia para apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de pavimentos. Sin embargo, el efecto correctivo inmediato de las actuaciones ha recibido escasa atención en el estado del arte, y en la práctica, el grado de mejora esperado después de una obra se fundamenta principalmente en rangos estimados a partir de la experiencia empírica de obras pasadas.

En este contexto, la correcta estimación de la regularidad IRI de construcción es fundamental para diseñadores, constructores o cualquier agencia vial; ya que determinar la efectividad de las diferentes actuaciones constituye un factor crítico para la selección de estrategias de mantenimiento vial adecuadas (Dong and Huang, 2012).

La estimación del IRI de construcción puede ser utilizada por consultores y diseñadores para evaluar el efecto sobre la regularidad de diferentes alternativas de diseño, o por los contratistas para estimar el IRI de construcción a conseguir bajo una combinación particular de factores de construcción. Para las agencias viales, la estimación correcta de la regularidad de construcción influirá en la toma de decisiones tanto sobre realizar o postergar una intervención como en el tipo de actuación requerida. En este sentido, la regularidad de construcción es comúnmente requerida como un parámetro de entrada para los modelos de deterioro utilizados en los sistemas de gestión de pavimentos PMS (por sus siglas en inglés *Pavement Management Systems*) (Abdelaziz et al., 2020, Pérez-Acebo et al., 2021).

Por lo tanto, la capacidad de predecir el IRI de construcción es importante para la toma de decisiones y el uso eficiente de los recursos en el ámbito del diseño, gestión y construcción de pavimentos. Un modelo de predicción bien fundamentado ayudará a reducir los costos del ciclo de vida de las carreteras y proveer de un mejor nivel de servicio a los usuarios de la vía. Además, la selección eficiente de una solución de pavimentación puede traer consigo mejoras en el impacto ambiental del proyecto y ahorros en el presupuesto.

A pesar de su importancia, la modelización del IRI de construcción ha recibido escaso interés de investigación, y su estudio ha sido abordado tradicionalmente desde un enfoque empírico basado en la correlación estadística existente entre la

regularidad IRI observada antes y después de la ejecución de obras de rehabilitación, dando origen a una serie de modelos de diversa naturaleza aunque con capacidad predictiva insuficiente. Para pavimentos asfálticos, algunas de las investigaciones disponibles se han enfocado exclusivamente en estudiar la influencia de diversos factores y su significancia estadística en el IRI de construcción. En general, estos estudios concluyen que el IRI de construcción estará determinado por factores tales como; la regularidad de la capa inferior (IRI antes de obra), características del diseño estructural de la nueva capa asfáltica, clima, tráfico, propiedades de las capas que conforman la estructura del pavimento, condiciones de drenaje, la técnica y calidad constructiva, entre otras. En menor medida, otras investigaciones han propuesto además una serie de modelos de regresión para estimar el IRI de construcción, ya sea mediante ecuaciones para la predicción directa del IRI post-obra, o para la estimación de la magnitud en la reducción de IRI producto de la obra (denominada IRI-drop).

### **1.3. Necesidad de investigación**

El análisis preliminar del estado del arte permitió identificar aspectos no resueltos en el desarrollo de los modelos disponibles para la predicción del IRI de construcción. Una de las limitaciones del enfoque empírico radica en el hecho de que para las mismas condiciones iniciales; valor de regularidad IRI y diseño de rehabilitación (espesor de refuerzo, tipo de mezcla asfáltica, reparación previa, etc.), se pueden observar obras que alcanzan valores considerablemente distintos de IRI post-rehabilitación, por lo que el ajuste de una correlación del tipo IRI antes-después no logra explicar completamente la variabilidad observada. En este sentido, algunos estudios han sugerido que también se debe tener en cuenta la naturaleza de la irregularidad existente, es decir, las longitudes de onda predominantes que contribuyen al IRI. Sin embargo, los modelos disponibles en la literatura no han considerado efectivamente esta influencia, toda vez que el IRI como variable explicativa no proporciona información detallada sobre la naturaleza de la irregularidad, es decir, sobre las diferentes longitudes de onda que componen los defectos del perfil.

El análisis en detalle del proceso de extendido de pavimentos asfálticos establece que el acabado superficial conseguido en la puesta en obra de la mezcla asfáltica dependerá principalmente del equilibrio de fuerzas que gobiernan el comportamiento de la regla de la pavimentadora durante el extendido (Roberts et al., 1996, USACE, 2013). Asumiendo buenas prácticas de construcción, la

respuesta de nivelación de la regla estará determinada principalmente por las longitudes de onda que caracterizan la irregularidad existente. Un ejemplo de esta interacción es el hecho de que la regla disminuye su eficiencia de nivelación a medida que aumenta la longitud de onda de los defectos que causan la irregularidad (Barber-Greene, 1972, Gourdon and Peyret, 1991, Ulrich, 1991, Sanchez Blanco, 1968). Esta y otras interacciones del proceso constructivo no son consideradas al evaluar la eficiencia de una rehabilitación con el enfoque tradicional disponible en la literatura, limitando los modelos del estado de arte a los datos de específicos de IRI empleados para el análisis y dificultando su generalización a otras condiciones de proyecto.

De acuerdo con lo anterior, resulta necesario profundizar el estudio de esta problemática, incorporando en la modelización del IRI de construcción la naturaleza de la regularidad existente y su interacción con la pavimentadora durante el extendido.

## 1.4. Objetivos

Tomando en cuenta el problema de investigación expuesto anteriormente y la revisión del estado del arte, la presente tesis doctoral propone un enfoque original para la predicción del efecto inmediato de las obras de refuerzo asfáltico en la corrección de la regularidad IRI. El objetivo general de esta tesis es:

- Desarrollar un modelo matemático que permita estimar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) conseguido en el extendido de pavimentos asfálticos, basado en la transformación del perfil longitudinal como resultado del efecto nivelador de la pavimentadora durante el proceso constructivo.

Los objetivos parciales asociados al desarrollo del objetivo general son:

- a) Conocer el nivel de desarrollo conseguido actualmente en relación al estudio de la regularidad inicial de construcción.
- b) Identificar los enfoques de modelización para el IRI de construcción existentes en el estado del arte y analizar sus limitaciones.
- c) Comprender el proceso de extendido de capas asfálticas e identificar los factores constructivos que afectan la calidad de la terminación superficial.
- d) Definir un enfoque de modelización para aquellos componentes de la pavimentadora que intervienen en la transformación del perfil longitudinal durante el proceso de extendido de pavimentos asfálticos.

- e) Formulación conceptual del modelo a desarrollar para la estimación del IRI de construcción.
- f) Recolección, revisión y procesamiento de datos de perfilometría longitudinal obtenidos antes y después de obras de refuerzo asfáltico para su utilización en el desarrollo del modelo.
- g) Caracterizar parámetros de la maquinaria, equipos y factores de la técnica constructiva necesarios para el desarrollo del modelo.
- h) Elaborar y calibrar un modelo que permita, a partir de un perfil longitudinal existente, y parámetros específicos del proyecto de pavimentación, estimar el índice de regularidad IRI inicial de construcción.

## **1.5. Plan de investigación**

El plan de trabajo consideró cuatro etapas, con sus correspondientes tareas e hitos de cumplimiento: estudio de antecedentes, formulación conceptual del modelo, preparación de base de datos para calibración y desarrollo del modelo de predicción.

### **1.5.1. Etapa 1: Estudio de antecedentes**

En esta etapa se realizaron tres actividades: recopilación y análisis de información, análisis de modelos e identificación de variables relevantes.

Se realizó una revisión de la literatura relevante a los objetivos propuestos. Según esto, se obtuvo una recopilación y análisis de los estudios relacionados con los distintos factores que influyen en la regularidad inicial de construcción.

Se revisaron modelos de predicción para el IRI de construcción existentes en la literatura, detallando sus variables explicativas y analizando sus limitaciones.

Se estudió el proceso constructivo involucrado en la colocación de capas asfálticas, describiendo el funcionamiento de la pavimentadora e identificando los distintos factores de ejecución de la obra que influyen en la regularidad inicial de construcción.

El hito asociado al cumplimiento de esta etapa es un estado del arte, que permitió contar con los antecedentes de base para el resto de la investigación, establecer las limitaciones de los modelos existentes e identificar las variables relevantes para abordar la problemática.

### **1.5.2. Etapa 2: Formulación conceptual del modelo**

A partir de los resultados de la etapa anterior se estudió el potencial de modelización individual para aquellos componentes de la pavimentadora que interactúan con el perfil longitudinal durante el proceso de extendido de la capa asfáltica y que influyen en la modificación de sus longitudes de onda componentes. El resultado de este análisis fue la definición de sub-modelos a integrar en el modelo final.

El desarrollo de esta etapa implica también la definición de características técnicas y de operación de la pavimentadora, que serán variables o parámetros a caracterizar para la elaboración del modelo.

El hito asociado al cumplimiento de esta etapa es la formulación conceptual del modelo final a desarrollar.

### **1.5.3. Etapa 3: Preparación base de datos para calibración**

Para efectos de calibrar el modelo final o los sub-modelos correspondientes, se contó con datos de perfilometría longitudinal obtenidos antes y después de obras de refuerzo asfáltico. La fuente de información fue la base de datos del programa norteamericano *Long-Term Pavement Performance* (LTPP).

Esta etapa involucra tareas asociadas a la recopilación, procesamiento, análisis y filtrado de la información de perfilometría; así como caracterizar variables y parámetros técnicos y de operación de la maquinaria, equipos y factores de la técnica constructiva necesarios para el desarrollo de los modelos.

El hito asociado al cumplimiento de esta etapa es una base de datos depurada y procesada en formato y contenido requeridos para su utilización en el desarrollo del modelo.

### **1.5.4. Etapa 4: Desarrollo del modelo de predicción**

De acuerdo con los análisis realizados en las etapas anteriores, se desarrolló el modelo final a partir de la integración de los sub-modelos correspondientes. La base de datos procesada en la etapa anterior fue utilizada para calibrar el modelo final o los sub-modelos según corresponda.

El hito asociado al cumplimiento de esta etapa es la obtención de un modelo que permita, a partir del perfil longitudinal del firme existente y condiciones

específicas del proyecto de pavimentación, estimar el Índice de Regularidad Internacional (IRI) de construcción al ejecutar obras de refuerzo asfáltico.

## **1.6. Estructura de la tesis**

La tesis se estructura en seis capítulos. En el Capítulo 1 se describe la problemática a resolver, los objetivos y etapas de la investigación. En el Capítulo 2 se realiza una revisión y análisis de modelos disponibles para la estimación del IRI de construcción en la rehabilitación de pavimentos asfálticos, y se plantean limitaciones predictivas del enfoque empírico utilizado hasta ahora en la literatura. Se describe en detalle el proceso de extendido de la capa asfáltica, y se propone una explicación para la variabilidad observada en el IRI de construcción basada en la eficiencia de nivelación de la pavimentadora y las características de la irregularidad existente.

Considerando el análisis de antecedentes realizado, en el Capítulo 3 se define el enfoque de modelización utilizado, se realiza la formulación conceptual de un modelo que permita estimar la regularidad IRI de construcción como resultado de la transformación de las longitudes de onda durante la colocación de la mezcla asfáltica, y se describe el método de calibración empleado.

En el Capítulo 4 se describe el desarrollo del modelo base, consistente en una idealización del proceso constructivo para extendedoras sobre ruedas y sin el uso de nivelación asistida. Se presenta la formulación de los sistemas lineales que constituyen el modelo y los resultados de la calibración. El Capítulo 5 contiene el desarrollo del modelo ampliado, correspondiente a la ampliación del modelo base para incorporar el uso de un sistema de control automático mediante viga de nivelación. Se describe la formulación de los sistemas lineales que constituyen el modelo ampliado y se presentan los resultados de la calibración.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las principales conclusiones y recomendaciones de esta investigación.



## **2. Revisión bibliográfica y análisis de antecedentes**

### **2.1. Introducción**

En este capítulo se presenta una revisión y análisis de la literatura relevante al problema de investigación. Se comienza con una recopilación de estudios relacionados con los distintos factores que influyen en la regularidad inicial de construcción. Luego, se realiza una revisión y análisis de modelos disponibles para la predicción del IRI de construcción en la rehabilitación de pavimentos asfálticos. La capacidad predictiva de cuatro modelos de regresión de la revisión bibliográfica fue puesta a prueba con datos reales de IRI de construcción.

Posteriormente se presentan los principios fundamentales de operación y funcionamiento de la pavimentadora, resaltando su relación con la regularidad inicial de construcción. A partir del análisis de la respuesta en frecuencias de la regla de la pavimentadora y del modelo de IRI, se propone una explicación para la variabilidad observada entre el IRI antes y después de la ejecución de obras de pavimentación.

### **2.2. Revisión bibliográfica**

El estudio del IRI de construcción ha recibido escaso interés de investigación, y su análisis ha sido abordado tradicionalmente desde un enfoque empírico basado en la correlación estadística existente entre la regularidad IRI observada antes y después de la ejecución de obras de rehabilitación. Algunas investigaciones se han enfocado exclusivamente en estudiar la influencia de diversos factores y su significancia estadística en el IRI de construcción. Otros estudios, además de estudiar los factores que afectan la regularidad de construcción, han propuesto una serie de modelos de regresión para estimar el IRI de construcción.

#### **2.2.1. Factores que afectan el IRI de construcción**

Los resultados disponibles en el estado del arte son variados, y dependiendo del estudio, se han propuesto una serie de variables explicativas que determinan la

regularidad inicial alcanzable en la rehabilitación de pavimentos asfálticos. La importancia relativa de estas variables varía entre autores, y para algunas de ellas, se pueden encontrar incluso conclusiones contradictorias.

Perera et al. (1998) estudiaron, entre otros objetivos de investigación, las características del IRI en pavimentos flexibles que fueron sometidos a diversas estrategias de rehabilitación. Los autores realizaron un análisis del IRI antes y después de refuerzos sobre pavimentos asfálticos existentes utilizando la información disponible para las secciones de prueba del programa SPS-5 (por sus siglas en inglés *Specific Pavement Studies*) del programa norteamericano *Long-Term Pavement Performance* (LTPP). Los resultados indicaron que los refuerzos reducen el IRI del pavimento y que, independiente del IRI antes del refuerzo, el IRI post-refuerzo se ubicó dentro de una banda de valores relativamente acotada. El rango de dicha banda varió de proyecto a proyecto, y los factores que podrían determinar dicho rango incluyen el procedimiento constructivo, la capacidad/calidad del contratista, y las longitudes de onda predominantes que contribuyen al IRI existente del pavimento antes del refuerzo. Por otro lado, se demostró que incluso refuerzos delgados (50 mm) reducen sustancialmente la irregularidad. Secciones que recibieron un mantenimiento intensivo previo a la colocación del refuerzo (incluye fresado) presentaron valores de IRI post-refuerzo similares, aunque levemente inferiores, respecto de las de secciones que recibieron un mínimo tratamiento. Los autores no encontraron ninguna relación estadísticamente significativa entre el IRI antes y después del refuerzo.

A partir del estudio antes citado, Perera and Kohn (2001) realizaron una serie de análisis complementarios para las secciones de prueba SPS-5, incluyendo además las secciones GPS-6B y GPS-6C del experimento GPS-6 (por sus siglas en inglés *General Pavement Studies*). Respecto de las secciones SPS-5, una de las conclusiones adicionales fue que la actuación de fresado antes del refuerzo (tratamiento previo intensivo) fue estadísticamente significativa solo en aquellas secciones con un IRI pre-refuerzo mayor a 1.5 m/km. De acuerdo con los autores, dicho efecto del fresado puede ser atribuido a dos factores. (1) El fresado previo a la rehabilitación provee de una superficie uniforme para la colocación refuerzo, lo cual se traduce en un menor IRI post-refuerzo; (2) Toda vez que el espesor de pavimento fresado es repuesto antes del refuerzo, el número de capas asfálticas requeridas para la colocación del espesor total de refuerzo en las secciones fresadas pudo ser mayor respecto de las secciones no fresadas, mejorando la regularidad en cada pasada de la extendidora. En el caso de las secciones GPS-

6B y GPS-6C, refuerzo asfáltico convencional y reciclado respectivamente, en la mayoría de los casos el IRI post-refuerzo se encontró en un rango 0.8 a 1.2 m/km. Tanto para las secciones SPS-5 como GPS-6, la distribución de frecuencia indicó que un 80% de las secciones alcanzaron un IRI post-refuerzo menor a 1.2 m/km.

McGhee (2000) realizó una investigación para identificar los factores predominantes que determinan la regularidad inicial alcanzable en la construcción de refuerzos asfálticos. La base de datos empleada para el estudio fueron evaluaciones de IRI en distintas obras de rehabilitación ejecutadas en un periodo de dos años, totalizando 4,260 km-pista en 854 secciones de obra distribuidas por todo el estado de Virginia, EE.UU. El autor concluyó que los principales factores que influyen en el IRI de construcción de un refuerzo asfáltico son: (1) Regularidad existente previa a la colocación del refuerzo. (2) Clasificación funcional del camino; esto ocurriría dado que los caminos de mayor jerarquía vial están diseñados y construidos para soportar mayor cantidad de tráfico y usualmente corresponden a autopistas de geometrías suaves (acuerdos geométricos amplios), lo cual finalmente contribuye a la obtención de una mejor regularidad de construcción. (3) Especificaciones técnicas de regularidad exigidas para la recepción de obras; en aquellas obras en que se implementó un plan piloto de especificaciones técnicas especiales para la recepción de obras (ajustes en el pago de incentivos), se obtuvieron refuerzos que alcanzaron menor IRI de construcción respecto de obras similares sin la especificación técnica especial. El resto de las variables analizadas en el estudio tales como: deterioros predominantes existentes en la superficie original, nivel de tráfico, edad del pavimento, espesor y tipo de material de refuerzo, ejecución de fresado, colocación de capas estructurales adicionales (capa intermedia o fresado y reposición) y existencia de restricciones horarias para la ejecución de las obras; no resultaron estadísticamente significativas o no se contó con suficientes datos de secciones como para establecer conclusiones generalizadas.

Wen (2011) investigó el efecto de diversos factores de diseño en el IRI de construcción de pavimentos asfálticos. Los factores analizados fueron el espesor de la capa asfáltica, ubicación del proyecto (urbano o rural), tipo de base, tipo de mezcla asfáltica y longitud del proyecto. Para el análisis se utilizaron mediciones de IRI inicial recopiladas a partir de 442 proyectos de reconstrucción y rehabilitación de pavimentos realizados entre los años 2000 a 2004 en el estado de Wisconsin, EE.UU. Los resultados indicaron que: (1) el espesor de la capa asfáltica afecta significativamente el valor del IRI inicial de construcción, de

modo que a mayor espesor de pavimento menor IRI de construcción. El autor explica que capas asfálticas más gruesas usualmente requieren ser extendidas en más de una sub-capa, lo cual permite una nivelación gradual de las irregularidades en las capas subyacentes. (2) La ubicación urbana o rural del proyecto también resulto significativa. En pavimentos urbanos existen más interferencias en el perfil longitudinal durante la construcción, tales como intersecciones de calles y elementos de drenaje, lo cual probablemente se traduce en un aumento del IRI inicial alcanzable durante la ejecución de la obra. La construcción de pavimentos rurales usualmente implica menos interrupciones, resultando en una superficie más regular. (3) Respecto del tipo de mezcla asfáltica, en los proyectos estudiados se utilizaron mezclas diseñadas por los métodos Marshall, Superpave y Stone Mastic Asphalt (SMA). El análisis estadístico indicó que las mezclas SMA presentaron un mayor IRI de construcción respecto de las otras mezclas asfálticas. (4) El efecto de la capa de base fue estadísticamente significativo solo en el caso de reconstrucción de pavimentos con un tipo de base denominado OGBC2 (*open-graded base course #2*), las cuales resultaron en mayor IRI de construcción respecto del resto de los proyectos. Esto probablemente debido a la granulometría de las bases OGBC2, que tiene menos agregados finos y una trabajabilidad relativamente más baja. (5) El efecto de la longitud del proyecto también resulto significativo. El análisis demostró que a mayor longitud de pavimentación, menor es la regularidad IRI inicial de construcción obtenida.

Hung et al. (2014) utilizaron los datos de inspecciones de condición de pavimentos (*Pavement Condition Survey, PCS*) del Departamento de Transporte de California (CALTRANS) para investigar el efecto de diversos factores en el IRI de construcción de refuerzos asfálticos sobre pavimentos asfálticos existentes. Para el análisis utilizaron datos de 193 contratos de programas de mantenimiento y rehabilitación entre los años 2000 a 2009, totalizando 228 proyectos y 4,475 secciones de análisis. Los autores obtuvieron las siguientes conclusiones: (1) IRI pre-refuerzo; pavimentos con menor IRI previo a la rehabilitación pueden alcanzar menores valores IRI de construcción independiente del resto de factores. (2) Espesor de refuerzo; el aumento en el espesor de refuerzo no representó beneficios adicionales cuando el IRI previo al refuerzo era menor de 1.9 m/km. En el caso de mezclas asfálticas de graduación abierta el espesor de refuerzo no demostró ningún efecto significativo en el IRI de construcción. (3) Preparación previa de la superficie y tipo de mezcla; el fresado previo a la colocación del

refuerzo o el uso de asfalto-caucho no constituyeron ningún beneficio adicional para la obtención de un menor IRI de construcción. El fresado previo en pavimentos con IRI menor a 1.9 m/km fue contraproducente, y puede resultar en un mayor IRI de construcción. La ejecución de bacheos locales fue beneficiosa solo cuando el IRI previo al refuerzo era mayor a 1.9 m/km. Los proyectos con tratamiento previo de bacheos locales tuvieron mejor desempeño que aquellos que recibieron fresado antes del refuerzo. En general, el tipo de superficie (graduación abierta, densa o discontinua) no tuvo ningún efecto en el IRI de construcción.

## 2.2.2. Modelos de predicción del IRI de construcción

Investigaciones similares a las citadas en la sección anterior, adicionalmente a estudiar los factores que afectan la regularidad de construcción, han propuesto una serie de modelos de regresión para estimar el IRI en el extendido de pavimentos asfálticos; ya sea mediante ecuaciones para la predicción directa del IRI post-obra, o para estimar la magnitud en la reducción de IRI producto de la obra (Watanatada et al., 1987, NDLI, 1995a, NDLI, 1991, NDLI, 1995b, Djärf et al., 1995, Morosiuk et al., 2004, Raymond et al., 2003, Dong and Huang, 2012, Kwon et al., 2015, Qiao et al., 2016, Lu and Xin, 2018).

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de los modelos empíricos de la revisión bibliográfica. En el Anexo A se incluye un análisis cronológico detallado de todos los modelos revisados.

A continuación, se presentan los principios básicos de los principales modelos de regresión disponibles de la literatura, los cuatro modelos descritos se utilizarán en la siguiente sección para la predicción y análisis del IRI de construcción.

(1) Raymond et al. (2003) estudiaron la influencia de diferentes factores de diseño en el IRI de construcción de refuerzos sobre pavimentos asfálticos existentes. A partir de los resultados obtenidos, los autores propusieron ecuaciones de predicción para estimar el IRI de construcción según el nivel de IRI pre-refuerzo y distintas combinaciones de grado de reparación previo (básico e intensivo) y espesor del refuerzo (delgado y grueso).

a) Preparación superficial básica y refuerzo delgado ( $R^2 = 0,28$ )

$$IRI_{as-built} = 0.44 + 0.31 \times IRI_{prior} \quad (1)$$

b) Preparación superficial básica y refuerzo grueso ( $R^2 = 0,28$ )

$$IRI_{as-built} = 0.52 + 0.25 \times IRI_{prior} \quad (2)$$

c) Preparación superficial intensiva y refuerzo delgado ( $R^2 = 0,29$ )

$$IRI_{as-built} = 0.40 + 0.29 \times IRI_{prior} \quad (3)$$

d) Preparación superficial intensiva y refuerzo grueso ( $R^2 = 0,13$ )

$$IRI_{as-built} = 0.63 + 0.17 \times IRI_{prior} \quad (4)$$

(2) Uno de los primeros y más exhaustivos estudios relacionados con el efecto de las obras de conservación en la restauración superficial del pavimento fue el desarrollado por el Banco Mundial en el marco del programa HDM (*Highway Design and Maintenance Standards Study*), a partir del cual se obtuvieron los modelos fundamentales utilizados en el software HDM-III (Watanatada et al., 1987). Los modelos desarrollados para HDM-III fueron actualizados a través de sucesivas revisiones para el estudio ISOHDM (*International Study of Highway Development and Management Tools*) cuyos resultados fueron incluidos el año 1995 en la primera versión de HDM-4 (NDLI, 1995a).

Revisiones posteriores del modelo incluido en HDM-4 (versión 1) dieron origen a los modelos incluidos en la versión actual de HDM-4 (versión 2), estableciendo una relación bi-lineal entre refuerzo y regularidad IRI para un determinado espesor de refuerzo, técnica constructiva y tipo de pavimento (Morosiuk et al., 2004).

$$\Delta RI = \max\{0, a_0[\min(a_1, RI_{bw}) - a_2] + a_3 \times \max[0, (RI_{bw} - a_1)]\} \quad (5)$$

$$RI_{bw} = \max(1.0, RI_{ap}) \quad (6)$$

$$RI_{aw} = RI_{bw} - \Delta RI \quad (7)$$

Dónde:

$\Delta\text{IRI}$  : Reducción de regularidad IRI post-refuerzo (m/km)

$\text{RI}_{\text{bw}}$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (m/km)

$\text{RI}_{\text{aw}}$  : Regularidad IRI después del refuerzo (m/km)

$\text{RI}_{\text{ap}}$  : Regularidad ajustada post-bacheos previos al refuerzo (m/km)

$a_0$  : Pendiente de la primera recta. Por defecto 0.9

$a_1$  : Regularidad IRI antes del refuerzo en que se interceptan ambas rectas (m/km)

$a_2$  : Regularidad IRI mínima después del refuerzo (m/km)

$a_3$  : Pendiente de la segunda recta

Los coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  se calculan como función del espesor del refuerzo según las siguientes expresiones.

$$a_1 = \max[4.0, 2.1 \times e^{(0.019 \times H)}] \quad (8)$$

$$a_2 = 1 + 0.018 \times \max[0, (100 - H)] \quad (9)$$

$$a_3 = \min\{a_0, \max[0, (0.01 \times H - 0.15)]\} \quad (10)$$

Dónde:

$H$  : Espesor del refuerzo en mm (rango válido entre 5 y 150 mm)

(3) Utilizando el método de regresión múltiple Dong and Huang (2012) investigaron la eficiencia y beneficio de una serie de rehabilitaciones de pavimentos asfálticos, desarrollando modelos de efectividad para una serie de parámetros; tales como la reducción de IRI producto de la rehabilitación (IRI-drop). La siguiente ecuación muestra el modelo de regresión obtenido para estimar la reducción IRI-drop en función de la regularidad existente antes del refuerzo (Pre\_IRI), el espesor de refuerzo (Overlay thickness) y la ejecución de fresado previo al refuerzo (Mill).

$$IRI_{\text{drop}} = 0.47 \times \text{Pre\_IRI} + 0.03 \times \text{Overlay thickness} + 0.04 \times \text{Mill} \quad (11)$$

(4) Qiao et al. (2016) estudiaron el efecto correctivo inmediato sobre la regularidad y las roderas de tres tipos de acciones de conservación, proponiendo un método para validar los modelos del efecto correctivo inmediato de las intervenciones. Los autores introdujeron un proceso de minería de datos (data mining) para mejorar la calibración de los modelos y utilizaron regresiones lineales para relacionar la reducción de IRI luego del mantenimiento ( $\Delta IRI_n$ ) con la regularidad existente antes de obras ( $IRI_{n0}$ ). Luego del análisis de regresión, los autores determinaron los factores de calibración para las tres alternativas de mantenimiento y presentaron los modelos validados del efecto correctivo inmediato como resultado de aplicar el método propuesto.

a) Opción de conservación 1: Refuerzo capa de rodadura (espesor 3.8 – 5.1 cm)

$$\Delta IRI_n = 0.6307 \cdot IRI_{n0} - 22.491 \quad (12)$$

b) Opción de conservación 2: Refuerzo capa intermedia + rodadura (espesor 7.6 + 3.8 cm)

$$\Delta IRI_n = 0.5234 \cdot IRI_{n0} - 8.0962 \quad (13)$$

c) Opción de conservación 3: Fresado y reposición capa de rodadura (5.1 cm)

$$\Delta IRI_n = 0.811 \cdot IRI_{n0} - 39.71 \quad (14)$$

Dónde:

$\Delta IRI_n$  : Reducción de la regularidad (in/mile)

$IRI_{n0}$  : Regularidad IRI antes del mantenimiento (in/mile)

Tabla 2.1: Resumen modelos empíricos de la revisión bibliográfica

ESTUDIO	MODELO	VARIABLES
HDM-III (1987)	Pavimentadora regular $IRI_a = 3.85 - \frac{[\min(HNEW, 80) + \min(HNEW, 40)]}{52} + \frac{28 \times \max(IRI_b - 3.85, 0)}{\max[\min(HNEW, 80), 28]}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_a</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_b</math>)</li> <li>• Espesor refuerzo (HNEW)</li> </ul>
	Pavimentadora con nivelación automática $IRI_a = \max \left\{ \begin{array}{l} (1.5 + 0.22 \times IRI_b - 0.00523 \times HNEW), \\ [IRI_b (1 - 0.008 \times \max(HNEW - 20, 0)) - 1.5] \end{array} \right\}$	
ISOHDM (1989-1995)	Indonesia $IRI_a = 2.0 + 0.0071 \times \max(80 - HNEW, 0) \times \max(IRI_b - 2.0, 0)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_a</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_b</math>)</li> <li>• Espesor refuerzo (HNEW)</li> </ul>
	Nepal $IRI_a = 2.5 + 0.0071 \times \max(80 - HNEW, 0) \times \max(IRI_b - 2.5, 0)$	
	Tailandia $IRI_a = 1.87 + 0.25 \times IRI_b$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_a</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_b</math>)</li> </ul>
	Suecia $IRI_a = 0.55 + 0.29 \times IRI_b$	

ESTUDIO	MODELO	VARIABLES
HDM-4 v1 (1995)	$IRI_a = a_0 + a_1 \times \max(IRI_b - a_0, 0) \times \max(a_2 - H, 0)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_a</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_b</math>)</li> <li>• Espesor refuerzo (<math>H</math>)</li> <li>• Estándar calidad constructiva (<math>a_0</math>)</li> <li>• Sensibilidad reducción de IRI (<math>a_1</math>)</li> <li>• Espesor (<math>a_2</math>) a partir del cual se consigue el estándar (<math>a_0</math>)</li> </ul>
HDM-4 v2 (2005)	Método 1  $RI_{aw} = RI_{bw} - \Delta RI$ $RI_{bw} = \max(1.0, RI_{ap})$ $\Delta RI = \max\{0, a_0[\min(a_1, RI_{bw}) - a_2] + a_3 \times \max[0, (RI_{bw} - a_1)]\}$ $a_1 = \max[4.0, 2.1 \times e^{(0.019 \times H)}]$ $a_2 = 1 + 0.018 \times \max[0, (100 - H)]$ $a_3 = \min\{a_0, \max[0, (0.01 \times H - 0.15)]\}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_{aw}</math>)</li> <li>• Reducción de rugosidad (<math>\Delta RI</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_{bw}</math>)</li> <li>• IRI antes de bacheos previos (<math>IRI_{ap}</math>)</li> <li>• <math>a_0</math>, <math>a_1</math>, <math>a_2</math> y <math>a_3</math> coeficientes de ajuste</li> <li>• Espesor refuerzo (<math>H</math>)</li> </ul>
	Método 2  $\Delta RI = \max\{0, \min[a_0(RI_{bw} - a_2), a_0(a_1 - a_2) + a_3 \times \max[0, (RI_{bw} - a_1)]]\}$	

ESTUDIO	MODELO	VARIABLES
Raymond, C. M. <i>et al.</i> (2003)	Preparación superficial básica y refuerzo delgado ( $R^2 = 0.28$ )  $IRI_{as-built} = 0.44 + 0.31 \times IRI_{prior}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_{as-built}</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_{prior}</math>)</li> </ul>
	Preparación superficial básica y refuerzo grueso ( $R^2 = 0.28$ )  $IRI_{as-built} = 0.52 + 0.25 \times IRI_{prior}$	
	Preparación superficial intensiva y refuerzo delgado ( $R^2 = 0.29$ )  $IRI_{as-built} = 0.40 + 0.29 \times IRI_{prior}$	
	Preparación superficial intensiva y refuerzo grueso ( $R^2 = 0.13$ )  $IRI_{as-built} = 0.63 + 0.17 \times IRI_{prior}$	
Dong, Q. & Huang, B. (2012)	$(R^2 = 0.87)$  $IRI_{drop} = 0.47 \times Pre\_IRI + 0.03 \times Overlay\ thickness + 0.04 \times Mill$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de IRI (<math>IRI_{drop}</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>Pre\_IRI</math>)</li> <li>• Espesor refuerzo (<math>Overlay\ Thickness</math>)</li> <li>• Fresado previo (<math>Mill</math>) (<math>Si = 1, No = 0</math>)</li> </ul>
Kwon, O. <i>et al.</i> (2015)	$(R^2 = 0.51)$  $IRI_p = 0.47 \cdot IRI_s + 15.69$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRI-post refuerzo (<math>IRI_p</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_s</math>)</li> <li>• Desviación estándar de los residuos (<math>\sigma_\epsilon=6.1</math>)</li> </ul>
	Función Densidad de Probabilidad del valor predicho  $f_{IRI_F}(x) = \frac{1}{\sigma_\epsilon \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{IRI_p - 0.47 \cdot IRI_s - 15.69}{\sigma_\epsilon}\right]^2\right)$	

ESTUDIO	MODELO	VARIABLES
<p>Qiao, Y. <i>et al.</i> (2016)</p>	<p>Opción 1: Refuerzo rodadura, espesor 1.5 – 2.0 in (<math>R^2 = 0.59</math>)</p> $\Delta IRI_n = -22.491 + 0.6307 \cdot IRI_{n0}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción IRI (<math>\Delta IRI_n</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_{n0}</math>)</li> </ul>
	<p>Opción 2: Refuerzo rodadura (1.5 in) + base asfáltica (2.0 in) (<math>R^2 = 0.45</math>)</p> $\Delta IRI_n = -8.0962 + 0.5234 \cdot IRI_{n0}$	
	<p>Opción 3: Fresado y reposición capa de rodadura (2.0 in) (<math>R^2 = 0.84</math>)</p> $\Delta IRI_n = -39.74 + 0.811 \cdot IRI_{n0}$	
<p>Lu, Q. &amp; Xin, C. (2018)</p>	$IRI^d = -34.72 + 0.65 \cdot IRI_c + 1.85 \cdot Thk + 6.91 \cdot Mill + 0.085 \cdot (Nc \times IRI_c) + 0.082 \cdot (Fc \times IRI_c) - 0.017 \cdot (Rt \times IRI_c) + 0.007 \cdot (En \times IRI_c)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción IRI (<math>IRI^d</math>)</li> <li>• IRI-previo (<math>IRI_c</math>)</li> <li>• Espesor refuerzo (<math>Thk</math>)</li> <li>• Fresado previo (<math>Mill</math>) (Si = 1, No = 0)</li> <li>• Zona climática (<math>Nc</math>) (Si = 1, No = 0)</li> <li>• Agr. Fatiga severo (<math>Fc</math>) (Si = 1, No = 0)</li> <li>• Roderas severo (<math>Rt</math>) (Si = 1, No = 0)</li> <li>• Endogeneidad (<math>En</math>) (Si = 1, No = 0)</li> </ul>

### 2.2.3. Análisis de modelos empíricos

La capacidad de predicción de los principales modelos de la revisión bibliográfica fue evaluada con datos reales de IRI de construcción provenientes de secciones de refuerzo asfáltico de la base de datos LTPP; específicamente del experimento SPS-5, diseñado para evaluar el efecto de diferentes alternativas de rehabilitación en el desempeño de pavimentos flexibles luego de la rehabilitación.

En la Figura 2.1 se presentan los resultados del IRI predicho (IRI-sim) respecto de los valores de regularidad de construcción real (IRI-post) obtenidos para las secciones correspondientes a preparación superficial mínima previos a la construcción del refuerzo (sin fresado). Dos espesores de refuerzo fueron considerados: refuerzos delgados de 5.1 cm (2 in) aproximadamente (código SHRP 502 y 505) y refuerzos gruesos de 12.7 cm (5.0 in) aprox. (código SHRP 503 y 504). Para la aplicación del modelo HDM-4 versión 2, la regularidad luego de la preparación superficial ( $RI_{ap}$ ) fue asumida como equivalente a la regularidad IRI existente antes de la obra ( $IRI_{bw}$ ), dado que una preparación superficial mínima no supone cambios sustanciales en la regularidad.

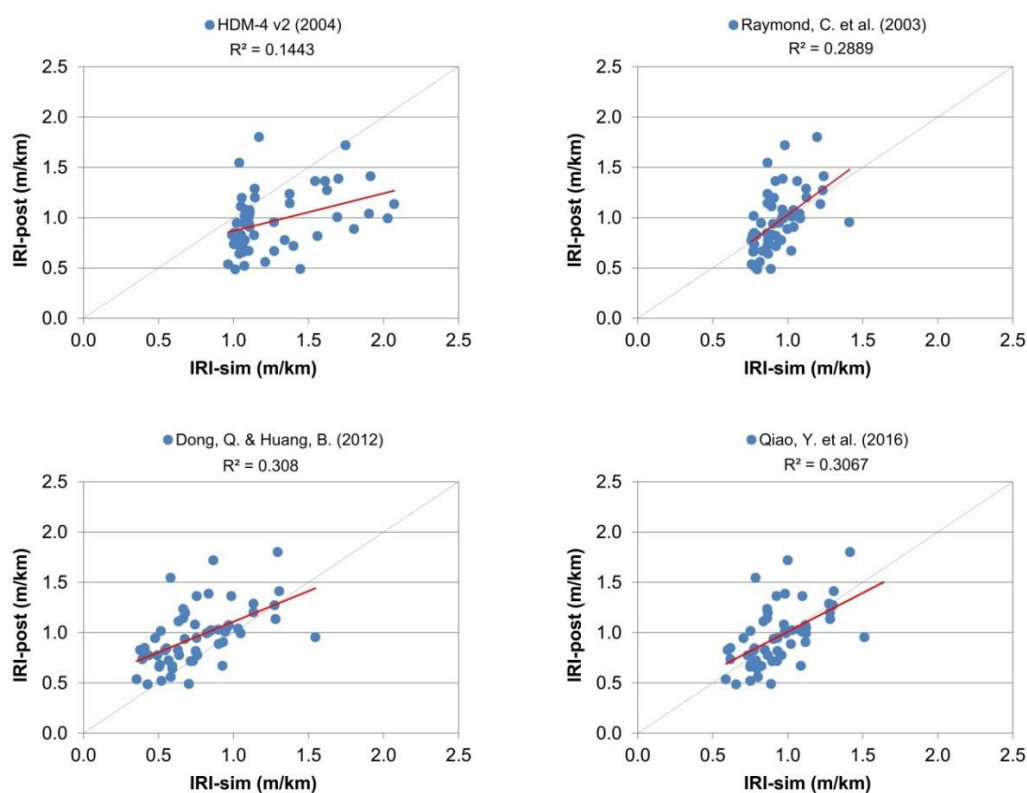


Figura 2.1: Evaluación Resultados de Modelos – Preparación superficial mínima.

La Figura 2.2 presenta los resultados de IRI-sim respecto de los valores de IRI-post obtenidos para las secciones de rehabilitación con trabajos de preparación superficial intensiva previos a la construcción del refuerzo (incluye fresado). Dos espesores de refuerzo fueron considerados: refuerzos delgados de 5.1 cm aproximadamente (código SHRP 506 y 509) y refuerzos gruesos de 12.7 cm aprox. (código SHRP 507 y 508). El modelo HDM-4 versión 2 no fue evaluado en este caso, dado que no se cuenta con información relativa la regularidad luego de la preparación superficial ( $RI_{ap}$ ) requerida por el modelo, y cambios en la regularidad luego del fresado son esperables.

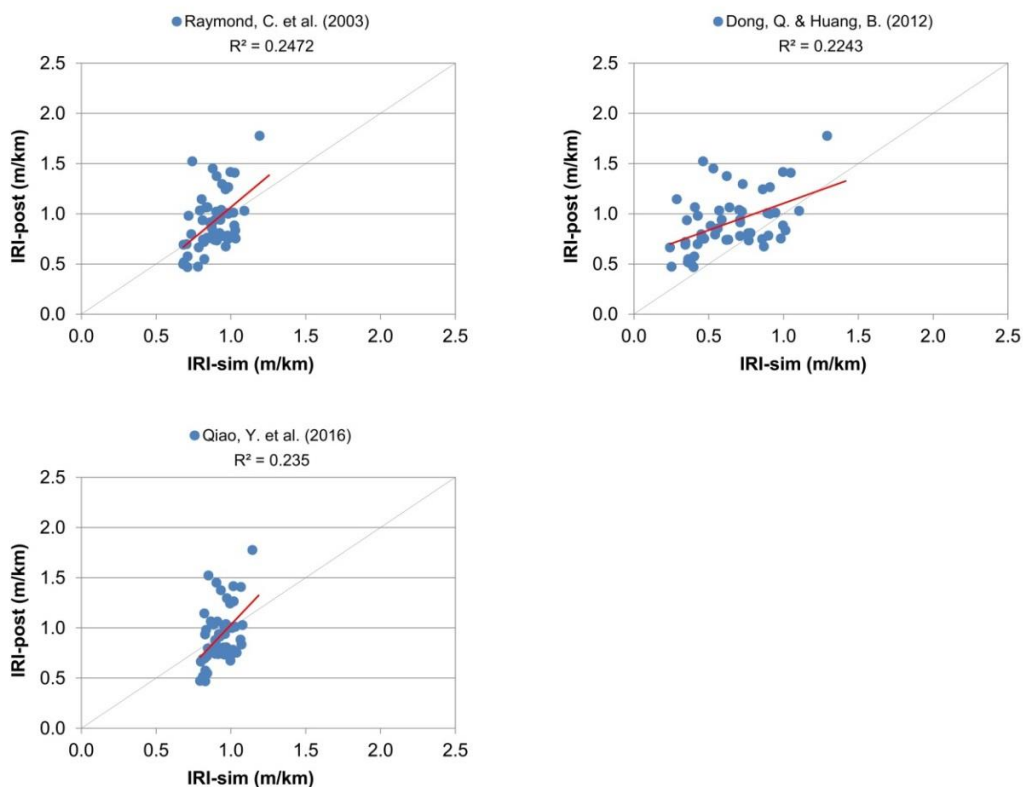


Figura 2.2: Evaluación Resultados de Modelos – Preparación superficial intensiva

En ambos casos, la Figura 2.1 y Figura 2.2 muestran que los valores para el IRI de construcción predichos por los modelos se encuentran relativamente dispersos (baja precisión) y en distintas medidas desfasados respecto de la línea de igualdad (sesgo), lo cual se ve reflejado en los coeficientes de determinación  $R^2$  relativamente bajos. Aunque en cada uno de los casos se pueden observar algunos valores con buena predicción del IRI de construcción, en general, la capacidad

predictiva parece ser insuficiente, con algunos errores de hasta 1 m/km en el IRI esperado. Un 49% de las simulaciones muestran un error de predicción mayor a 0.2 m/km IRI, un 37% de ellas se encuentran en un rango de 0.2 – 0.5 m/km en el error de predicción y un 12% de las predicciones tiene un error mayor a 0.5 m/km.

#### **2.2.4. Limitaciones en la aplicación de modelos empíricos**

Aunque el análisis de regresión de series de datos del IRI existente antes y después de obras de pavimentación puedan mostrar alguna correlación y variables estadísticamente significativas se logren identificar; en la práctica, para estudios en el ámbito de la gestión y construcción de pavimentos, un error potencial de 0.5 m/km en el IRI de construcción esperado puede llevar a toma de decisiones poco precisas y tener un impacto significativo tanto en la expectativa de aceptación (recepción) de obras de pavimentación como en el análisis del ciclo de vida de los proyectos.

El uso de datos de regularidad IRI medidos antes y después de la ejecución de las obras para el desarrollo de modelos de predicción del IRI de construcción parece tener una limitación: el hecho de que para un mismo valor de IRI inicial y diseño de rehabilitación (espesor de refuerzo, tipo de mezcla asfáltica, reparación previa, etc.) se pueden observar obras que alcanzan valores significativamente diferentes de IRI post-rehabilitación, por lo que el ajuste de una relación del tipo IRI antes-después no logra explicar completamente la variabilidad observada. Este hecho fue advertido, mas no abordado, en el modelo propuesto por (Kwon et al., 2015), quienes incorporaron en su cálculo la probabilidad de que el valor predicho de IRI sea igual al valor real, en el caso de ejemplo citado se calculó un escaso 6.5% de probabilidad. El problema mencionado se ejemplifica en la Figura 2.3, que muestra los gráficos de IRI antes y después de obras de refuerzo asfáltico para el mismo set de datos de pavimentos utilizado para el análisis de modelos empíricos en la sección anterior.

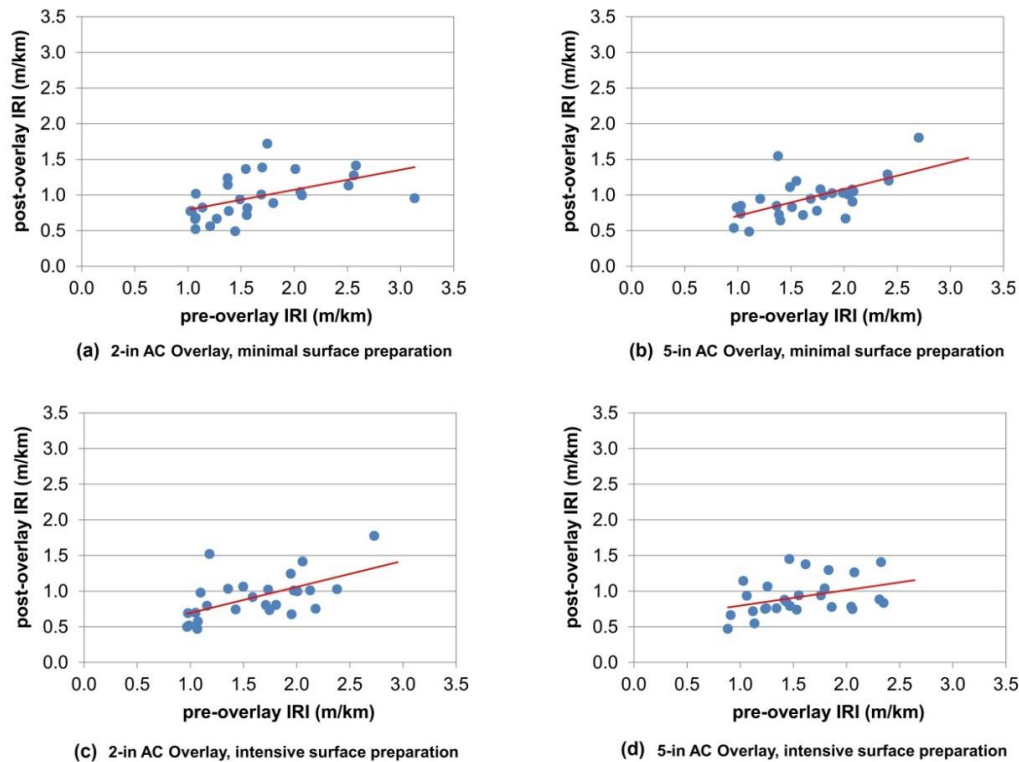


Figura 2.3: Evaluación Resultados de Modelos – Preparación superficial intensiva

De acuerdo con la Figura 2.3(a), por ejemplo, secciones de pavimento con valores de IRI pre-refuerzo cercanos a 1.5 m/km alcanzaron valores de IRI post-refuerzo en el rango de 0.5 m/km a 1.5 m/km, todos ellos para el mismo tipo de reparación previa (mínima) y espesor de refuerzo delgado (5.1 cm). Lo mismo se puede observar en el caso de refuerzos gruesos (12.7 cm). De forma similar, en la Figura 2.3(c) se observan secciones con valores de IRI pre-refuerzo cercanos a 2.0 m/km alcanzaron valores de IRI post-refuerzo en el rango de 0.5 m/km a 1.5 m/km, todos ellos para el mismo tipo de reparación previa (intensiva) y espesor de refuerzo (5.1 cm).

## 2.2.5. Conclusiones de la revisión de modelos empíricos

La revisión bibliográfica y análisis presentados evidencian que la variable más utilizada para explicar la regularidad IRI de construcción es el IRI existente previo a la construcción del refuerzo; lo que ha llevado al desarrollo de distintos modelos de regresión, aunque con una capacidad insuficiente para explicar la variabilidad observada en la regularidad de construcción. En este sentido, algunos estudios han sugerido que también se debe tener en cuenta la naturaleza

de la irregularidad existente, es decir, las longitudes de onda predominantes que contribuyen al IRI (Perera et al., 1998, NDLI, 1995a, Morosiuk et al., 2004). Sin embargo, los modelos revisados no han considerado efectivamente esta influencia, toda vez que el IRI como variable explicativa no proporciona información detallada sobre la naturaleza de la irregularidad, es decir, sobre las diferentes longitudes de onda que componen los defectos del perfil.

La relación antes mencionada entre las longitudes de onda componentes del perfil existente y la regularidad conseguida durante la construcción puede ser explicada mediante el principio de funcionamiento de la pavimentadora de asfalto, para lo cual se ha dedicado la siguiente sección.

### **2.3. Extendido de la capa asfáltica**

La bibliografía revisada en la sección anterior hace referencia a distintos estudios realizados en el pasado y que se han enfocado principalmente en la relación existente entre diversos factores relativos al proyecto de rehabilitación y la regularidad inicial obtenida en la construcción del refuerzo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la terminación superficial del pavimento estará determinada en última instancia por la calidad de ejecución constructiva de la obra de pavimentación. En los estudios antes mencionados, el efecto de la calidad constructiva está implícito en los resultados de IRI post-refuerzo utilizados en los distintos análisis.

El estudio en detalle del proceso constructivo establece que el acabado superficial conseguido en la puesta en obra de un refuerzo dependerá principalmente del equilibrio de fuerzas que gobiernan el comportamiento de la regla de la pavimentadora durante el extendido de la mezcla asfáltica (Roberts et al., 1996, USACE, 2013, Asefma, 2008).

#### **2.3.1. Descripción de la pavimentadora**

Las pavimentadoras, también llamadas terminadoras o extendedoras, son máquinas automotrices diseñadas para colocar material de pavimentación sobre una superficie existente según el ancho, pendiente, sección transversal y espesor requeridos. Fue desarrollada en la década de 1930 por la compañía Barber-Greene Co., y desde entonces, el concepto básico de su funcionamiento ha permanecido relativamente inalterado: la mezcla asfáltica es descargada en el frente de la pavimentadora y transportada hacia su parte posterior donde es

distribuida transversalmente para ser enrasada y compactada por una regla autonivelante (ver Figura 2.4).



Figura 2.4: Pavimentadora Barber-Greene – Modelo 879 (año 1936)

Fuente: Página Web <https://www.oemoffhighway.com>

La pavimentadora debe ser capaz de proveer regularidad superficial y una terminación uniforme a la carpeta extendida, además de la densificación inicial del material previo a su compactación final por parte de los rodillos. Los dos elementos principales de una pavimentadora son la unidad de potencia o tractor y la unidad de enrase o regla (ver Figura 2.5).

La unidad tractora cumple todas las funciones necesarias para recibir la mezcla asfáltica directamente desde los camiones de despacho y transportar el material a través de la maquina hacia los tornillos o sinfines ubicados en su parte posterior, los que distribuyen la mezcla de forma transversal frente de la regla.

La regla es el componente responsable de la colocación, enrasado y precompactación de la mezcla asfáltica y se conecta al tractor por medio de dos brazos laterales, uno a cada lado (ver Figura 2.5). Cada brazo lateral está conectado al tractor en el “punto de tiro” y a la regla en el “punto pivote”. A medida que la regla es arrastrada hacia adelante el material de pavimentación es regulado debajo de la misma. Este material hace que la regla se desplace verticalmente para establecer la profundidad o espesor de la capa. La regla puede “flotar” libremente hacia arriba o hacia abajo, independientemente del tractor, según la cantidad de material que fluya bajo ella.

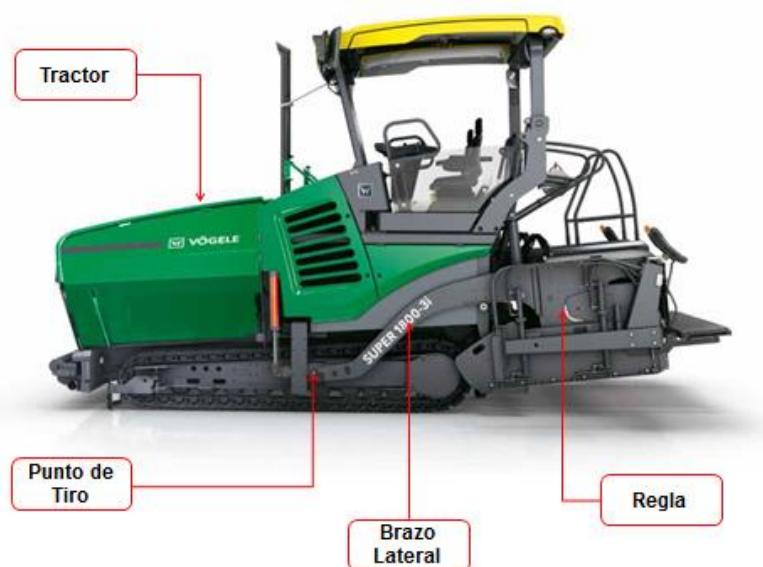


Figura 2.5: Tractor y Regla de la Extendedora  
Fuente: Adaptado de Vögele (2016)

A continuación, se describen aspectos funcionales y operaciones de los principales elementos que componen la pavimentadora. La información presentada corresponde a una síntesis de antecedente recopilados en diversas fuentes tales como; libros (Hunter, 2000, Roberts et al., 1996), manuales de pavimentación (USACE, 2013, AI, 1982, Blaw-Knox, 1997, Shell, 2015, Cedarapids, 2015), revistas especializadas (Asefma; Construction Equipment); instructivos, manuales y capacitaciones de fabricantes (Vögele, Volvo, Roadtec, Caterpillar, Cedarapids), presentaciones de conferencias (57th Idaho Asphalt Conference; Michigan 56th Annual Asphalt Paving Conference), páginas web de asociaciones e instituciones (Washington Asphalt Pavement Association), entre otras.

### 2.3.2. Unidad tractora o tractor

La unidad tractora, equipada con ruedas u orugas, es propulsada por un motor propio que provee de la energía necesaria para movilizar la máquina y empujar el camión de despacho cuando se requiera. Está conformada por los siguientes componentes principales; los rodillos de empuje y el sistema de alimentación de material compuesto por la tolva receptora, cintas transportadoras, compuertas de flujo y los sinfines de distribución (ver Figura 2.6). La unidad tractora también provee la fuerza motriz para remolcar la regla de enrasado por medio de los brazos laterales conectados al tractor en el punto de tiro.



Figura 2.6: Tractor – Componentes Principales

Fuente: Adaptado de Vögele (2016)

Los camiones de despacho depositan la mezcla asfáltica en la tolva receptora situada en la parte frontal de la pavimentadora. Las cintas transportadoras movilizan el material asfáltico desde la tolva y a través de las compuertas de flujo hacia el sinfín de distribución en la parte posterior del tractor. Luego, los tornillos sinfín se encargan de distribuir uniformemente la mezcla a lo largo de toda la regla para obtener una colocación pareja y uniforme. En la Figura 2.7 se ilustra el flujo de la mezcla asfáltica desde la tolva hasta el sinfín de distribución y su posterior extendido.

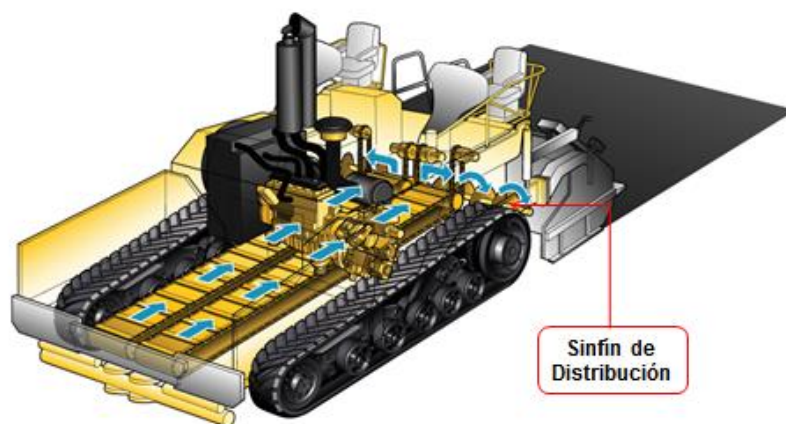


Figura 2.7: Sistema de Alimentación de Material Asfáltico

Fuente: Adaptado de Mansell (2017)

### 2.3.2.1. Tolva receptora

La tolva receptora es utilizada como un depósito temporal para la mezcla asfáltica durante el proceso de extendido. La capacidad de carga de la tolva es superior a la cantidad de material requerido de forma inmediata, y de este modo el volumen disponible en la tolva compensa la demanda variable de mezcla asfáltica que surge al pavimentar sobre cambios en el perfil longitudinal y transversal, ayudando así a mantener una velocidad relativamente constante durante el extendido. La tolva de la extendedora cuenta con paredes laterales basculantes independientes, las cuales pueden ser plegadas hacia arriba para recolectar hacia las cintas transportadoras el material acumulado en el borde exterior de la tolva (ver Figura 2.8).

El transporte del material de pavimentación desde la planta de producción se realiza mediante camiones de despacho, los que comúnmente descargan la mezcla directamente sobre la tolva de la pavimentadora, aunque para incrementar la continuidad del extendido también se pueden utilizar elevadores de asfalto (*windrow elevators*) o vehículos de transferencia de material MTV (*material transfer device*).



Figura 2.8: Tractor – Tolva Basculante

Fuente: Sunkenberg (2010)

En el caso de la descarga directa desde el camión, como la tolva de la extendedora no tiene la capacidad suficiente para almacenar toda la carga de un camión, la pavimentadora empuja al camión mientras avanza el extendido de la carpeta. A

medida que se va agotando el material disponible en la tolva receptora, el camión descarga más mezcla hasta vaciarse completamente y dar paso al siguiente camión. Durante el proceso las ruedas del camión están en contacto con los rodillos de empuje de la extendedora y ruedan sobre los mismos (ver Figura 2.9).



Figura 2.9: Pavimentadora – Alimentación desde el Camión

Fuente: Página Web Vögele. <https://www.wirtgen-group.com>

### 2.3.2.2. Cintas transportadoras y compuertas de flujo

En la base de la tolva receptora se ubican un par de cintas transportadoras independientes compuestas por cadenas y rejillas metálicas. Las cintas transportadoras son un sistema continuo que circula movilizand material desde la tolva hacia los sinfines de distribución ubicados en la parte posterior y luego retornan su recorrido por debajo de la pavimentadora (ver Figura 2.10). La cinta de un lado tiene la capacidad de operar de forma independiente de la del otro lado, toda vez que el operador puede requerir alimentar más cantidad de material de un lado que del otro.

En la mayoría de las pavimentadoras modernas, la velocidad de las cintas transportadoras opera de forma independiente a la velocidad de la pavimentadora, y en algunas pavimentadoras, la velocidad de las cintas también opera de forma independiente a la velocidad de los sinfines de distribución.



Figura 2.10: Tractor – Cintas transportadoras

Fuente: Adaptado de Vögele (2019)

La mayoría de las pavimentadoras disponen de un par de compuertas situadas en el fondo de la tolva, una sobre cada cinta transportadora, utilizadas para regular el flujo de material movilizado por las cintas hacia los tornillos sinfín (ver Figura 2.11). Al subir las compuertas de flujo, aumenta la cantidad de material que va a los tornillos, mientras que al bajarlas disminuye. De este modo, la posición de las compuertas de flujo y la velocidad de las cintas transportadoras determinará la cantidad de material en la cámara de distribución.



Figura 2.11: Tractor – Cintas transportadoras y Compuertas de Flujo

Fuente: Adaptado de Volvo (2020)

### 2.3.2.3. Tornillos Sinfín de Distribución

Los sinfines de distribución se ubican en la cámara o espacio disponible entre la parte posterior del tractor y la cara frontal de la regla. En esta cámara la mezcla es distribuida uniformemente a lo largo de toda la regla por el movimiento de dos tornillos sinfines independientes (ver Figura 2.12).



Figura 2.12: Tractor – Sinfín de Distribución

Fuente: Mansell (2017)

Ambos tornillos convergen, uno por cada lado, en una caja de transmisión ubicada en el punto medio de la extendedora. Normalmente en el extremo del sinfín junto a la caja de transmisión la hélice tiene forma reversa para asegurar una distribución uniforme de mezcla en el punto medio de la regla (ver Figura 2.13).

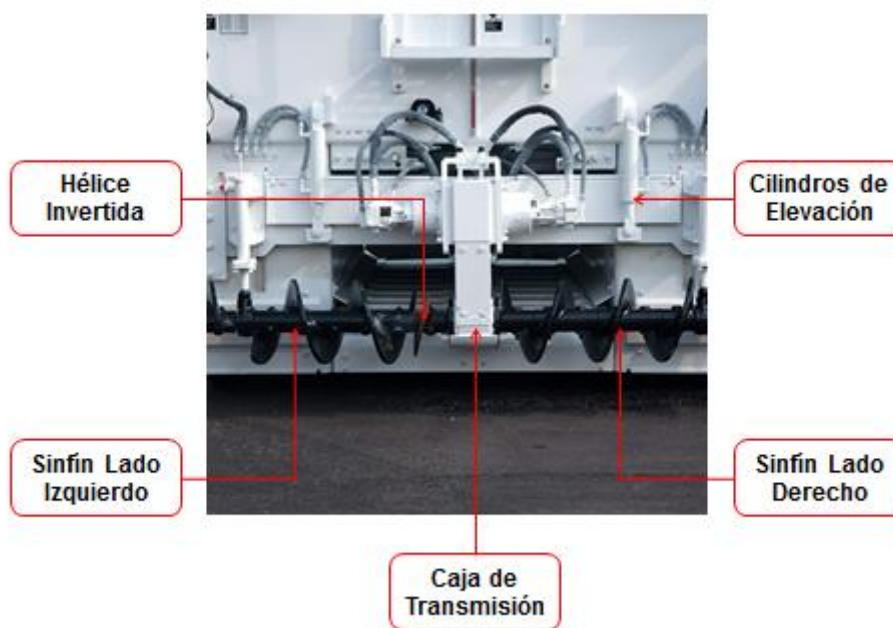


Figura 2.13: Vista Trasera del Tractor. Los Sinfines de Distribución

Fuente: Adaptado de página web ROADTEC. <https://es.roadtec.com>

En las pavimentadoras modernas la altura de los sinfines puede ser regulada mediante cilindros que permiten su elevación o descenso. La posición de los sinfines es comúnmente ajustada en relación con el espesor de pavimentación. Como regla general, los sinfines deben ser ajustados lo más bajo posible para minimizar la cantidad de mezcla en la cámara de distribución, no obstante, la parte inferior del sinfín debe estar siempre por encima de la superficie de la capa extendida.

Cuando la pavimentadora dispone de compuertas de flujo, cada sinfín opera de forma conjunta con la cinta transportadora de su lado correspondiente. Por lo tanto, al igual que las cintas transportadoras, el sinfín de un lado puede operar de forma independiente al del otro lado. Sin embargo, cuando la extendedora no utiliza compuertas de flujo, los sinfines operaran de forma independiente tanto entre ellos como respecto de su correspondiente cinta transportadora.

#### 2.3.2.4. Regulación de la Carga de Material

La “carga de material” es la masa o volumen de material de pavimentación que está dispuesto transversalmente frente a la regla, a lo largo de la misma. La cantidad de material y su consistencia son factores fundamentales en el

establecimiento del flujo de material debajo de la regla y para el control de densidad, textura superficial y perfil de la carpeta. Controlar el volumen de mezcla en la cámara de distribución y el flujo continuo de material a través de la pavimentadora requiere de la acción coordinada entre los operadores del tractor y la regla.

Si el sistema de alimentación está configurado correctamente, las cintas transportadoras y sinfines de distribución operarán en un movimiento lento y continuo sin interrupciones. Esta acción continua se consigue ajustando correctamente las compuertas de flujo (en caso de haberlas) y determinando la configuración correcta de velocidad para las cintas y sinfines de distribución.

La cantidad de material que fluye desde las cintas transportadoras hacia los sinfines de distribución puede ser regulada de dos formas dependiendo de la pavimentadora: (1) velocidad constante y (2) velocidad variable o proporcional.

(1) En pavimentadoras antiguas, la velocidad de las cintas transportadoras y sinfines es constante en el modo manual de operación. El operador de la extendidora solo puede controlar la cantidad de material disponible frente a la regla ajustando la posición de las compuertas de flujo o mediante el encendido/apagado manual del sistema de alimentación. En el modo automático, un sensor en la salida de cada cinta transportadora monitoriza continuamente la carga de material frente a la regla y de forma automática acciona el encendido/apagado la cinta y sinfín correspondiente según se requiera más o menos volumen de material.

Aun con el uso de un sensor de control de flujo, en este tipo de extendedoras es muy difícil conseguir una carga de material uniforme frente a la regla, toda vez que la demanda de material no es constante durante la pavimentación; por ejemplo en el caso del extendido de un refuerzo asfáltico, donde la nueva carpeta debe nivelar las irregularidades de la superficie inferior. Esta demanda variable genera cambios en el volumen de material disponible frente a la regla, y en consecuencia, el sensor automático responderá accionando de forma intermitente el sistema de alimentación, lo cual puede causar defectos de segregación en la terminación superficial del firme.

(2) Pavimentadoras posteriores incorporaron un sistema de alimentación en que el operador puede seleccionar entre una serie de velocidades para las cintas transportadoras en el modo manual de operación. Cada una de estas velocidades se expresa como un porcentaje de la velocidad máxima de las cintas. Una vez que

se han seleccionado las velocidades para cada cinta, los sinfines correspondientes operarán con una velocidad proporcional. De este modo, el operador de la extendidora puede controlar la cantidad de material disponible frente a la regla ajustando la posición de las compuertas de flujo, el ratio de velocidad entre las cintas transportadoras y sinfines, o mediante el encendido/apagado manual del sistema de alimentación. En el modo automático, un sensor de control de flujo monitoriza continuamente la carga de material frente a la regla y de forma automática regula la velocidad de alimentación según se requiera más o menos volumen de material. Con este sistema, la demanda variable de material durante el extendido puede ser compensada cambiando la velocidad de las cintas sin la necesidad de apagar/encender el sistema de forma intermitente.

Si las compuertas de flujo se ajustan muy altas, la cámara de distribución se desbordará de material y la carga de material en el centro de la extendidora será muy alta (ver Figura 2.14). Cuando hay mucho material fluyendo por las cintas, la velocidad rotacional de los sinfines disminuye e incluso pueden detenerse. Este comportamiento irregular pueda ocasionar parches aleatorios de segregación de agregados en la superficie de la carpeta.

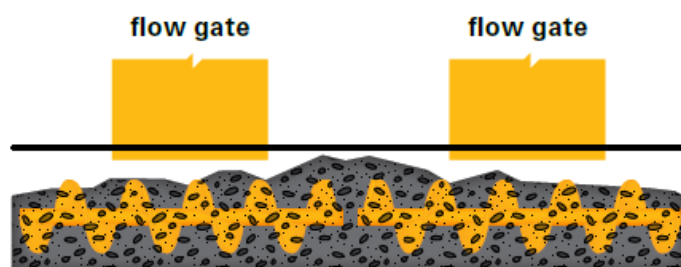


Figura 2.14: Compuertas muy Altas – Tornillos Sinfín Sobrecargados

Fuente: Adaptado de Caterpillar (2016)

Si las compuertas de flujo se ajustan muy bajas, la cámara de distribución operará con poca mezcla y la carga de material en el centro de la extendidora será muy baja (ver Figura 2.15). Cuando no hay suficiente material fluyendo por las cintas, la velocidad rotacional de los sinfines aumentará, pudiendo dejar marcas continuas de segregación de agregados en la superficie de la carpeta.

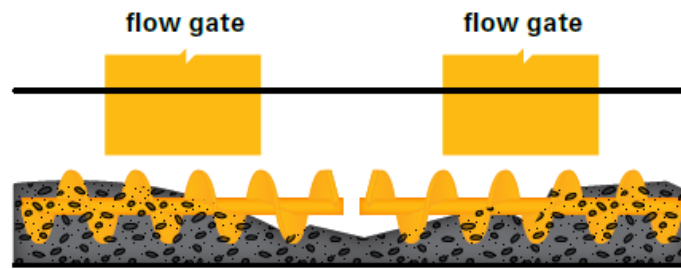


Figura 2.15: Compuertas muy Bajas – Flujo de Material Insuficiente

Fuente: Adaptado de Caterpillar (2016)

Además de la aparición de distintos tipos de segregación, la velocidad incorrecta de los sinfines puede ocasionar variaciones en la pre-compactación de la mezcla. La carga correcta de material es aquella que apenas cubre el eje de los tornillos sinfín de forma uniforme a lo ancho de toda la regla (ver Figura 2.16). La velocidad ideal de operación de los sinfines debe estar entre las 20 y 40 revoluciones por minuto (rpm).

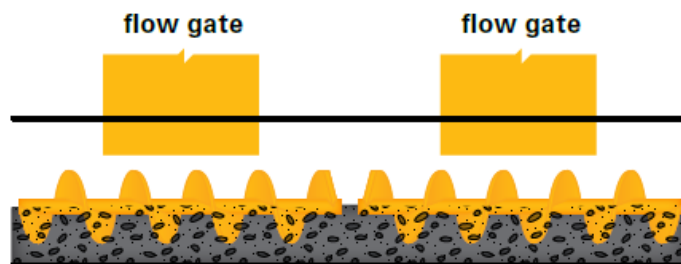


Figura 2.16: Ajuste Correcto – Cantidad o Flujo Uniforme de Material

Fuente: Adaptado de Caterpillar (2016)

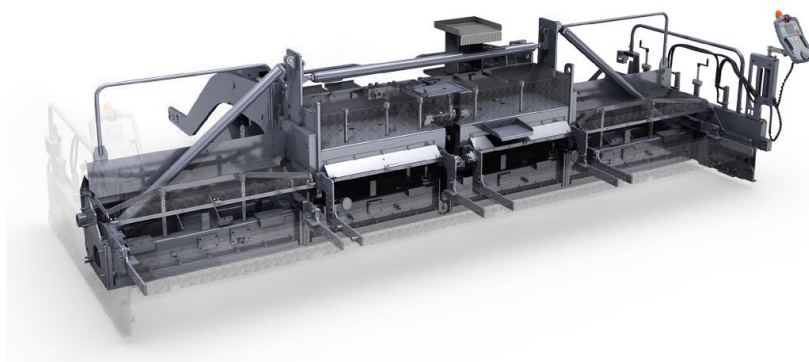
Algunas pavimentadoras actuales no utilizan compuertas de flujo, y el sistema de alimentación se regula de forma automática mediante sensores ultrasonido que monitorizan continuamente la carga de material frente a la regla y de forma automática regulan la velocidad de las cintas y de los sinfines, que pueden operar de forma independiente, según se requiera más o menos volumen de material.

### 2.3.3. La regla de enrasado

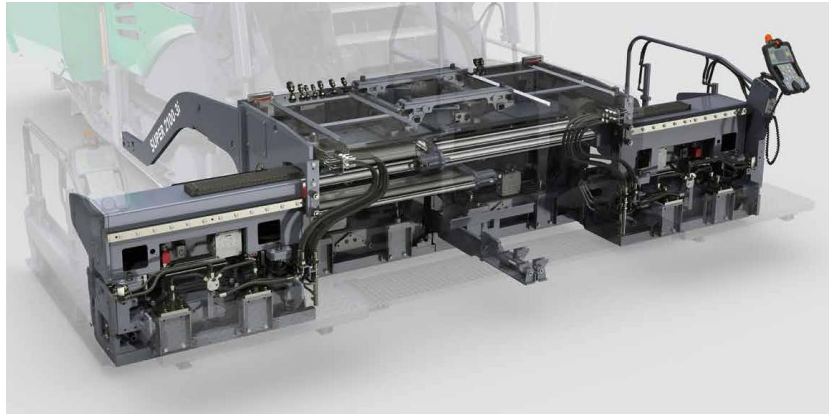
La regla de enrasado, o plancha, es un elemento característico de la pavimentadora y su funcionamiento determinará el perfil longitudinal y transversal de la capa extendida, así como su espesor, textura y compactación inicial. El tamaño básico de la regla es, dependiendo del fabricante, de entre 2.5 m a 3 m de ancho aproximadamente. Sin embargo, existen pavimentadoras más pequeñas equipadas con reglas adecuadas para el extendido de vías peatonales o superficies similares de anchos inferiores a 1 m.

Las reglas pueden ser del tipo “ancho fijo” o “extensible telescópica” (ver Figura 2.17). En general, las pavimentadoras modernas incluyen reglas extensibles telescópicamente para adaptarse a anchos de pavimentación que pueden alcanzar hasta los 9 m. Sin embargo, la mayoría de las reglas de “ancho fijo” también son adaptables a mayores anchos de pavimentación por medio de extensiones mecánicas o módulos que se montan en cada lado de la regla, pudiendo agregar varias extensiones por cada lado para conseguir anchos de hasta 16 m.

Todas las reglas, independiente del tipo y configuración, deben ser calentadas previamente al comienzo del extendido. El objetivo es precalentar todos los elementos de la regla en contacto con el material asfáltico hasta una temperatura cercana a la de colocación de la mezcla, para asegurar que esta no se adhiera a los componentes de regla durante la pavimentación, ya que esta situación perjudica la terminación superficial y dificulta el extendido. Dependiendo del modelo y antigüedad de la regla, el sistema de calefacción podrá ser mediante quemadores a gas o diésel en las más antiguas, o con sistemas de calefacción mediante resistencias eléctricas controladas automáticamente en las reglas más modernas.



(a) Ancho Fijo



(b) Extensible Telescópica

Figura 2.17: Regla de Extendido

Fuente: Vögele (2016)

El funcionamiento de la regla estará determinado por los siguientes elementos principales; ángulo de ataque, manivela de profundidad, punto de pivote, punto de tiro, placa alisadora y placa de corte (ver Figura 2.18). Adicionalmente, por medio de su peso y acción vibratoria, la regla proporciona la densificación inicial o pre-compactación del material.

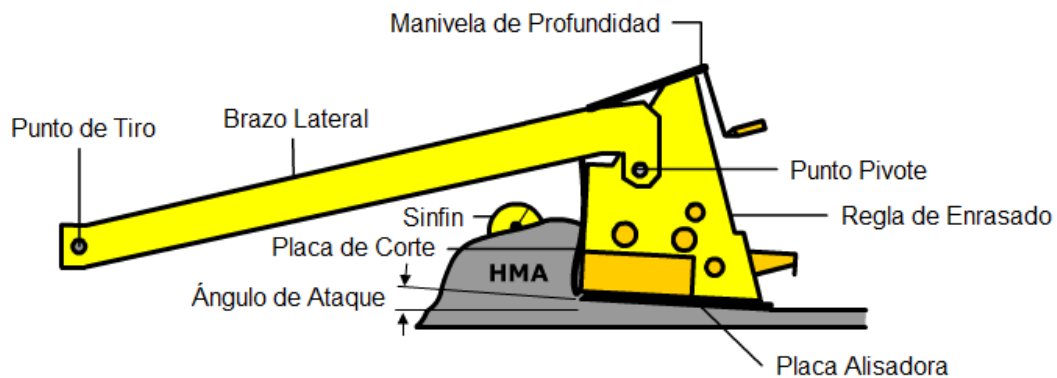


Figura 2.18: Regla de Extendido – Elementos Principales

Fuente: Adaptado de página Web WAPA. <http://www.asphaltwa.com/laydown/>

La regla emplea el concepto de “flotación libre” desarrollado a comienzos de 1930 por los ingenieros Harry H. Barber y William B. Greene; principio de funcionamiento que se mantiene vigente hasta el día de hoy en todas las pavimentadoras asfálticas modernas (USACE, 2013). El concepto de regla

flotante se basa en que la regla puede rotar sobre el punto de tiro y de esta forma nivelar las irregularidades de la rasante o superficie sobre la cual se está pavimentando (ver Figura 2.19).

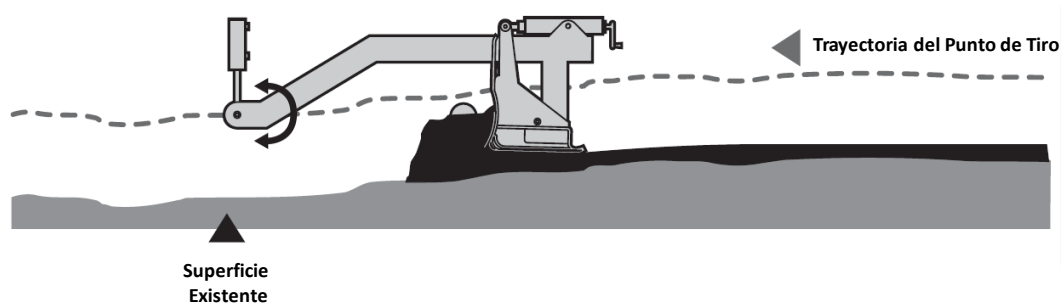


Figura 2.19: Regla de Extendido – Principio de Flotación Libre

Fuente: Adaptado de Topcon (2014)

A medida que la regla es remolcada por el tractor hacia el material distribuido frente a ella (carga de material), inicialmente ascenderá o descenderá hasta alcanzar una posición en que las fuerzas actuantes sobre la regla se encuentren en equilibrio (ver Figura 2.20). En esta posición, la regla se sustentará o “flotará” en un plano esencialmente paralelo a la línea de arrastre, determinando así el espesor de la capa extendida. La regla continuará moviéndose en este plano, manteniendo el espesor de la capa, mientras todas las fuerzas actuantes permanezcan constantes.

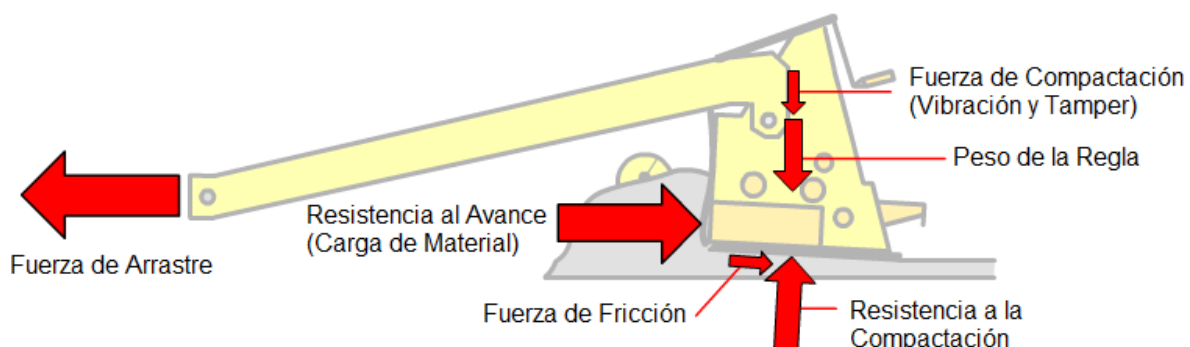


Figura 2.20: Regla de Extendido – Fuerzas Actuantes

Fuente: Adaptado de página Web WAPA. <http://www.asphaltwa.com/laydown/>

Al operar de este modo, la regla compensará las irregularidades de la capa inferior extendiendo una mayor cantidad de material en las depresiones y una menor cantidad sobre los montículos (ver Figura 2.21), conformando así un nuevo perfil longitudinal como resultado del suavizado, o filtrado, de las irregularidades en la capa subyacente.



Figura 2.21: Regla de Extendido – Compensación de Irregularidades

Fuente: Sunkenberg (2010)

### 2.3.3.1. Ángulo de ataque

El ángulo de ataque es el ángulo que existe entre la placa alisadora y la superficie de la rasante que está siendo pavimentada. Por lo tanto, corresponde a la relación entre la nariz de la regla y el borde trasero de la placa alisadora. Este ángulo determina la cantidad de material que pasará debajo de la regla en una distancia determinada y es fundamental para controlar la profundidad de la capa.

La regla siempre debe trabajar con la nariz levemente levantada (ángulo de ataque positivo), esto facilita que el material suelto fluya bajo la regla dándole sustentación para que ésta pueda “flotar”. Al comienzo de la pavimentación, el ángulo de ataque inicial se debe ajustar de forma que entre el frente y borde posterior de la placa alisadora exista una diferencia de altura positiva entre 3 mm (1/8”) y 6 mm (1/4”). Ver Figura 2.22.

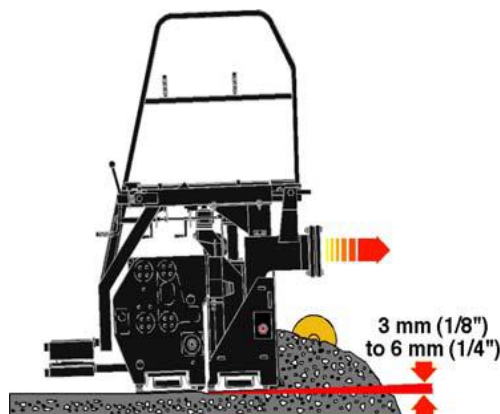


Figura 2.22: Regla de Extendido – Ángulo de Ataque Inicial

Fuente: Caterpillar (2016)

Con la regla ajustada en esta inclinación la mayor parte de la placa alisadora estará en contacto con la mezcla, por lo tanto, se maximiza la superficie de trabajo para que la regla pueda proveer una adecuada terminación superficial y pre-compactación del material.

### 2.3.3.2. Punto de tiro

El punto de tiro es la conexión, mediante un eje de pivote, entre los brazos laterales que remolcan la regla y la unidad tractora. Toda vez que la regla está unida al tractor solamente en los dos puntos de tiro (uno por cada lado), sobre los cuales puede rotar libremente, la regla puede “flotar” y auto-nivelarse al avanzar sobre la mezcla.

En las primeras pavimentadoras el punto de tiro consistía en la conexión del brazo lateral y el tractor mediante un pasador simple de posición fija, por lo cual los brazos solo podían rotar sobre el punto de tiro pero su movimiento estaba restringido en cualquier dirección. Esta configuración no permitía ajustar la altura del punto de tiro, y el espesor de la capa extendida solo podía regularse cambiando el ángulo de ataque de la regla mediante las manivelas de profundidad.

Eventualmente se fueron realizando mejoras al diseño original, incorporando pistones que permiten regular la posición vertical del punto de tiro, y por lo tanto, el espesor de la capa sin necesidad de ajustar el ángulo de ataque. También se incorporó un cierto grado de movimiento horizontal, el cual permite pequeños retrocesos de la extendedora sin que este movimiento se transmita a la regla minimizando así la ocurrencia de irregularidades inducidas, por ejemplo, por el

impacto del camión de despacho cuando entra en contacto con los rodillos de empuje. Ver Figura 2.23.

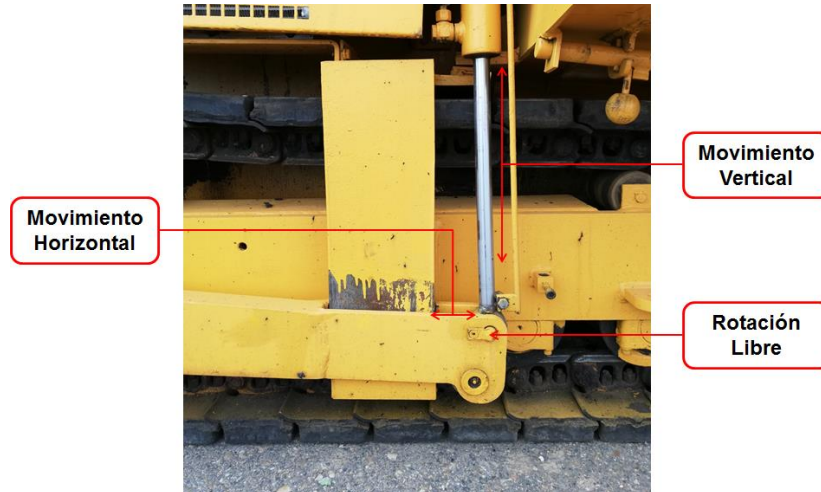
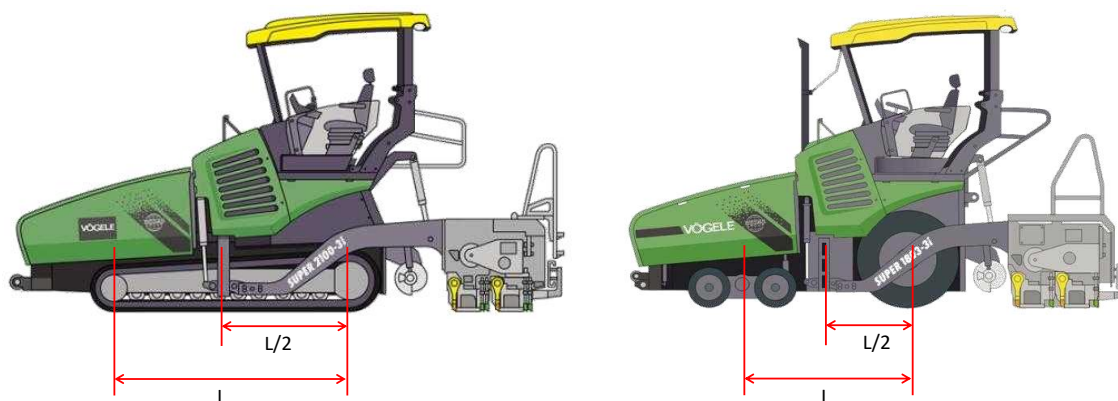


Figura 2.23: Regla de Extendido – Punto de Tiro

Fuente: Elaboración propia

El punto de tiro se ubica horizontalmente en el centro de la longitud base (*wheelbase*) del tren de rodado. En pavimentadoras sobre orugas, la longitud base corresponde a la distancia entre el rodillo de rodadura frontal y el engranaje planetario trasero de la oruga, ver Figura 2.24(a). En pavimentadoras sobre ruedas neumáticas con bogie delantero oscilante, la longitud base corresponde a la distancia entre el eje del bogie y el eje de la rueda de tracción trasera, ver Figura 2.24(b). Tradicionalmente la extendedora sobre orugas tiene una longitud base mayor que la extendedora sobre ruedas.



(a) Tren de Rodado con Orugas

(b) Tren de Rodado con Neumáticos

Figura 2.24: Longitud Base de la Extendedora

Fuente: Adaptado de Vögele (2018)

La posición vertical del punto de tiro está directamente relacionada con la “línea de arrastre”. La línea de arrastre es aquella recta ficticia que pasa por el punto de tiro y el punto pivote de forma simultánea (ver Figura 2.25), y hace referencia al ángulo con el cual la regla es remolcada hacia adelante (dirección de la fuerza de arrastre). Usualmente, para conseguir un extendido suave y regular, la fuerza de arrastre debe ser aplicada relativamente paralela a la pendiente de la capa inferior sobre la que se desplaza la unidad tractora. Por lo tanto, la elevación del punto de tiro se establece en relación al espesor de la capa extendida. Como regla general, al comenzar la pavimentación se debe ubicar la altura inicial del punto de tiro una pulgada (1 in) más arriba que el espesor suelto que está siendo extendido.

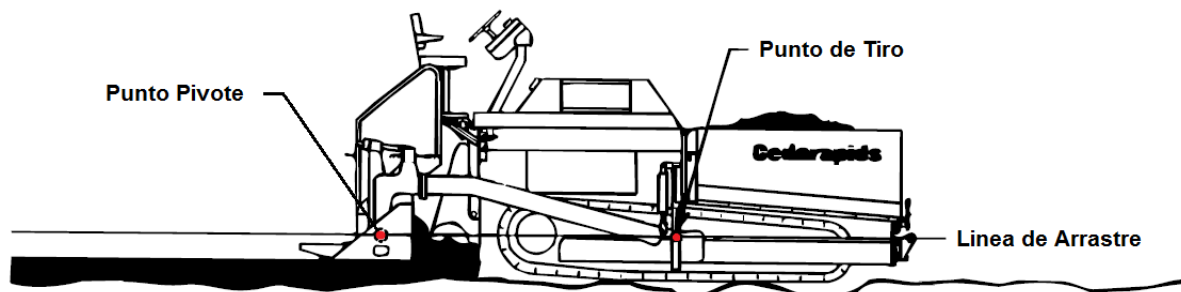


Figura 2.25: Línea de Arrastre

Fuente: Adaptado de Cedarapids (2015)

Al pavimentar sobre una superficie de perfil irregular, la posición vertical del punto de tiro se verá afectada por el movimiento del chasis del tractor. En pavimentadoras sobre orugas, al desplazarse la oruga sobre una irregularidad en la superficie, el tren de rodado y por lo tanto el chasis del tractor se inclinarán, modificando la posición vertical del punto de tiro que responderá a la media de la pendiente abarcada por la longitud base (USACE, 2013). Por lo tanto, el desplazamiento vertical del punto de tiro es atenuado por la longitud base de la oruga, permitiendo al tractor desplazarse sobre irregularidades menores (longitud de onda corta) manteniendo una línea de arrastre relativamente constante.

En el caso de pavimentadoras sobre ruedas, a medida que el tractor se desplaza sobre una superficie irregular, el diseño oscilante del bogie delantero le permite pivotar sobre la irregularidad, manteniendo siempre dos neumáticos del tractor en contacto con la superficie de referencia. Cuando la rueda de tracción trasera pase sobre la irregularidad, el punto de tiro ya estará por delante del obstáculo. Esta acción nivelante permite al tractor mantener una línea de arrastre relativamente constante al pasar sobre irregularidades cortas.

En cualquier caso, frente a irregularidades acusadas o de larga longitud de onda, el punto de tiro cambiará su posición vertical, y por lo tanto la línea de arrastre modificará su dirección afectando el comportamiento de la regla de enrasado y la conformación del perfil longitudinal final.

### **2.3.3.3. Regulación del espesor de extendido**

El espesor de material extendido bajo la regla es regulado mediante al ángulo de ataque. Una vez que la regla ha establecido su posición de equilibrio, flotará estable en dicha posición manteniendo el ángulo de ataque y espesor de mezcla requeridos para conservar el equilibrio de fuerzas. Existen dos mecanismos para modificar el ángulo de ataque, y por lo tanto, el espesor de la mezcla: (1) rotando manualmente la regla con las manivelas de profundidad (punto de tiro fijo) y (2) cambiando la elevación del punto de tiro de forma manual o automática (manivelas fijas). Ver Figura 2.26.



(a) Regulación por Manivelas de Profundidad



(b) Regulación por Punto de Tiro

Figura 2.26: Regulación Ángulo de ataque

Fuente: Adaptado de Cedarapids (2015)

(1) Las manivelas de profundidad (*depth cranks*) son un mecanismo de ajuste ubicado en la parte posterior del brazo lateral. Se ubican una por cada lado de la regla y se utilizan para rotar manualmente la regla entorno al punto pivote y así modificar el ángulo de ataque (ver Figura 2.27). Al girar las manivelas hacia la izquierda se aumenta el ángulo de ataque y hacia la derecha se disminuye (en algunas pavimentadoras puede estar invertido). La intensidad de la respuesta varía de una regla a otra.



Figura 2.27: Regla de Extendido – Manivelas de Profundidad

Fuente: Sunkenberg (2010)

Al girar la manivela hacia la izquierda, la regla rotará en sentido anti-horario en torno al punto pivote aumentando su ángulo de ataque. Al aumentar el ángulo, más material fluye bajo la regla incrementando su resistencia a la compactación (aumento fuerza de sustentación). Al aumentar la fuerza vertical bajo la regla, ésta se elevará rotando en torno al punto de tiro para compensar las fuerzas actuantes, disminuyendo el ángulo de ataque hasta restaurar una nueva posición de equilibrio correspondiente al ángulo inicial pero con un mayor espesor de extendido (ver Figura 2.28). Esto se conoce como acción “auto-nivelante” de la regla.

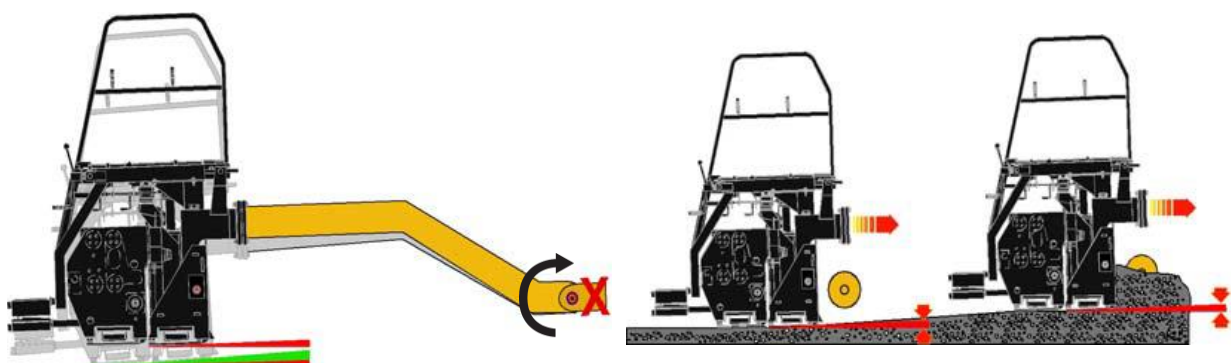


Figura 2.28: Regla de Extendido – Manivela, Aumento Ángulo de Ataque

Fuente: Caterpillar (2016)

(2) El segundo mecanismo para regular el espesor de extendido es cambiar la elevación del punto de tiro. Este mecanismo se utiliza normalmente en conjunto con un sistema de nivelación automático, el cual controla la posición del punto de tiro de tal forma que se mantenga un espesor de capa o perfil longitudinal previamente establecido. La posición del punto de tiro también se puede modificar manualmente para realizar pequeñas correcciones en el espesor de la capa y/o la conformación del perfil.

Como regla general, se considera un ratio de 8:1 entre el desplazamiento vertical del punto de tiro y el cambio en el ángulo de ataque. Por lo tanto, si el punto de tiro es desplazado verticalmente 25 mm (1 in), el ángulo de ataque cambiará en 3 mm (1/8 in) (Hunter, 2000, USACE, 2013). Ver Figura 2.29.

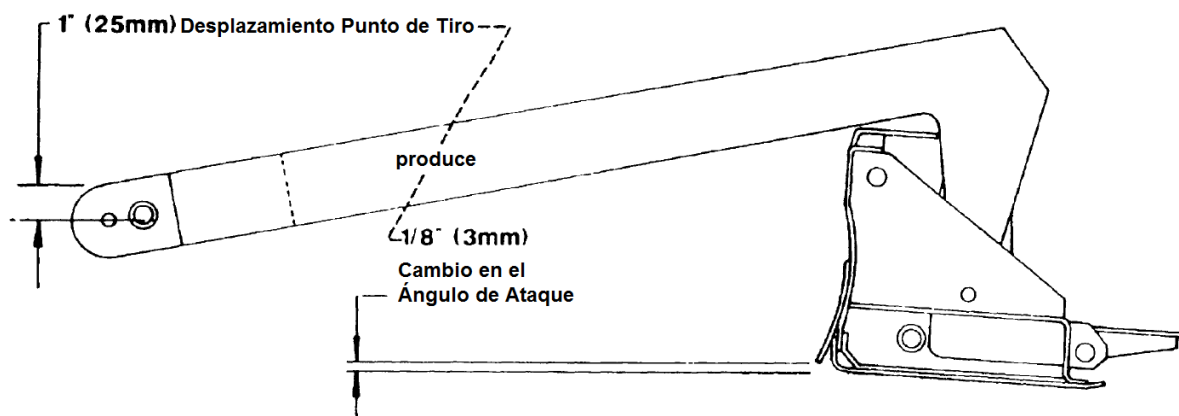


Figura 2.29: Regla de Extendido – Ratio de Profundidad

Fuente: Adaptado de Hunter (2000)

#### 2.3.3.4. Tiempo de respuesta de la regla

El tiempo de respuesta de la regla se refiere a la cantidad de tiempo requerido por la regla para completar un cambio en la profundidad de la capa debido a una modificación en el ángulo de ataque, sea este introducido manualmente con las manivelas de profundidad o mediante un cambio en la posición del punto de tiro (Cedarapids, 2015).

Si bien el cambio en el ángulo de ataque es inmediato, su efecto sobre el espesor de extendido es gradual y la regla deberá recorrer varias veces la longitud de arrastre (distancia horizontal entre el punto de tiro y punto pivote) para restablecer la posición de equilibrio y completar el ajuste en el espesor de la capa. Al respecto, tanto en guías de fabricantes como en la literatura técnica (Roberts et al., 1996, USACE, 2013, Blaw-Knox, 1997, Hunter, 2000, Cedarapids, 2015), se hace referencia a una distancia típica de aproximadamente 5 longitudes de arrastre para que la regla pueda completar un ajuste en el espesor de extendido.

El tiempo de reacción de la regla es el mismo independiente de la magnitud de cambio en el ángulo de ataque. Es decir, cualquiera sea el cambio en el punto de tiro o regulación en las manivelas de profundidad, la regla siempre tardará aproximadamente 5 longitudes de arrastre para alcanzar el nuevo espesor de equilibrio.

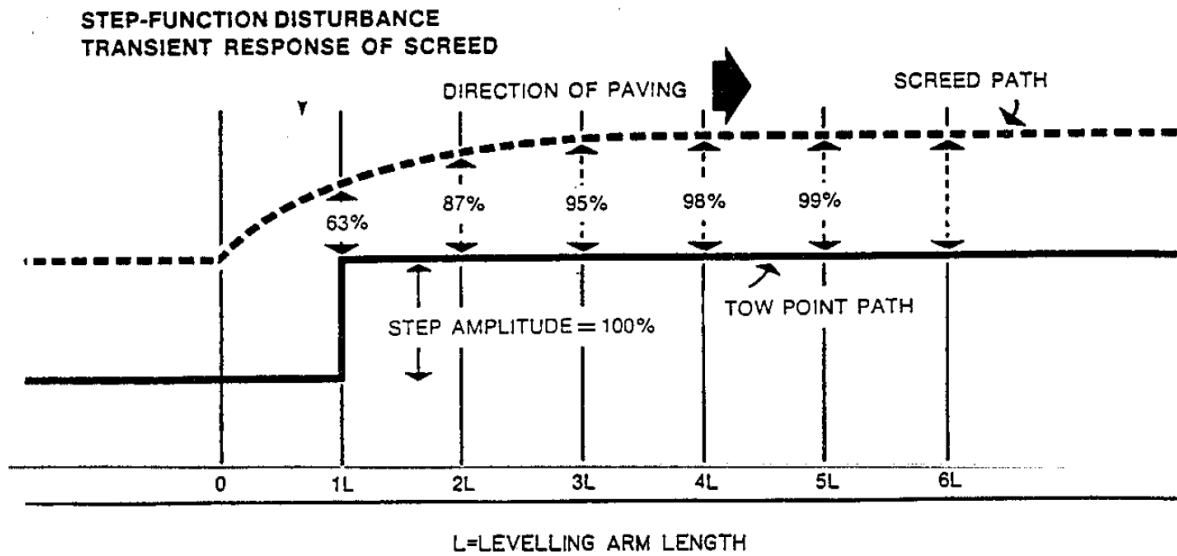


Figura 2.30: Regla de Extendido – Tiempo de Respuesta

Fuente: Roberts et al. (1996)

La Figura 2.30 representa la trayectoria vertical de la regla en función de la distancia recorrida (expresada en longitudes de arrastre) como respuesta a una distorsión introducida en el punto de tiro (función escalón). Se observa que el 63% del ajuste en el espesor se realiza durante la primera longitud de arrastre (1L), 87% al cabo de la segunda longitud, 95% en la tercera, 98% en la cuarta, y 99% al completar la quinta longitud de arrastre (5L). El resultado práctico de esta regla general es que, por ejemplo, para una longitud de arrastre de 3 m, se requiere del extendido de 15 m de mezcla para que la regla establezca un nuevo espesor de equilibrio debido a una regulación en el ángulo de ataque.

Este tipo de respuesta exponencial, muy empleada en teoría de señales y sistemas de control, se conoce como respuesta al escalón unitario de un sistema de primer orden lineal e invariante en el tiempo (LTI, por sus siglas en inglés *Linear Time-Invariant*), y puede ser expresada mediante la siguiente ecuación (Barber-Greene, 1972).

$$y = 1 - e^{-x/L} \quad (15)$$

Dónde:

y : Respuesta de la regla, expresada en porcentaje de la respuesta total (%)

x : Distancia recorrida

L : Longitud de arrastre

Reemplazando valores de  $x = L, 2L, 3L, 4L$  y  $5L$  en la Ecuación (15) se puede verificar que la respuesta de la regla es del 63%, 87%, 95%, 98% y 99% de la respuesta total respectivamente. Por lo tanto, de esta formulación se desprende el principio general del tiempo de respuesta equivalente a 5 longitudes de arrastre, aproximadamente, para que la regla pueda completar un ajuste.

Es importante mencionar que esta expresión matemática supone condiciones idealizadas de pavimentación, es decir, que el resto de las fuerzas actuantes sobre la regla permanecen constantes durante la respuesta.

### 2.3.3.5. Placa de corte o de impacto

El espesor y textura de la capa extendida también son afectadas por la posición de la placa de corte o de impacto (*strike-off plate*). Esta placa, al estar ubicada en la parte frontal de la regla, está en contacto directo con la carga de material y funciona como un dispositivo de corte para controlar la cantidad de mezcla que fluye bajo la regla hacia la placa alisadora. También tiene la función de absorber el desgaste que se produce en la nariz de la regla a medida que la mezcla impacta con el borde redondeado frontal de la placa de alisadora. La posición de la placa de corte es fijada o pre-establecida antes de comenzar la pavimentación, y su elevación no es regulada durante el extendido. Por defecto, la placa de corte se establece media pulgada ( $\frac{1}{2}$  in) por encima de la placa alisadora. Ver Figura 2.31.

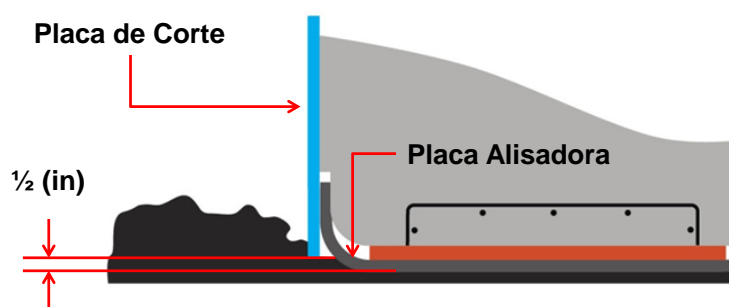


Figura 2.31: Regla de Extendido – Posición Correcta Placa de Corte

Fuente: Adaptado de Butler (n.d.)

La posición de la placa de corte en relación a la placa alisadora tendrá un impacto en el ángulo de ataque establecido en la posición de equilibrio. Si la placa de corte está muy alta, una gran cantidad de material ingresará hacia la placa alisadora provocando que la regla se eleve excesivamente para alcanzar la posición de

equilibrio, resultando en un espesor mayor al pre-establecido según el ángulo de ataque y posición del punto de tiro iniciales. Para compensar esta diferencia, se deberá reducir manualmente el ángulo de ataque durante el extendido, introduciendo un ángulo de ataque negativo y ocasionando que la regla trabaje sobre su borde delantero. Si se establece un ángulo de ataque negativo (nariz hacia abajo), la mayor parte del trabajo de compactación y enrasado será realizado por el frente de la placa alisadora. La superficie de contacto insuficiente entre la regla y la mezcla extendida resultará en una terminación superficial inconsistente. El esfuerzo en el borde frontal de la regla será excesivo, provocando un desgaste acelerado de la placa de corte y el frente de la placa alisadora, ver Figura 2.32(a). Además, durante detenciones parciales de la pavimentadora, por ejemplo para la recepción de un nuevo camión de despacho, la regla descansará su peso sobre el borde frontal induciendo una irregularidad en forma de depresión transversal sobre la capa extendida (asentamiento de la regla).

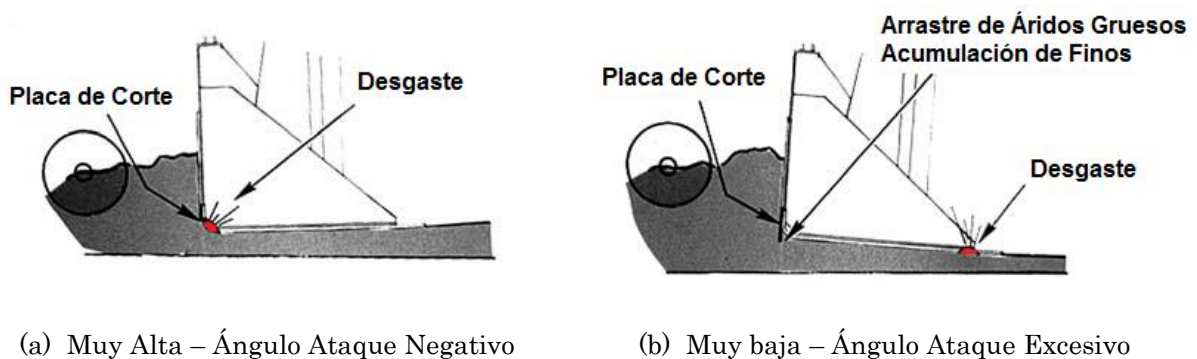


Figura 2.32: Regla de Extendido – Efecto Placa de Corte

Fuente: Adaptado de USACE (2013)

Por el contrario, si la placa de corte está muy baja, una cantidad insuficiente de material ingresará hacia la placa alisadora provocando que la regla descienda para alcanzar la posición de equilibrio. Este comportamiento resultará en un espesor de capa menor al pre-establecido inicialmente. Para compensar esta diferencia se deberá aumentar manualmente el ángulo de ataque durante el extendido, introduciendo un ángulo positivo excesivo y ocasionando que la regla trabaje sobre su borde trasero, ver Figura 2.32(b). La mayor parte del trabajo de compactación y enrasado será realizado por la parte trasera de la placa alisadora; resultando en una textura superficial abierta, un desgaste excesivo de la placa en

dicha zona, y un comportamiento errático de la regla. Al igual que en caso de un ángulo de ataque negativo, se inducirán deformaciones por asentamiento durante detenciones parciales de la pavimentadora ya que la regla descansará su peso sobre el borde trasero.

#### **2.3.3.6. Grupo de compactación**

La acción compactadora de la regla está relacionada con tres aspectos fundamentales del extendido; por un lado la densificación de la mezcla le proporciona capacidad de soporte para que la regla pueda flotar adecuadamente sobre ella y conformar una capa suave y regular según el espesor, pendiente y sección transversal requeridos. Por otro lado, la acción vibratoria de la regla facilita el sellado superficial de la capa para conseguir un acabado y textura uniforme. Por último, a mayor grado de pre-compactación impartida por la regla, menor será el efecto del espesor de capa sobre la compactación final proporcionada por los rodillos.

El grado de compactación inducido a la mezcla asfáltica por la regla es función de muchas variables; las propiedades de la mezcla (rigidez, diseño de la mezcla, contenido de asfalto, vacíos, etc.), la temperatura (de colocación, superficial y ambiental), el nivel de presión aplicado por la regla (peso propio sobre superficie de contacto), la cantidad de material fluyendo bajo la regla (espesor de capa), las irregularidades de la capa subyacente, entre otros, influyen en la capacidad de la regla para densificar la mezcla.

En términos generales, la compactación impartida por la regla es conseguida por la acción de dos mecanismos: Extrusión y Gradiente (ver Figura 2.33). (1) La compactación por extrusión ocurre en la parte frontal de la regla y está influenciada por la posición de la placa de corte y el borde frontal de la placa alisadora, cuya forma redondeada o biselada ejerce presión sobre el material asfáltico de tal manera que la mezcla es empujada bajo la regla para la conformación de la capa. (2) La compactación por gradiente ocurre a lo largo de la placa alisadora y está influenciada por el ángulo de ataque, posición del punto de tiro, carga de material, peso propio y vibración de la regla (amplitud y frecuencia).

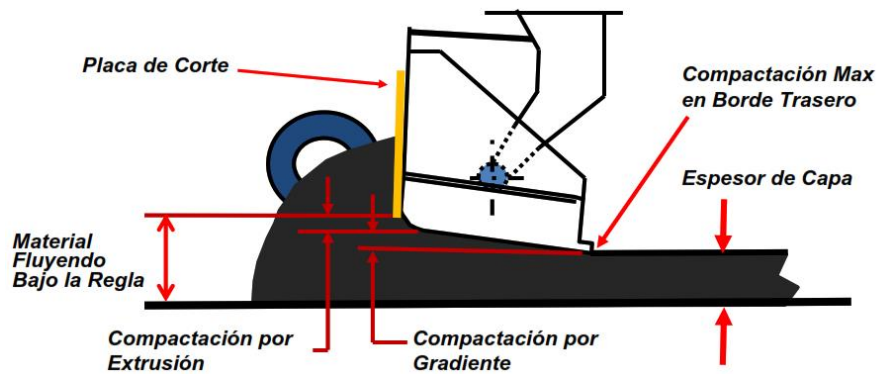


Figura 2.33: Mecanismos de Compactación – Extrusión y Gradiente

Fuente: Adaptado Vögele (n.d.)

Para asistir la pre-compactación y terminación superficial de la mezcla a medida que es colocada, la regla de extendido puede estar provista de un grupo de compactación compuesto por diferentes dispositivos: (a) Sistema de Vibración, (b) Barra Támper, y (c) Barras de Presión. Cada uno de estos sistemas provee diferentes niveles de compactación inicial. Ver Figura 2.34.



(a) Vibración

(b) Támper

(c) Barras de Presión

Figura 2.34: Regla de Extendido – Dispositivos de Compactación

Fuente: Vögele (2018)

En la actualidad, todas las reglas cuentan con un sistema de vibración que actúa junto al peso propio de la regla proporcionando una compactación inicial entre 75% al 85% de la densidad máxima teórica. La mayoría de los fabricantes incorporan además una barra támper como parte del grupo de compactación, consiguiendo aumentar entre 88% y 92% el grado de pre-compactación. En reglas diseñadas para conseguir una alta compactación inicial, se utilizan dispositivos

adicionales como doble tamper o barras de presión en la parte posterior de la regla, alcanzando densidades de compactación entre el 90% y 94%.

*a) Vibración*

La vibración de la regla es producida por un eje giratorio con pesos excéntricos cuya frecuencia (magnitud) y amplitud (intensidad) de vibración es regulable, ver Figura 2.35. La actuación del sistema hace vibrar el marco de la regla y la placa alisadora en contacto con el material. Este movimiento reduce la resistencia a la fricción entre las partículas de la mezcla asfáltica, promoviendo su reagrupación y en consecuencia consiguiendo su compactación. Aproximadamente entre un 75% y 85% de la densidad máxima teórica es conseguida por el efecto del peso propio y vibración de la regla.

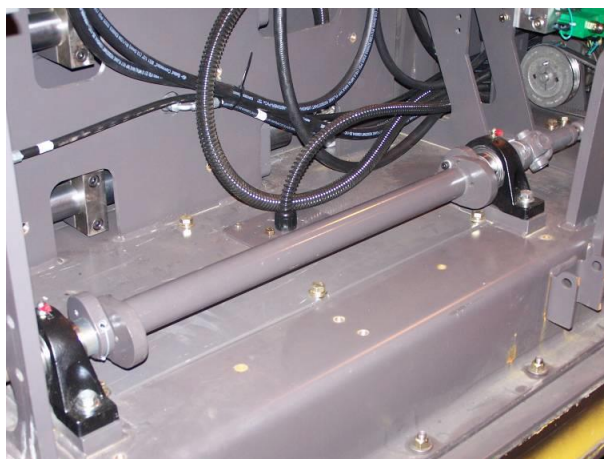


Figura 2.35: Dispositivos de Compactación – Sistema Vibratorio

Fuente: Sunkenberg (2010)

La frecuencia de vibración (número de vibraciones por minuto) es controlada por la velocidad rotacional del eje. Aumentar las revoluciones por minuto (rpm) del eje incrementará la frecuencia de vibración y por lo tanto el esfuerzo de compactación. La amplitud de la vibración aplicada (cantidad de fuerza) es regulada por la ubicación de los pesos excéntricos en el eje, cuya configuración es determinada según el espesor de la capa extendida; menor amplitud para capas delgadas y mayor amplitud para capas gruesas. Típicamente, para capas delgadas de hasta 3 cm o mezclas asfálticas con un tamaño nominal de agregado de hasta 6 mm, se requiere de una baja velocidad vibratoria de entre 1000 a 1200 (rpm). Para capas medianas en el rango de 3 a 10 cm los mejores resultados se

consiguen utilizando una velocidad media de vibración entre 1200 a 2100 (rpm). Capas gruesas, mayores a 10 cm, requieren mayores velocidades que en algunos tipos de reglas pueden alcanzar las 3000 (rpm).

La densidad de compactación conseguida también es función de la velocidad de pavimentación. A medida que la pavimentadora se desplaza más rápido, la regla permanece menos tiempo sobre cualquier punto de la sección transversal, reduciendo el esfuerzo de compactación aplicado por la regla.

#### *b) Barra támara*

El sistema de compactación mediante támara consiste en una barra que oscila verticalmente al frente de la placa alisadora (ver Figura 2.36). La acción apisonadora del támara facilita el flujo de material bajo la regla y provee un grado de compactación inicial a la mezcla. Esta pre-compactación inicial de la mezcla mejora su capacidad de soporte facilitando así la flotación de la regla sobre ella (se requiere menos ángulo de ataque).

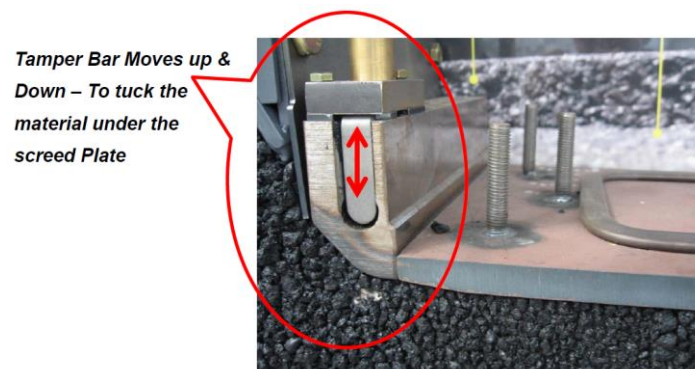


Figura 2.36: Dispositivos de Compactación – Barra Tamper

Fuente: Vögele (n.d.)

El támara emplea un movimiento vertical de alta amplitud y baja frecuencia, típicamente entre 300 y 1800 (rpm). El movimiento es generado por la rotación de un eje excéntrico. La correcta configuración del támara en función de la velocidad de pavimentación y espesor de la capa extendida es fundamental para conseguir un efecto óptimo de pre-compactación. A mayor velocidad del támara (frecuencia del golpe), mayor compactación. El recorrido vertical del golpe del tamper se debe ajustar según el espesor de la capa extendida; menor altura para capas delgadas y mayor altura para capas gruesas.

Para capas delgadas, se recomienda un golpe corto de hasta 2 mm a una muy baja velocidad (frecuencia). Para capas medianas, los mejores resultados se consiguen con un golpe de 4 mm. Para el extendido de capas gruesas superiores a 12 cm se recomienda una longitud máxima de golpe de 7 mm para conseguir resultados óptimos de compactación. Ver Figura 2.37.

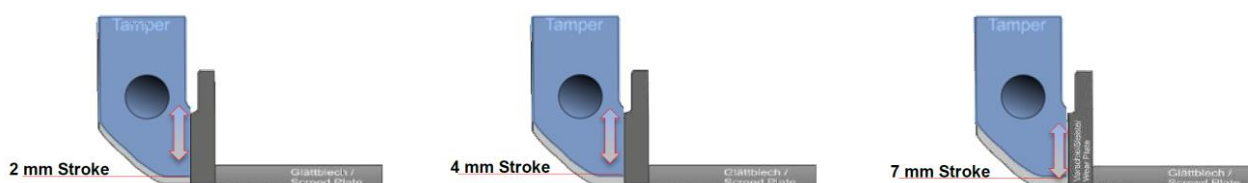


Figura 2.37: Dispositivos de Compactación – Recorrido Vertical del Tamper

Fuente: Vögele (2018)

En la práctica, la compactación ocurre en la cara inferior de la barra támara, donde el material entra en contacto con la barra y es confinado bajo la regla por el movimiento descendente de esta. Al ser una superficie de contacto pequeña, el efecto compactador del támara por si solo puede resultar perjudicial para la terminación superficial, induciendo pequeñas ondulaciones (marcas) en la superficie por cada golpe de la barra. Para evitar este inconveniente, el támara se debe utilizar siempre en conjunto con el sistema de vibración activado.

### c) Barras apisonadoras

Algunos fabricantes producen reglas denominadas de “alta compactación”, diseñadas para disminuir la dependencia de los rodillos para conseguir la densidad de diseño y reducir al mínimo la posibilidad de irregularidades inducidas durante la terminación final; en algunos casos permiten la colocación de pavimentos de mayor espesor en una sola capa, prescindiendo del extendido de una capa inferior nivelante; también, se disminuye el efecto de la temperatura al pavimentar en condiciones extremas, ya que el enfriamiento rápido en dichas condiciones ambientales es mucho menos probable en una capa con alta precompactación inicial.

Las reglas de “alta compactación” consiguen su cometido mediante una serie de innovaciones en el grupo de compactación; como el uso de doble barra támara, sistemas de vibrado de mayor amplitud o la introducción de barras de presión en el borde posterior de la placa alisadora (ver Figura 2.38).

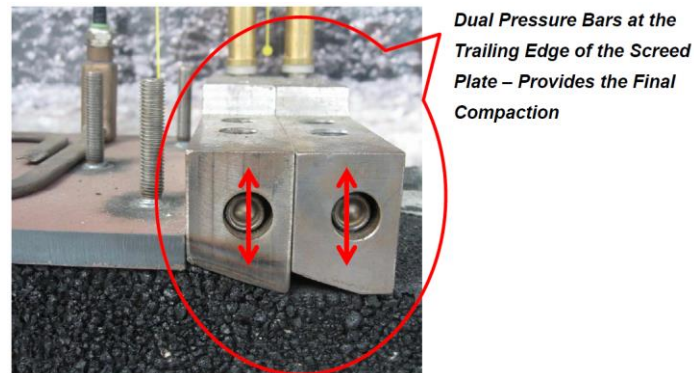


Figura 2.38: Dispositivos de Compactación – Barras de Presión

Fuente: Vögele (n.d.)

Las barras de presión, a diferencia del támara, están en contacto constante con el material asfáltico y lo presiona por medio de impulsos hidráulicos de alta frecuencia. El avance de la barra de presión entre dos impulsos, que resulta de una combinación de frecuencia y velocidad de extendido, es extremadamente breve. Por ejemplo, a una velocidad de pavimentación de 5 m/min y una frecuencia de 50 Hz, el avance de la barra es cercano 0.2 mm recorridos en 0.007 s. La combinación de rápida aceleración e impulsos de alta frecuencia con que operan las barras de presión resulta en elevados valores de fuerza actuando sobre la mezcla asfáltica, consiguiendo un mayor nivel de compactación respecto del obtenido con una regla tradicional.

#### **2.3.4. Sistemas de nivelación asistida**

A medida que se realiza el extendido, el tractor de la pavimentadora se moverá hacia arriba o abajo en respuesta al perfil longitudinal de la superficie que se está pavimentando. El movimiento del tractor se traduce en desplazamientos verticales del punto de tiro y, en consecuencia, en cambios del ángulo de ataque. Cada vez que el tractor pase sobre un montículo o una depresión el ángulo de ataque cambiará, modificando la cantidad de mezcla asfáltica que fluye bajo la regla (espesor de capa). Dado el tiempo de respuesta requerido para completar el ajuste (5 longitudes de arrastre), la regla reaccionará más lentamente que el tractor a los movimientos verticales del rodado, compensando las irregularidades de la capa inferior con una mayor cantidad de material extendido sobre las depresiones y una menor cantidad en los montículos. Este comportamiento de la regla, o principio autonivelante, determinará la conformación del nuevo perfil

longitudinal cuando la extendidora es operada en forma manual o sin un sistema de nivelación asistida.

Para intentar suavizar los movimientos verticales del punto de tiro durante el extendido, los fabricantes de pavimentadoras han introducido sistemas de nivelación automáticos para el control de la regla, de forma que el sistema de nivelación controle la elevación del punto de tiro en relación a una referencia longitudinal diferente a la impuesta por el rodado de la pavimentadora.

#### **2.3.4.1. Principio de funcionamiento del sistema de nivelación**

El objetivo de los sistemas de control es mantener constante la elevación del punto de tiro en relación a una referencia predeterminada, independiente del movimiento de la unidad tractora en respuesta a los cambios de perfil de la superficie que se está pavimentando. De este modo, las desviaciones en la superficie del pavimento son promediadas sobre la longitud de la referencia.

Mantener constante la elevación de los puntos de tiro permite que la regla mantenga un ángulo de ataque más consistente, lo que a su vez resulta en el extendido de una capa más suave y regular. Para ello, es necesario establecer en todo momento cuál es la posición de la regla y compararla con la referencia que podrá ser fija o dinámica.

El sistema de nivelación utiliza un sensor electrónico para mantener la cota establecida (o punto cero) en relación con la referencia. Si algo hace que el sensor se desvíe del valor de consigna se envía una señal electrónica a la válvula solenoide del punto de tiro, causando que el cilindro de control suba o baje para restablecer el punto cero en el sensor (ver Figura 2.39). Cuando se levanta el punto de tiro, aumenta el ángulo de ataque en la regla, causando un incremento del espesor extendido. Cuando se baja el punto de tiro, disminuye el ángulo de ataque, lo que hace que la regla disminuya su profundidad.

El nivel de rasante requerido puede venir determinado por una referencia fija o bien por un valor resultante de la regularización, o promediación, del perfil longitudinal existente en la base sobre la que se extiende (referencia móvil).

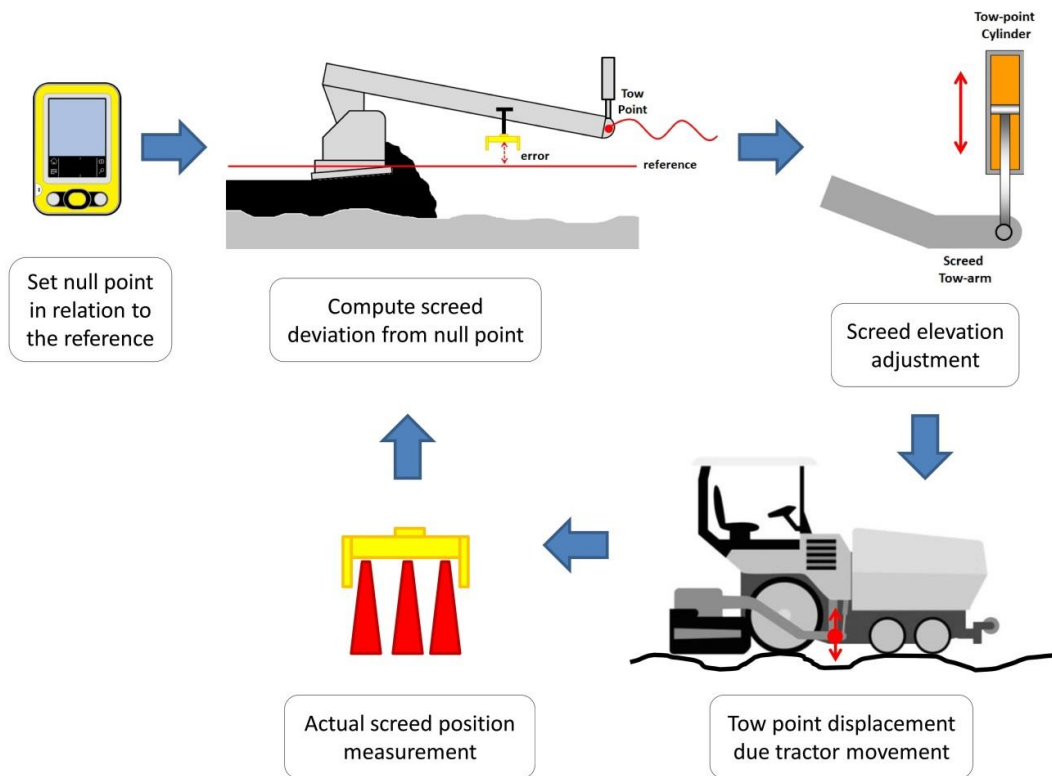


Figura 2.39: Principio de Funcionamiento del Sistema de Nivelación

#### 2.3.4.2. Referencias fijas

Las referencias fijas se emplean cuando prima la obtención de una cota determinada frente a otros condicionantes. Pueden ser un cable instalado para tal fin, un haz láser, la junta constructiva de una capa adyacente, un bordillo existente o cualquier otra referencia tangible, o a partir de las cotas del proyecto precargadas en un sistema de guiado 3D.

Las referencias fijas tienen en común que son independientes de la superficie real sobre la que se apoya la pavimentadora, por lo que el espesor final que será extendido en cada punto es desconocido a priori. Por lo tanto, el perfil final una vez compactado el firme se verá influido por el grado de asentamiento que en cada punto haya sufrido la capa, pudiendo ocurrir desviaciones respecto del perfil teórico.

##### a) *Uso de cable o lienza*

En este caso, la referencia corresponde al perfil teórico del proyecto trasladado físicamente a la obra mediante la colocación de un cable o lienza. Como el cable debe ser instalado previamente por equipos de topografía, la precisión de la

rasante obtenida en el extendido dependerá directamente de la calidad de trabajo en la instalación del cable.



Figura 2.40: Referencia Fija – Cable

Fuente: Página Web <https://constructionmentor.net/asphalt-paver-operation/>

Cualquier deflexión en la instalación del cable será palpada por el sensor y transmitida hacia el sistema de control, que actuará sobre el punto de tiro, resultando en irregularidad superficial y desviaciones de la rasante extendida respecto de la proyectada. Por lo tanto, el cable debe ser instalado muy tenso para evitar el efecto de catenaria entre los postes de apoyo. Típicamente se utilizan puntos de apoyo cada 8 – 10 m como máximo. Para la pavimentación de curvas horizontales puede ser difícil el correcto replanteo de la rasante mediante cables, ya que el radio de la curva debe ser aproximado por una sucesión de rectas.

El uso de cable correctamente instalado provee de una excelente referencia tangible. Sin embargo, dado el tiempo y recursos que se requieren para la instalación del sistema, su uso se restringe a proyectos o sectores de obra donde el cumplimiento de una rasante específica es extremadamente importante.

#### *b) Haz de laser*

La tecnología láser ha sido empleada con éxito en proyectos de pavimentación como una referencia fija. Como alternativa al uso de cable, su uso es recomendado en ubicaciones donde hay una buena distancia de visibilidad y el pavimento a extender tiene pendiente constante.

Un dispositivo emisor transmite una señal laser que es captada por un receptor montado en la extendidora. Luego, el sistema de control regulará la posición del

punto de tiro como respuesta a su desviación respecto del láser. Para evitar falsas señales ocasionadas por algún objeto que se cruce sobre la trayectoria del láser, el sistema de control incluye un retardo que permite la interrupción momentánea del láser sin realizar ajustes al punto de tiro.

La aplicación de la nivelación láser, al no poder reproducir más que planos en el espacio, se reduce generalmente al extendido de plataformas en puertos, aeropuertos o zonas extensas de aparcamientos.

*c) Juntas de pista adyacente o bordillos*

Consiste en utilizar una referencia fija, que a diferencia del cable o laser, está construida de forma adyacente al área de pavimentación. En este caso, el objetivo será replicar la rasante de dicha referencia. Un caso común del uso de esta referencia es al pavimentar varias pistas adyacentes de forma consecutiva, una vez pavimentada la primera, la pista contigua se “apoya” en la terminación de la anterior para replicar el perfil. Ver Figura 2.41.



a) Igualación de Junta

b) Igualación de Bordillo

Figura 2.41: Referencia Fija – Juntas o Bordillos

Fuente: Topcon (2009)

Este sistema se debe utilizar solo cuando la referencia que está siendo copiada ya cuenta con un perfil correcto tanto en elevación como en regularidad. Normalmente se utiliza en el extendido de capas de rodado.

*d) Sistema de guiado 3D*

El empleo de cables u otras referencias físicas posibilita adoptar formas complejas en el espacio pero, al igual que la referencia láser, están sujetas a

posibles errores de establecimiento que introducen desviaciones entre lo definido en proyecto y la posición real de la referencia a seguir.

Los sistemas de guiado 3D descartan los posibles errores de establecimiento en la referencia y permiten a su vez desarrollar formas de gran complejidad. Tiene en común con todas las expuestas anteriormente su desconocimiento del perfil real sobre la que se apoya la pavimentadora, y en consecuencia del espesor final extendido en cada punto.

#### **2.3.4.3. Referencias móviles**

Si el objetivo principal que se persigue es una buena regularidad superficial del pavimento, es conveniente optar por el empleo de referencias dinámicas, cuya misión es regularizar la capa subyacente mediante la promediación de larga distancia. En este caso, la nivelación durante el extendido ya no depende de la perfección de la referencia sino que, de manera móvil, se determina el espesor de capa más adecuado para regularizar la rasante existente.

Este tipo de sistemas se basa en un dispositivo de nivelación longitudinal conectado físicamente a la pavimentadora y que se desplaza junto a ella durante el extendido. El instrumento de nivelación auscultará continuamente la superficie de apoyo, estableciendo una nueva referencia como resultado de promediar las irregularidades de la capa subyacente. Por lo tanto, la capacidad de regularización del sistema estará determinada por la longitud del instrumento empleado para realizar la promediación. Dependiendo de cómo se realiza el muestreo de la superficie existente, existen dos tipos de referencias móviles: de contacto o flotantes.

A diferencia de una referencia fija, la referencia móvil no garantiza que la mezcla extendida cuente con la cota especificada. La elevación conseguida estará determinada por la cota de la capa subyacente y el espesor extendido.

##### *a) Referencias de contacto*

Corresponden a un instrumento longitudinal rígido (viga o tubo de nivelación) que se apoya directamente sobre la superficie a pavimentar y desliza sobre ella en forma de ski. La referencia está dada por un cable tensado longitudinalmente entre ambos extremos del dispositivo. De este modo, a medida que los extremos del ski se mueven hacia arriba y hacia abajo en respuesta al deslizamiento sobre la superficie existente, se establece una referencia móvil dada por la pendiente del cable. Un sensor detectará las desviaciones de la referencia móvil respecto de

la posición nula, controlando la posición del punto de tiro para compensar la desviación. El sensor de pendiente debe instalarse en el medio de la viga de nivelación.

Un inconveniente con el uso de contactos rígidos es el hecho de que en puntos altos singulares, como un pequeño montículo, el extremo frontal del ski deslizará hacia arriba (con pendiente positiva) por encima del defecto hasta el punto medio de la viga; donde a modo de balancín, cambiará su pendiente y deslizará hacia abajo (con pendiente negativa) hasta que el extremo trasero del instrumento deje atrás el defecto. Como resultado el defecto será replicado por el sistema de nivelación, aunque atenuado sobre la longitud de la viga.

Para salvar este inconveniente, otros dispositivos han restringido el contacto con la superficie a una serie de zapatas o patines conectados a la parte inferior de la viga de nivelación. Las zapatas pueden ser oscilantes o estar amortiguadas con resortes, de modo que uno o varias zapatas pueden pasar sobre puntos singulares altos y bajos en la superficie de apoyo, u otras interferencias como piedras o restos de mezcla asfáltica, sin modificar la pendiente de toda la viga. Ver Figura 2.42.



Figura 2.42: Referencia Móvil – Viga con Zapatas de Apoyo

Fuente: Brock and Hedderich (2017)

#### *b) Referencias sin contacto o flotantes*

La referencia móvil flotante consiste en una viga de nivelación que no está en contacto directo con la capa de apoyo. El muestreo de la superficie se realiza de

forma digital por sensores ultrasonido. Típicamente se disponen 3 o 4 sensores a lo largo de la viga. Existen sensores simples, o de una célula, que emiten una sola señal cuyo valor se considera representativo de la elevación de la rasante existente en dicho punto; o sensores múltiples, que emiten hasta 5 señales cada uno para obtener diferentes lecturas representativas de la rasante existente bajo el sensor.

Luego, la referencia utilizada para la nivelación estará dada por el promedio de las lecturas validas de todos los sensores. La detección sin contacto permite trabajar sobre todo tipo de superficies; aglomerado, zahorras, etc. sin problemas de adherencia o hundimiento.



Figura 2.43: Referencia Móvil – Viga Flotante con Sensores Múltiples

Fuente: Página Web <https://mobacommunity.com/>

#### 2.3.4.4. Ajuste del punto de tiro

La modificación del ángulo de ataque de la regla se realiza a través de la variación de altura del punto en el que los brazos de arrastre de la regla se unen a la unidad tractora de la extendidora. Estos puntos se denominan puntos de tiro (Sección 2.3.3.2).

Cada uno de estos puntos está suspendido de un cilindro hidráulico que permite elevar o descender su posición con respecto a la superficie a pavimentar. Dada la capacidad de torsión de la regla y el hecho de que los dos puntos de ajuste tengan circuitos de control independiente, permite un control independiente de ambos lados de la regla.

Los circuitos hidráulicos de cada costado disponen de una electroválvula que recibe señales desde el controlador del sistema de nivelación en función de la información de la que este dispone. La unidad de control evalúa de manera continua la posición real de la regla en relación al valor de consigna introducido en el mismo. Para evaluar la correcta posición de la regla con relación al valor de consigna que se ha establecido con respecto a la referencia dispuesta se emplean diversos sensores que actúan como sistemas de medición.

Los equipos de nivelación pueden presentarse como un único cuerpo que engloba las funciones de sensor y controlador, o bien separados como en los modernos sistemas modulares.

Los sistemas de nivelación pueden ser analógicos o digitales. Los primeros son más precisos pero no permiten el filtraje de errores de medición. Los sistemas digitales posibilitan el descarte de mediciones no deseadas y la promediación de diferentes medidas. Puede incluso combinarse un sensor digital y uno analógico controlando cada uno de ellos un lado de la máquina.

#### *a) Sensores análogos*

Con relación a los controles de altura, si bien su precisión es muy buena, deben establecer contacto con la misma por lo que, en el caso de leer una línea de referencia, la presión ejercida sobre la misma por el brazo palpador acentúa las deformaciones que experimenta la misma debida a su propio peso. Además de los posibles errores ocasionados por tropiezos del palpador con los elementos de sujeción de la línea estos sistemas carecen de medios para descartar medidas anómalas por lo que, al limitarse a reportar la medición efectuada, sea cual sea, están sujetos a posibles fallos debidos a caídas de la línea de referencia u otras contingencias.

#### *b) Sensores Digitales*

El tratamiento de la información digitalizada por parte del controlador posibilita además una interpretación más inteligente de las lecturas llevadas a cabo por los sensores. Permite el filtraje y la promediación de las mediciones así como la omisión de lecturas no relacionadas con la referencia a seguir.

#### 2.3.4.5. Posición del sensor en relación a la regla

La posición del sensor en relación a la regla determina que tan rápido la regla responderá a un cambio en el valor de consigna (*null point*) del sensor, afectando en consecuencia el perfil o la regularidad superficial.

La ubicación del sensor se convierte en el punto de control de la regla y el punto de tiro se convierte en un punto de ajuste para subir o bajar el brazo de la regla y reestablecer el valor de consigna en el sensor. La longitud efectiva de arrastre es en este caso la distancia entre el punto de control (sensor) y el punto pivote (extremo trasero de la regla). Debido a que la regla debe recorrer cinco longitudes de arrastre para reaccionar a un cambio en el punto de tiro, acortar la longitud de arrastre efectiva se traduce en una reducción de la distancia que debe recorrer la pavimentadora para completar el ajuste y, en consecuencia, en una disminución del tiempo de respuesta.

De acuerdo con lo anterior, posicionar el sensor hacia el extremo de la regla acorta el tiempo de reacción. Una regla más sensible, o reactiva, es deseable cuando es necesario copiar una referencia fija (construir perfil), como en el caso del seguimiento de un cable o una cuneta. Para estas aplicaciones, los fabricantes recomiendan ubicar el sensor a una distancia de  $2/3$  a  $3/4$  alejado del punto de tiro (relativo a la longitud de arrastre). Ver Figura 2.44(a).

Por el contrario, posicionar el sensor hacia el punto de tiro ralentiza el tiempo de respuesta de la regla. Cuando se requiere una superficie suave y regular (construir regularidad) es necesaria una regla menos sensible o reactiva, como en el caso de utilizar una viga de nivelación flotante o de contacto. En estas aplicaciones, los fabricantes recomiendan ubicar el sensor a una distancia de  $1/4$  a  $1/3$  alejado del punto de tiro (USACE, 2013, Topcon, 2014, Cedarapids, 2015). Ver Figura 2.44(b).

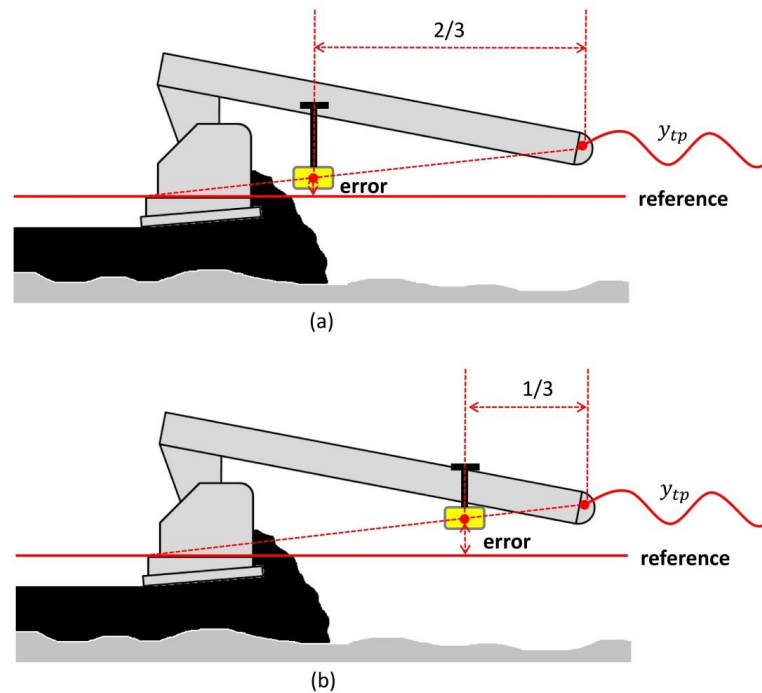


Figura 2.44: Posición del Sensor en Relación a la Regla

### 2.3.5. Compactación final e influencia en el IRI

Una vez extendida en obra la mezcla asfáltica, se procede a su compactación final con los rodillos, hasta alcanzar, como mínimo, el porcentaje de la densidad de referencia establecido en las especificaciones técnicas del proyecto o en la normativa vigente.

La compactación es el proceso mediante el cual la mezcla asfáltica es comprimida y reducida en volumen. Como resultado del proceso de compactación, los agregados cubiertos con asfalto en la mezcla son forzados a acercarse entre sí; lo cual incrementa su trabazón mecánica y la fricción entre partículas, reduciendo así el contenido de huecos en la mezcla e incrementado su densidad.

Si durante el proceso de extendido se han seguido las recomendaciones constructivas indicadas en las secciones anteriores, consiguiendo una mezcla de buena homogeneidad granulométrica y térmica, así como una capa de espesor constante en toda su superficie tanto longitudinal como transversalmente, y una pre-compactación adecuada. Entonces, en la compactación final por parte de los rodillos solo habría que procurar no dañar la capa.

Siendo homogénea la compactación, si la capa sobre la que se actúa no lo es, quedará irregularmente compactada y, por consiguiente, con un IRI deficiente.

En muchas ocasiones el buen IRI que deja el enrasado uniforme de la extendedora empeora con la compactación final, por las deformaciones que se producen en capas heterogéneas en espesor, o en granulometría o en temperatura o como combinación de estos tres factores.

Según el tipo de mezcla asfáltica y el espesor de la capa a compactar, se deberá determinar el equipo de compactación más adecuado, el número de pasadas, amplitudes y frecuencias de la vibración, presión de inflado en rodillos neumáticos, etc. Una forma de comprobar previamente el comportamiento en obra de una determinada mezcla asfáltica, el equipo de extendido y, especialmente, el plan de compactación; es la realización de un tramo de prueba antes de iniciar la puesta en obra definitiva.

Algunas recomendaciones o reglas prácticas para una adecuada compactación son, entre otras, las siguientes: La velocidad de todos los rodillos debe ser uniforme y no debe haber cambios bruscos, ni en las trayectorias, ni en las inversiones de sentido; Las ruedas motoras del rodillo, especialmente en pendiente, deben ser las más próximas a la extendedora para evitar la formación de arrollamientos (corrugaciones u ondulaciones transversales). Con tambores de diámetro pequeño, el riesgo de arrollamiento aumenta, junto con el de conseguir un IRI no satisfactorio; Debe comenzar a compactarse por la parte más baja de la sección transversal, avanzando hacia la zona más elevada solapando en pasadas sucesivas; Deben evitarse las paradas de los compactadores sobre mezcla todavía caliente. Si la temperatura ambiente es baja, hay que iniciar la compactación inmediatamente detrás del extendido y aumentar la velocidad de la misma. En este caso es recomendable incrementar los medios disponibles para conseguir la compactación de la mezcla en el menor tiempo posible; La velocidad es muy importante cuando se usa rodillo vibratorio, porque al incrementar la velocidad, la distancia entre impactos aumenta y, en consecuencia, la compactación disminuye, por lo que se requerirá mayor número de pasadas. La velocidad ideal está entre 3 y 5 km/h.

Debe evitarse, en cualquier caso, la compactación a temperaturas por debajo de 90°C (o más concretamente la que, para cada tipo de mezcla asfáltica se establezca en la fórmula de trabajo correspondiente), porque será, en general, poco eficaz en función de la curva de viscosidad/temperatura del betún asfáltico, y no se producirá la necesaria disminución de huecos. Por el contrario, tampoco se debe compactar por encima de la temperatura máxima de compactación establecida en la fórmula, para evitar el posible arrollamiento de la mezcla. Por lo

tanto, la compactación debe efectuarse siempre respetando el intervalo de temperaturas de compactación que viene fijado en la fórmula de trabajo de la mezcla.

## 2.4. Eficiencia de nivelación y regularidad IRI

Como se ha mencionado anteriormente, el rodado de la pavimentadora sobre las irregularidades de la superficie a pavimentar provocará movimientos en el chasis del tractor que afectarán la posición del punto de tiro y, en consecuencia, el ángulo de ataque de la regla. Por lo tanto, es de interés conocer la respuesta de la regla respecto de una función sinusoidal de cualquier longitud de onda; asimilable a la trayectoria ondulatoria del punto de tiro como resultado del rodado de la pavimentadora (Barber-Greene, 1972).

Este análisis se realiza determinando la respuesta en frecuencias del sistema, para lo cual es conveniente expresar la repuesta de la regla en términos de su función de transferencia. Como se ha indicado anteriormente, la respuesta de la regla se asimila a la de un sistema lineal de primer orden, cuya función de transferencia en el dominio de Laplace ( $s$ ) está dada por la Ecuación (16). La obtención de esta función se detalla posteriormente en la Sección 4.2.2.

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (16)$$

Dónde:

$\tau$  : constante de tiempo ( $L_b/V$ )

$L_b$  : Longitud de arrastre

$V$  : Velocidad de pavimentación

Considerado una longitud de arrastre  $L_b = 3$  m y una velocidad estándar de extendido  $V = 5$  m/min, se ha calculado con el *software* Matlab® la respuesta en frecuencias del sistema para una perturbación sinusoidal en el punto de tiro considerando longitudes de onda desde 0.1 m a 100 m. Los resultados se presentan gráficamente en la Figura 2.45 (gráfica azul).

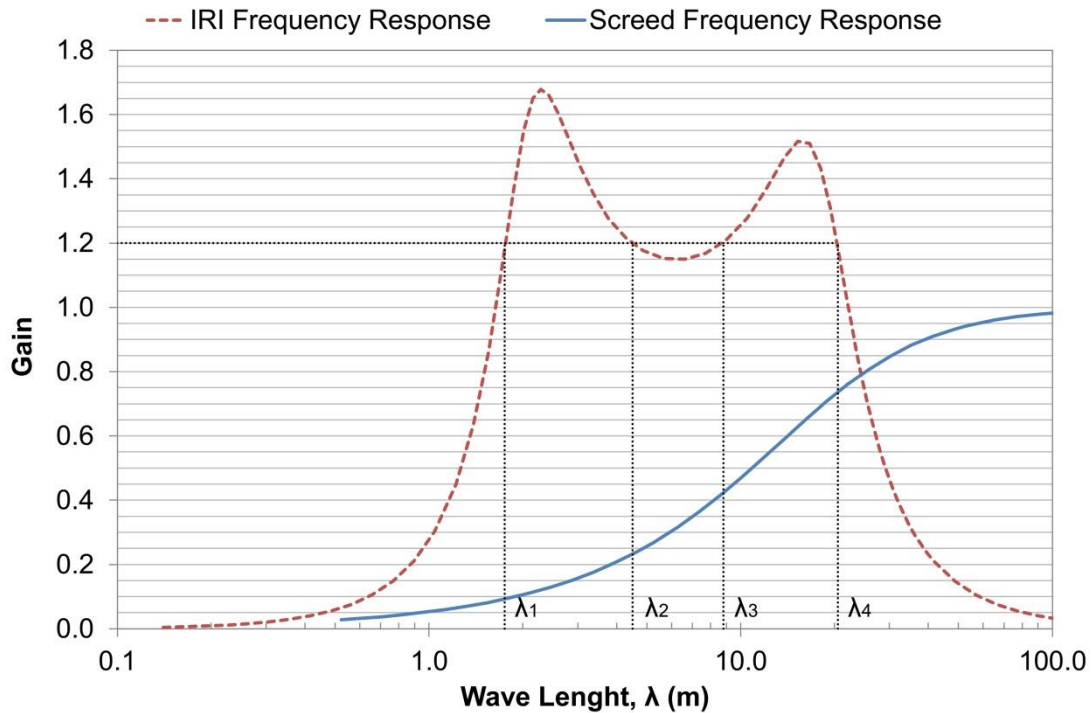


Figura 2.45: Respuesta en Frecuencias – IRI vs Regla de la Extendedora

La respuesta en frecuencias representa la respuesta de la regla respecto de una función sinusoidal de cualquier longitud de onda, expresada en términos de la ganancia (*Gain*) o razón entre la amplitud de la señal de salida respecto a la señal de entrada. Por ejemplo, cuando el punto de tiro sigue una trayectoria sinusoidal con longitud de onda 4 m (señal de entrada), la respuesta de la regla (señal de salida) será una senoide con una amplitud del 20% respecto de la señal de entrada. En otras palabras, la regla ha “suavizado” la senoide de entrada en un 80%. Este ratio entre la señal de entrada/salida se denomina eficiencia de nivelación de la regla.

La interpretación de la respuesta en frecuencias permite observar una característica fundamental del funcionamiento autonivelante de la regla: ***la regla disminuye su eficiencia de nivelación a medida que aumenta la longitud de onda de los defectos que causan la irregularidad.*** Por lo tanto, la respuesta de nivelación de la pavimentadora está directamente relacionada con la naturaleza de los defectos o irregularidades del perfil existente. Este comportamiento, ya advertido en estudios anteriores (Barber-Greene, 1972, Ulrich, 1991, Gourdon and Peyret, 1991, Sanchez Blanco, 1968), es la razón de que las extendedoras utilicen sistemas de control automático mediante viga de nivelación

(promediación de larga referencia) para regular de forma asistida la posición vertical del punto de tiro y compensar la menor eficiencia de nivelación en defectos de longitud de onda mayores a la longitud base de la extendedora.

El concepto de la respuesta en frecuencias es clave para explicar la variabilidad observada en los modelos de predicción para el IRI de construcción existentes en la literatura. Para este análisis se ha empleado la función de transferencia del modelo de IRI; calculada en Matlab® a partir de la transformada de Laplace del sistema de ecuaciones diferenciales que definen el modelo de cuarto de carro (Melis, 2008). El resultado se incluye en la Figura 2.45 (gráfica roja), en conjunto con la respuesta en frecuencias de la regla de la extendedora (gráfica azul).

La respuesta en frecuencias del IRI indica que se podrá obtener un mismo valor de IRI para defectos de diferente longitud de onda. Por ejemplo, se puede observar que para irregularidades de 4 longitudes de onda distintas en el rango de corta ( $\lambda_1 = 1.8$  m), media ( $\lambda_2 = 4.5$  y  $\lambda_3 = 8.8$  m) y larga ( $\lambda_4 = 21$  m), el modelo de IRI obtiene una misma respuesta de aprox. 1.2 veces la amplitud de la señal de entrada. Sin embargo, para estos mismos defectos, la regla de extendido utilizada por la pavimentadora (color azul) tendrá diferentes eficiencias de nivelación, de aprox. 90%, 78%, 58% y 25% respectivamente. Esta diferencia de la respuesta en frecuencias entre el IRI y la regla de la extendedora explicaría el hecho de que para obras con la misma regularidad IRI inicial, y diseño de rehabilitación, se pueden conseguir terminaciones con IRI de construcción diferentes, lo cual dependerá de la naturaleza de la irregularidad existente en términos de sus longitudes de onda componentes.

De acuerdo con el análisis realizado, resulta necesario abordar esta problemática considerando las características de la regularidad, en términos de sus longitudes de onda componentes, y su interacción con la pavimentadora durante el extendido.

## 3. Metodología

### 3.1. Introducción

Considerando la revisión de antecedentes y análisis realizados en los capítulos anteriores, se propone un enfoque original para el estudio de esta problemática, consistente en el desarrollo de un modelo de predicción del IRI de construcción basado en la respuesta de nivelación la pavimentadora durante el proceso constructivo; la cual para un *input* dado por el perfil longitudinal existente, producirá un *output* correspondiente al nuevo perfil longitudinal del pavimento rehabilitado.

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del modelo; se describe el enfoque de modelización empleado, los elementos o aspectos del proceso de extendido a modelizar, la formulación conceptual del modelo y los pasos metodológicos definidos para la calibración.

### 3.2. Formulación del modelo

#### 3.2.1. Enfoque de modelización

Existen diferentes formas de abordar el problema de construir un modelo matemático que represente un determinado proceso. Comúnmente el modelo de un sistema está basado ya sea en la descripción física completa del proceso, o por el contrario, basado fundamentalmente en datos experimentales. Entre ambos planteamientos existe un enfoque intermedio, en el cual considerando cierta comprensión física del proceso, existen parámetros que deben ser determinados mediante datos experimentales (Jelali and Kroll, 2003).

El proceso real de pavimentación es un sistema altamente complejo que involucra muchas variables e interacciones. Un modelo teórico que incluyese "todos" los posibles fenómenos físicos que intervienen en el proceso de pavimentación sería demasiado complejo para ser utilizado directamente. Un modelo tan complejo y típicamente no-lineal implicaría una gran cantidad de parámetros que sólo se conocen dentro de un cierto rango o incluso se desconocen por completo. Aunque este tipo de modelos teóricos son útiles para el diseño y la comprensión física de

las piezas individuales que componen la maquinaria, no resulta práctico para el análisis del comportamiento de la extendidora objeto de esta investigación.

Para efectos de la presente investigación el enfoque de modelización empleado se basa en la idea de que, en términos de las características de respuesta del sistema (efecto nivelador de la pavimentadora), no es necesario describir la estructura física detallada del proceso real. En cambio, se puede utilizar un conjunto de modelos físicos estándar para describir la respuesta dinámica de un proceso real más complejo. Luego, los parámetros del modelo se estiman mediante datos experimentales. De esta forma, el modelo resultante proporciona una relación entrada-salida del proceso.

Por lo tanto, el proceso de pavimentación fue modelizado como un sistema dinámico que para una entrada (*input*) dada por las características del perfil original producirá una salida (*output*) correspondiente al nuevo perfil longitudinal del pavimento como resultado de la transformación de las longitudes de onda componentes del perfil durante la colocación de la mezcla asfáltica.

### 3.2.2. Sistemas dinámicos

Un sistema se define como cualquier conjunto de elementos que interactúan entre sí para los cuales existen relaciones de causa-efecto (*input-output*) entre sus variables. La característica más importante de esta definición radica en que para efectos de modelado y análisis del sistema se deben tener en cuenta las interacciones entre las variables, en lugar de tratar los elementos individuales por separado (Close et al., 2002).

Las **entradas** al sistema son señales o funciones temporales a través de las cuales el sistema recibe información. Estos estímulos contribuyen a generar cambios en algunas o en todas las variables del proceso; estas últimas también son señales puesto que pueden ser descritas como funciones del tiempo. Las señales del proceso elegidas para observar el comportamiento del sistema se conocen como **respuestas** o **salidas** del sistema.

Las respuestas de un sistema pueden depender también de la información existente en el instante en que su comportamiento empieza a ser observado (condiciones iniciales). Los sistemas con esta característica se denominan sistemas dinámicos (Salgado et al., 2014).

De acuerdo con lo anterior, el análisis de sistemas guarda relación con el comportamiento de los sistemas en el tiempo, el cual depende de:

- a) Los elementos que lo forman y su interconexión, descritos mediante un modelo matemático.
- b) Las entradas, excitaciones o estímulos aplicados al sistema.
- c) La historia del sistema, condensada en un conjunto de condiciones iniciales.
- d) La variable independiente de tiempo (cuando los elementos del sistema y/o la interconexión de ellos cambian a medida que el tiempo transcurre).

La teoría y herramientas existentes para modelar sistemas son muy diversas, y en ellas se combinan leyes de la física, la química, la termodinámica, además de teoría de señales, procesamiento de datos, matemáticas y herramientas numéricas.

Los **sistemas lineales** son un subconjunto del universo de sistemas. Su importancia radica en la conjunción de dos elementos:

- a) Muchos sistemas pueden representarse por modelos lineales de razonable fidelidad.
- b) Existen poderosas herramientas para analizar y sintetizar este tipo de sistemas.

Las dos propiedades claves que definen los sistemas lineales son: superposición y homogeneidad. (1) La propiedad de superposición encierra la idea que la salida del sistema se puede calcular separando los efectos de componentes del estado y/o componentes de la salida, y luego sumando (superponiendo) las respuestas a cada uno de esos componentes. (2) Por su parte, la idea de homogeneidad se expresa en que la proporcionalidad en la entrada y/o el estado se propaga a la salida sin alteración. En resumen, la propiedad de linealidad nos permite calcular el efecto de una combinación lineal de entradas y condiciones iniciales como la combinación lineal de sus efectos individuales (Salgado et al., 2014).

Cuando se enfrenta el problema de analizar un sistema, naturalmente no trabajamos con el sistema real, sino que con una representación de ese sistema. Esa representación o modelo, captura aspectos esenciales del sistema. Por definición, un modelo es una representación aproximada de la realidad, y su grado de fidelidad depende de muchos factores, siendo uno de ellos el propósito del modelo. De esta forma, una decisión fundamental a la hora de modelar un

sistema es definir el propósito, es decir, definir aquellos aspectos esenciales que queremos capturar.

### **3.2.3. Aspectos a modelizar**

Como aspectos a modelizar se han considerado aquellos elementos fundamentales del proceso constructivo que intervienen en la transformación del perfil longitudinal durante el extendido de mezcla asfáltica.

Como se ha establecido en capítulos anteriores, la regularidad superficial conseguida estará determinada principalmente por el comportamiento de la regla durante la pavimentación. A su vez, asumiendo buenas prácticas de construcción, la respuesta de nivelación de la regla dependerá esencialmente de las características de regularidad (longitudes de onda componentes) de la superficie a pavimentar.

El modelo fue desarrollado para el caso de extendedoras sobre ruedas considerando dos alternativas de nivelación; (1) Un modelo base que recoge el funcionamiento de la pavimentadora sin nivelación automática, es decir, que represente la respuesta de la regla en “flotación libre”. (2) Un modelo ampliado que, a partir del modelo base, incorpora el efecto del control automático en la respuesta de la regla, y en consecuencia, en la regularidad conseguida en el extendido. En ambos casos, el perfil longitudinal resultante deberá ser corregido para incorporar el efecto de la compactación final por parte de los rodillos.

Para el desarrollo de los modelos se han empleado técnicas de análisis de sistemas lineales, comúnmente utilizados en otras áreas de ingeniería como señales digitales y sistemas de control, aprovechando las ventajas de la transformada de Laplace y las funciones de transferencia, como también la potencia del *software* Matlab ® para el manejo de estos modelos.

#### **3.2.3.1. Modelo base**

El modelo base se obtuvo mediante la formulación de sistemas lineales que describen, de forma idealizada, los siguientes aspectos del proceso constructivo para el caso de pavimentadora sobre ruedas y sin el uso de nivelación automática.

- 1) El rodado de la pavimentadora sobre una superficie irregular provocará desplazamientos verticales de la unidad tractora, que afectarán la posición del punto de tiro y en consecuencia el ángulo de ataque de la regla. Por lo

tanto, la trayectoria del punto de tiro como resultado del rodado de la extendidora es el primer aspecto del proceso constructivo a modelizar.

- 2) El segundo aspecto a modelizar es la posición vertical de la regla en respuesta a la trayectoria del punto de tiro. Debido al tiempo de respuesta de la regla para restaurar la posición de equilibrio, la influencia de la irregularidad subyacente es atenuada sobre la longitud natural de nivelación ( $5L$ ), por lo que su efecto sobre el perfil final es diferido. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, este tipo de respuesta se representa mediante un sistema lineal de primer orden (Barber-Greene, 1972, Ulrich, 1991, Sanchez Blanco, 1968).
- 3) La demanda variable de material requerido para compensar las irregularidades de onda corta bajo la regla dificulta mantener un volumen constante de mezcla fluyendo bajo ella, modificando en consecuencia la fuerza vertical de sustentación e induciendo cambios en el espesor de extendido, y por tanto en la regularidad del perfil longitudinal. Este efecto se manifiesta de forma inmediata, y se ha modelizado como una vibración local independiente de la trayectoria vertical de la regla.
- 4) Por último, la compactación final de la capa por parte de los rodillos producirá una reducción proporcional del espesor extendido que, si no es homogéneo, afectará al perfil final y a la regularidad IRI.

Estos aspectos del proceso constructivo constituyen los sub-modelos que, en su conjunto, son integrados para formar el modelo base.

### **3.2.3.2. Modelo ampliado**

El modelo ampliado se obtuvo actualizando el modelo base para incorporar el uso de un sistema de control automático mediante viga de nivelación. Se realizó la formulación de sistemas lineales que describen, de forma idealizada, los siguientes aspectos operativos del sistema de nivelación automático.

- 5) Obtención del perfil de referencia obtenido como resultado de la promediación móvil por la viga de nivelación.
- 6) Modelización de la unidad de control: En función de la diferencia, o error, entre la posición de la regla y el valor de referencia en el punto de control, se determinará la señal eléctrica proporcional para el control de la electroválvula.

- 7) Modelización del tiempo de respuesta de la electroválvula a la señal eléctrica y el flujo de aceite correspondiente hacia el cilindro de control del punto de tiro.
- 8) Por último, dependiendo de la dirección del flujo de aceite hidráulico, el cilindro se moviera hacia arriba o hacia abajo para controlar la posición del punto de tiro en relación al valor de referencia.

Estos aspectos del proceso constructivo constituyen los sub-modelos que, junto al modelo base, son integrados para formar el modelo final.

### 3.2.4. Formulación conceptual del modelo

Los sub-modelos descritos anteriormente están representados por una o varias ecuaciones matemáticas que describen la relación entre entradas y salidas de diferentes elementos que describen el efecto nivelador de la pavimentadora durante el proceso constructivo (sistema a modelizar). El modelo final queda definido por la interconexión de dichos sub-modelos, conformando un sistema dinámico que para un *input* dado por las características del perfil longitudinal existente producirá un *output* correspondiente al perfil longitudinal post-obra, a partir del cual se calcula el IRI de construcción.

Para definir la conexión entre los diferentes componentes del sistema se utilizó un diagrama de bloques. El diagrama de bloques es una representación gráfica del funcionamiento interno del sistema que se hace mediante bloques y sus relaciones, y que, además, define la organización de todo el proceso interno, sus entradas y sus salidas.

A diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar de forma más realista el flujo de las señales del sistema real. Las ventajas de la representación mediante bloques radica en que es fácil formar el diagrama general de todo el sistema con sólo conectar los bloques de los componentes de acuerdo con el flujo de señales y en que es posible evaluar la contribución de cada componente al desempeño general del sistema (Ogata, 2010).

En el siguiente diagrama de bloques se representan las funciones que desempeñan cada componente del sistema, y el flujo de señales entre los sub-modelos que lo conforman.

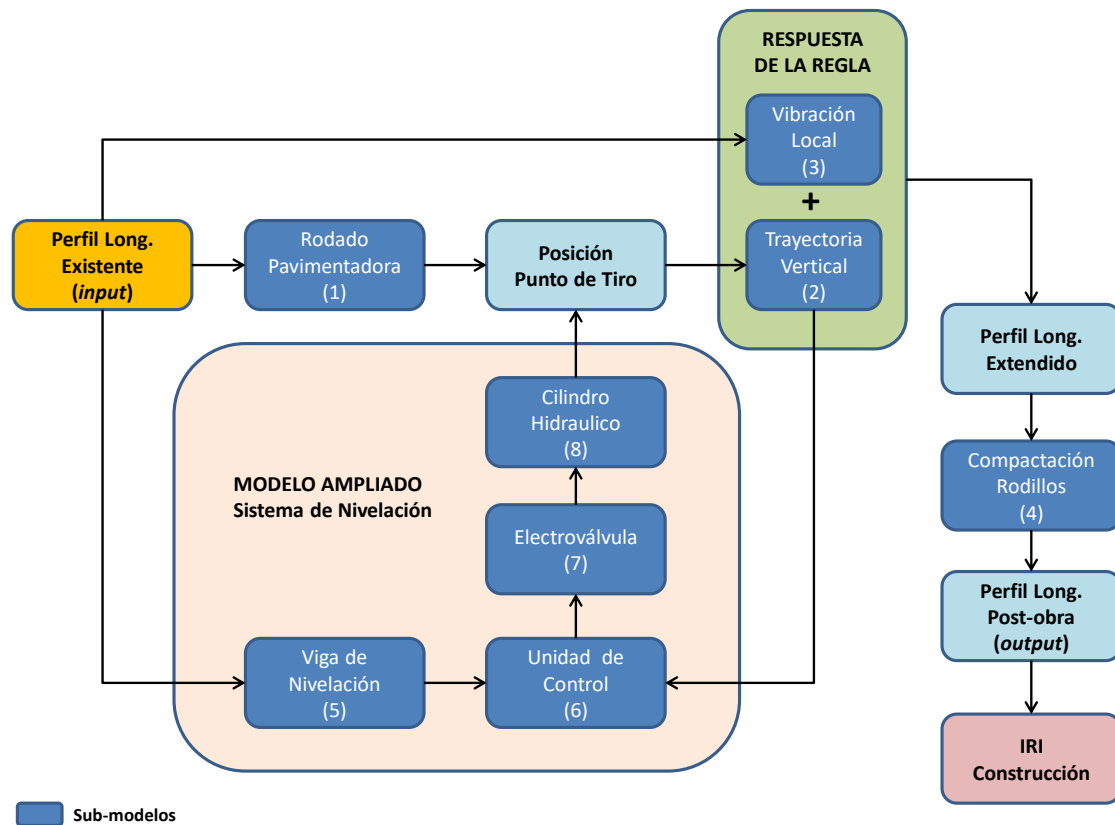


Figura 3.1: Formulación Conceptual del Modelo

### 3.3. Calibración del modelo

El método empleado para la calibración se basa en optimizar el valor de los parámetros del modelo que permitan lograr un mejor ajuste entre el IRI calculado sobre el perfil longitudinal resultante de la simulación respecto a los datos de IRI real observado post-obra para el mismo perfil longitudinal inicial (pre-obra). La optimización se realizó mediante la minimización de los cuadrados de las diferencias de los valores de IRI estimados y los observados (*Sum of Squared Error, SSE*). El minimizar el valor de SSE conlleva una reducción del error medio de estimación (*Root Mean Square Error, RMSE*) que permite encontrar el factor de calibración que asegura el mejor ajuste del IRI predicho y por ende la calibración del modelo.

Para calibrar el modelo se requiere información detallada de obras de reapeo, incluyendo datos de perfilometría longitudinal medidos antes y después de la rehabilitación, así como los antecedentes de la ejecución de obra que constituyen

los parámetros del modelo (características de la pavimentadora, espesores de extendido, etc.).

### **3.3.1. Base de datos para calibración**

Como fuente de datos se utilizó la información disponible en el programa norteamericano *Long Term Pavement Performance* (LTPP). El programa LTPP fue diseñado como un estudio de largo plazo (+20 años) que comenzó el año 1987 en Estados Unidos; y uno de sus objetivos fue establecer una base de datos de pavimentos nacional para respaldar los objetivos del *Strategic Highway Research Program* (SHRP) y necesidades futuras. Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, el programa LTPP fue dividido entre dos programas complementarios. El primer programa, denominado *General Pavement Studies* (GPS), utiliza secciones de prueba de pavimentos en servicio tanto en su fase de diseño original o en su fase posterior al primer refuerzo. El segundo programa, denominado *Specific Pavement Studies* (SPS), investiga el efecto de propiedades específicas de diseño en el desempeño de los pavimentos.

La base de datos LTPP contiene información de más de 2500 secciones de pavimento distribuidas a lo largo de Estados Unidos y Canadá, y se encuentra disponible para su consulta y descarga *online* desde el sitio web LTPP InfoPave (<https://infopave.fhwa.dot.gov/>).

Para efectos de la presente investigación, se utilizaron exclusivamente las secciones del experimento SPS-5, diseñado para evaluar el efecto de distintas alternativas de rehabilitación sobre el desempeño en el tiempo de recapesos asfálticos sobre pavimentos asfálticos existentes. El detalle de las secciones e información recopilada para cada una de ellas se describe en el Anexo B.

### **3.3.2. Pre-Selección de secciones para calibración**

Al ser parte de los programas específicos (*Specific Pavement Studies*, SPS), las secciones del experimento SPS-5 cuentan con gran cantidad de información de interés registrada durante la ejecución de las obras, así como auscultaciones de perfilometría longitudinal antes y después de las mismas. El experimento SPS-5 está compuesto originalmente por 18 proyectos de recapeo distribuidos entre Estados Unidos y Canadá. Cada proyecto incluye 9 secciones de prueba con distintas alternativas de rehabilitación estandarizadas, totalizando 162 secciones principales. Además, algunos estados incluyeron secciones suplementarias con

alguna modificación respecto de las alternativas estándar, totalizando 48 secciones adicionales en todo el experimento.

De acuerdo con los aspectos de modelización definidos anteriormente, las obras seleccionadas para calibración deben cumplir necesariamente con dos condicionantes:

- 1) No se ejecutaron fresados o reparaciones excesivas sobre la superficie existente previo a la ejecución del recapeo; de forma tal que los datos de perfilometría post-obra respondan principalmente a la nivelación efectuada por la extendedora como respuesta al perfil longitudinal de la superficie original de la cual se tiene perfilometría pre-obra.
- 2) El extendido del refuerzo asfáltico se realizó con una pavimentadora sobre ruedas.

En el caso del modelo base las secciones deben cumplir, además de la condición (1) y (2), con la siguiente condición:

- El extendido se realizó sin nivelación asistida de larga referencia, es decir, sin el uso de viga de nivelación de contacto o flotante, de forma que la calibración del modelo corresponda a la respuesta de la regla en “flotación libre”.

Por el contrario, en el caso del modelo ampliado las secciones deben cumplir, además de la condición (1) y (2), con la siguiente condición.

- El extendido se realizó utilizando nivelación asistida mediante viga de nivelación, de modo que la calibración del modelo represente la respuesta de la regla controlada automáticamente.

A partir de una revisión exhaustiva de las 210 secciones disponibles en la base de datos SPS-5, se realizó un primer proceso de pre-selección de obras candidatas a ser utilizadas en la calibración, descartando todas aquellas secciones que consideraron ejecución de fresado previo al extendido del refuerzo (reparación previa intensiva) y/o que utilizaron modelos de extendedoras sobre orugas para la colocación del refuerzo.

Del resultado, secciones adicionales fueron descartadas por presentar información incompleta y/o por desviaciones de la obra real ejecutada respecto de la rehabilitación proyectada; por ejemplo, la ausencia de la evaluación de perfilometría anterior o posterior a la obra, o secciones proyectadas como de reparación superficial mínima en las cuales finalmente se ejecutó fresado. De la pre-selección resultaron un total de 32 secciones candidatas.

### 3.3.3. Discriminación por sistema de nivelación

A partir de las 32 secciones resultantes de la pre-selección, se identificaron y separaron aquellas obras que utilizaron nivelación asistida. Esta información estuvo disponible de forma explícita para algunas secciones en los reportes de construcción, en otros casos, fue deducida a partir del análisis de densidad espectral de los perfiles longitudinales antes y después de la obra.

La densidad espectral es una función que indica como la varianza del perfil es “distribuida” sobre las diferentes sinusoides que, sumadas, aproximan el perfil. En otras palabras, es una representación estadística de la importancia (en términos de amplitud) de las diferentes longitudes de onda componentes del perfil longitudinal. La gráfica de estas amplitudes respecto de sus longitudes de onda correspondientes se denomina periodograma o gráfico de densidad espectral de potencia PSD (por sus siglas en inglés, *Power Spectral Density*). La función de PSD (ISO, 2016) puede calcularse tanto sobre el perfil de elevaciones como sobre el perfil de pendientes, en este último caso, las amplitudes resultantes son más uniformes sobre el espectro de las longitudes de onda componentes, permitiendo una mejor visualización de las diferentes características de la irregularidad (Sayers and Karamihas, 1998). Para efectos de esta investigación, el análisis de densidad espectral se realizó con el gráfico PSD calculado sobre el perfil de pendientes utilizando el *software* ProVal ® y considerando un filtrado de 12 octavas por banda. En la Figura 3.2 y Figura 3.3 se presentan ejemplos de análisis para el caso sin nivelación asistida y con nivelación respectivamente.

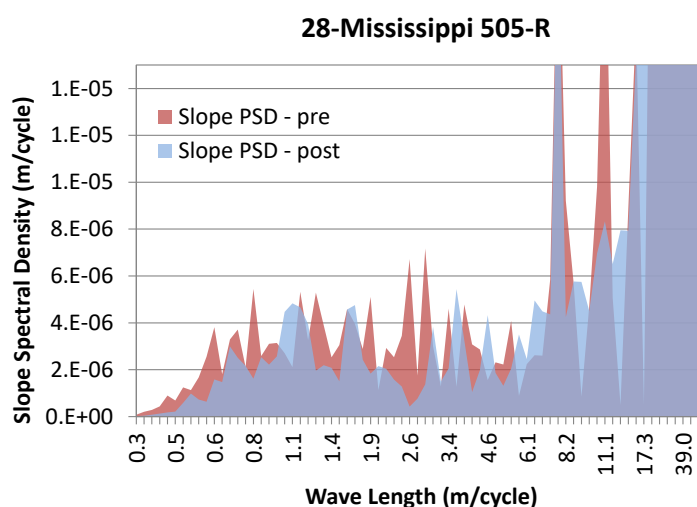


Figura 3.2: PSD de Pendientes Sin Nivelación Asistida – Antes y Después de Obra

En la Figura 3.2, al comparar la densidad espectral PSD del perfil longitudinal pre-obra (rojo) respecto del perfil longitudinal post-obra (azul), este último presenta una reducción de amplitudes (*Slope Spectral Density*, m/cycle) en las irregularidades de hasta 6 m de longitud de onda aproximadamente, valor consistente con la longitud de la pavimentadora, lo que constituye un indicio de que el extendido se realizó sin nivelación asistida. En el caso de secciones con nivelación asistida, este efecto se aprecia en una reducción de amplitud en las longitudes de onda componentes hasta los 12 m aproximadamente, valor consistente la longitud de las vigas de nivelación (ver Figura 3.3).

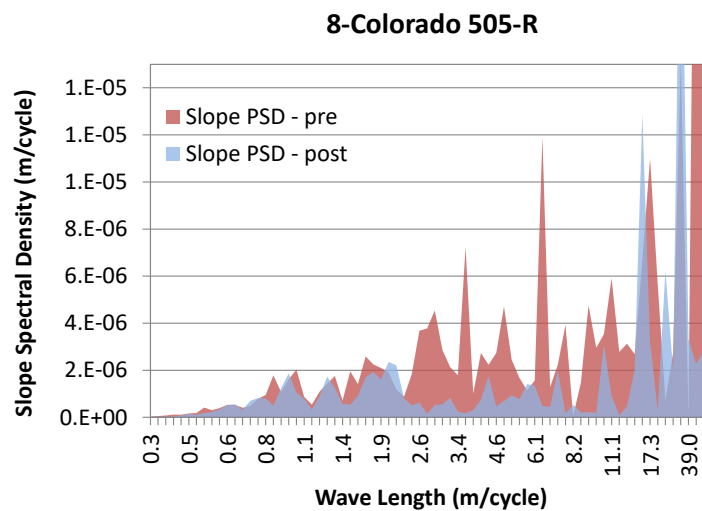


Figura 3.3: PSD de Pendientes Con Nivelación Asistida – Antes y Después de Obra



## 4. Desarrollo del modelo base

### 4.1. Introducción

Las irregularidades de la capa subyacente afectarán el rodado de la extendedora, la posición del punto de tiro, y la respuesta de la regla en general, que podrá reaccionar de forma autonivelante o de forma controlada cuando se utilice un sistema de nivelación automático. Por último, la compactación final con rodillos producirá una reducción del espesor extendido que, si presenta variaciones acusadas, afectará al perfil final y en consecuencia al IRI de construcción.

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo base que recoge la respuesta autonivelante de la regla de la pavimentadora, es decir, sin el uso de nivelación automática. Se definen los sistemas de ecuaciones para los diferentes submodelos que describen el proceso de extendido y compactación, se detallan los datos y procedimientos empleados en la calibración del modelo y se discuten los resultados obtenidos.

### 4.2. Formulación del modelo base

Las irregularidades en la capa subyacente afectarán la posición de equilibrio de la regla por dos mecanismos: uno de efecto diferido y otro de efecto inmediato.

(1) El rodado de la extendedora sobre la superficie a pavimentar provocará desplazamientos verticales de la unidad tractora, que afectarán la posición del punto de tiro y por lo tanto el ángulo de ataque de la regla. Debido al tiempo de respuesta de la regla para restaurar la posición de equilibrio, la influencia de la irregularidad subyacente es atenuada sobre la longitud natural de nivelación, por lo que su efecto sobre el perfil final es diferido.

(2) La demanda variable de material requerido para nivelar las irregularidades de la superficie a pavimentar dificulta mantener un volumen constante de mezcla tanto frente a la regla como fluyendo bajo ella, modificando en consecuencia la fuerza de resistencia al avance y la fuerza vertical de sustentación respectivamente, induciendo cambios inmediatos en el espesor de extendido y por tanto en la regularidad del perfil longitudinal.

Una vez extendida la mezcla asfáltica, la compactación final de la capa por parte de los rodillos producirá una reducción del espesor inicial extendido que determinará el perfil longitudinal conseguido.

#### 4.2.1. Modelización del rodado para extendedoras sobre ruedas

Al pavimentar sobre una superficie de perfil irregular, la posición vertical del punto de tiro se verá afectada por el movimiento del chasis del tractor. El punto de tiro se ubica aproximadamente en el centro de la longitud base (*wheelbase*) del tren de rodado. En pavimentadoras sobre ruedas neumáticas con bogie delantero, la longitud base ( $L_{wb}$ ) corresponde a la distancia entre el eje del bogie y el eje de la rueda de tracción trasera (ver Figura 4.1). A medida que el tractor se desplaza sobre una superficie irregular, el diseño oscilante del bogie delantero le permite pivotar sobre la irregularidad. Cuando la rueda de tracción trasera pase sobre la irregularidad, el punto de tiro ya estará por delante del obstáculo. Esta acción nivelante permite al tractor mantener una línea de arrastre relativamente constante al pasar sobre irregularidades cortas. En cualquier caso, frente a irregularidades acusadas o de larga longitud de onda, el punto de tiro cambiará su posición vertical, y por lo tanto la línea de arrastre modificará su dirección afectando el comportamiento de la regla de enrasado y la conformación del perfil longitudinal final.

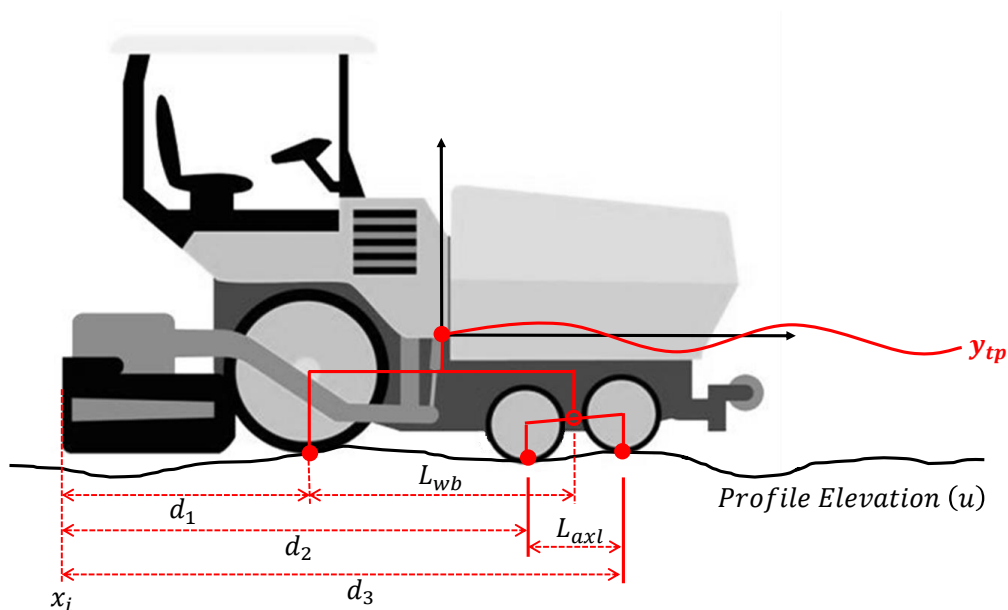


Figura 4.1: Esquema de cálculo trayectoria punto de tiro

De acuerdo con lo anterior, el rodado de la extendidora funciona como un filtro analógico cuyo resultado es la trayectoria del punto de tiro. Para extendedoras sobre ruedas, el desplazamiento vertical del punto de tiro ( $y_{tp}$ ) se ha calculado de forma simplificada como la cota media entre la rueda motriz trasera y el eje del bogie oscilante delantero, cuya cota será a su vez la media entre las dos ruedas del bogie.

$$y_{tp}(i) = \frac{1}{2} \left[ u(x_i + d_1) + \frac{u(x_i + d_2) + u(x_i + d_3)}{2} \right] \quad (17)$$

Dónde:

- $y_{tp}$  : Desplazamiento vertical del punto de tiro.
- $u$  : Perfil longitudinal de la superficie a pavimentar.
- $d_1$  : Distancia desde la posición de la regla  $x_i$  hasta la rueda motriz.
- $d_2$  : Distancia desde la posición de la regla  $x_i$  hasta la rueda trasera del bogie oscilante.
- $d_3$  : Distancia desde la posición de la regla  $x_i$  hasta la rueda delantera del bogie oscilante.

En la Ecuación (17) la elevación ‘u’ del perfil longitudinal está expresada con relación al extremo trasero de la extendidora (borde de la regla). Sin embargo, para obtener la función de transferencia del sistema mediante su transformada de Laplace, es necesario expresar la Ecuación (17) en términos del frente de la pavimentadora como se presenta a continuación.

$$y_{tp}(i) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{u_{tp}(x_i) + u_{tp}(x_i - L_{axl})}{2} + u_{tp} \left( x_i - \left[ \frac{L_{axl}}{2} + L_{wb} \right] \right) \right\} \quad (18)$$

Dónde:

- $u_{tp}$  : Perfil longitudinal a partir de la rueda delantera del bogie.
- $L_{axl}$  : Distancia entre ejes de ruedas del bogie delantero.
- $L_{wb}$  : Distancia entre ejes de la rueda de tracción trasera y el bogie delantero (wheelbase).

En la Ecuación (18) el perfil longitudinal ‘ $u_{tp}$ ’ se inicia en la rueda delantera del bogie, y se define como el resultado de truncar el inicio del perfil longitudinal ‘ $u$ ’ en una distancia inicial  $d_3$  (ahora  $x_i$  es la posición de la rueda delantera del bogie).

Asumiendo una velocidad de pavimentación ( $V$ ) constante, la Ecuación (18) puede ser escrita en función del tiempo.

$$y_{tp}(t) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{u_{tp}(t) + u_{tp}(t - T_1)}{2} + u_{tp} \left( t - \left[ \frac{T_1}{2} + T_2 \right] \right) \right\} \quad (19)$$

Dónde:  $T_1 = \frac{L_{axl}}{V}$  y  $T_2 = \frac{L_{wb}}{V}$

Las constantes de tiempo  $T_1$  y  $T_2$  representan el tiempo requerido por la pavimentadora para recorrer una distancia  $L_{axl}$  y  $L_{wb}$  respectivamente.

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (19), utilizando la propiedad de retardo temporal, considerando condiciones iniciales iguales a cero y reordenando términos, se obtiene la función de transferencia en el dominio de Laplace ‘ $s$ ’ que define la relación entre el perfil de entrada ( $u_{tp}$ ) y la trayectoria del punto de tiro ( $y_{tp}$ ).

$$\frac{y_{tp}(s)}{u_{tp}(s)} = \frac{1}{4} \left[ 1 + e^{-\left(\frac{L_{axl}}{V}\right)s} + 2e^{-\frac{1}{V}\left(\frac{L_{axl}}{2} + L_{wb}\right)s} \right] \quad (20)$$

#### 4.2.2. Modelo cinemático de respuesta vertical de la regla

Como se ha establecido anteriormente, el rodado de la pavimentadora sobre las irregularidades de la superficie afectará la posición del punto de tiro y, en consecuencia, la posición de la regla que responderá buscando una nueva posición de equilibrio. Asumiendo que todas las fuerzas actuantes sobre la regla permanecen constantes, la trayectoria de la regla frente a un cambio en el punto de tiro se reduce al estudio de su respuesta cinemática. En la Figura 4.2 se presenta el esquema empleado para la descripción del movimiento.

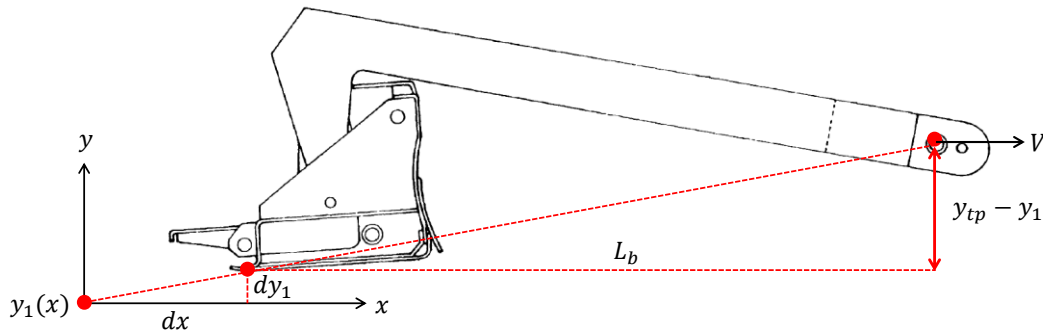


Figura 4.2: Respuesta cinemática – Trayectoria de la regla

Asumiendo que el brazo lateral y la regla son indeformables, se puede establecer una relación geométrica entre la trayectoria del punto de tiro ( $y_{tp}$ ) y el desplazamiento vertical de la regla ( $y_1$ ).

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{y_{tp} - y_1}{L_b} \Rightarrow dy_1 + dx \frac{y_1}{L_b} = dx \frac{y_{tp}}{L_b} \quad (21)$$

Derivando la expresión respecto del tiempo ( $t$ ), y considerando una velocidad de pavimentación constante ( $V$ ), se obtiene la ecuación diferencial que describe la cinemática del movimiento vertical  $y_1(t)$  de la regla.

$$\dot{y}_1(t) + \frac{V}{L_b} y_1(t) = \frac{V}{L_b} y_{tp}(t) \quad (22)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (22), y considerando condiciones iniciales iguales a cero, se obtiene la siguiente expresión:

$$s y_1(s) + \frac{V}{L_b} y_1(s) = \frac{V}{L_b} y_{tp}(s) \Rightarrow y_{tp}(s) = y_1(s) \left( 1 + \frac{L_b}{V} s \right) \quad (23)$$

A partir de la Ecuación (23) se deduce la función de transferencia del sistema  $H_1(s)$ , definida como la relación entre las transformadas de Laplace de la

respuesta del sistema  $y_1(s)$  y la señal de entrada o excitación que en este caso corresponde a la trayectoria del punto de tiro  $y_{tp}(s)$ .

$$\frac{y_1(s)}{y_{tp}(s)} = H_1(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (24)$$

Dónde:

$\tau$  : constante de tiempo ( $L_b/V$ )

Se puede verificar que cuando la señal de entrada  $y_{tp}(t)$  corresponde al escalón unitario, cuya transformada de Laplace es  $y_{tp}(s) = 1/s$ , la anti-transformada de Laplace de la Ecuación (24) da como resultado la Ecuación (15) publicada por Barber-Greene Co. y que corresponde a la solución analítica del sistema.

### 4.2.3. Modelo dinámico de vibración de la regla

Los cambios en la trayectoria de la regla descritos por el modelo cinemático anterior se superponen a otras influencias, como los movimientos ocasionados por la pre-compactación del material asfáltico y el flujo de este bajo la regla (Ulrich, 1991). Por lo tanto, la terminación superficial conseguida no estará determinada exclusivamente por el movimiento vertical del punto de tiro y su efecto sobre la posición de la regla. Para efectos del modelo, estas influencias serán consideradas como una vibración local de la regla en respuesta a las irregularidades de onda corta del perfil longitudinal bajo la placa alisadora. Esta respuesta dinámica ocurrirá de forma independiente a la posición vertical de la regla y su resultado se superpondrá a la trayectoria.

Al pasar la regla sobre una concavidad local (irregularidad de onda corta) aumentará momentáneamente la altura de mezcla fluyendo bajo la placa alisadora; dado que el esfuerzo de compactación de la regla permanece constante para un mayor espesor de mezcla, la densidad de la mezcla se reducirá, provocando un descenso de la regla (menor resistencia a la compactación). Por el contrario, al pasar sobre una protuberancia se disminuirá el volumen de material bajo la regla, aumentando la resistencia a la compactación y provocando un ascenso de la regla. Este movimiento vibratorio será representado mediante un resorte amortiguado que se comprime al pasar sobre una protuberancia (reacción hacia arriba) y se estira al pasar sobre una concavidad (reacción hacia abajo).

De acuerdo con lo anterior, la dinámica vertical de la regla será representada por un modelo simplificado de un grado de libertad; compuesto por una masa suspendida por un resorte y un amortiguador, moviéndose sobre el perfil longitudinal de la superficie existente. Ver Figura 4.3.

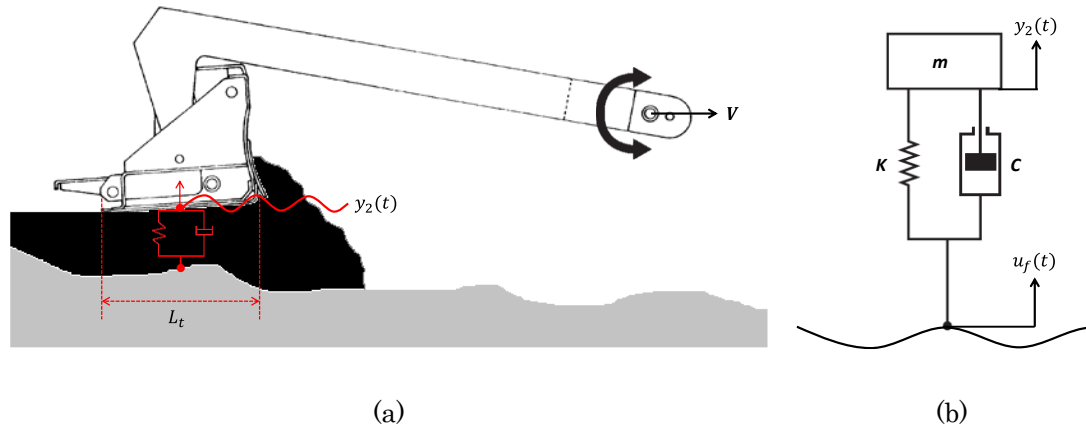


Figura 4.3: Respuesta dinámica – Vibración de la regla

El modelo dinámico (ver Figura 4.3b) supone que las irregularidades de la superficie se transmiten hacia la regla, por medio de la mezcla asfáltica, en un solo punto de contacto. Sin embargo, la regla realmente se apoya sobre la mezcla en una superficie dada por el ancho de la placa alisadora ( $L_t$ ). Además, el sistema debe representar la vibración de la regla en respuesta exclusivamente a las irregularidades de onda corta del perfil longitudinal bajo la placa alisadora. Por lo tanto, para que la respuesta del sistema sea independiente del trazado en alzado de la vía, se utilizará como señal de entrada el perfil  $u_f(t)$  correspondiente a la primera diferencia del perfil original  $u(t)$ , equivalente a eliminar su tendencia o pendiente, calculada sobre intervalos iguales al ancho de la placa alisadora ( $L_t$ ). Este filtrado se implementa mediante la siguiente función de transferencia.

$$\frac{u_f(s)}{u(s)} = 1 - e^{-\left(\frac{L_t}{V}\right)s} \quad (25)$$

La dinámica vertical del sistema depende de la masa ( $m$ ) de la regla, así como de las características de rigidez ( $k$ ) y amortiguamiento ( $c$ ) que simulan la rigidez de la mezcla asfáltica y su efecto amortiguador. La ecuación de movimiento del sistema está dada por:

$$m\ddot{y}_2(t) + c\dot{y}_2(t) + ky_2(t) = c\dot{u}_f(t) + k\dot{u}_f(t) \quad (26)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (26), considerando condiciones iniciales iguales a cero, y reordenando los términos, se obtiene la siguiente expresión:

$$y_2(s)(ms^2 + cs + k) = u_f(s)(cs + k) \quad (27)$$

Para efectos de calibración posterior del modelo resulta conveniente expresar la Ecuación (27) en su forma estándar, dada por la frecuencia natural no amortiguada del sistema ( $\omega_n$ ) y la razón de amortiguamiento ( $\zeta$ ) (Kelly, 2012). Se normaliza la expresión por la masa ( $m$ ) y se aplican los siguientes reemplazos:

$$\text{Frecuencia natural no amortiguada} \quad : \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\text{Razón de amortiguamiento} \quad : \zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$$

Luego se deduce la función de transferencia del sistema  $H_2(s)$ :

$$\frac{y_2(s)}{u_f(s)} = H_2(s) = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (28)$$

#### **4.2.4. Corrección por compactación: Espesor suelto y factor de esponjamiento**

La compactación con rodillos es el proceso de densificación final de la mezcla por la reducción de su contenido de vacíos hasta alcanzar, como mínimo, el porcentaje

de la densidad de referencia establecido en las especificaciones técnicas del proyecto o en la normativa vigente. Como resultado del proceso de compactación, los agregados en la mezcla son forzados a acercarse entre sí, reduciendo el volumen de la mezcla (menos contenido de huecos) e incrementado así su densidad.

De acuerdo con lo anterior, la mezcla asfáltica debe ser extendida por la pavimentadora en un “espesor suelto” ( $h_{LIFT}$ ) levemente mayor que el espesor de diseño, de forma que al reducir su volumen luego de la compactación final por los rodillos el “espesor compactado” ( $h_{COMP}$ ) coincida con el espesor proyectado para la capa asfáltica.

Para efectos del modelo la compactación se asumirá constante y proporcional al espesor de capa extendida por la pavimentadora. La cota final del perfil extendido ( $y_{LIFT}$ ) estará dada por el perfil resultante de la respuesta de la regla ( $y = y_1 + y_2$ ) adicionando el espesor suelto ( $h_{LIFT}$ ) establecido en la posición inicial.

$$y_{LIFT} = y + h_{LIFT} \quad (29)$$

El espesor de capa resultante ( $h$ ) en cada punto de la simulación se calcula como la diferencia entre el perfil extendido y el perfil de la capa subyacente.

$$h = y_{LIFT} - u \quad (30)$$

En cada punto de la simulación, la reducción proporcional de espesor por efecto de compactación estará dada por el coeficiente de paso  $FF$  (*fluff factor*).

$$FF = \frac{h}{h_{COMP}} - 1 \Rightarrow h_{COMP} = \frac{h}{1 + FF} \quad (31)$$

Finalmente, la cota de la capa extendida y compactada se calcula como la cota del perfil inicial (capa subyacente) adicionando el espesor compactado en cada punto de la simulación.

$$\begin{aligned}
y_{COMP} &= u + h_{COMP} = u + \frac{h}{1 + FF} = u + \frac{y_{LIFT} - u}{1 + FF} \\
&= y_{LIFT} \left( \frac{1}{1 + FF} \right) + u \left( \frac{FF}{1 + FF} \right)
\end{aligned} \tag{32}$$

#### 4.2.5. Acoplamiento del modelo base

El acoplamiento consiste en integrar los modelos de trayectoria y vibración de la regla incorporando las funciones para sus respectivas variables de entrada: posición del punto de tiro (modelización del rodado) y el perfil original sin tendencia suavizado sobre el ancho la placa alisadora. La siguiente expresión representa la respuesta total de la regla considerando todas las variables ya definidas.

$$\begin{aligned}
y(s) &= \left( \frac{1}{1 + \tau s} \right) \times \frac{1}{4} \left[ 1 + e^{-\left(\frac{L_{axl}}{V}\right)s} + 2e^{-\frac{1}{V}\left(\frac{L_{axl}}{2} + L_{wb}\right)s} \right] u_{tp}(s) \\
&+ \left( \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right) \times \left[ 1 - e^{-\left(\frac{L_t}{V}\right)s} \right] u(s)
\end{aligned} \tag{33}$$

El perfil longitudinal resultante ( $y$ ) debe ser corregido para incorporar el espesor de extendido y la compactación final por parte de los rodillos. Combinando el resultado anterior con la Ecuación (29) y Ecuación (32) se obtiene la expresión para la cota del perfil final compactado.

$$y_{COMP} = (y + h_{LIFT}) \left( \frac{1}{1 + FF} \right) + u \left( \frac{FF}{1 + FF} \right) \tag{34}$$

### 4.3. Calibración del modelo base

La respuesta del modelo propuesto dependerá de parámetros relacionados con algunas dimensiones características de la pavimentadora ( $L_b$ ,  $L_{axl}$ ,  $L_{wb}$ ) y el proceso constructivo ( $V$ ,  $h_{LIFT}$ ,  $FF$ ) que son conocidos *a priori* o pueden ser estimados mediante valores típicos empleados en obra. Por lo tanto, los

parámetros desconocidos a determinar son la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) y la razón de amortiguamiento ( $\zeta$ ) asociadas a la vibración de la regla.

#### 4.3.1. Parámetros de calibración modelo base

Suponiendo que la respuesta dinámica de la regla es aquella que alcanza lo más rápido posible el valor estacionario sin oscilar entorno a este, entonces, podemos asumir una razón de amortiguamiento crítico  $\zeta = 1$ . A partir de este supuesto, el único parámetro a calibrar será la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) del sistema.

De acuerdo con el método establecido en la Sección 3.3, la calibración consiste en determinar la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) del modelo que permita minimizar la suma de los cuadrados del error (SSE) entre los valores de IRI estimados y los observados. El valor así obtenido para la frecuencia natural (parámetro de calibración) garantiza el mejor ajuste del IRI predicho y por ende la calibración del modelo.

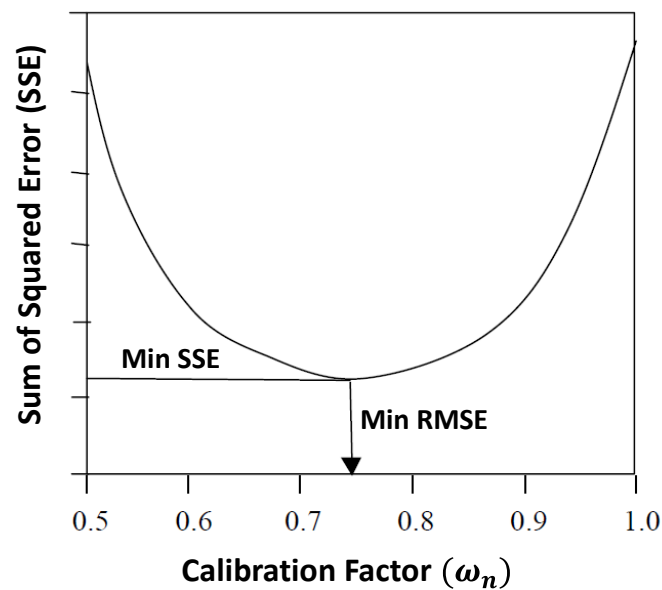


Figura 4.4: Método de Calibración Modelo Base – Minimización de SSE

#### 4.3.2. Datos para calibración del modelo base

De la pre-selección de 32 secciones a utilizar en el estudio (Sección 3.3.2) se consideraron sólo aquellas obras que no utilizaron nivelación automática durante

la pavimentación. Como resultado del análisis de la base de datos LTPP fueron seleccionadas 16 secciones para la calibración.

El resumen de los datos recopilados se presenta en la Tabla 4.1. Para cada obra se calculó el coeficiente de compactación FF a partir del “espesor suelto” ( $h_{LIFT}$ ) y el “espesor compactado” ( $h_{COMP}$ ) según la definición presentada anteriormente, ver Ecuación (31).

Tabla 4.1: Secciones LTPP SPS-5 Para Calibración del Modelo Base

SPS-5 Test Site			ASPHALT PAVER		LIFT_NO	$h_{LIFT}$ (in)	$h_{COMP}$ (in)	Fluff Factor FF
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID	MANUFACTURER	MODEL				
1	Alabama	0502	BARBER GREENE	BG-240B	1	1.6	1.3	0.23
1	Alabama	0503	BARBER GREENE	BG-240B	1	2.5	2.1	0.19
					2	2.4	1.9	0.26
1	Alabama	0504	BARBER GREENE	BG-240B	1	3.0	2.4	0.25
					2	2.4	1.9	0.26
1	Alabama	0505	BARBER GREENE	BG-240B	1	1.7	1.4	0.21
28	Mississippi	0502	CEDARAPIDS	BSF531	1	2.6 <sup>(*)</sup>	2.1	0.25
28	Mississippi	0503	CEDARAPIDS	BSF531	1	1.4 <sup>(*)</sup>	1.1	0.25
					2	1.4 <sup>(*)</sup>	1.1	0.25
					3	3.0 <sup>(*)</sup>	2.4	0.25
28	Mississippi	0504	CEDARAPIDS	BSF531	1	1.9 <sup>(*)</sup>	1.5	0.25
					2	1.9 <sup>(*)</sup>	1.5	0.25
					3	2.4 <sup>(*)</sup>	1.9	0.25
28	Mississippi	0505	CEDARAPIDS	BSF531	1	2.5 <sup>(*)</sup>	2.0	0.25
48	Texas	A502	BARBER GREENE	BG-260	1	2.9 <sup>(*)</sup>	2.3	0.25
48	Texas	A503	BARBER GREENE	BG-260	1	1.7 <sup>(*)</sup>	1.4	0.25
					2	1.7 <sup>(*)</sup>	1.4	0.25
					3	2.6 <sup>(*)</sup>	2.1	0.25
48	Texas	A504	BARBER GREENE	SB-140	1	1.9 <sup>(*)</sup>	1.5	0.25
					2	1.9 <sup>(*)</sup>	1.5	0.25
					3	2.4 <sup>(*)</sup>	1.9	0.25
48	Texas	A505	BARBER GREENE	SB-140	1	2.9 <sup>(*)</sup>	2.3	0.25
81	Alberta	0502	BLAW-KNOX	PF-220	1	2.3	2.0	0.15
81	Alberta	0503	BLAW-KNOX	PF-220	1	2.9	2.6	0.12
					2	2.6	2.4	0.08
81	Alberta	0504	BLAW-KNOX	PF-220	1	3.0	2.6	0.15
					2	2.8	2.4	0.17
81	Alberta	0505	BLAW-KNOX	PF-220	1	2.3	2.0	0.15

(\*) Sin información de “espesor suelto”.

Se asume a partir de la recomendación general de 1/4” adicional por cada 1” extendida (FF=0.25).

Las secciones de código SHRP ID 502, 503, 504 y 505 corresponden a obras de preparación superficial mínima previo a la construcción del refuerzo, es decir, con bacheos localizados y sin ejecución de fresado. De estas secciones, las de código 502 y 503 son recapeos con asfalto reciclado en espesor delgado (2 in) y grueso (5 in) respectivamente; y las secciones de código 504 y 505 corresponden a recapeos con asfalto convencional en espesor grueso (5 in) y delgado (2 in) respectivamente. En los refuerzos de espesor grueso (503 y 504) la capa fue extendida en 2 o 3 pasadas sucesivas de la pavimentadora, lo cual será simulado de cara a la calibración del modelo.

#### 4.3.2.1. Datos de IRI para el modelo base

Para cada una de las 16 secciones se analizó el perfil longitudinal auscultado en la huella interna (*left*, L) y huella externa (*right*, R), medidos antes y después de la ejecución del refuerzo. Con el objetivo de maximizar la muestra disponible, se adoptó como unidad de análisis el IRI calculado sobre intervalos de 20 m. Cada sección de LTPP tiene una longitud estándar de 152 m, lo que constituye 7 medidas de IRI cada 20 m por perfil.

A partir de los 64 perfiles longitudinales disponibles (16 secciones, 2 huellas, antes y después de obras), se calcularon los valores de regularidad IRI antes y después de obras para la huella izquierda, la huella derecha y el promedio entre huellas.

- Cálculo de regularidad real antes de obras (IRI-pre)
  - 112 valores de IRI-pre cada 20 m a partir del perfil derecho. 16 secciones x 7 unidades de muestra.
  - 112 valores de IRI-pre cada 20 m a partir del perfil izquierdo. 16 secciones x 7 unidades de muestra.
  - 112 valores de IRI-pre promedio entre huellas cada 20 m. 16 secciones x 7 unidades de muestra.
- Cálculo de regularidad real después de obras (IRI-post)
  - 112 valores de IRI-post cada 20 m a partir del perfil derecho. 16 secciones x 7 unidades de muestra.
  - 112 valores de IRI-post cada 20 m a partir del perfil izquierdo. 16 secciones x 7 unidades de muestra.

- 112 valores de IRI-post promedio entre huellas cada 20 m. 16 secciones x 7 unidades de muestra.

Por lo tanto, se cuenta con 112 datos reales de IRI promedio después de obra para la calibración del modelo base.

#### 4.3.2.2. Caracterización de extendedoras para modelo base

Las dimensiones características de las extendedoras fueron determinadas a partir de una revisión de catálogos de fabricantes, y completadas según tres criterios complementarios; (1) valor disponible directamente en el catálogo para el modelo en cuestión, (2) valor estimado a partir de otras dimensiones informadas en el catálogo, (3) dimensión estimada a partir del valor medio obtenido de otros catálogos para modelos similares. En la Tabla 4.2 se presentan las dimensiones características de las pavimentadoras empleadas en la calibración del modelo base.

Tabla 4.2: Caracterización de las Extendedoras – Calibración Modelo Base

ASPHALT PAVER		$L_{axl}$ (mm)	$L_{wb}$ (mm)	$L_b$ (mm)	$L_t$ (mm)
MANUFACTURER	MODEL				
BARBER GREENE	BG-240B	850	2180	2880	610
CEDARAPIDS	BSF-531	850	2300	2940	610
BARBER GREENE	BG-260	850	2510	3415	610
BARBER GREENE	SB-140	850	2340	3220	610
BLAW-KNOX	PF-220	850	2770	3595	610

Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos de fabricantes

#### 4.3.3. Procedimiento de simulación modelo base

El procedimiento consistió en calcular los perfiles longitudinales resultantes de la simulación de extendido para cada una de las obras, tomando como parámetros de entrada los valores determinados en las secciones anteriores y el perfil longitudinal inicial (pre-obra) según corresponda.

En la base de datos no se contó con información de velocidad de pavimentación, por lo tanto, se asumió para todas las simulaciones una velocidad de  $V = 5$  m/min, considerada como un valor estándar dentro de la práctica constructiva. Respecto de la frecuencia natural ( $\omega_n$ ), el parámetro a calibrar, se asumieron valores desde

los 0.005 Hz hasta 0.250 Hz en incrementos de 0.005 Hz, totalizando 50 simulaciones de  $\omega_n$  para cada pasada de la extendidora.

En el caso de aquellas obras con mayor espesor de refuerzo, donde la capa fue extendida en varias pasadas de la extendidora (códigos 503 y 504), se utilizó el perfil longitudinal resultante de la simulación de la primera pasada como señal de entrada para la simulación de la segunda pasada. De igual manera se procedió para aquellas secciones donde el extendido se realizó en 3 capas.

De esta forma, se realizaron las simulaciones del perfil post-obra a partir de los 16 perfiles reales pre-obra para cada una de las huellas, totalizando 2,800 simulaciones que fueron programadas en el *software* Matlab ®.

- 8 secciones con 1 pasada de extendidora. 50 simulaciones x 2 huellas x 1 pasada x 8 secciones. 800 simulaciones.
- 4 secciones con 2 pasadas de extendidora. 50 simulaciones x 2 huellas x 2 pasadas x 4 secciones. 800 simulaciones.
- 4 secciones con 3 pasadas de extendidora. 50 simulaciones x 2 huellas x 3 pasadas x 4 secciones. 1200 simulaciones.

Como resultado de las simulaciones se obtuvieron los perfiles post-obra a utilizar para cada una de las 16 secciones, en cada una de sus huellas.

- Para cada frecuencia natural (50), se tienen 16 perfiles post-obra simulados a partir del perfil pre-obra real de la huella derecha.
- Para cada frecuencia natural (50), se tienen 16 perfiles post-obra simulados a partir del perfil pre-obra real de la huella izquierda.

A partir de los perfiles post-obra obtenidos de la simulación, se calculó el IRI cada 20 m para la huella izquierda y derecha de cada una de las obras, así como el valor promedio entre huellas.

- Para cada frecuencia natural (50), se tienen 112 valores de IRI-sim cada 20 m a partir del perfil derecho.
- Para cada frecuencia natural (50), se tienen 112 valores de IRI-sim cada 20 m a partir del perfil izquierdo.
- Para cada frecuencia natural (50), se tienen 112 valores de IRI-sim promedio entre huellas cada 20 m.

Para cada una de las 112 unidades de muestra, los 50 valores de IRI promedio entre huellas obtenidos en cada obra (uno por cada frecuencia natural  $\omega_n$ ), fueron comparados con el valor correspondiente de IRI real calculado sobre los perfiles longitudinales post-obra, determinando así el error cuadrático (*squared error*, SE) de la predicción en cada simulación. La frecuencia natural ( $\omega_n$ ) que resulte en una menor suma del error cuadrático (SSE) entre todas las obras, es la que minimiza el error de estimación (RMSE).

## 4.4. Resultados calibración del modelo base

A continuación, se presentan los resultados de aplicar el método de calibración al desarrollo del modelo base. El detalle de los resultados intermedios obtenidos en las simulaciones y utilizados para establecer la calibración del modelo base se presentan en el Anexo C.

### 4.4.1. Análisis considerando todas las secciones

En la Figura 4.5 se presentan los resultados de la suma de cuadrados del error (SSE) para cada valor de frecuencia natural simulado. Se incluye tanto el resultado de analizar todas las secciones en conjunto, como los resultados de analizar las secciones de forma independiente según el número de pasadas de la pavimentadora para el extendido del refuerzo.

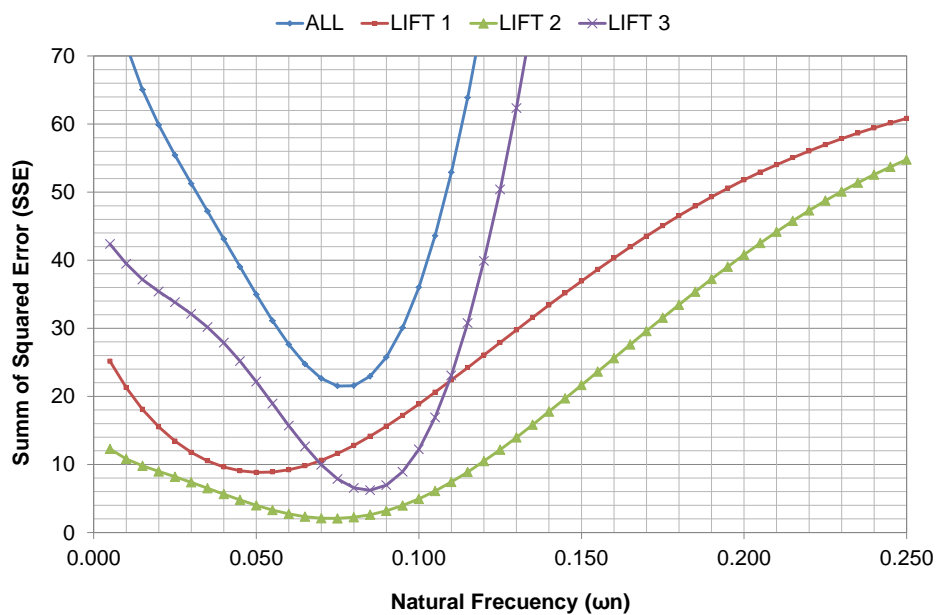


Figura 4.5: Calibración Modelo Base – Todas las Secciones

Cuando se analizan todas las secciones (ALL) el valor óptimo corresponde a la frecuencia natural  $\omega_n = 0.075$ , asociada a un SSE = 21.259 que minimiza el error cuadrático medio RMSE hasta un valor de 0.45 m/km en el IRI predicho. De la misma figura, se puede observar que la frecuencia natural que minimiza el error de estimación varía dependiendo de cuantas pasadas efectuó la extendedora para la colocación del refuerzo.

En las obras donde el extendido se realizó en una sola capa (LIFT1), el valor óptimo se obtiene para una frecuencia natural  $\omega_n = 0.050$ , asociada a un SSE = 8.829 correspondiente a un error de 0.40 m/km. En las obras donde el refuerzo de extendió en 2 o 3 pasadas (LIFT2 y LIFT3), la frecuencia óptima es de  $\omega_n = 0.075$  y  $\omega_n = 0.085$  respectivamente, resultando en un error RMSE de 0.27 m/km y 0.51 m/km.

Los valores de IRI cada 20 m pueden resultar muy dispersos en torno al valor medio representativo de la regularidad de la sección, por lo que es de práctica común en el control y supervisión de pavimentos reportar las auscultaciones en intervalos de mayor longitud. Para estos efectos se utilizó un intervalo de evaluación de 100 m, considerado un estándar común en diversos países (Múčka, 2017). A partir de los resultados obtenidos, se calculó el IRI cada 100 metros para cada sección considerando las frecuencias óptimas de extendido determinadas en la calibración, es decir, utilizando frecuencias de  $\omega_n = 0.050$ ,  $\omega_n = 0.075$  y  $\omega_n = 0.085$  para simulaciones de una, dos o tres pasadas de la extendedora respectivamente. En la Figura 4.6 se presentan los resultados obtenidos.

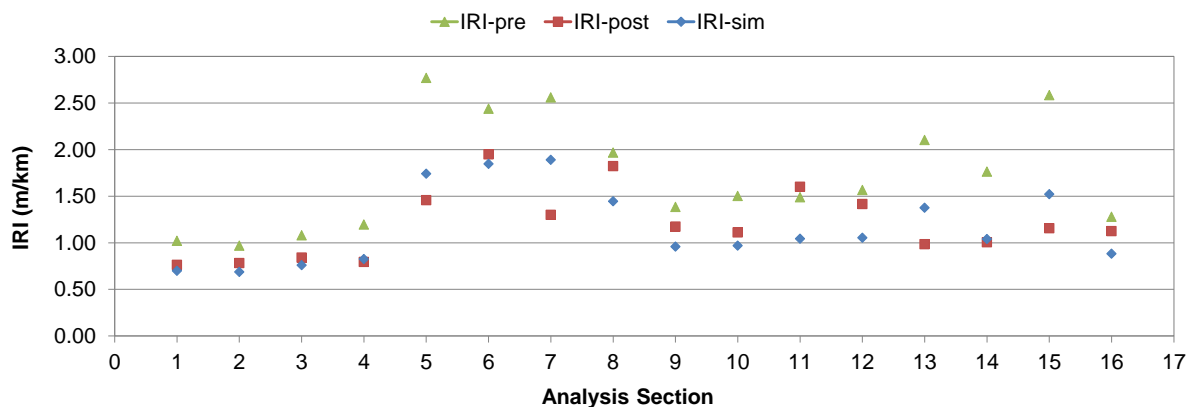


Figura 4.6: Calibración Modelo Base – Comparación IRI 100 m (todas las secciones)

De la Figura 4.6 se puede observar que los valores predichos (IRI-sim) son siempre menores a los valores previos a la ejecución del refuerzo (IRI-pre), demostrando el efecto nivelador del extendido. También, en general, el valor predicho es coherente con el valor de IRI real observado luego de la obra (IRI-post), con un coeficiente de correlación  $r = 0.68$  y un error medio de estimación RMSE de 0.30 m/km equivalente a un error porcentual medio (MAPE) del 19.5%.

Un aspecto a considerar del análisis realizado es el hecho de que en algunas secciones, como la número 11, el IRI-post obra observado resultó en un valor más alto que el IRI-pre existente antes de la ejecución del refuerzo, lo cual probablemente se relaciona con un proceso constructivo deficiente, o en menor medida, con posibles errores de medición. Estas secciones de comportamiento inconsistente contribuyen a aumentar el error de estimación en el proceso de calibración.

Dado que el modelo propuesto se fundamenta en varios supuestos relacionados con una ejecución constructiva idealizada; como velocidad constante, homogeneidad de la mezcla, etc. Condiciones que se pueden aproximar en obra con buenas prácticas de pavimentación, resulta razonable repetir el proceso de calibración eliminando del análisis todas aquellas secciones donde el valor de IRI después del refuerzo (IRI-post), calculado sobre 100 m, aumentó o presentó una reducción menor a 0.1 m/km respecto del IRI observado antes de la obra (IRI-pre).

#### **4.4.2. Análisis descartando secciones inconsistentes**

A continuación se presentan los resultados de calibración excluyendo del análisis aquellas secciones de comportamiento inconsistente. El criterio empleado permite que las secciones tengan valores anómalos en algún intervalo de 20 m, pero en promedio sobre 100 m, deben presentar una reducción de IRI mayor a 0.1 m/km. Para reducir al mínimo el número de datos excluidos de la muestra se realizó un descarte por huellas, es decir, para cada sección se descarta solo la huella inconsistente y la huella correcta se asume como representativa. Este comportamiento diferenciado por huellas se observó en algunas de las obras, cuya explicación puede tener su origen en aspectos constructivos como por ejemplo una mala operación del control transversal de la regla, toda vez que esta puede ser regulada por el operador en ambos extremos de forma independiente.

En la Figura 4.7 se presentan los resultados de la suma de cuadrados del error (SSE) para cada valor de frecuencia natural simulado. Se incluye tanto el resultado de analizar todas las secciones en conjunto una vez descartadas las huellas inconsistentes, como los resultados de analizar las secciones de forma independiente según el número de pasadas de la pavimentadora para el extendido del refuerzo.

Cuando se analizan todas las secciones (ALL) el valor óptimo corresponde a la frecuencia natural  $\omega_n = 0.070$ , asociada a un SSE = 19.105 que minimiza el error cuadrático medio RMSE hasta un valor de 0.43 m/km en el IRI predicho.

En las obras donde el extendido se realizó en una sola capa (LIFT1), el valor óptimo se obtiene para una frecuencia natural  $\omega_n = 0.045$ , asociada a un SSE = 8.472 correspondiente a un error de 0.39 m/km. En las obras donde el refuerzo se extendió en 2 o 3 pasadas (LIFT2 y LIFT3), la frecuencia óptima es de  $\omega_n = 0.065$  y  $\omega_n = 0.075$  respectivamente, resultando en un error RMSE de 0.27 m/km y 0.48 m/km.

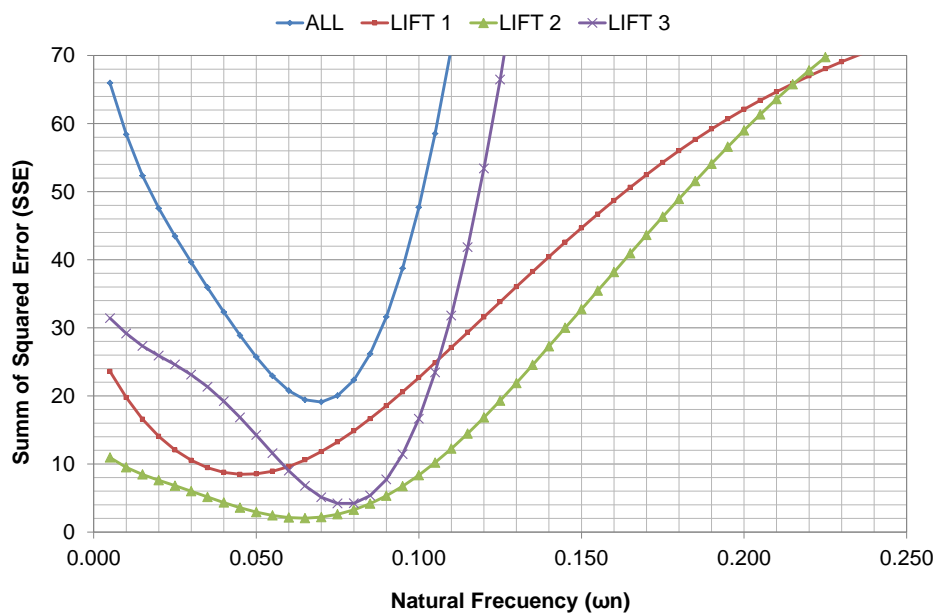


Figura 4.7: Calibración Modelo Base – Solo Secciones Consistentes

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el IRI cada 100 metros para cada sección considerando las frecuencias óptimas de extendido determinadas en la calibración, es decir, utilizando frecuencias de  $\omega_n = 0.045$ ,  $\omega_n = 0.065$  y  $\omega_n = 0.075$

para simulaciones de una, dos o tres pasadas de la extendidora respectivamente. En la Figura 4.8 se presentan los resultados obtenidos.

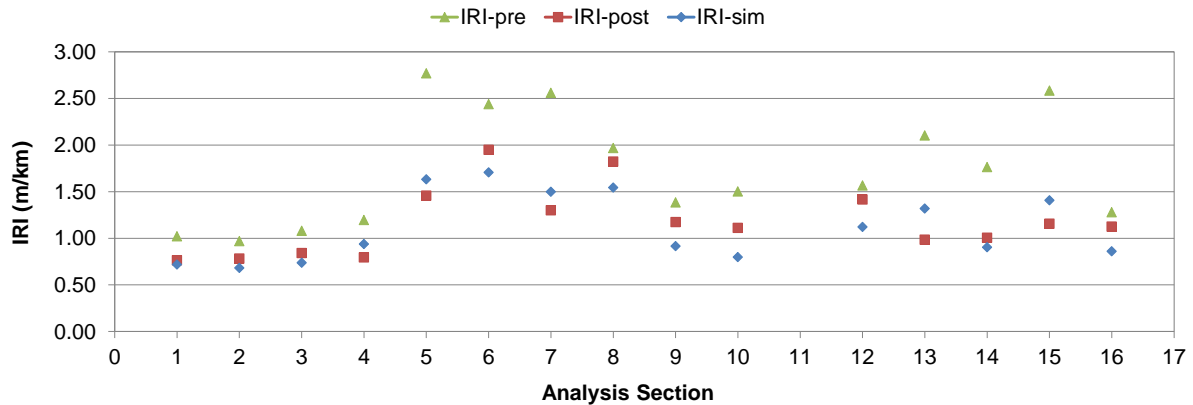


Figura 4.8: Calibración Modelo Base – Comparación IRI 100 m

Al igual que en el análisis anterior, en la Figura 4.8 se puede observar que los valores predichos (IRI-sim) son siempre menores a los valores previos a la ejecución del refuerzo (IRI-pre), demostrando el efecto nivelador del extendido. También, ha mejorado la coherencia general entre el valor predicho (IRI-sim) y el valor real de IRI observado (IRI-post), resultando en un coeficiente de correlación  $r = 0.81$  y un error medio de estimación RMSE de 0.22 m/km en el IRI predicho equivalente a un error porcentual medio MAPE del 17.6%.

En la Figura 4.9 se presenta un ejemplo de los resultados de IRI cada 20 m calculados para cada sección considerando las frecuencias óptimas determinadas en la calibración. En el Anexo C se incluyen el detalle de los resultados obtenidos.

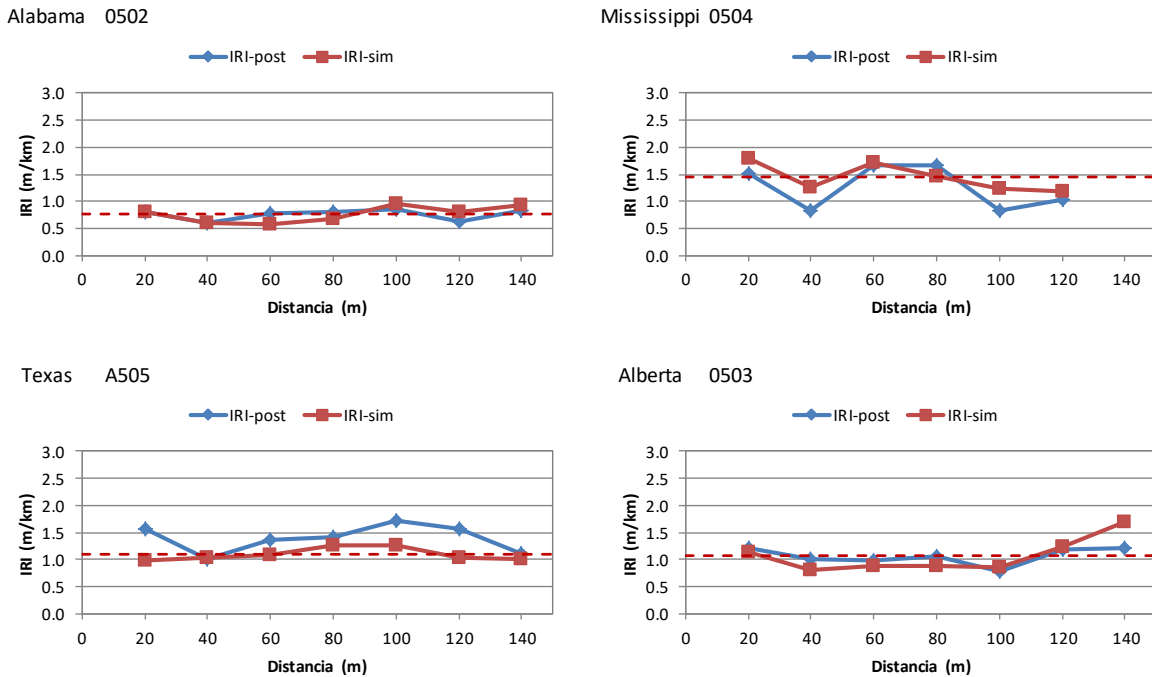


Figura 4.9: Calibración Modelo Base – Evaluación IRI 20 m

#### 4.4.3. Modelo base: Visualización del perfil

A diferencia de los modelos de regresión, el enfoque de modelización empleado permite visualizar gráficamente los aspectos del proceso constructivo que fueron simulados y su efecto en la transformación del perfil longitudinal durante la colocación de la mezcla asfáltica. A modo de ejemplo, se presenta la modelización de extendido para la huella izquierda de la sección Alabama 0502. De acuerdo con la Tabla 4.1, esta sección corresponde a un refuerzo cuyo espesor suelto extendido fue de  $h_{LIFT} = 4.1$  cm (1.6 in), ejecutado en una sola pasada con una extendedora Barber-Greene BG-240B. El espesor compactado fue de  $h_{COMP} = 3.3$  cm (1.3 in), equivalente a un coeficiente de paso  $FF = 0.23$ . Se utiliza la frecuencia natural  $\omega_n = 0.045$  obtenida en la calibración. Los resultados de la simulación se visualizan en la Figura 4.10.

En la Figura 4.10 (superior) se puede apreciar la respuesta del sub-modelo de trayectoria de la regla ( $y_1$ ) en respuesta a la posición del punto de tiro (modelización del rodado) y el sub-modelo de vibración local de la regla ( $y_2$ ) en respuesta a las irregularidades de onda corta del perfil longitudinal bajo la placa alisadora.

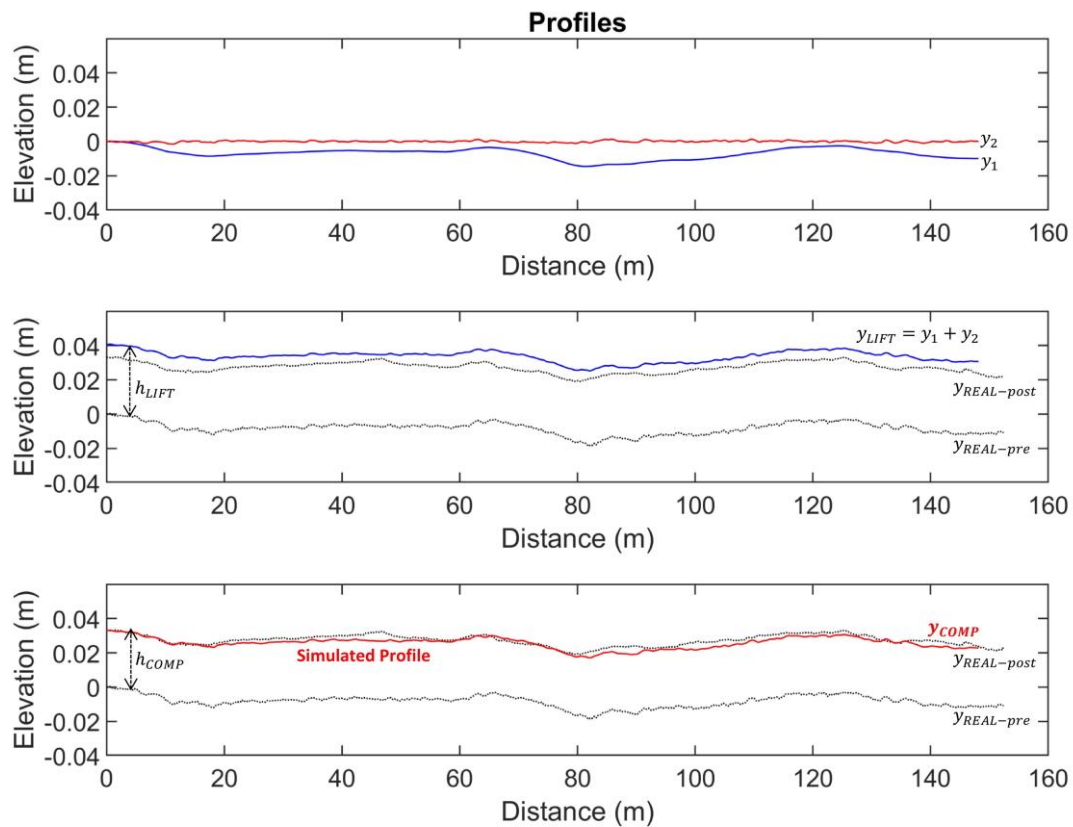


Figura 4.10: Calibración Modelo Base – Visualización Gráfica de Modelización

En la Figura 4.10 (central) se visualiza la respuesta total de la regla ( $y_{LIFT}$ ), resultante de superponer la trayectoria y vibración para el espesor suelto ( $h_{LIFT}$ ) establecido en la posición inicial. El perfil resultante corresponde al extendido sin compactar. La regularidad del perfil real antes de obras es  $IRI\text{-pre} = 1.14$  m/km y luego de las obras es  $IRI\text{-post} = 0.68$  m/km.

Por último, en la Figura 4.10 (inferior) se presenta el perfil final simulado ( $y_{COMP}$ ) luego de la corrección proporcional del espesor extendido por concepto de compactación final con rodillos (coeficiente de paso  $FF = 0.23$ ). La regularidad del perfil final obtenido de la modelización es  $IRI\text{-sim} = 0.72$  m/km, correspondiente a un error  $\Delta IRI = 0.04$  m/km ( $IRI @ 100m$ ) en la predicción.

#### 4.4.4. Comparación con modelos empíricos

Finalmente, considerando la misma base de datos, se ha realizado una comparación entre la capacidad predictiva del nuevo modelo desarrollado y los modelos empíricos evaluados en la Sección 2.2.3. Los valores de IRI simulados

(IRI-sim) obtenidos tanto por el modelo propuesto como por modelos empíricos del estado del arte se han graficado respecto de los valores reales de IRI auscultados después de obra (IRI-post). Los resultados para las 15 secciones de estudio se presentan en la Figura 4.11.

Los valores de IRI-sim para los cuatro modelos empíricos fueron calculados a partir de sus ecuaciones de correlación con el IRI-pre (obtenido a partir del perfil longitudinal inicial), considerando para cada sección de análisis los valores particulares que adoptan las variables de cada modelo de regresión según corresponda. En la Figura 4.11 se puede apreciar que los IRI predichos por el modelo propuesto presentan menor dispersión (mayor precisión) al mismo tiempo que se encuentran más centrados en torno a la recta de igualdad (menor sesgo) respecto de los modelos empíricos tradicionales, lo que se manifiesta en un coeficiente  $R^2$  superior en todos los casos. Estos resultados constituyen una mejora respecto de los modelos disponibles en la literatura, demostrando el potencial del enfoque propuesto como alternativa de modelación.

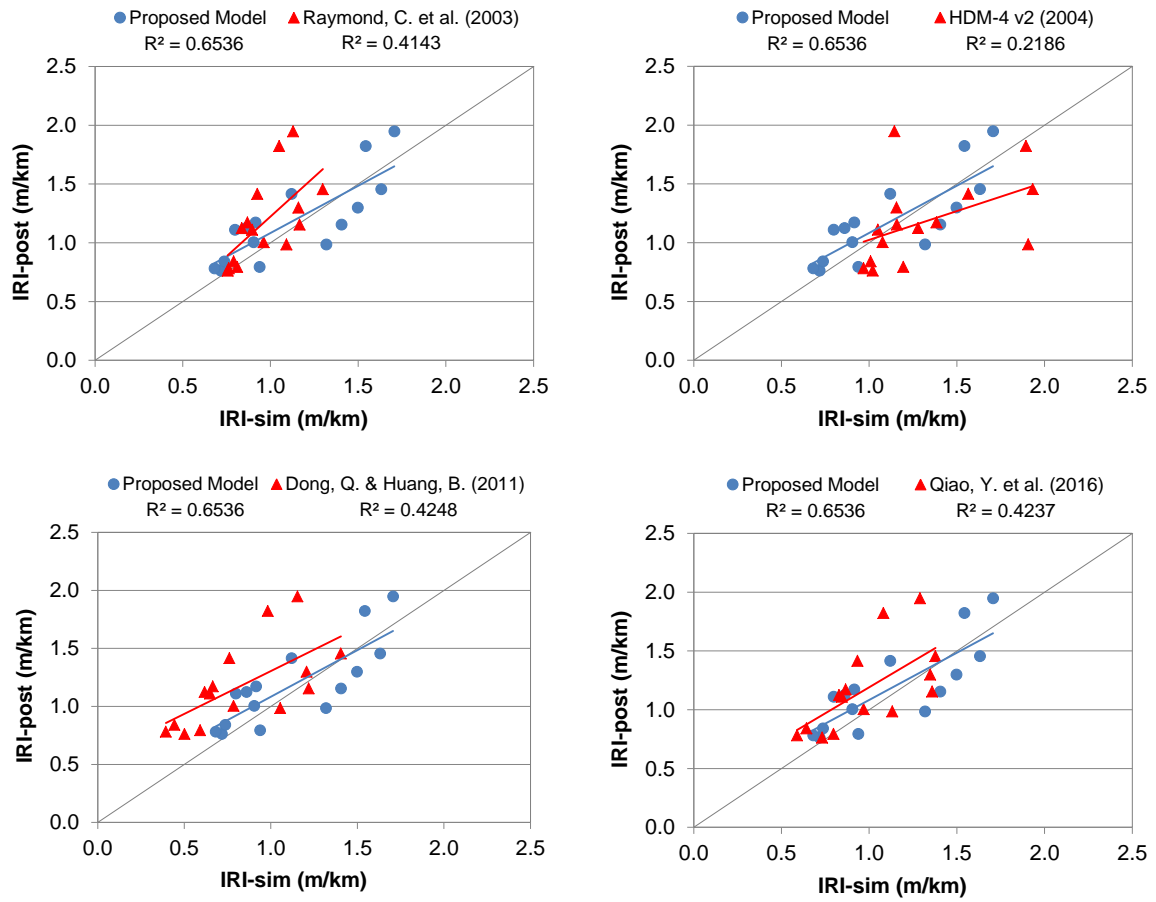


Figura 4.11: Comparación Modelo Base vs Modelos de Regresión

## **5. Desarrollo del modelo ampliado: Nivelación automática**

### **5.1. Introducción**

El modelo base desarrollado y calibrado en el capítulo anterior establece una relación entre las longitudes de onda componentes del perfil longitudinal y la regularidad conseguida durante el proceso constructivo. El concepto subyacente a esta relación es el principio de funcionamiento de la pavimentadora y su respuesta de nivelación, a mayor longitud de onda de los defectos, en mayor medida la regla reproducirá dichas ondulaciones (Barber-Greene, 1972, Ulrich, 1991). Esta es la razón por la cual las pavimentadoras utilizan sistemas de control automático mediante vigas de nivelación (promediación de larga referencia) con el fin de regular la posición del punto de tiro de la regla y compensar su menor eficiencia de nivelación en defecto de mayor longitud de onda.

En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo ampliado que, a partir del modelo base, incorpora el efecto del control automático en la respuesta de la regla. Se desarrollan los sistemas de ecuaciones para los diferentes sub-modelos que describen el proceso de nivelación automático, se detallan los datos y procedimientos empleados en la calibración del modelo y los resultados obtenidos.

### **5.2. Formulación del modelo ampliado**

Los sistemas de nivelación asistida se basan en la utilización de sensores para mantener una elevación predefinida (posición nula) en relación a una referencia longitudinal. Si ocurre una desviación del sensor respecto de la posición nula, se envía una señal a la electroválvula que controla la posición del punto de tiro, subiendo o bajando su elevación para compensar la desviación del sensor y reestablecer así su posición nula. De esta forma, aunque el tractor se mueva verticalmente sobre las irregularidades de la capa subyacente, el sistema automático compensará la posición del punto de tiro manteniendo un ángulo de ataque constante en todo momento y conformando así una superficie más regular.

### 5.2.1. Modelización del Perfil de Referencia: Viga de Nivelación

El modelo representa un sistema de sensores acústicos instalados sobre una viga flotante unida a la pavimentadora. Los sistemas de referencia mediante viga flotante para pavimentadoras están hechos típicamente de 3 o 4 sensores ultrasónicos montados en una viga de 9 a 13 m. Cada sensor envía sus resultados de medición a la unidad de control en donde los valores son promediados estableciendo una referencia para la regla como resultado de la regularización de la superficie subyacente.

El sensor de seguimiento (punto de control) debe ubicarse en el centro de la viga de nivelación (punto pivote de la viga). Al operar de esta forma, el movimiento ascendente y descendente de la viga durante la pavimentación no afecta el valor promedio registrado.

Para efectos del modelo, se asumió una viga de nivelación de 9 m con tres (3) sensores. En esta configuración el censor central se ubica en el punto medio de la viga, y por lo tanto, coincide con el punto de control de la regla (ver Figura 5.1).

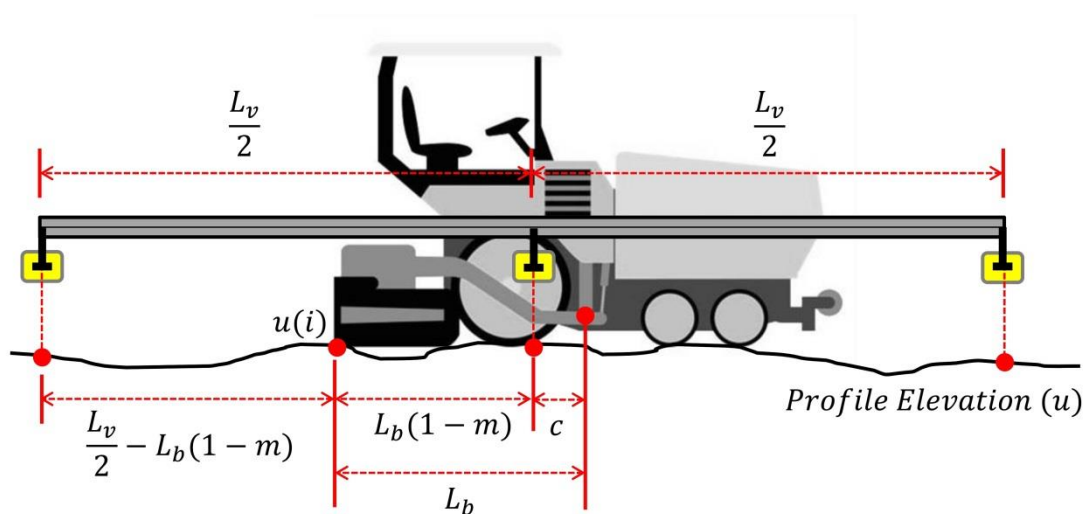


Figura 5.1: Referencia Móvil – Cálculo del Perfil de Referencia

El perfil de referencia ( $u_{|v|}$ ) resultante de la promediación de larga referencia es obtenido mediante la siguiente expresión.

$$u_{lvl} = \frac{1}{3} \left\{ u \left[ i - \left( \frac{L_v}{2} - L_b(1 - m) \right) \right] + u \left[ i + L_b(1 - m) \right] + u \left[ i + \left( \frac{L_v}{2} + L_b(1 - m) \right) \right] \right\} \quad (35)$$

Dónde:

$L_v$  : Longitud de la viga de nivelación. Supuesto 9 m.

$m$  : Ratio de ubicación del centro de la viga en relación a la longitud de arrastre.  $m = c/L_b$

$c$  : Distancia desde el punto de tiro al centro de la viga (sensor central)

$i$  : Cada una de las “n” cotas del perfil longitudinal “u” ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

En la Ecuación (35) la elevación ‘u’ del perfil está referida respecto al extremo posterior de la extendedora (borde de arrastre de la regla).

### 5.2.2. Modelo de la unidad de control

En la posición inicial, antes de comenzar la pavimentación, la diferencia o error entre el punto de control ( $y_{cp}$ ) y el valor de referencia es asignado como cero, por lo tanto, no existe un error de control (punto nulo o *null point*). Cuando la extendedora comienza a moverse sobre la superficie a pavimentar la posición del punto de tiro cambia, y en consecuencia, también lo hace la posición de la regla, ocasionando una desviación del punto de control respecto de la referencia.

La unidad de control utiliza el valor de elevación establecido por la referencia (valor objetivo) y lo compara con la posición actual de la regla en el punto de control; la desviación obtenida es el valor de error (err) para generar la señal de control. Se puede establecer la siguiente relación directa entre la elevación del punto de tiro ( $y_{tp}$ ), la posición de la regla ( $y_1$ ) y la elevación del punto de control ( $y_{cp}$ ). Ver Figura 5.2.

$$\frac{y_{tp} - y_1}{L_b} = \frac{y_{tp} - y_{cp}}{c} \Rightarrow y_{cp} = y_{tp} \left( \frac{L_b - c}{L_b} \right) + \frac{c}{L_b} y_1 \quad (36)$$

$$m = \frac{c}{L_b} \Rightarrow y_{cp} = y_{tp}(1 - m) + m \cdot y_1 \quad (37)$$

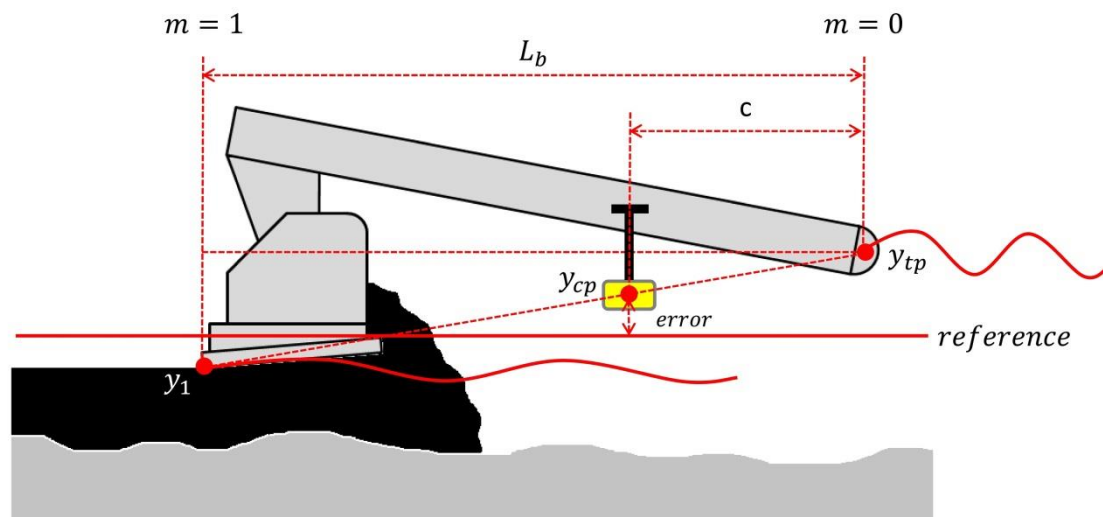


Figura 5.2: Ubicación del Punto de Control de la Regla

Los sistemas de control automático utilizan configuraciones de sensibilidad para establecer cuán rápido, o sensible, el controlador reacciona a una desviación. Los rangos de configuración usualmente comienzan en 1 (baja sensibilidad) hasta 10 (alta sensibilidad). Detrás de este valor existe una combinación pre-establecida de los parámetros de control denominados “Banda Muerta” y “Banda Proporcional” (MOBA, 2017, Topcon, 2014, Mini-Line, 2018).

La banda muerta ( $D_b$ , por sus siglas en inglés *Dead Band*) corresponde a la resolución del sistema y define la desviación mínima, respecto de la referencia, requerida para iniciar una actuación del sistema. Si el error detectado es menor a la banda muerta, la unidad de control no iniciará ninguna regulación. Este parámetro tiene el propósito de asegurar un comportamiento estable de la regla en torno al punto de control. Un valor mínimo de banda muerta es requerido para permitir la vibración normal de la maquinaria sin iniciar actuaciones de control.

La banda proporcional ( $P_b$ , por sus siglas en inglés *Proportional Band*) es el rango de la medición del sensor de control por encima o por debajo del valor de referencia sobre el cual la señal de control hidráulico es proporcional a la desviación (error). La salida hidráulica mínima es aplicada cuando la lectura del sensor está justo por encima de la banda muerta  $D_b$  (comienzo de  $P_b$ ) y la máxima salida hidráulica se obtiene cuando la lectura del sensor se desvía de la referencia en una magnitud igual o superior a la banda proporcional seleccionada. Un menor  $P_b$  se traduce en una respuesta hidráulica más rápida del cilindro de control.

La relación proporcional entre la magnitud de la desviación en el sensor y la señal de salida generada por la unidad de control se denomina ganancia de control ( $K_c$ , *control gain*). Expresada como ratio respecto de la corriente máxima en la válvula ( $i_v/i_{max}$ ) la ganancia de control está dada por  $K_c = 1/P_b$ .

Los fabricantes de sistemas de control proveen valores por defecto para la sensibilidad (SEN) correspondientes a combinaciones específicas de  $Db$  y  $P_b$ . En la Tabla 5.1 se presentan los valores considerados en la presente investigación, correspondientes a la configuración por defecto para el caso de válvula solenoide proporcional en un sistema de nivelación para pavimentadoras desarrollado por la empresa MOBA (*Mobile Automation Company*) (MOBA, 2017).

Tabla 5.1: Configuración de Sensibilidad para Servo-válvulas y Válvulas Proporcionales

Sensitivity (SEN)	Dead Band Db (mm)	Prop Band Pb (mm)
1	2.2	46.0
2	2.0	41.0
3	1.8	36.0
4	1.6	31.0
5	1.4	26.0
6	1.2	21.0
7	1.0	16.0
8	0.8	11.0
9	0.6	6.0
10	0.4	1.0

Fuente: MOBA-Matic Levelling System for Paver

A modo de ejemplo, al utilizar un valor de sensibilidad  $SEN = 5$ , los parámetros de control son  $Db = 1.4$  (mm),  $P_b = 26$  (mm) y por lo tanto la ganancia  $K_c = 1/26 = 0.038$  (1/mm) o  $K_c = 38$  (1/m). Esto significa que, para una desviación de  $err = 5$  (mm) en la posición de la regla respecto de la referencia (evaluada en el punto de control), el sistema enviará una señal de control  $i_c = 5 \times 0.038 = 0.19$  (o 19% de la corriente máxima) a la válvula solenoide. Cualquier desviación mayor a  $P_b = 26$  mm, producirá la máxima señal de control de  $i_c = 1$  (o 100% de la corriente máxima). La relación entre los parámetros de control se ejemplifica gráficamente en la Figura 5.3.

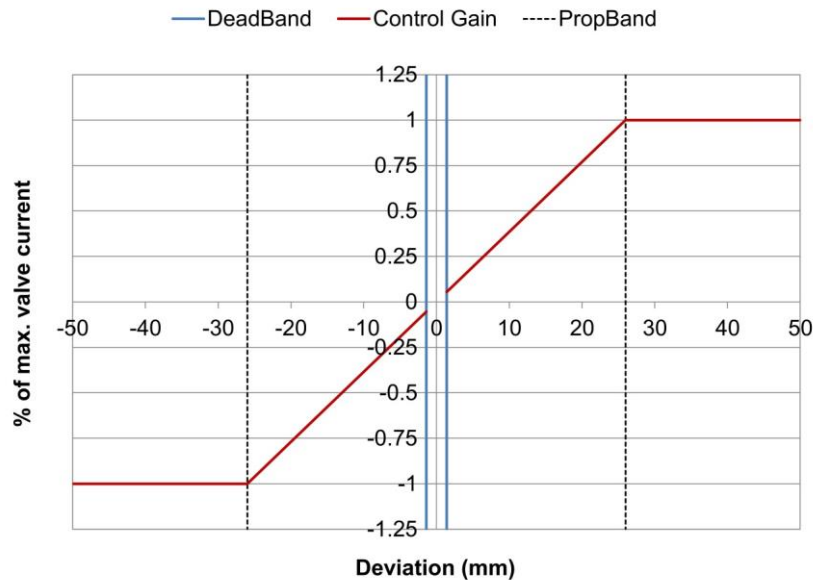


Figura 5.3: Unidad de Control – Visualización de la Banda Muerta y Banda Proporcional

### 5.2.3. Modelización válvula de control

Las pavimentadoras asfálticas están provistas de una válvula de control para ajustar la posición de la regla. La válvula regula el flujo de aceite hidráulico dentro de las cámaras del cilindro que produce el movimiento ascendente o descendente del pistón que controla la elevación del punto de tiro, y en consecuencia, de la regla.

Las válvulas utilizadas para este fin son típicamente válvulas de solenoide controladas eléctricamente. Dependiendo del diseño del actuador, las válvulas de solenoide pueden proveer de posicionamiento de válvula y caudal variables (solenoide proporcional) o de operación como conmutador entre posiciones de válvula completamente abierta/cerrada (solenoide *on-off*). Para esta investigación se asumió una válvula de solenoide proporcional típica.

Una válvula de solenoide proporcional controla el caudal de fluido variando el tamaño del paso de flujo a través del puerto u orificio de salida de la válvula. El posicionamiento variable de la válvula se logra por medio de un actuador de solenoide, constituido por una bobina eléctrica con un núcleo ferromagnético móvil (corredera) en su interior. Ver Figura 5.4.

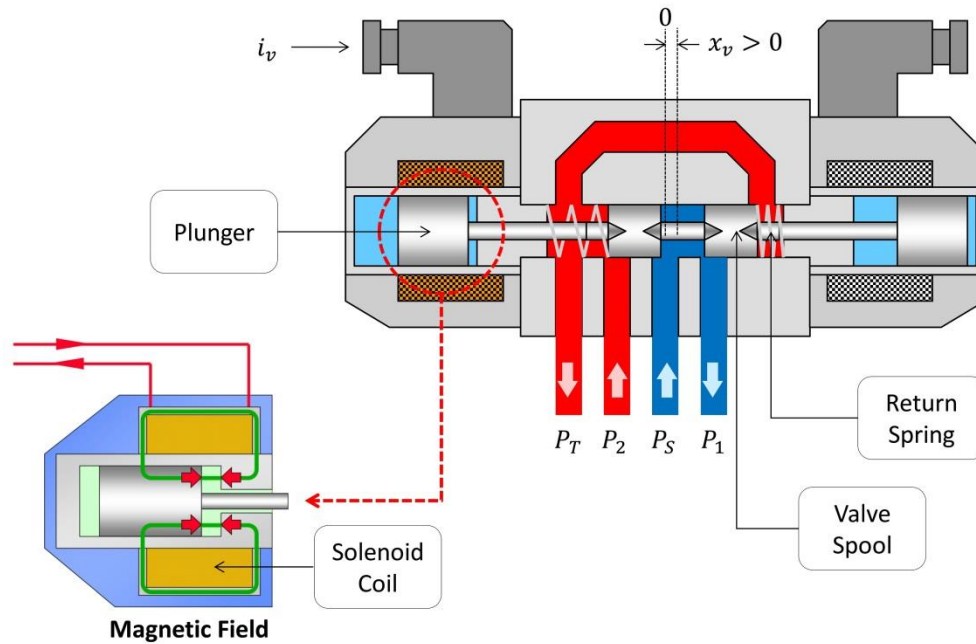


Figura 5.4: Principio de Funcionamiento de la Válvula Solenoide

La operación de la válvula solenoide puede ser descrita por la interacción de tres subsistemas: (1) subsistema electromagnético, (2) subsistema mecánico y (3) subsistema hidráulico.

En la posición nula o cerrada (solenoide no energizado) un resorte mantiene el vástago contra los puertos de la válvula, cerrando los orificios e impidiendo de este modo el flujo a través de la misma. Cuando el solenoide es energizado el flujo de corriente por la bobina crea un campo magnético (subsistema electromagnético). El campo magnético ejerce una fuerza de atracción que se incrementa hasta que su magnitud es suficiente para superar la fuerza del resorte (subsistema mecánico) e iniciar el movimiento de la corredera hacia el interior del solenoide (ver Figura 5.4). El desplazamiento del vástago abre los orificios de la válvula permitiendo el flujo de aceite a través de los puertos (subsistema hidráulico). Una vez que se quita la energía, el resorte restituye el vástago a su posición de reposo original.

### 5.2.3.1. Dinámica del actuador solenoide

El modelo matemático completo del actuador de la válvula solenoide (subsistemas electromagnético y mecánico) puede ser descrito por un sistema no-lineal de tercer orden. Una ecuación diferencial ordinaria (EDO) no-lineal de primer orden

para el circuito del solenoide, Ecuación (38), y una EDO no-lineal de segundo orden para el sistema electromecánico, Ecuación (39) (Kluever, 2015).

$$V_e(t) - \frac{dL}{dx} \dot{x} \cdot i = iR + L(x) \frac{di}{dt} \quad (38)$$

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_{em} = \frac{1}{2} L_x \cdot i^2 \quad (39)$$

En la Ecuación (38) la inductancia  $L(x)$  y su derivada ( $L_x$ ) son funciones no lineales de la posición del actuador. El término  $-L_x \dot{x} \cdot i$  representa el efecto de la posición del vástago sobre el voltaje inducido en la bobina. Cuando el actuador es atraído con velocidad ( $\dot{x}$ ) hacia el interior del solenoide, induce un voltaje que se opone a la caída de tensión suministrada por la fuente. En la Ecuación (39) la fuerza electromagnética ( $F_{em}$ ) es una función no lineal de la corriente y la posición del vástago.

El comportamiento dinámico descrito anteriormente involucra un gran número de parámetros, algunos de los cuales son solo conocidos sobre un cierto rango o incluso completamente desconocidos. Este tipo de análisis es de utilidad para el diseño de válvulas de control, donde la influencia de todas las variables en la respuesta dinámica debe ser tomada en cuenta. Sin embargo, para efectos de aplicación, la descripción analítica completa del sistema puede ser innecesaria ya que resulta lenta y difícil de validar. Para efectos prácticos, los fabricantes de electroválvulas usualmente proveen en sus catálogos información de la conocida respuesta al escalón unitario o la respuesta en frecuencias para varios tipos y tamaños de válvulas, especificaciones técnicas que se utilizan para desarrollar modelos simplificados de precisión suficiente para aplicaciones prácticas (Jelali and Kroll, 2003).

### 5.2.3.2. Modelo simplificado de respuesta temporal

Para efectos de modelizar el sistema de control en esta investigación, se ha simplificado el modelo no-lineal de tercer orden para el actuador de la válvula solenoide descrito anteriormente. Cuando la dinámica de la válvula es suficientemente rápida, en relación a la respuesta del proceso que se desea controlar (movimiento del cilindro del punto de tiro), el desplazamiento de la

corredera ( $x_v$ ) desde la posición nula puede considerarse proporcional a una respuesta lineal de primer orden a la variable de entrada (corriente); lo cual se considera suficientemente preciso para modelar la respuesta temporal de válvulas proporcionales comunes (Thayer, 1965, Alleyne and Liu, 1999, Niksefat and Sepehri, 2001).

$$\dot{x}_v = -\frac{1}{\tau_v} x_v + \frac{K_i}{\tau_v} \cdot i_v \quad (40)$$

Dónde:

- $x_v$  : Desplazamiento corredera de la válvula (m)
- $\tau_v$  : Constante de tiempo equivalente de la válvula (s)
- $K_i$  : Ganancia corriente-posición de la corredera para la respuesta estacionaria (m/A)
- $i_v$  : Corriente de entrada a la válvula (A)

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (40), considerando condiciones iniciales iguales a cero, y reordenando los términos, se obtiene la siguiente expresión para la función de transferencia del sistema.

$$\frac{x_v(s)}{i_v(s)} = H_v(s) = \left( \frac{1}{\tau s + 1} \right) K_i \quad (41)$$

La constante de tiempo ( $\tau_v$ ) de la válvula se obtiene a partir del tiempo de respuesta al escalón especificado por el fabricante. Para efectos de la investigación se asumió una válvula proporcional de la marca Bosch-Rexroth de características similares a las típicamente observadas en los diagramas hidráulicos que acompañan los manuales de máquinas pavimentadoras.

El modelo seleccionado (4WRA-B6) corresponde a una válvula proporcional de control direccional de 4/3 vías con un caudal nominal de 12 (l/min). El tiempo de respuesta al escalón es de 18 (ms) a la posición abierta (ON) y 20 (ms) a la posición cerrada (OFF).

De acuerdo con lo anterior, la frecuencia de la válvula ( $f_v$ ) para un ciclo (0 – 100% – 0) está dado por:

$$f_v = \frac{1}{t_{on} + t_{off}} = \frac{1}{18 + 20} \times 1000 = 26.3 \text{ (Hz)} \quad (42)$$

La constante de tiempo equivalente de la válvula ( $\tau_v$ ) se calcula mediante la siguiente expresión (Thayer, 1965).

$$\tau_v = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_v} = 0.00605 \text{ (s)} = 6.1 \text{ (ms)} \quad (43)$$

### 5.2.3.3. Modelo de respuesta hidráulica

El último aspecto a modelizar es la relación entre la posición de la corredera ( $x_v$ ) y el flujo de aceite hidráulico a través de los puertos de la válvula (subsistema hidráulico). Las ecuaciones que representan el flujo saliente de la válvula hacia el cilindro ( $Q_1$ ) y el que flujo que retorna ( $Q_2$ ) están dadas por la conocida ecuación general de flujo a través de orificios (Merritt, 1967). Para el caso de extendido del cilindro ( $x_v > 0$ ).

$$Q_1 = C_d \cdot A_{v1} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} \quad (44)$$

$$Q_2 = C_d \cdot A_{v2} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_T)} \quad (45)$$

Dónde:

$Q_1$  : Flujo saliente de la válvula a través del puerto 1 (orificio 1) ( $m^3/s$ )

$Q_2$  : Flujo que retorna a la válvula a través del puerto 2 (orificio 2) ( $m^3/s$ )

$C_d$  : Coeficiente de descarga

- $A_{v1}$  : Área de apertura del orificio 1 (m<sup>2</sup>). Función de la posición de la corredera ( $x_v$ )
- $A_{v2}$  : Área de apertura del orificio 2 (m<sup>2</sup>). Función de la posición de la corredera ( $x_v$ )
- $P_s$  : Presión de suministro (MPa)
- $P_1$  : Presión en la cámara 1 del cilindro (MPa). Conectada al puerto 1 de la válvula.
- $P_2$  : Presión en la cámara 2 del cilindro (MPa). Conectada al puerto 2 de la válvula.
- $P_T$  : Presión de retorno al tanque (MPa)
- $\rho$  : Densidad del aceite hidráulico (kg/m<sup>3</sup>)

Considerando que los puertos de las válvulas son iguales y simétricos, entonces  $A_{v1} = A_{v2} = A_v$ . La tasa de cambio del área de apertura del orificio con el desplazamiento de la corredera se denomina el gradiente de área de la válvula ( $w$ ). Para una válvula lineal, simétrica y críticamente centrada; el área de apertura de los puertos ( $A_v$ ) es proporcional, con un grado de aproximación suficiente, al desplazamiento de la corredera ( $A_v \approx w \cdot x_v$ ) que a su vez se ha considerado proporcional a la corriente aplicada ( $x_v \approx K_i \cdot i_v$ ). La presión de retorno al tanque es usualmente despreciable ( $P_T \approx 0$ ) en relación a las presiones en las líneas  $P_1$  y  $P_2$ . Luego, las ecuaciones de flujo pueden expresarse en función de la corriente de la siguiente forma.

$$Q_1 = C_d \cdot w \cdot x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} = C_d \cdot w \cdot K_i \cdot i_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_1)} = K_f \cdot i_v \sqrt{P_s - P_1} \quad (46)$$

$$Q_2 = C_d \cdot w \cdot x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_T)} = C_d \cdot w \cdot K_i \cdot i_v \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2} = K_f \cdot i_v \sqrt{P_2} \quad (47)$$

Donde el coeficiente de válvula  $K_f = C_d \cdot w \cdot K_i \sqrt{\frac{2}{\rho}}$

### 5.2.3.4. Linearización del modelo

En ingeniería de control cuando un sistema no-lineal opera alrededor de un punto de equilibrio, y si las señales involucradas son pequeñas, es posible aproximar el sistema no lineal mediante un sistema lineal. Este método es comúnmente aplicado en la modelización de sistemas controlados por válvulas, en que las características de flujo no-lineal a través de la válvula se linealizan en torno a punto de operación para ser combinadas con los otros términos dinámicos del sistema de control. Tal modelo linealizado permite desarrollar una función de transferencia lineal que luego puede ser utilizada con el análisis convencional de sistemas lineales (Watton, 2007, Ogata, 2010).

El procedimiento de linealización se basa en el desarrollo de la función no-lineal en series de Taylor alrededor del punto de operación y la retención sólo del término lineal. Debido a que no se consideran los términos de orden superior del desarrollo en serie de Taylor, estos términos no considerados deben ser suficientemente pequeños; es decir, las variables sólo se desvían ligeramente de la condición de operación.

De acuerdo con lo anterior, la Ecuación (46) y Ecuación (47) que representan el flujo saliente y entrante a la válvula respectivamente se pueden linealizar en torno al punto de operación (0) mediante desarrollo en series de Taylor.

Asumiendo una presión de suministro ( $P_s$ ) constante, el desarrollo en series de Taylor para la ecuación del flujo saliente de la válvula ( $Q_1$ ) está dado por.

$$\Delta Q_1 = \left. \frac{\partial Q_1}{\partial i_v} \right|_0 \cdot \Delta i_v - \left. \frac{\partial Q_1}{\partial P_1} \right|_0 \cdot \Delta P_1 \quad (48)$$

Dónde:

$$\left. \frac{\partial Q_1}{\partial i_v} \right|_0 = K_f \sqrt{P_s - P_{10}} = K_{q1} \quad (49)$$

$$\left. \frac{\partial Q_1}{\partial P_1} \right|_0 = \frac{K_f i_{v0}}{2\sqrt{P_s - P_{10}}} = K_{p1} \quad (50)$$

Los coeficientes  $K_q$  y  $K_p$  se denominan coeficientes de ganancia-flujo y presión-flujo respectivamente. Por lo tanto, la ecuación linealizada del flujo saliente de la válvula está dada por.

$$\Delta Q_1 = K_{q1} \cdot \Delta i_v - K_{p1} \cdot \Delta P_1 \quad (51)$$

Del mismo modo, se puede obtener el desarrollo en series de Taylor para la ecuación del flujo que retorna a la válvula ( $Q_2$ ).

$$\Delta Q_2 = \left. \frac{\partial Q_2}{\partial i_v} \right|_0 \cdot \Delta i_v + \left. \frac{\partial Q_2}{\partial P_2} \right|_0 \cdot \Delta P_2 \quad (52)$$

Dónde:

$$\left. \frac{\partial Q_2}{\partial i_v} \right|_0 = K_f \sqrt{P_{20}} = K_{q2} \quad (53)$$

$$\left. \frac{\partial Q_2}{\partial P_2} \right|_0 = \frac{K_f i_{v0}}{2\sqrt{P_{20}}} = K_{p2} \quad (54)$$

La ecuación linealizada del flujo que retorna a la válvula está dada por.

$$\Delta Q_2 = K_{q2} \cdot \Delta i_v + K_{p2} \cdot \Delta P_2 \quad (55)$$

El punto de operación más importante es la condición nula de la válvula (cerrada), ya que la operación normal del sistema ocurre usualmente en torno a este punto. La ganancia-flujo de la válvula es la más grande y el coeficiente de presión-flujo es el menor ( $K_{p1} = K_{p2} = K_p \approx 0$ ).

Por lo tanto, para una válvula de corredera críticamente centrada, en la condición nula ( $i_{v0} = 0$  y  $P_{10} = P_{20} = P_s/2$ ) el coeficiente linealizado de ganancia flujo está dado por la Ecuación (56) (Watton, 2007).

$$K_{q1} = K_{q2} = K_q = K_f \sqrt{\frac{P_s}{2}} \quad (56)$$

El coeficiente de válvula  $K_f$  puede ser determinado experimentalmente o puede ser calculado utilizando la especificación de operación nominal provista en el catálogo del fabricante.

### 5.2.3.5. Coeficiente de flujo nominal

Los fabricantes determinan experimentalmente el caudal de fluido que pasa a través de la válvula para unas condiciones específicas de operación denominadas “nominales”. El resultado se especifica en el manual de la válvula como caudal nominal ( $Q_R$ ).

Para determinar el caudal nominal (*rated condition test*), los puertos de la válvula están conectados ( $Q_1 = Q_2$ ) mediante una restricción que genera una caída de presión  $P_L = P_1 - P_2$ . De acuerdo con la ecuación general de flujo, el caudal en la válvula bajo estas condiciones está dado por la siguiente expresión.

$$Q_L = K_f \cdot i_v \sqrt{\frac{P_s - P_L}{2}} \quad (57)$$

Los fabricantes especifican el caudal nominal ( $Q_R$ ) para la corriente nominal ( $i_{max}$ ). Por lo tanto, el coeficiente de flujo nominal ( $K_f$ ) está dado por.

$$Q_R = K_f \cdot i_{max} \sqrt{\frac{\Delta P_R}{2}} \Rightarrow K_f = \frac{Q_R}{i_{max}} \sqrt{\frac{2}{\Delta P_R}} \quad (58)$$

En válvulas proporcionales, la prueba se realiza para una caída de presión  $\Delta P_R = P_s - P_L = 10 \text{ (bar)} = 1 \text{ (MPa)}$ .

### 5.2.3.6. Funciones de transferencia de la válvula

Reemplazando la expresión para el coeficiente de flujo ( $K_f$ ) en la Ecuación (51) y (55), se obtienen las siguientes ecuaciones linealizadas para el flujo saliente y de retorno a la válvula (validas en torno al punto de operación nulo).

$$Q_1 = \frac{Q_R}{i_{max}} \sqrt{\frac{2}{\Delta P_R}} \cdot \sqrt{\frac{P_s}{2}} \cdot i_v - K_p \cdot P_1 = K_Q \cdot \frac{i_v}{i_{max}} - K_p \cdot P_1 \quad (59)$$

$$Q_2 = \frac{Q_R}{i_{max}} \sqrt{\frac{2}{\Delta P_R}} \cdot \sqrt{\frac{P_s}{2}} \cdot i_v + K_p \cdot P_2 = K_Q \cdot \frac{i_v}{i_{max}} + K_p \cdot P_2 \quad (60)$$

Donde  $K_Q$  se define como la ganancia de flujo de la válvula:  $K_Q = Q_R \cdot \sqrt{\frac{P_s}{\Delta P_R}}$

Para efectos del modelo, se asumió una válvula de solenoide proporcional con un caudal nominal de  $Q_R = 12$  (L/min), una presión de suministro de  $P_s = 5$  (MPa) y un coeficiente de presión flujo  $K_P = 5 \times 10^{-11}$ .

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (59) y Ecuación (60), considerando condiciones iniciales iguales a cero, y reordenando los términos, se obtienen las siguientes funciones de transferencia lineales.

$$Q_1(s) = K_Q \cdot i_c(s) - K_p \cdot P_1(s) \quad (61)$$

$$Q_2(s) = K_Q \cdot i_c(s) + K_p \cdot P_2(s) \quad (62)$$

Donde la corriente de entrada es:  $i_c = \frac{i_v}{i_{max}}$

De la Ecuación (61) y Ecuación (62) se puede observar que la corriente de entrada es el ratio de corriente máxima de la válvula ( $i_v/i_{max}$ ), que corresponde a la señal proveniente de la unidad de control derivada en la Sección 5.2.2.

### 5.2.4. Modelo de respuesta cilindro hidráulico

El cilindro hidráulico que controla el punto de tiro consiste en un cilindro de pistón asimétrico como el ilustrado en la Figura 5.5. La derivación del modelo para el sistema válvula-cilindro que se presenta a continuación está basado en el procedimiento descrito por Niksefat and Sepehri (2001).

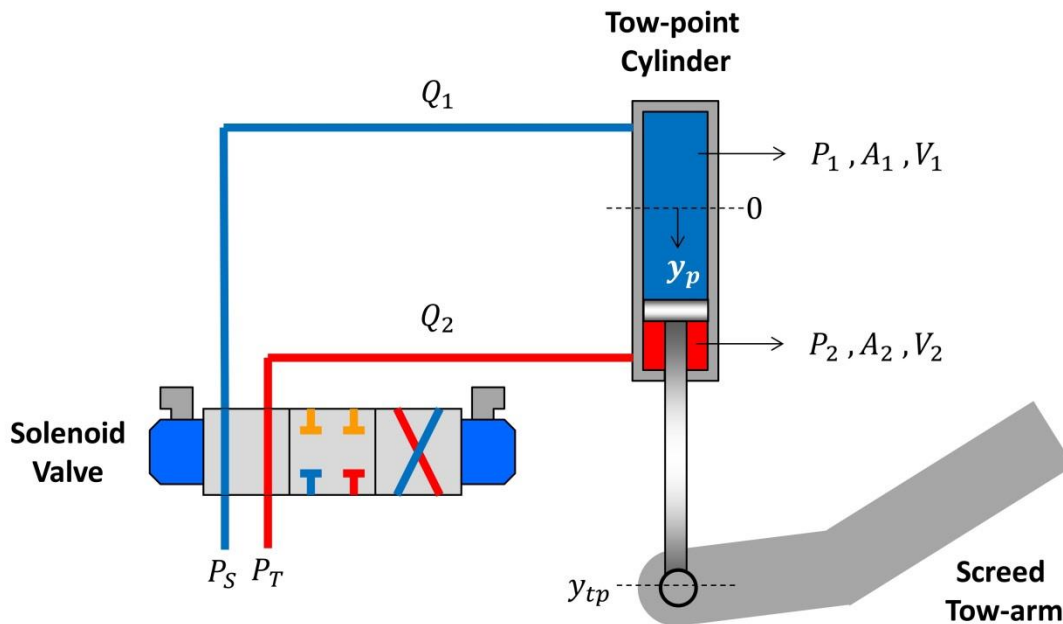


Figura 5.5: Sistema de Control Válvula-Cilindro

En la Figura 5.5,  $P_S$  es la presión de suministro desde la bomba hidráulica y  $P_T$  es la presión de retorno al tanque.

#### 5.2.4.1. Ecuación de movimiento del cilindro

Asumiendo que no existen otras fuerzas externas actuando sobre el punto de tiro, además de la fuerza de elevación o descenso ejercida por el movimiento del pistón, el modelo del sistema se obtiene a partir del equilibrio de fuerzas según la siguiente expresión.

$$m_e \ddot{y}_p(t) + b \dot{y}_p(t) = P_1 \cdot A_1 - P_2 \cdot A_2 \quad (63)$$

Dónde:

$m_e$  : Masa equivalente (brazo de tiro +  $\frac{1}{2}$  regla) soportada por el cilindro.  
Supuesto 800 (kg)

$y_p$  : Desplazamiento del pistón al interior del cilindro (relativo a su posición inicial) (m)

$b$  : Coeficiente de amortiguamiento viscoso del pistón (fricción de Coulomb) (N·s/m)

$P_1$  : Presión hidráulica en la cámara superior del cilindro (Pa)

$A_1$  : Área transversal de la cámara superior del cilindro. Lado sin vástago (m<sup>2</sup>)

$P_2$  : Presión hidráulica en la cámara inferior del cilindro (Pa)

$A_2$  : Área transversal de la cámara inferior del cilindro. Lado con vástago (m<sup>2</sup>)

Las áreas  $A_1$  y  $A_2$  de las cámaras superior e inferior del cilindro se calculan a partir de los diámetros del pistón y el vástago respectivamente.

$$A_1 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad A_2 = \pi \left(\frac{D^2 - d^2}{4}\right) \quad (64)$$

Dónde:

$D$  : Diámetro del pistón del cilindro. Supuesto 0.1 (m)

$d$  : Diámetro del vástago del cilindro. Supuesto 0.05 (m)

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (63), considerando condiciones iniciales iguales a cero, y reordenando los términos, se obtiene la siguiente expresión para la ecuación de movimiento del cilindro.

$$y_p(s)(m_e s^2 + bs) = A_1 P_1(s) - A_2 P_2(s) \quad (65)$$

### 5.2.4.2. Ecuación de continuidad del cilindro

El siguiente paso es establecer las ecuaciones de continuidad para cada cámara del cilindro. Despreciando las filtraciones de fluido entre ambas cámaras.

$$Q_1 = A_1 \frac{dy_p}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \cdot \frac{dP_1}{dt} \quad (66)$$

$$Q_2 = A_2 \frac{dy_p}{dt} + \frac{V_2}{\beta_e} \cdot \frac{dP_2}{dt} \quad (67)$$

Dónde:

$V_1$  : Volumen cámara superior del cilindro (m<sup>3</sup>)

$V_2$  : Volumen cámara inferior del cilindro (m<sup>3</sup>)

$\beta_e$  : Módulo de elasticidad del aceite hidráulico (Pa). Supuesto 700 (MPa)

La posición inicial o neutra del pistón ( $y_p = 0$ ) se define de modo tal que los volúmenes en las cámaras superior e inferior del cilindro sean iguales ( $V_{10} = V_{20}$ ). Asumiendo pequeños desplazamientos del pistón en torno a la posición neutra, se puede considerar la siguiente aproximación (Niksefat and Sepehri, 2001).

$$\frac{V_1}{\beta_e} \approx \frac{V_2}{\beta_e} \approx \frac{1}{\beta_e} \left( \frac{V_{10} + V_{20}}{2} \right) = \frac{1}{\beta_e} \left( \frac{V_t}{2} \right) = C_H \quad (68)$$

Dónde:

$V_t$  : Volumen total del cilindro en la posición neutra (m<sup>3</sup>)

$C_H$  : Capacitancia hidráulica (m<sup>3</sup>/Pa)

Aplicando la transformada de Laplace a la Ecuación (66) y Ecuación (67), considerando condiciones iniciales iguales a cero, y reordenando los términos, se obtienen las siguientes expresiones.

$$Q_1(s) = sA_1 \cdot y(s) + sC_H \cdot P_1(s) \quad (69)$$

$$Q_2(s) = sA_2 \cdot y(s) + sC_H \cdot P_2(s) \quad (70)$$

### 5.2.5. Modelo del sistema válvula-cilindro

Combinando las funciones de transferencia del cilindro, Ecuación (69) y Ecuación (70), con las funciones de transferencia lineales obtenidas para la válvula, Ecuación (61) y Ecuación (62), y reordenando los términos, se obtienen las siguientes expresiones en el dominio de Laplace para las presiones hidráulicas en las cámaras superior ( $P_1$ ) e inferior ( $P_2$ ) del cilindro.

$$P_1(s) = \frac{K_Q}{sC_H + K_p} \cdot i_c(s) - \frac{sA_1}{sC_H + K_p} \quad (71)$$

$$P_2(s) = -\frac{K_Q}{sC_H + K_p} \cdot i_c(s) + \frac{sA_2}{sC_H + K_p} \quad (72)$$

Reemplazando los resultados en la ecuación de movimiento del cilindro, Ecuación (65), y reordenando los términos, se obtiene la expresión para el sistema válvula-cilindro.

$$y_p(s)[(m_e s^2 + bs)(sC_H + K_p) + s(A_1^2 + A_2^2)] = K_Q(A_1 + A_2) \cdot i_c(s) \quad (73)$$

A partir de la Ecuación (73) se deduce la función de transferencia del sistema  $H_c(s)$ . Despreciando el amortiguamiento ( $b$ ) y definiendo el ratio de áreas entre el pistón y vástago del cilindro:  $\alpha = A_2/A_1$ .

$$\frac{y_p(s)}{i_c(s)} = H_c(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{\frac{1 + \alpha}{A_1(1 + \alpha^2)} \cdot K_Q}{\frac{m_e C_H}{A_1^2(1 + \alpha^2)} s^2 + \frac{m_e K_p}{A_1^2(1 + \alpha^2)} s + 1} \quad (74)$$

Aplicando los siguientes reemplazos, la Ecuación (74) se puede expresar en términos de la frecuencia natural ( $\omega$ ) y la razón de amortiguamiento ( $\zeta$ ) del sistema.

$$\omega = \sqrt{\frac{A_1^2(1 + \alpha^2)}{m_e C_H}} \quad \zeta = \frac{m_e K_p}{2\sqrt{m_e C_H} \cdot \sqrt{A_1^2(1 + \alpha^2)}}$$

Luego se obtiene la función de transferencia final del sistema  $H_C(s)$ :

$$H_c(s) = K_Q \cdot \frac{\frac{1 + \alpha}{A_1(1 + \alpha^2)}}{\frac{1}{\omega^2}s^2 + \frac{2\zeta}{\omega}s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (75)$$

La función de transferencia obtenida para el sistema válvula-cilindro, aunque relativamente simple, ha sido utilizada en otros estudios relacionados con sistemas de nivelación (Guilan and Yuzeng, 1986, Xinrong and Jing, 1999, Longting, 2008), por lo que se consideró de una precisión suficiente para los efectos esta modelación.

### 5.2.6. Acoplamiento del modelo ampliado

La integración consiste en acoplar el modelo base con el modelo ampliado del sistema de nivelación y sus respectivas variables de entrada. La integración se realizó en el entorno Matlab/Simulink®. La Figura 5.6 muestra la representación en diagrama de bloques del sistema dinámico final para la respuesta de la regla ( $y$ ).

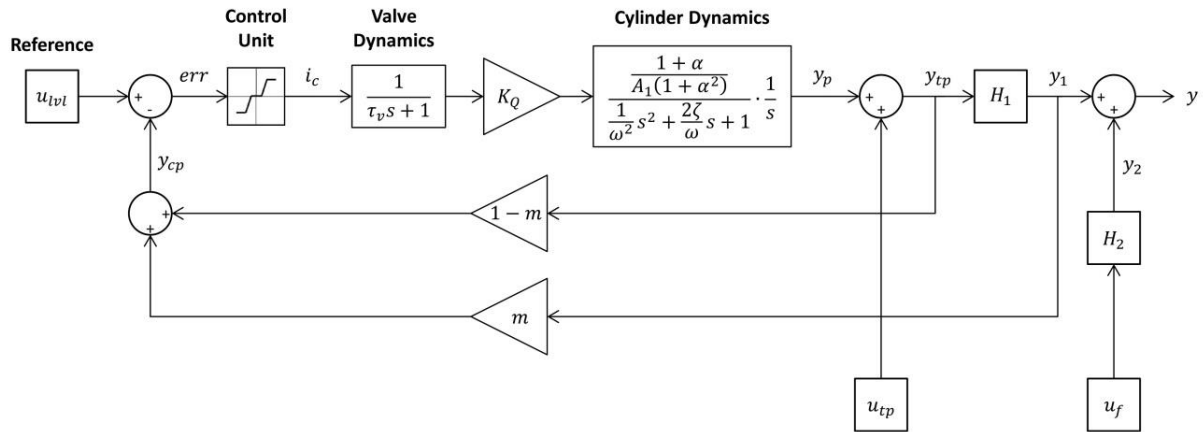


Figura 5.6: Diagrama de Bloques – Modelo Final de Respuesta de la Regla

Al igual que en el modelo base, el perfil longitudinal resultante ( $y$ ) es luego corregido para incorporar la reducción proporcional del espesor extendido debido a la compactación final con rodillo, ver Ecuación (34).

## 5.3. Calibración del modelo ampliado

### 5.3.1. Parámetros de calibración modelo ampliado

Dada la dependencia con el modelo base, la respuesta del modelo ampliado dependerá de las mismas dimensiones características de la pavimentadora ( $L_b$ ,  $L_{axl}$ ,  $L_{wb}$ ) y el proceso constructivo ( $V$ ,  $h_{LIFT}$ ,  $FF$ ) que son conocidos *a priori* o pueden ser estimados mediante valores típicos empleados en obra, al igual que en modelo base. Los dos parámetros asociados a la respuesta dinámica de la regla fueron determinados en la calibración del modelo base; razón de amortiguamiento  $\zeta = 1$  y frecuencia natural  $\omega_n = 0.045$ ,  $\omega_n = 0.065$  y  $\omega_n = 0.075$  para simulaciones de una, dos o tres pasadas de la extendidora respectivamente (Sección 4.4.2).

Por lo tanto, los parámetros desconocidos a calibrar son la sensibilidad del sistema de nivelación (SEN) y el ratio de ubicación del punto de control en relación a la longitud de arrastre ( $m = c/L_b$ ).

De forma similar al modelo base, el método empleado para la calibración se basa en determinar los valores de sensibilidad y ubicación del punto de control del modelo que permitan minimizar la suma de los cuadrados del error (SSE) entre

los valores de IRI estimados y los observados. Los valores así obtenidos para los parámetros de calibración aseguran el mejor ajuste del IRI predicho y por ende la calibración del modelo. Ver Figura 5.7.

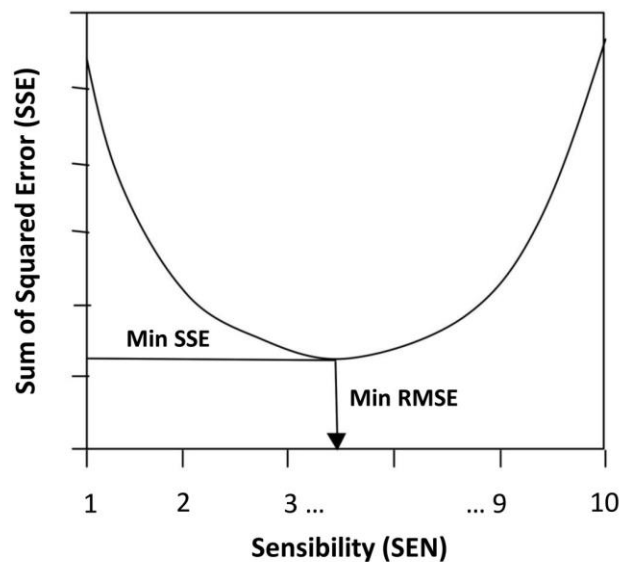


Figura 5.7: Método de Calibración Modelo Ampliado – Minimización del SSE

### 5.3.2. Datos para calibración del modelo ampliado

De la pre-selección de 32 secciones a utilizar en el estudio (Sección 3.3.2) se consideraron sólo aquellas obras que utilizaron nivelación automática durante la pavimentación. Como resultado del análisis de la base de datos LTPP fueron seleccionadas 16 secciones para la calibración.

Finalmente, en algunas secciones, el IRI observado post-obra (IRI-post) resultó en un valor más alto que el IRI-pre existente antes de la ejecución del refuerzo, lo cual probablemente se relaciona con un proceso constructivo deficiente, o en menor medida, con posibles errores de medición. Estas secciones de comportamiento inconsistente contribuyen a aumentar el error de estimación en el proceso de calibración.

Dado que el modelo propuesto se fundamenta en varios supuestos relacionados con una ejecución constructiva idealizada; como velocidad constante, homogeneidad de la mezcla, etc. Condiciones que se pueden aproximar en obra con buenas prácticas de pavimentación, resulta razonable excluir del proceso de

calibración todas aquellas secciones donde el valor de IRI después del refuerzo (IRI-post), calculado sobre 100 m, aumentó o presentó una reducción menor a 0.1 m/km respecto del IRI observado antes de la obra (IRI-pre). En otras palabras, solo fueron consideradas en el análisis aquellas secciones que mostraron una reducción promedio de IRI superior a 0,1 m/km después del refuerzo.

Como resultado del análisis, 15 secciones fueron seleccionadas para la calibración. El resumen de los datos recopilados se presenta en la Tabla 5.2. Para cada obra se calculó el coeficiente de compactación FF a partir del “espesor suelto” ( $h_{LIFT}$ ) y el “espesor compactado” ( $h_{COMP}$ ) según la definición presentada en la Sección 4.2.4, ver Ecuación (31).

Tabla 5.2: Secciones LTPP SPS-5 Para Calibración del Modelo Ampliado

SPS-5 Test Site			ASPHALT PAVER		LIFT_NO	$h_{LIFT}$ (in)	$h_{COMP}$ (in)	Fluff Factor FF
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID	MANUFACTURER	MODEL				
8	Colorado	0502	BARBER GREENE	BG-260B	1	3.1	2.5	0.24
8	Colorado	0503	BARBER GREENE	BG-260B	1	3.5	2.7	0.30
					2	2.5	1.9	0.30
8	Colorado	0504	BARBER GREENE	BG-260B	1	4.1	2.5	0.63
					2	4.2	2.6	0.63
8	Colorado	0505	BARBER GREENE	BG-260B	1	2.9	2.5	0.16
23	Maine	0502	BLAW-KNOX	PF-180H	1	2.4	2.1	0.14
					2	1.6	1.4	0.14
23	Maine	0503	BLAW-KNOX	PF-180H	1	2.1	1.8	0.17
					2	2.0	1.8	0.11
					3	2.3	2.0	0.15
23	Maine	0504	BLAW-KNOX	PF-180H	1	2.3	2.0	0.15
					2	1.9	1.7	0.12
					3	2.4 <sup>(e)</sup>	1.9	0.25
23	Maine	0505	BLAW-KNOX	PF-180H	1	1.5	1.2	0.25
					2	1.5	1.2	0.25
24	Maryland	0503	BARBER GREENE	BG-240	1	2.0	1.6	0.25
					2	2.0	1.6	0.25
					3	2.4	2.0	0.20
24	Maryland	0504	BARBER GREENE	BG-240	1	2.0	1.5	0.33
					2	2.0	1.5	0.33
					3	2.6	2.0	0.30
24	Maryland	0505	BARBER GREENE	BG-240	1	2.5	2.1	0.19
34	New Jersey	0502	BARBER GREENE	BG-260	1	2.4	2.0	0.20
34	New Jersey	0503	BARBER GREENE	BG-260	1	3.5	3.0	0.17
					2	2.5	2.0	0.25
34	New Jersey	0504	BARBER GREENE	BG-260	1	4.0	3.0	0.33

SPS-5 Test Site			ASPHALT PAVER		LIFT_NO	$h_{LIFT}$ (in)	$h_{COMP}$ (in)	Fluff Factor FF
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID	MANUFACTURER	MODEL				
					2	2.5	2.0	0.25
34	New Jersey	0505	BARBER GREENE	BG-260	1	2.5	2.0	0.25

(\*) No 'lift thickness' information reported.

Assumed from the general rule of about 1/4" roll-down per 1" of screed laid thickness (FF = 0.25).

Al igual que en modelo base, en los refuerzos de espesor grueso (503 y 504) la capa fue extendida en 2 o 3 pasadas sucesivas de la pavimentadora, lo cual será simulado de cara a la calibración del modelo.

### 5.3.2.1. Datos de IRI para el modelo ampliado

Para cada una de las 15 secciones se analizó el perfil longitudinal auscultado en la huella interna (*left*, L) y huella externa (*right*, R), medidos antes y después de la ejecución del refuerzo. Con el objetivo de maximizar la muestra disponible, se eligió como unidad de análisis el IRI calculado sobre intervalos de 20 m. Cada sección de LTPP tiene una longitud estándar de 152 m, lo que constituye 7 medidas de IRI cada 20 m por perfil.

A partir de los 60 perfiles longitudinales disponibles (15 secciones, 2 huellas, antes y después de obras), se calcularon los valores de regularidad IRI antes y después de obras para la huella izquierda, la huella derecha y el promedio entre huellas.

- Cálculo de regularidad real antes de obras (IRI-pre)
  - 105 valores de IRI-pre cada 20 m a partir del perfil derecho. 15 secciones x 7 unidades de muestra.
  - 105 valores de IRI-pre cada 20 m partir del perfil izquierdo. 15 secciones x 7 unidades de muestra.
  - 105 valores de IRI-pre promedio entre huellas cada 20 m. 15 secciones x 7 unidades de muestra.
- Cálculo de regularidad real después de obras (IRI-post)
  - 105 valores de IRI-post cada 20 m a partir del perfil derecho. 15 secciones x 7 unidades de muestra.
  - 105 valores de IRI-post cada 20 m partir del perfil izquierdo. 15 secciones x 7 unidades de muestra.

- 105 valores de IRI-post promedio entre huellas cada 20 m. 15 secciones x 7 unidades de muestra

Por lo tanto, se cuenta con 105 datos reales de IRI promedio después de obra para la calibración del modelo ampliado.

### 5.3.2.2. Caracterización de extendedoras para modelo ampliado

Al igual que en modelo base, las dimensiones características de las extendedoras fueron determinadas a partir de una revisión de catálogos de fabricantes, y completadas según tres criterios complementarios: (1) valor disponible directamente en el catálogo para el modelo en cuestión, (2) valor estimado a partir de otras dimensiones informadas en el catálogo, (3) dimensión estimada a partir del valor medio obtenido de otros catálogos para modelos similares. En la Tabla 5.3 se presentan las dimensiones características de las pavimentadoras empleadas en la calibración.

Tabla 5.3: Caracterización de las Extendedoras – Calibración Modelo Ampliado

ASPHALT PAVER		$L_{axl}$ (mm)	$L_{wb}$ (mm)	$L_b$ (mm)	$L_t$ (mm)
MANUFACTURER	MODEL				
BARBER GREENE	BG-260B	850	2510	3415	610
BLAW-KNOX	PF-180H	914	2540	3330	610
BARBER GREENE	BG-240	850	2180	3150	610
BARBER GREENE	BG-260	850	2510	3415	610

Fuente: Elaboración propia a partir de catálogos de fabricantes

### 5.3.3. Procedimiento de simulación modelo ampliado

El procedimiento consistió en calcular los perfiles longitudinales resultantes de la simulación de extendido para cada una de las obras, tomando como parámetros de entrada los valores determinados en las secciones anteriores y el perfil longitudinal inicial (pre-obra) según corresponda.

En la base de datos no se contó con información de velocidad de pavimentación, por lo tanto se asumió para todas las simulaciones una velocidad de  $V = 5$  m/min, considerada como un valor estándar dentro de la práctica constructiva. Respecto de los parámetros a calibrar; se asumieron valores de sensibilidad SEN desde 1

hasta 10 así como cuatro posiciones para el punto de control  $m = 1/4$ ,  $m = 1/3$ ,  $m = 2/3$  y  $m = 3/4$ , totalizando 40 simulaciones para cada pasada de la extendedora.

En el caso de aquellas obras con mayor espesor de refuerzo, donde la capa fue extendida en varias pasadas de la extendedora (códigos 503 y 504), se utilizó el perfil longitudinal resultante de la simulación de la primera pasada como señal de entrada para la simulación de la segunda pasada. De igual manera se procedió para aquellas secciones donde el extendido se realizó en 3 capas.

De esta forma, se realizaron las simulaciones del perfil post-obra a partir de los 15 perfiles reales pre-obra para cada una de las huellas, totalizando 2,320 simulaciones que fueron programadas en el *software* Matlab ®.

- 5 secciones con 1 pasada de extendedora. 40 simulaciones x 2 huellas x 1 pasada x 5 secciones. 400 simulaciones.
- 6 secciones con 2 pasadas de extendedora. 40 simulaciones x 2 huellas x 2 pasadas x 6 secciones. 960 simulaciones.
- 4 secciones con 3 pasadas de extendedora. 40 simulaciones x 2 huellas x 3 pasadas x 4 secciones. 960 simulaciones.

Como resultado de las simulaciones se obtuvieron los perfiles post-obra a utilizar para cada una de las 15 secciones, en cada una de sus huellas.

- Para cada combinación de sensibilidad y punto de control (40), se tienen 15 perfiles post-obra simulados a partir del perfil pre-obra real de la huella derecha.
- Para cada combinación de sensibilidad y punto de control (40), se tienen 15 perfiles post-obra simulados a partir del perfil pre-obra real de la huella izquierda.

A partir de los perfiles post-obra obtenidos de la simulación, se calculó el IRI cada 20 m para la huella izquierda y derecha de cada una de las obras, así como el valor promedio entre huellas.

- Para cada combinación de sensibilidad y punto de control (40), se tienen 105 valores de IRI-sim cada 20 m a partir del perfil derecho.
- Para cada combinación de sensibilidad y punto de control (40), se tienen 105 valores de IRI-sim cada 20 m a partir del perfil izquierdo.
- Para cada combinación de sensibilidad y punto de control (40), se tienen 105 valores de IRI-sim promedio entre huellas cada 20 m.

Para cada una de las 105 unidades de muestra, los 40 valores de IRI promedio entre huellas obtenidos en cada obra (10 valores de SEN para cada una de las 4 posiciones de control) fueron comparados con el valor correspondiente de IRI real calculado sobre los perfiles longitudinales post-obra, determinando así el error cuadrático (*squared error*, SE) de la predicción en cada simulación. La sensibilidad (SEN) y posición del sensor 'm' que resulte en una menor suma del error cuadrático (SSE) entre todas las obras, es la que minimiza el error de estimación (RMSE) del modelo.

## 5.4. Resultados calibración del modelo ampliado

A continuación se presentan los resultados de aplicar el método de calibración al desarrollo del modelo ampliado. El detalle de los resultados intermedios obtenidos en las simulaciones y utilizados para establecer la calibración del modelo ampliado se presentan en el Anexo D.

### 5.4.1. Sensibilidad y posición óptima del sensor

En la Figura 5.8 se presentan los resultados de la suma de cuadrados del error (SSE) para cada valor de sensibilidad (SEN) y posición de control simulados. Se observa que el valor óptimo de SEN está en el rango de 4 – 6 para cualquier configuración del punto de control ( $m = 1/4$ ,  $m = 1/3$ ,  $m = 2/3$  y  $m = 3/4$ ). Estos resultados son consistentes con las recomendaciones de los fabricantes de sistemas de control en cuanto a un ajuste de sensibilidad intermedio para que la regla reaccione al cambio lo suficientemente rápido para lograr la corrección, pero sin sobrepasar (*overshooting*) la nueva elevación (MOBA, 2017, Mini-Line, 2018).

Los peores valores de SEE resultantes de la calibración se obtienen para los mayores valores de SEN, lo cual es consistente con el principio de funcionamiento del sistema de nivelación; en ajustes altos de sensibilidad la Banda Muerta es muy pequeña ( $Db = 0.4$  mm para  $SEN = 10$ ) y por lo tanto la unidad de control está constantemente detectando un error en el sensor y enviando señales del control al punto de tiro, por otro lado, la Banda Proporcional ( $Pb$ ) es la menor ( $Pb = 1$  mm para  $SEN = 10$ ) lo que se traduce en la respuesta hidráulica más rápida, por lo cual es sistema de nivelación se encuentra sobre-corrigiendo en todo momento la posición de la regla y en consecuencia afectando negativamente la regularidad.

En cuanto a la posición del sensor, los mejores resultados de calibración se obtienen para  $m = 1/4$  y  $m = 1/3$ , lo cual es coherente con las recomendaciones al utilizar una referencia móvil mediante viga de nivelación (USACE, 2013, Topcon, 2014, Cedarapids, 2015).

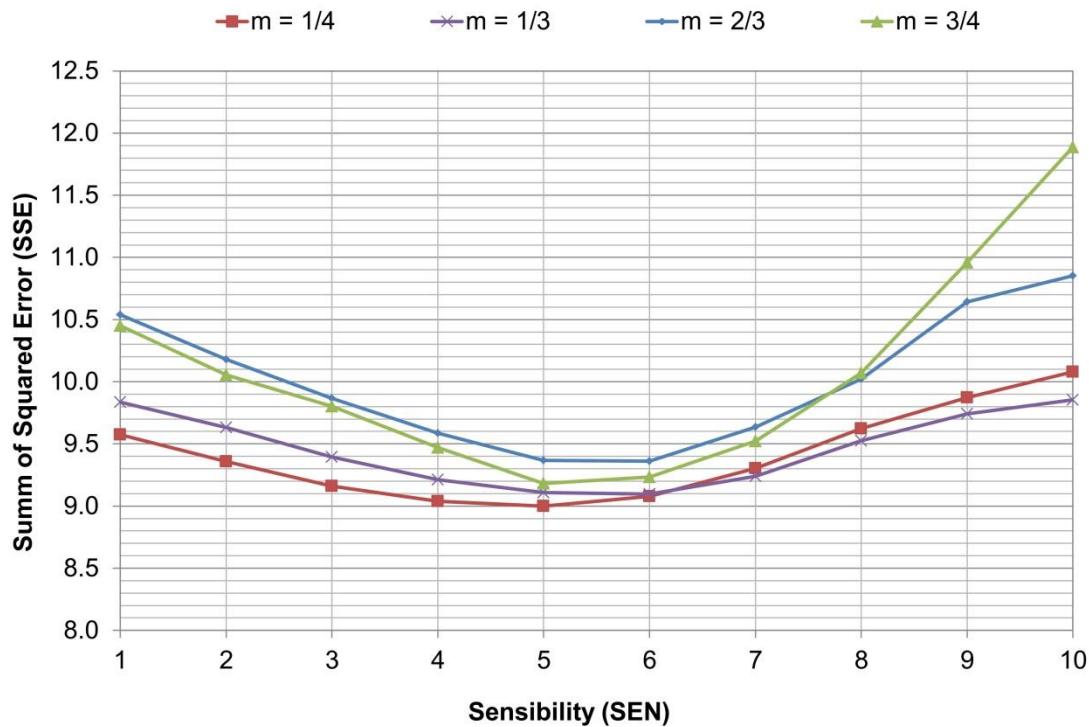


Figura 5.8: Calibración Modelo Ampliado – Minimización del SSE

De acuerdo con la Figura 5.8 el valor óptimo corresponde a una sensibilidad del sistema de nivelación de  $SEN = 5$  con el punto de control (sensor central) a una distancia  $m = 1/4$  del punto de tiro; resultando un  $SSE = 9.0$  que minimiza el error cuadrático medio RMSE a un valor de  $0,30$  m/km para el IRI predicho. Para la posición del sensor  $m = 1/3$ , la mejor sensibilidad es  $SEN = 6$  con resultados similares ( $SSE = 9.1$  y  $RMSE = 0.30$  m/km). El resultado óptimo obtenido coincide exactamente con la configuración de fábrica recomendada para el sistema de nivelación MOBA utilizado como referencia para la tabla de sensibilidad (Sección 5.2.2.).

### 5.4.2. Modelo ampliado: Evaluación secciones 100 m

Los valores de IRI cada 20 m pueden resultar muy dispersos en torno al valor medio representativo de la regularidad de la sección, por lo que es de práctica común en el control y supervisión de pavimentos reportar las auscultaciones en intervalos de mayor longitud. Al igual que en la calibración del modelo base, para estos efectos se utilizó un intervalo de evaluación de 100 m.

A partir de los resultados obtenidos en la sección anterior, se calculó el IRI cada 100 metros para cada sección considerando la sensibilidad y posición del sensor óptimas determinadas en la calibración, es decir, utilizando valores de  $SEN = 5$  y  $m = 1/4$ . En la Figura 5.9 se presentan los resultados obtenidos.

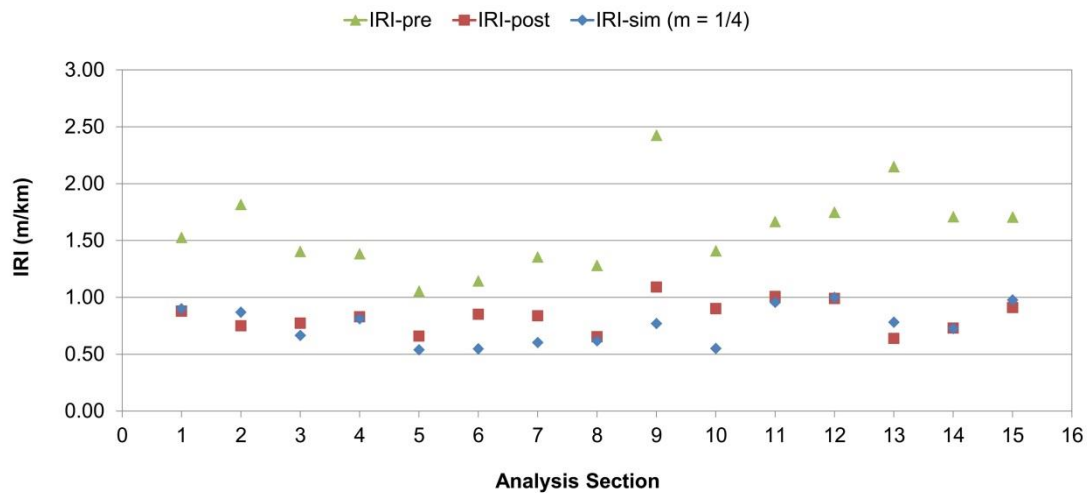


Figura 5.9: Calibración Modelo Ampliado – Comparación IRI 100 m

De la Figura 5.9 se puede observar que los valores predichos (IRI-sim) son siempre menores a los valores previos a la ejecución del refuerzo (IRI-pre), demostrando el efecto nivelador del proceso de extendido. También, en general, el valor predicho es coherente con el valor de IRI real observado luego de la obra (IRI-post), con un error medio de estimación RMSE de 0.17 m/km equivalente a un error porcentual medio (MAPE) del 15.1%.

En la Figura 5.10 se presenta un ejemplo de los resultados de IRI cada 20 m calculados para cada sección considerando las frecuencias óptimas determinadas en la calibración. En el Anexo D se incluyen el detalle de los resultados obtenidos.

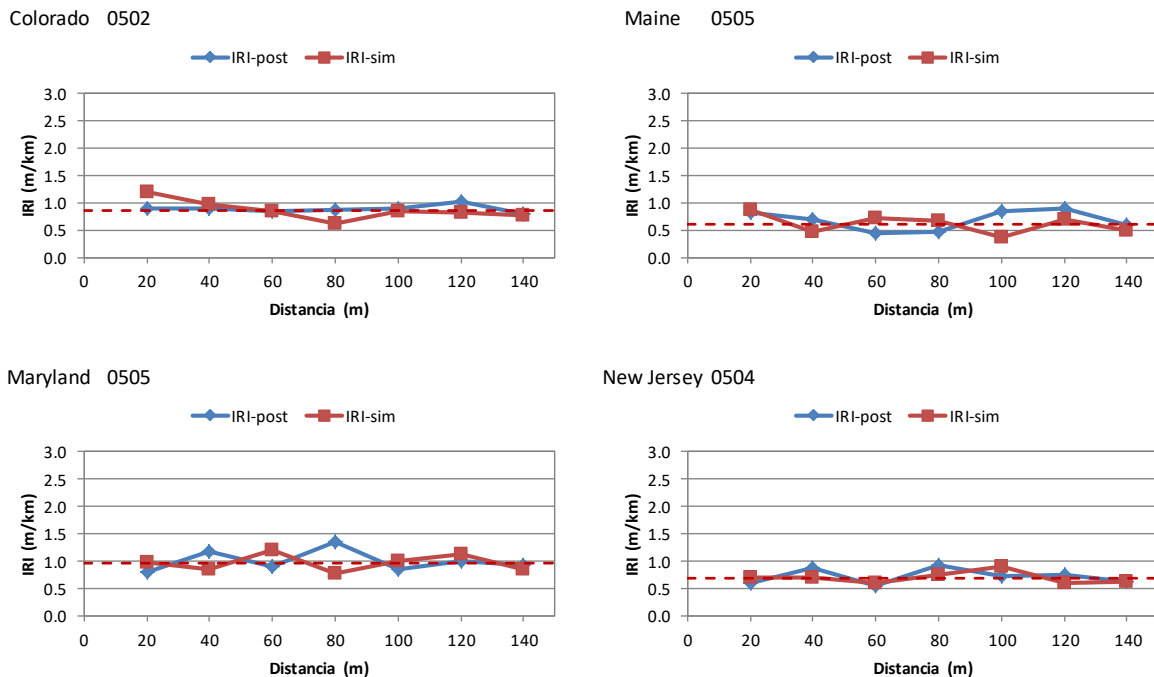


Figura 5.10: Calibración Modelo Ampliado – Evaluación IRI 20 m

### 5.4.3. Comparación con modelo base

Para evaluar la mejora del modelo ampliado frente al modelo base, se probó el modelo sin nivelación automática con el mismo conjunto de datos utilizados en esta sección. Los resultados obtenidos para las 15 secciones del estudio se presentan en la Figura 5.11.

De acuerdo con la Figura 5.11, cuando se usa el modelo base los valores predichos de IRI-sim (sin nivelación) son, en promedio, más altos que los valores reales de IRI-post observados después de las obras; lo que indica que el modelo base sobreestima el IRI de construcción en obras que utilizan sistema de nivelación automática (como era de esperar). El error medio de estimación es  $RMSE = 0,22$  m/km equivalente a un  $MAPE$  del 22,6%.

Al utilizar el modelo con nivelación automática, los valores predichos de IRI-sim (con nivelación) son más consistentes respecto de los valores reales de IRI-post; resultando en valores promedio más cercanos entre ambos y un menor error ( $RMSE = 0.17$  m/km y  $MAPE = 15.1\%$ ). Además, los resultados de IRI-sim del modelo ampliado con nivelación automática son siempre más bajos que los valores obtenidos con el modelo base (sin nivelación), lo que demuestra el efecto de nivelación adicional proporcionado por el sistema de control automático.

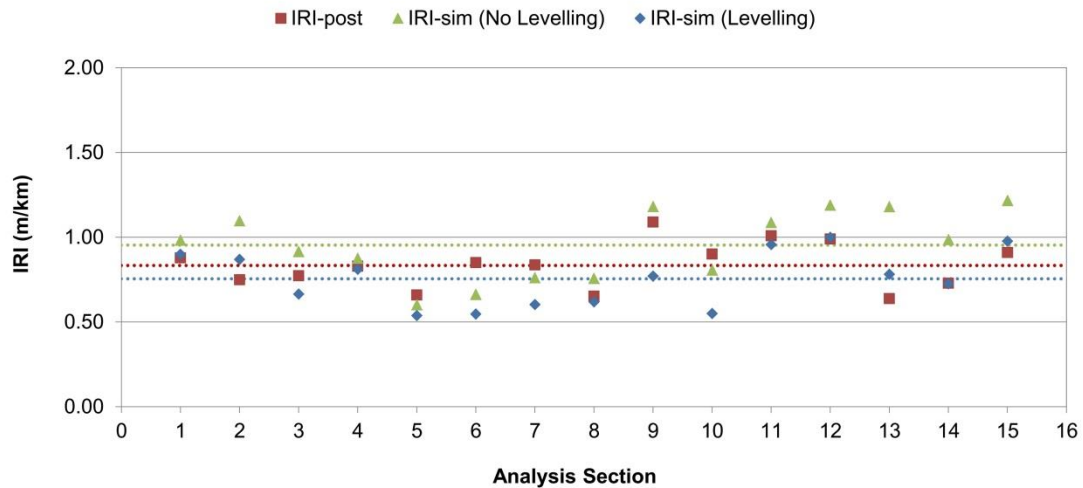


Figura 5.11: Comparación de Modelos – Con y Sin Nivelación Asistida

De acuerdo con los resultados obtenidos el modelo ampliado representa una mejora con respecto al modelo base para la evaluación de obras que utilizan viga de nivelación como referencia para el sistema de control automático, demostrando el potencial del modelo propuesto como una herramienta valiosa para la predicción del IRI de construcción.

#### 5.4.4. Modelo ampliado: Visualización del perfil

El enfoque de modelización empleado permite visualizar gráficamente los aspectos del proceso constructivo que fueron simulados y su efecto en la transformación del perfil longitudinal durante la colocación de la mezcla asfáltica. A modo de ejemplo, se presenta la modelización de extendido para la huella derecha de la sección New Jersey 0502. De acuerdo con la Tabla 5.2, esta sección corresponde a un refuerzo cuyo espesor suelto extendido fue de  $h_{LIFT} = 6.1$  cm (2.4 in), ejecutado en una sola pasada con una extendidora Barber-Greene BG-260. El espesor compactado fue de  $h_{COMP} = 5.1$  cm (2.0 in), equivalente a un coeficiente de paso  $FF = 0.20$ . Se utiliza la frecuencia natural para una pasada de la extendidora  $\omega_n = 0.045$  obtenida en la calibración del modelo base. Para el sistema de nivelación se utilizan los valores de  $SEN = 5$  y  $m = 1/4$  determinados en la calibración. Los resultados de la simulación se visualizan en la Figura 5.12.

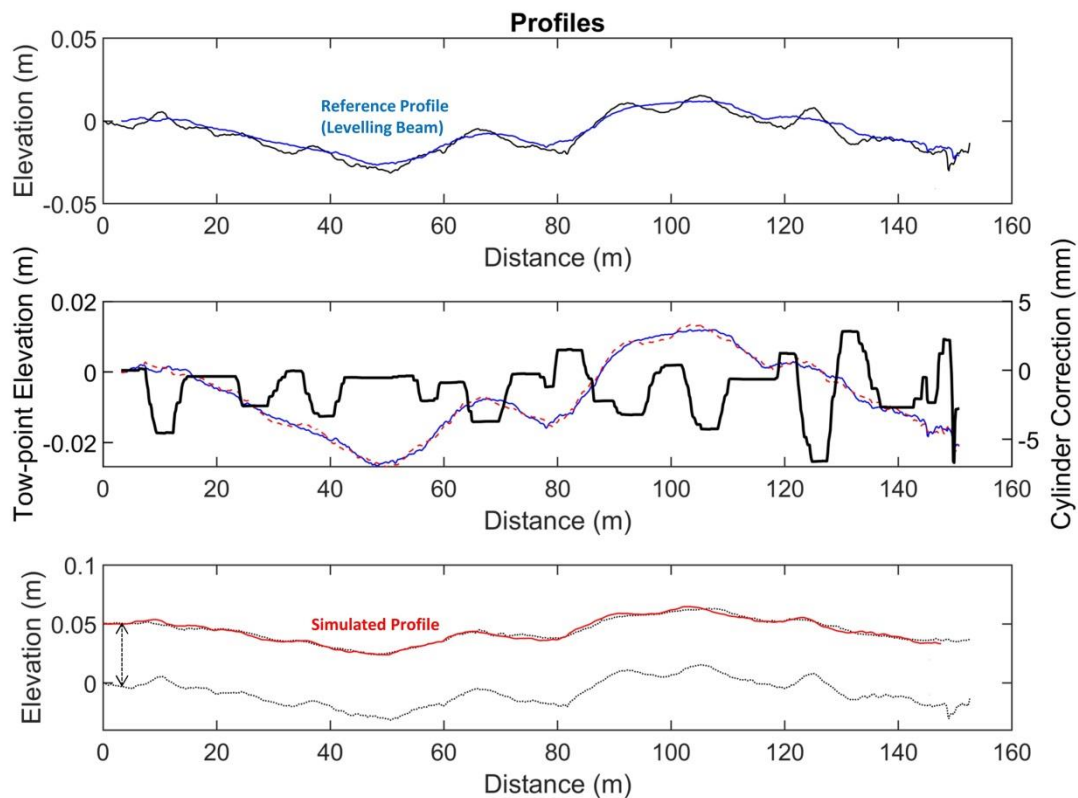


Figura 5.12: Modelo Ampliado – Visualización Gráfica de Modelización

La Figura 5.12 (superior) muestra el perfil de referencia (línea azul) resultante de la promediación de la superficie existente mediante viga de nivelación. Se puede observar que las longitudes de onda más largas asociada con la alineación vertical de la carretera todavía están presentes, sin embargo, las longitudes de onda inferiores a la longitud de la viga de nivelación (9 m) son regularizadas.

La Figura 5.12 (central) muestra en el eje izquierdo la posición del sensor (línea roja discontinua) en relación con la referencia (línea azul). Los límites del eje han sido ajustados para que se puedan visualizar los cambios de elevación. El eje derecho (línea negra) muestra el movimiento de corrección del cilindro (mm) que actúa sobre el punto de tiro. Como se puede observar, cuando la posición del sensor está por encima de la referencia el cilindro se mueve hacia abajo para bajar el punto de tiro y en consecuencia la posición de la regla; cuando el error es inferior a la banda muerta  $D_b$  (2.4 mm) el cilindro no actúa y permanece estable; de lo contrario, cuando el punto de control está por debajo de la referencia el cilindro se mueve hacia arriba para elevar el punto de tiro y corregir la posición de la regla.

Por último, en la Figura 5.12 (inferior) se presenta en color rojo el perfil final simulado ( $y_{COMP}$ ) luego de la corrección proporcional del espesor extendido por concepto de compactación final con rodillos (coeficiente de paso  $FF = 0.20$ ).

La regularidad del perfil existente es  $IRI\text{-pre} = 1.66$  m/km ( $IRI @ 100$  m) y la regularidad de construcción real luego del refuerzo es  $IRI\text{-post} = 0.97$  m/km. La regularidad del perfil final obtenido de la modelización es  $IRI\text{-sim} = 0.95$  m/km, correspondiente a un error  $\Delta IRI = 0.02$  m/km ( $IRI @ 100$ m) en la predicción.



## 6. Conclusiones

El objetivo general de esta tesis fue desarrollar un modelo que permita estimar el IRI conseguido en el extendido de pavimentos asfálticos, basado en la transformación del perfil longitudinal, como resultado del efecto nivelador de la pavimentadora durante el proceso constructivo.

La investigación desarrollada permitió cumplir con los objetivos planteados, y los resultados obtenidos demuestran el potencial del enfoque propuesto como alternativa de modelación. A continuación, se presentan de forma pormenorizada las principales conclusiones de la tesis.

### 6.1. Del análisis de antecedentes

De la revisión bibliográfica se puede concluir que el estudio de la regularidad de construcción ha sido abordado tradicionalmente desde un enfoque empírico, basado en la correlación estadística entre el IRI observado antes y después de la ejecución de obras de pavimentación. Sin embargo, es preciso considerar que la terminación superficial del pavimento estará determinada en última instancia por la calidad de ejecución constructiva de la obra de pavimentación, cuyo elemento central es el efecto nivelador de la pavimentadora durante el extendido, aspecto que no ha sido abordado adecuadamente por los estudios disponibles en la literatura.

Como parte del análisis de antecedentes, se evaluó la capacidad de predicción de los principales modelos de la revisión bibliográfica utilizando datos reales de IRI de construcción.

- Los resultados obtenidos muestran errores de hasta 1 m/km en el IRI esperado. Un 49% de los resultados mostraron un error de predicción mayor a 0.2 m/km IRI y un 12% de las predicciones tiene un error mayor a 0.5 m/km. Los resultados carecen de la precisión requerida para la toma de decisiones confiables en el ámbito de la gestión y construcción de pavimentos. Por lo tanto, los modelos disponibles proveen una capacidad predictiva insuficiente.

De acuerdo con el análisis realizado, se concluye que el ajuste de modelos de regresión a partir de datos de IRI medidos antes y después de obras de pavimentación tiene una limitación fundamental.

- Para un mismo valor de IRI inicial y diseño de rehabilitación (espesor de refuerzo, tipo de mezcla asfáltica, reparación previa, etc.) se pueden observar obras que alcanzan valores significativamente diferentes de IRI de construcción. Por lo tanto, el ajuste de una correlación del tipo IRI antes-después no logra explicar completamente la variabilidad observada.

Aunque la revisión bibliográfica indica que la variable más utilizada para explicar el IRI de construcción es el IRI existente previo a la ejecución de la obra, algunos estudios han sugerido que también se debe tener en cuenta la naturaleza de la irregularidad, es decir, las longitudes de onda predominantes que contribuyen al IRI existente.

- Los modelos de la literatura no han considerado efectivamente esta influencia, toda vez que el IRI como variable explicativa no proporciona información detallada sobre la naturaleza de la irregularidad.

Del análisis en detalle del proceso constructivo de pavimentos asfálticos se puede concluir que la calidad de la terminación superficial conseguida durante el extendido dependerá principalmente del equilibrio de fuerzas que gobiernan el comportamiento de la regla de la pavimentadora.

- Las variables fundamentales que influyen en este equilibrio son: el ángulo de ataque de la regla (relación entre la nariz de la regla y su borde trasero), la velocidad de avance, el ajuste de los sistemas de compactación, la carga de material tanto frente a la regla como fluyendo bajo ella, y la homogeneidad de la mezcla.

Cualquier cambio en una o varias de estas variables durante el extendido influirá en las fuerzas actuantes sobre la regla, provocando que ésta modifique su posición de equilibrio. La variable de acción más directa sobre el espesor de la capa, y por lo tanto sobre la regularidad superficial, es el ángulo de ataque.

Durante la pavimentación, el rodado de la pavimentadora sobre las irregularidades de la superficie a pavimentar provocará movimientos en el chasis del tractor que afectarán la posición del punto de tiro, y en consecuencia, el ángulo de ataque de la regla. Por lo tanto, se realizó un análisis de la respuesta en frecuencias de la regla respecto de una función sinusoidal de cualquier

longitud de onda; asimilable a la trayectoria ondulatoria del punto de tiro como resultado del rodado de la pavimentadora.

- La interpretación de la respuesta en frecuencias permitió verificar una característica fundamental del funcionamiento autonivelante de la regla: Cuanto más larga sea la ondulación en la superficie en menor medida la regla nivelara la irregularidad, o lo que es lo mismo, más fielmente reproducirá la regla estas ondulaciones

El comportamiento descrito es la razón de que las extendedoras utilicen sistemas de control automático mediante viga de nivelación para regular de forma asistida la posición vertical del punto de tiro, y en consecuencia del ángulo de ataque, y de esta forma compensar la menor eficiencia de nivelación en defectos de mayor longitud de onda.

El siguiente análisis fue comparar la respuesta en frecuencias de la regla y del modelo de IRI. A partir de los resultados, se ha propuesto una explicación para la variabilidad observada en los modelos de predicción para el IRI de construcción existentes en la literatura.

- La respuesta en frecuencias del IRI indica que se podrá obtener un mismo valor de IRI para defectos de diferente longitud de onda. Sin embargo, para estos mismos defectos, la regla de extendido utilizada por la pavimentadora tendrá diferentes eficiencias de nivelación.

La diferencia observada entre la respuesta en frecuencias del IRI y la regla de la extendedora explicaría el hecho de que para obras con la misma regularidad IRI inicial, y diseño de rehabilitación, se pueden conseguir pavimentos con IRI de construcción diferentes; lo cual dependerá de las longitudes de onda que componen los defectos del perfil y que condicionaran la respuesta de nivelación de la pavimentadora.

Los resultados obtenidos del análisis de antecedentes permiten verificar que la regularidad superficial conseguida está determinada principalmente por el comportamiento de la regla durante la pavimentación, cuya respuesta de nivelación, asumiendo buenas prácticas de construcción, dependerá a su vez de la naturaleza de los defectos o irregularidades de la superficie a pavimentar. En consecuencia, para mejorar la predicción del IRI de construcción, se concluye que resulta necesario abordar la modelización considerando las características de la regularidad existente y su interacción con la pavimentadora durante el proceso de extendido.

## 6.2. Del desarrollo de los modelos

De la formulación del modelo se concluye que el modelo de pavimentación queda definido por la interconexión de 8 sub-modelos, conformando un sistema dinámico que para una entrada (*input*) dada por el perfil longitudinal de la superficie existente producirá una salida (*output*) correspondiente al perfil longitudinal post-obra resultante del proceso constructivo, a partir del cual se calcula el IRI de construcción.

El enfoque de modelización definido se basa en utilizar un conjunto de modelos físicos estándar, o sub-modelos, para describir la respuesta dinámica de un proceso real más complejo. El modelo resultante proporciona sólo una relación entrada-salida del proceso. Por lo tanto, el modelo desarrollado no corresponde a una descripción física completa de todos los elementos o piezas individuales que componen la maquinaria.

Como aspectos a modelizar, o sub-modelos, fueron definidos aquellos componentes de la pavimentadora que intervienen en la transformación del perfil longitudinal durante el proceso de extendido de pavimentos asfálticos.

- El modelo fue desarrollado para el caso de extendedoras sobre ruedas considerando dos alternativas de nivelación: modelo base y modelo ampliado.
- En ambos casos, el perfil longitudinal resultante es corregido para incorporar el efecto de la compactación final por parte de los rodillos.

Como fuente de datos para la calibración se utilizó la información disponible en el programa norteamericano Long Term Pavement Performance (LTPP), específicamente el experimento SPS-5. A partir de una revisión exhaustiva de las 210 secciones disponibles en la base de datos SPS-5, se realizó un primer proceso de pre-selección de obras candidatas a ser utilizadas en la calibración. Resultando en un total de 32 secciones a utilizar.

- Se descartaron todas aquellas secciones que consideraron ejecución de fresado previo al extendido del refuerzo (reparación previa intensiva) y/o que utilizaron modelos de extendedoras sobre orugas para la colocación del refuerzo.
- Adicionalmente se descartaron secciones por presentar información incompleta y/o por desviaciones de la obra real ejecutada respecto de la rehabilitación proyectada.

De la pre-selección de 32 secciones para la calibración se diferenciaron aquellas obras que utilizaron nivelación asistida durante la pavimentación. Esta información estuvo disponible de forma explícita para algunas secciones en los reportes de construcción, en otros casos, fue deducida a partir del análisis de densidad espectral de los perfiles longitudinales antes y después de la obra.

- Como resultado se obtuvieron 16 secciones para la calibración del modelo base y 15 secciones para la calibración del modelo ampliado.
- Para cada una de las secciones se realizó una caracterización de las extendedoras utilizadas a partir de una revisión de catálogos de fabricantes.

Como resultado de la preparación de datos para la calibración de los modelos se contó con una base de datos depurada y procesada en formato y contenido requeridos para su utilización en el desarrollo del modelo.

### **6.2.1. Conclusiones del modelo base**

El modelo base consistió en una idealización del proceso constructivo para extendedoras sobre ruedas y sin el uso de nivelación asistida, como resultado del acoplamiento de cuatro sub-modelos:

- 1) Modelización del rodado sobre la superficie existente y su efecto en la trayectoria del punto de tiro. La posición del punto de tiro se ha calculado de forma simplificada como la cota media entre la rueda motriz trasera y el eje del bogie oscilante delantero.
- 2) Modelo cinemático de trayectoria de la regla. Este modelo recoge el tiempo de reacción de la regla, comúnmente aceptado como cinco longitudes de arrastre, en respuesta a los cambios en la posición del punto de tiro. Este tipo de respuesta se representa mediante un sistema lineal de primer orden.
- 3) Modelo dinámico de vibración de la regla. Este modelo recoge la vibración de la regla en respuesta a las irregularidades locales de onda corta bajo la placa alisadora. La dinámica vertical de la regla fue representada por un modelo de un grado de libertad; compuesto por una masa suspendida por un resorte y un amortiguador, moviéndose sobre el perfil longitudinal de la superficie existente. Esta respuesta dinámica ocurre de forma independiente a la posición vertical de la regla y su resultado se superpone a la trayectoria.
- 4) Corrección diferencial de espesor por efecto de la compactación final con rodillos. Este modelo refleja la relación entre el “espesor suelto” extendido por

la pavimentadora y el “espesor final compactado” luego del paso de los rodillos. Para efectos del modelo la compactación se asumió constante y proporcional al espesor de capa extendida por la pavimentadora.

El modelo base fue calibrado a partir de una selección de 16 secciones del experimento SPS-5 de la base de datos LTPP. El parámetro a calibrar del fue la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) asociada a la vibración de la regla, para la cual se asumieron valores desde los 0.005 Hz hasta 0.250 Hz en incrementos de 0.005 Hz, totalizando 50 simulaciones de  $\omega_n$  para cada pasada de la extendedora.

- En las obras donde el extendido se realizó en una sola capa, el valor óptimo se obtiene para una frecuencia natural  $\omega_n = 0.045$ , asociada a un SSE = 8.472 correspondiente a un error de 0.39 m/km.
- En las obras donde el refuerzo se extendió en 2 o 3 pasadas, la frecuencia optima es de  $\omega_n = 0.065$  y  $\omega_n = 0.075$  respectivamente, resultando en un error RMSE de 0.27 m/km y 0.48 m/km.

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el IRI cada 100 metros para cada sección considerando las frecuencias óptimas determinadas en la calibración.

- Del análisis de resultados de IRI cada 100 m se puede observar que los valores predichos (IRI-sim) son siempre menores a los valores previos a la ejecución del refuerzo (IRI-pre), demostrando el efecto nivelador del extendido.
- También, se observa una coherencia general entre el valor predicho (IRI-sim) y el valor real de IRI observado (IRI-post), resultando en un error medio de estimación RMSE de 0.22 m/km en el IRI predicho equivalente a un error porcentual medio MAPE del 17.6%.

Finalmente, se ha realizado una comparación entre la capacidad predictiva del nuevo modelo desarrollado y los modelos empíricos evaluados en el análisis de antecedentes.

- Los IRI predichos por el modelo propuesto presentan menor dispersión (mayor precisión) al mismo tiempo que se encuentran más centrados en torno a la recta de igualdad (menor sesgo) respecto de los modelos empíricos tradicionales, lo que se manifiesta en un coeficiente  $R^2$  superior en todos los casos.

Estos resultados constituyen una mejora respecto de los modelos disponibles en la literatura, demostrando el potencial del enfoque propuesto como alternativa de modelación.

En el modelo base, así como en el proceso de pavimentación real, la regla de la extendedora disminuye su eficiencia de nivelación a medida que aumenta la longitud de onda de los defectos que causan la irregularidad; razón por la cual se utilizan sistemas de nivelación automática para regular la elevación del punto de tiro en relación a una referencia longitudinal diferente a la impuesta por el rodado de la pavimentadora.

### **6.2.2. Conclusiones del modelo ampliado**

El modelo ampliado consistió en una idealización del proceso constructivo para extendedoras sobre ruedas con uso de nivelación asistida, como resultado de la integración de cuatro sub-modelos adicionales:

- 5) Modelización del perfil de referencia como resultado de la promediación móvil mediante viga de nivelación flotante de 9 m con tres sensores. Cada sensor envía sus resultados de medición a la unidad de control en donde los valores son promediados estableciendo una referencia para la regla como resultado de la regularización de la superficie subyacente.
- 6) Modelización de la señal de control. El error calculado como la diferencia entre el valor de referencia y la posición de la regla en el punto de control es utilizado por la unidad de control para determinar la señal eléctrica proporcional para el control de la electroválvula. Para establecer cuán rápido, o sensible, el controlador reacciona a una desviación se considera un parámetro de sensibilidad.
- 7) Modelo de respuesta de la electroválvula. La válvula fue representada mediante la respuesta temporal de un sistema lineal de primer orden y una ganancia de flujo proporcional a la corriente de control. El resultado del modelo es el flujo de aceite hidráulico hacia las cámaras del cilindro de control del punto de tiro
- 8) Modelo del cilindro hidráulico. Dependiendo de la dirección del flujo de aceite desde la electroválvula hacia las cámaras del cilindro, el pistón se moviera hacia arriba o hacia abajo para controlar la elevación del punto de tiro y en consecuencia la posición de la regla.

El modelo ampliado fue calibrado a partir de una selección de 15 secciones del experimento SPS-5 de la base de datos LTPP. Los parámetros a calibrar fueron la sensibilidad del sistema de nivelación (SEN) y el ratio de ubicación del punto de control en relación a la longitud de arrastre ( $m = c/L_b$ ). Se asumieron valores de sensibilidad SEN desde 1 hasta 10 así como cuatro posiciones para el punto de control  $m = 1/4$ ,  $m = 1/3$ ,  $m = 2/3$  y  $m = 3/4$ , totalizando 40 simulaciones para cada pasada de la extendidora.

Según los resultados obtenidos el valor óptimo de SEN está en el rango de 4 – 6 para cualquier configuración del punto de control ( $m = 1/4$ ,  $m = 1/3$ ,  $m = 2/3$  y  $m = 3/4$ ).

- Estos resultados son consistentes con las recomendaciones de los fabricantes de sistemas de control en cuanto a un ajuste de sensibilidad intermedio.

En cuanto a la posición del sensor, los mejores resultados de calibración se obtienen para  $m = 1/4$  y  $m = 1/3$ , lo cual es coherente con las recomendaciones al utilizar una referencia móvil mediante viga de nivelación.

- La configuración óptima corresponde a una sensibilidad del sistema de nivelación de  $SEN = 5$  con el punto de control (sensor central) a una distancia  $m = 1/4$  del punto de tiro; resultando un  $SSE = 9.0$  que minimiza el error cuadrático medio RMSE a un valor de 0,30 m/km para el IRI predicho.
- El resultado óptimo obtenido coincide exactamente con la configuración de fábrica recomendada para el sistema de nivelación utilizado como referencia para la tabla de sensibilidad.

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el IRI cada 100 metros para cada sección considerando la sensibilidad y posición del sensor óptimas determinadas en la calibración.

- Del análisis de resultados de IRI cada 100 m se puede observar que los valores predichos (IRI-sim) son siempre menores a los valores previos a la ejecución del refuerzo (IRI-pre), demostrando el efecto nivelador del proceso de extendido.
- También, en general, el valor predicho es coherente con el valor de IRI real observado luego de la obra (IRI-post), con un error medio de estimación RMSE de 0.17 m/km equivalente a un error porcentual medio (MAPE) del 15.1%.

Finalmente, para evaluar la mejora del modelo ampliado frente al modelo base, se probó el modelo sin nivelación automática con el mismo conjunto de datos.

- Al utilizar el modelo con nivelación automática, los valores predichos de IRI-sim (con nivelación) son más consistentes respecto de los valores reales de IRI-post.
- Además, los resultados de IRI-sim del modelo ampliado con nivelación automática son siempre más bajos que los valores obtenidos con el modelo base (sin nivelación), lo que demuestra el efecto de nivelación adicional proporcionado por el sistema de control automático.

De acuerdo con los resultados obtenidos el modelo ampliado representa una mejora con respecto al modelo base para la evaluación de obras que utilizan sistema de control automático mediante viga de nivelación.

### **6.3. Contribución original de la tesis**

A partir del análisis de respuesta en frecuencias de la regla de la pavimentadora y del modelo de IRI, se ha propuesto una explicación para el hecho de que obras con un mismo valor de IRI inicial y diseño de rehabilitación (espesor de refuerzo, reparación previa, etc.) puedan alcanzar valores significativamente diferentes para el IRI de construcción. Razón por la cual el enfoque empírico tradicional no logra explicar la variabilidad observada en obras de pavimentación.

En respuesta a esta necesidad de investigación, se ha propuesto un enfoque original para el estudio de esta problemática, modelizando el proceso de extendido del pavimento como un sistema dinámico que para una entrada dada por las características del perfil original producirá una salida correspondiente al perfil longitudinal del nuevo pavimento construido. Como resultado, se obtuvo un modelo para el caso de extendedoras sobre ruedas considerando dos alternativas de nivelación; un modelo base (sin nivelación automática) y un modelo ampliado que, a partir del modelo base, incorpora el efecto de un sistema de control automático mediante viga de nivelación.

Como parte del análisis realizado en la preparación de datos para calibración se ha propuesto el uso de la densidad espectral de potencia (PSD) de los perfiles longitudinales antes y después de obra para evaluar el uso de nivelación automática en la pavimentación, demostrando ser una herramienta de gran utilidad para este fin.

El modelo desarrollado supone una nueva forma de estimar el IRI de construcción de pavimentos asfálticos, basado en la transformación del perfil longitudinal como resultado del efecto nivelador de la pavimentadora durante el extendido. En este sentido, los resultados obtenidos constituyen una herramienta práctica de utilidad para consultores, constructores o cualquier agencia vial, la cual permitirá estudiar la efectividad de un determinado refuerzo en la mejora de la regularidad, de modo que se puedan realizar ajustes en el proyecto antes del inicio de las obras. Por ejemplo; analizar los efectos en la regularidad de aumentar o disminuir el espesor de refuerzo, evaluar el costo/beneficio de colocar la sobrecarpeta en una o más capas, asistir la toma de decisiones en la selección del tipo y tamaño de pavimentadora, valorar la necesidad de fresados o evaluar el efecto en la regularidad del uso de sistemas de nivelación automáticos.

#### **6.4. Limitaciones y futuras líneas de investigación**

El proceso tecnológico real de pavimentación es un sistema muy complejo que involucra muchas variables e interacciones. El enfoque de modelización propuesto se basa en la definición de un conjunto de modelos físicos estándar que permitan describir la respuesta dinámica de un proceso real más complejo, proporcionado solo una relación de entrada-salida del proceso. Por lo tanto, el modelo desarrollado no corresponde a una descripción física completa de todos los elementos o piezas individuales que componen la maquinaria.

El modelo desarrollado es aplicable a pavimentadoras sobre ruedas sin utilizar sistema de nivelación o utilizando un sistema de nivelación automático basado en promediación de larga referencia mediante viga flotante. Por lo tanto, si bien puede ser aplicado en otras situaciones, no está calibrado para el caso de extendedoras sobre orugas o con sistemas de nivelación basados en referencias fijas.

El modelo propuesto se fundamenta en varios supuestos relacionados con una ejecución constructiva idealizada; como velocidad constante de la extendedora, alimentación continua del material asfáltico, homogeneidad de la mezcla, etc. condiciones que se pueden aproximar en obra con buenas prácticas de pavimentación. Sin embargo, en realidad, siempre habrá ocasiones en que la extendedora debe detenerse por falta o demora en el suministro de mezcla asfáltica, en tramos de empalme con otros pavimentos o intersecciones, etc. Tanto el número de detenciones como el tiempo que la extendedora permanece detenida pueden afectar la potencial regularidad de la terminación superficial. Al respecto,

algunos de los procedimientos constructivos disponibles para minimizar el efecto de estos factores son; (1) El uso de transfer. Es un dispositivo que se sitúa entre el camión y la extendedora y que permiten regular en cierta medida la velocidad de la misma o al menos evitar paradas prolongadas entre camiones consecutivos; dan cierta continuidad a la alimentación y sobre todo evitan el impacto del camión sobre la extendedora. (2) Sistema de Silo Móvil. Este dispositivo reúne las ventajas del transfer, pero además tiene la capacidad de rehomogeneizar la mezcla asfáltica, tanto en su granulometría como en la temperatura de la misma.

Los modelos han sido calibrados mediante datos reales de perfiles longitudinales e información constructiva de obras disponibles en la base de datos LTPP. Si bien los resultados han sido satisfactorios, hubiese sido deseable contar con más información para complementar la calibración realizada con una posterior validación del modelo. No obstante, no ha sido posible contar con más información que la considerada en la tesis.

Teniendo en cuenta las limitaciones y supuestos asumidos en este trabajo de investigación, se proponen las siguientes líneas de investigación para robustecer lo realizado.

- Ampliar el sub-modelo de rodado para incorporar el caso de pavimentadoras sobre orugas y su efecto sobre la trayectoria del punto de tiro.
- Ampliar el modelo para incorporar otras alternativas de nivelación, como referencias mediante cable, a partir de cotas desde planos del proyecto, o cualquier otro tipo de referencia fija.
- Realizar un estudio de sensibilidad de la velocidad de pavimentación en los resultados del modelo, la cual fue asumida constante e igual a 5 m/min.
- Profundizar el sub-modelo de compactación final con rodillos, para incorporar los aspectos dinámicos de los materiales y la maquinaria en el proceso de compactación. Para efectos del modelo la compactación se asumió constante y proporcional al espesor de capa extendida por la pavimentadora.
- Ampliar la base de datos con nuevas obras de pavimentación que permitan complementar los resultados obtenidos mediante un estudio de validación del modelo.
- Ampliar las aplicaciones del modelo mediante implementación de evaluación multiobjetivo que permita, por ejemplo, minimizar el valor del IRI de

construcción en función de la combinación óptima de otros parámetros del modelo.

## Referencias

- ABDELAZIZ, N., ABD EL-HAKIM, R. T., EL-BADAWY, S. M. & AFIFY, H. A. 2020. International Roughness Index prediction model for flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 88-99.
- AI 1982. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. Serie de Manuales N°22 (MS-22). Lexington, USA.: Asphalt Institute.
- ALLEYNE, A. & LIU, R. 1999. On the Limitations of Force Tracking Control for Hydraulic Servosystems. *ASME. J. Dyn. Sys., Meas., Control*, 121, 184-190.
- ASEFMA 2008. Monografía 1 – El IRI, Definición e Importancia, Recomendaciones Para Obtener un Buen IRI. Madrid, España: Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas.
- BARBER-GREENE 1972. Principles of the Asphalt Finisher. Illinois, USA.: Barber-Greene Company, Manual Page 6900.
- BILODEAU, J. P., GAGNON, L. & DORÉ, G. 2017. Assessment of the relationship between the international roughness index and dynamic loading of heavy vehicles. *International Journal of Pavement Engineering*, 18, 693-701.
- BLAW-KNOX 1997. Manual de Pavimentación. Illinois, USA: Blaw-Knox Construction Equipment Corp.
- BROCK, J. D. & HEDDERICH, J. 2017. Technical Paper T-123. Tennessee, USA: Roadtec.
- BUTLER, C. n.d. Mat Quality. Roadtec Training Presentation.
- CATERPILLAR 2016. Guía Para la Pavimentación de Asfalto. CAT Paving Products.
- CEBON, D. Road damaging effects of dynamic axle loads. *International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions*, 1986 Kelowna, British Columbia.
- CEDARAPIDS 2015. Quality Paving Guide Book. Milwaukee, USA: Construction Industry Manufacturers Association.
- CLOSE, C. M., FREDERICK, D. K. & NEWELL, J. C. 2002. Modeling and Analysis of Dynamic Systems, John Wiley & Sons.
- COLLOP, A. C. & CEBON, D. 1995. A model of whole-life flexible pavement performance. *Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 209, 389-407.

- DJÄRF, L., MAGNUSSON, R., LANG, J. & ANDERSSON, O. 1995. Road Deterioration and Maintenance Effects for Paved Roads in Cold Climates. Stockholm: Swedish Road and Transport Research Institute.
- DONG, Q. & HUANG, B. 2012. Evaluation of effectiveness and cost-effectiveness of asphalt pavement rehabilitations utilizing LTPP data. *Journal of Transportation Engineering*, 138, 681-689.
- ERVIN, R. D., NISONGER, R. L., SAYERS, M., GILLESPIE, T. D. & FANCHER, P. S. 1983. Influence of Truck Size and Weight Variables on Stability and Control Properties of Heavy Trucks. EE.UU.: University of Michigan Transportation Research Institute UMTRI-83-10/2. Federal Highway Administration FHWA-RD-83-030.
- GOURDON, J. L. & PEYRET, F. Modelling and controlling the road finishing process. *Proceedings of the 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp. 479-488, 1991 Stuttgart, Germany.
- GUILAN, L. & YUZENG, L. 1986. 沥青混凝土摊铺机自动找平系统数字仿真 [The Data Simulation of the Automatic Leveling system of the Asphalt Paver]. *长安大学学报(自然科学版)* [Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)], 1, 150-159.
- HUNG, S. S., REZAEI, A. & HARVEY, J. T. 2014. Effects of milling and other repairs on smoothness of overlays on asphalt pavements. *Transportation Research Record*, 2408, 86-94.
- HUNTER, R. N. 2000. *Asphalts in road construction*, London, UK., Thomas Telford.
- ISO 2016. Standar No. 8608:2016. Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data. Switzerland: International Organization for Standardization.
- JELALI, M. & KROLL, A. 2003. *Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control*, Springer Science & Business Media.
- KELLY, S. G. 2012. *Mechanical vibrations: theory and applications*, Stamford, USA, Cengage learning.
- KLUEVER, C. A. 2015. *Dynamic Systems: Modeling, Simulation and Control*, John Wiley & Sons.
- KWON, O., LEE, H. S., CHUN, S., HOLZSCHUHER, C. & CHOUBANE, B. Probabilistic Relationship Between Smoothness of Final Asphalt Surface and Underlying Layer. 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2015 Washington, DC.
- LAVAUD AGUIRRE, P. Como construir Pavimentos Asfálticos de Calidad. Comisión Permanente del Asfalto. XXXIV Reunión, 2006 Mar del Plata, Argentina.

- LONGTING, Z. 2008. 沥青混凝土摊铺机智能控制系统的研究 [Research of Intelligent Control System in Asphalt Concrete Paver]. Dalian, China: Master Thesis. Dalian University of Technology.
- LU, Q. & XIN, C. 2018. Pavement Rehabilitation Policy for Reduced Life-Cycle Cost and Environmental Impact Based on Multiple Pavement Performance Measures. Final Report. Tampa, Florida. EE.UU.: Center for Transportation, Environment, and Community Health CTECH. University of South Florida.
- MANSELL, T. Using your Paver as it was Intended. Presented at the 57th Idaho Asphalt Conference, 2017 Idaho, USA.
- MASSUCCO, J. & CAGLE, J. 1999. Getting Smoother Pavement. *Public Roads*, 62, 27–31.
- MCGHEE, K. K. 2000. Factors Affecting Overlay Ride Quality. *Transportation Research Record*, 1712, 58-65.
- MELIS, M. 2008. Apuntes de Introducción a la Dinámica Vertical de la Vía y a las Señales Digitales en Ferrocarriles, Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid.
- MERRITT, H. E. 1967. *Hydraulic Control Systems*, John Wiley & Sons, Inc.
- MINI-LINE 2018. *Grade and Slope Control System. HS301 User Manual*. Fredensborg, Denmark: TF-Technologies Paving Innovation.
- MOBA 2017. *MOBA-Matic MMC-1000 CAN Levelling System for paver, milling machines and other mobile applications*. Limburg, Germany: MOBA Mobile Automation AG.
- MOROSIUK, G., RILEY, M. J. & ODOKI, J. B. 2004. *Modelling road deterioration and works effects, Version 2*. UK.: HDM-4 Highway Development and Management Series. Volume Six.
- MÚČKA, P. 2017. *International Roughness Index Specifications Around the World*. *Road Materials and Pavement Design*, 18, 929-965.
- NDLI 1991. *Nepal Road Maintenance Project – Final Report*. Vancouver, Canada.: N.D. Lea International.
- NDLI 1995a. *Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4. Final Report Asian Development Bank Project RETA 5549*. Vancouver, Canada.: N.D. Lea International.
- NDLI 1995b. *Thailand Pavement Management System – PTMPS Design Report*. Vancouver, Canada.: N.D. Lea International.
- NIKSEFAT, N. & SEPEHRI, N. 2001. *Designing Robust Force Control of Hydraulic Actuators Despite System and Environmental Uncertainties*. *IEEE Control Systems Magazine*, 21, 66-77.
- OGATA, K. 2010. *Ingeniería de Control Moderna - 5ta Edición*, Madrid, España., Pearson Educación S.A.

- PERERA, R. W., C., B. & KOHN, S. D. 1998. Investigation of Development of Pavement Roughness. EE.UU.: Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-RD-97-147.
- PERERA, R. W. & KOHN, S. D. 2001. LTPP data analysis: Factors affecting pavement smoothness. Washington, DC, USA: Transportation Research Board, National Research Council.
- PIERCE, L. M., SIVANESWARAN, N., WILLOUGHBY, K. & MAHONEY, J. Impacts of Smoothness on Hot Mix Asphalt Pavement Performance in Washington State. 6th International Conference on Managing Pavements, 2004 Brisbane Convention & Exhibition Center, Queensland, Australia.
- PÉREZ-ACEBO, H., GONZALO-ORDEN, H., FINDLEY, D. J. & ROJÍ, E. 2021. Modeling the international roughness index performance on semi-rigid pavements in single carriageway roads. *Construction and Building Materials*, 272, 121665.
- QIAO, Y., DAWSON, A., PARRY, T. & FLINTSCH, G. W. 2016. Immediate effects of some corrective maintenance interventions on flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 19, 502-508.
- RAYMOND, C. M., TIGHE, S. L., HAAS, R. & ROTHENBURG, L. 2003. Analysis of influences on as-built pavement roughness in asphalt overlays. *International Journal of Pavement Engineering*, 4, 181-192.
- ROBERTS, F. L., KANDHAL, P. S., BROWN, E. R., LEE, D. Y. & KENNEDY, T. W. 1996. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction – Second edition, USA, National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- SALGADO, M. E., YUZ, J. I. & ROJAS, R. A. 2014. Análisis de Sistemas Lineales, Valparaíso, Chile, Universidad Técnica Fererico Santa María.
- SANCHEZ BLANCO, V. 1968. Regularidad Superficial de los Pavimentos Extendidos Mecánicamente. *Boletín de información / Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo*, 69, 57-77.
- SAYERS, M. W. & KARAMIHAS, S. 1998. The little book of profiling: basic information about measuring and interpreting road profiles. USA: University of Michigan, Ann Arbor, Transportation Research Institute.
- SHELL 2015. The Shell Bitumen Handbook - Sixth Edition. London, UK.: Shell Bitumen.
- SMITH, K. L., SMITH, K. D., EVANS, L. D., HOERNER, T. E. & DARTER, M. I. 1997. Smoothness Specifications for Pavements. Washington, D.C. EE.UU.: NCHRP Web Document 1 (Project 1-31). Transportation Research Board, National Research Council.
- STROUP-GARDINER, M., PARKER, F., BURNS HARRIS, K. & WILLIAMS, B. 2004. The Effect of Material Transfer Devices on HMA Material Uniformity and Ride Quality. Final Report. Alabama Department of Transportation: Project Number 930-471.

- SUNKENBERG, J. Paving Principles - Paver and Screed Operation. Presented at the 37th Rocky Mountain Asphalt Conference and Equipment Show, 2010 Denver, Colorado.
- THAYER, W. J. 1965. Transfer functions for Moog servovalves. New York, USA: Moog technical bulletin N° 103.
- TOPCON. Sonic Tracker Theory of Operation. Training Presentation. Topcon Positioning Systems Inc, 2009.
- TOPCON 2014. P-32+ and P-32 Operator's Manual. California, USA: Topcon Positioning Systems Inc.
- ULRICH, A. Automatic Levelling in Road Construction. Proceedings of the 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), pp. 467-478, 1991 Stuttgart, Germany.
- USACE 2013. Hot-Mix Asphalt Paving Handbook. Washington, DC: US Army Corps of Engineers.
- VOLVO 2020. Tracked and Wheeled Pavers Brochure P5110B, P5170B. Volvo Construction Equipment.
- VÖGELE 2016. Cartilla de Extendido. Ludwigshafen, Germany: Joseph Vögele AG.
- VÖGELE 2018. Operators Guide. Ludwigshafen, Germany: Joseph Vögele AG.
- VÖGELE 2019. Super 2000-3i Tracked Paver Brochure. Ludwigshafen, Germany: Joseph Vögele AG.
- VÖGELE. Pavement Equipment - Manufacturer Perspective. Training Presentation. Joseph Vögele AG, n.d.
- WATANATADA, T., HARRAL, C. G., PATERSON, W. D., DHARESHWAR, A. M., BHANDARI, A. & TSUNOKAWA, K. 1987. The Highway Design and Maintenance Standards Model. Volume 1, Description of the HDM-III Model. London, UK.: Published for the World Bank. Johns Hopkins University Press.
- WATTON, J. 2007. Modelling, Monitoring and Diagnostic Techniques for Fluid Power Systems, Springer Science & Business Media.
- WEN, H. 2011. Design factors affecting the initial roughness of asphalt pavements. International Journal of Pavement Research and Technology, 4, 268.
- XINRONG, Z. & JING, C. 1999. 沥青混凝土摊铺机自动找平控制系统的计算机仿 [Computer Simulation of Auto-Leveling System for Asphalt Paver]. 建筑机械 [Construction Machinery], 2, 23-25.



## Anexo A. Revisión de modelos empíricos

### A.1. Modelos HDM-III (1987)

Uno de los primeros y más exhaustivos estudios relacionados con el efecto de las obras de conservación en la restauración superficial del pavimento fue el desarrollado por el Banco Mundial en el marco del programa HDM (*Highway Design and Maintenance Standards Study*), a partir del cual se obtuvieron los modelos fundamentales utilizados en el software HDM-III (Watanatada et al., 1987). HDM-III modela la reducción de regularidad después de un refuerzo asfáltico como función de la regularidad IRI-pre obra y el espesor de refuerzo. Dos modelos fueron desarrollados; uno considerando el extendido con pavimentadora “regular” y otro para pavimentadora con “sistema de nivelación automático”.

i) Pavimentadora Regular

$$IRI_a = 3.85 - \frac{[\min(\text{HNEW}, 80) + \min(\text{HNEW}, 40)]}{52} + \frac{28 \times \max(\text{IRI}_b - 3.85, 0)}{\max[\min(\text{HNEW}, 80), 28]} \quad (\text{A.1})$$

j) Pavimentadora con Sistema de Nivelación Automático

$$IRI_a = \max \left\{ \begin{array}{l} (1.5 + 0.22 \times \text{IRI}_b - 0.00523 \times \text{HNEW}), \\ [IRI_b(1 - 0.008 \times \max(\text{HNEW} - 20, 0)) - 1.5] \end{array} \right\} \quad (\text{A.2})$$

Dónde:

$IRI_a$  : Regularidad IRI después del refuerzo (m/km)

$IRI_b$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (m/km)

HNEW : Espesor del refuerzo (mm)

El valor mínimo de IRI post-refuerzo ( $IRI_a$ ) predicho por el modelo es de 1.5 m/km, el cual se obtiene por defecto con refuerzos desde los 80 mm de espesor y cuando la regularidad pre-refuerzo ( $IRI_b$ ) es menor a 3.85 m/km.

## A.2. Estudio ISOHDM (1989 - 1995)

Los modelos desarrollados para HDM-III fueron actualizados a través de sucesivas revisiones del estudio ISOHDM (*International Study of Highway Development and Management Tools*). Respecto del efecto reductor de los refuerzos asfálticos en la regularidad, investigaciones realizadas en Indonesia, Nepal, Barbados, Tailandia, Suecia y Trinidad; demostraron la importancia del estándar de calidad constructiva en el resultado final alcanzable (NDLI, 1995a). En la Figura A.1 se presenta una comparación entre los resultados predichos para un refuerzo de 50 mm por los modelos de HDM-III (pavimentadora regular), Indonesia, Nepal, Tailandia y Suecia.

En Indonesia el año 1989 los consultores C.P Corne & Associates llevaron a cabo el estudio “*Roughness Reduction from Overlays*”. Se concluyó que el IRI de construcción para refuerzos asfálticos de 80 mm o más extendidos en múltiples capas era de 2.0 m/km en promedio. A partir de estos resultados, y por medio de interpolación, los autores propusieron la siguiente relación (NDLI, 1995a).

$$IRI_a = 2.0 + 0.0071 \times \max(80 - HNEW, 0) \times \max(IRI_b - 2.0, 0) \quad (A.3)$$

Dónde:

$IRI_a$  : Regularidad IRI después del refuerzo (m/km)

$IRI_b$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (m/km)

HNEW : Espesor del refuerzo (mm)

Analizando la Ecuación (A.3), se deduce que cualquier refuerzo igual o superior a 80 mm de espesor dará como resultado un IRI de construcción mínimo igual a 2.0 m/km. Lo mismo ocurre en situaciones en que el IRI pre-refuerzo ( $IRI_b$ ) sea menor a 2.0 m/km.

Un estudio posterior realizado para la calibración de HDM-III en Nepal (NDLI, 1991) demostró que la Ecuación (A.3) propuesta en Indonesia era válida para refuerzos delgados en Nepal, pero utilizando un límite inferior de 2.5 m/km para el IRI de construcción. De este modo, se propuso la siguiente expresión para el uso de HDM-III en Nepal.

$$IRI_a = 2.5 + 0.0071 \times \max(80 - HNEW, 0) \times \max(IRI_b - 2.5, 0) \quad (A.4)$$

En Tailandia el año 1991 los consultores N.D. Lea International llevaron a cabo el estudio “*Thailand Road Maintenance Project*”, donde investigaron la reducción en el IRI ocasionado por refuerzos asfálticos de 50 mm y dando lugar a la siguiente expresión (NDLI, 1995b).

$$IRI_a = 1.87 + 0.25 \times IRI_b \quad (A.5)$$

En la Ecuación (A.5) el IRI post-refuerzo ( $IRI_a$ ) solo depende del IRI previo a la colocación de refuerzo ( $IRI_b$ ), y es igual a un valor mínimo de 1,87 m/km más un 75% de reducción respecto del valor inicial de  $IRI_b$ . Esta expresión difiere significativamente de la incluida por defecto en HDM-III, resultando en una menor reducción de IRI cuando la regularidad pre-refuerzo es menor a 6.0 m/km (ver Figura A.1).

En el marco del estudio ISOHDM, una investigación realizada en 1995 por el Instituto Sueco de Investigación en Caminos y Transporte (*Swedish Road and Transport Research Institute, VTI*) obtuvo la siguiente relación para refuerzos asfálticos de 25 a 60 mm de espesor (Djårf et al., 1995).

$$IRI_a = 0.55 + 0.29 \times IRI_b \quad (A.6)$$

La Ecuación (A.6) fue obtenida a partir de  $n = 26$  muestras con una bondad de ajuste de  $R^2 = 0.43$  y un rango de validez para valores de IRI pre-refuerzo ( $IRI_b$ ) entre 1.1 y 4.5 m/km. Al igual que en caso de Tailandia, la Ecuación (A.6) calibrada en Suecia establece una relación directa entre el IRI post-refuerzo y el IRI previo a la rehabilitación, la cual es independiente del espesor de refuerzo. Sin embargo, predice una mayor reducción de IRI respecto de todas las ecuaciones anteriores (ver Figura A.1), estableciendo que el IRI post-refuerzo ( $IRI_a$ ) es igual a un valor mínimo de 0.55 m/km más un 71% de reducción respecto del valor inicial del IRI pre-refuerzo ( $IRI_b$ ).

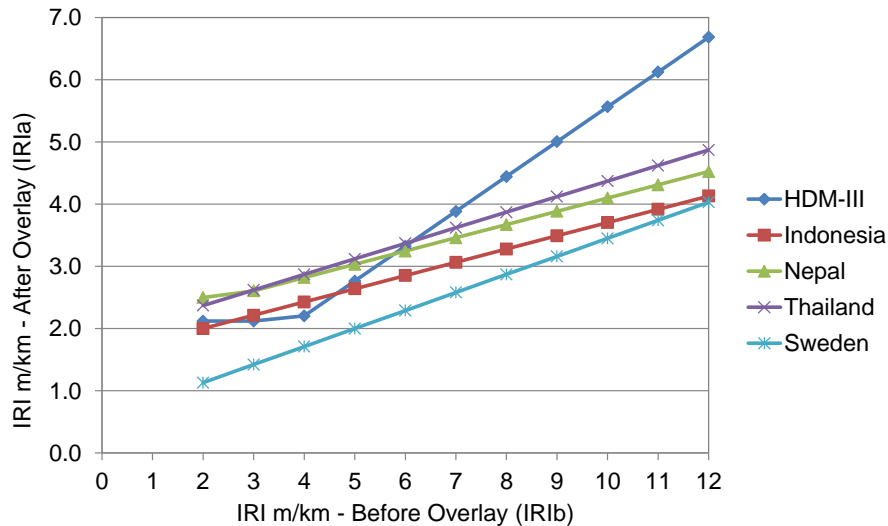


Figura A.1: Comparación de Modelos Estudio ISOHDM – Refuerzo de 50 mm.

Las diferencias obtenidas respecto del valor mínimo de IRI post-refuerzo empleado en los modelos para distintos países pone de manifiesto la importancia del estándar de calidad constructiva como un factor a considerar en cualquier modelo de esta naturaleza.

### A.3. Modelos HDM-4 versión 1 (1995)

A partir de los resultados anteriores, el estudio ISOHDM (NDLI, 1995a) propuso el siguiente modelo de regresión para ser incluido en la primera versión de HDM-4, estableciendo una relación lineal entre el IRI post-refuerzo y la regularidad pre-refuerzo, el espesor de refuerzo y la calidad constructiva.

$$IRI_a = a_0 + a_1 \times \max(IRI_b - a_0, 0) \times \max(a_2 - H, 0) \quad (A.7)$$

Dónde:

$IRI_a$  : Regularidad IRI después del refuerzo (m/km)

$IRI_b$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (m/km)

$H$  : Espesor del refuerzo (mm)

$a_0$  : Estándar de calidad constructiva (1 alta – 2.5 baja). Por defecto 2.0

- $a_1$  : Sensibilidad de la reducción de regularidad respecto del espesor. Por defecto 0.01
- $a_2$  : Espesor (mm) sobre el cual el estándar  $a_0$  es conseguido independiente de la regularidad existente la superficie original. Por defecto 80 mm

En el modelo de la Ecuación (A.7), la constante  $a_0$  representa el estándar general de calidad constructiva para una determinada región o país, el cual podrá variar desde 1 para lugares con alto estándar constructivo (como Suecia) hasta valores de 2.5 donde los estándares de pavimentación son regulares o bajos. La constante  $a_1$  representa la sensibilidad en la reducción de regularidad respecto del espesor del refuerzo, para un rango de 20 mm a 80 mm de espesor, la cual puede variar dependiendo del tipo de superficie previa a la colocación del refuerzo. La constante  $a_2$  corresponde al espesor de refuerzo a partir del cual el estándar  $a_0$  de IRI post-refuerzo ( $IRI_a$ ) es alcanzado independiente de la regularidad existente pre-refuerzo ( $IRI_b$ ). Por defecto, HDM-4 adopta un valor de la constante  $a_2 = 80$  mm, el cual fue considerado consistente con los resultados obtenidos en Indonesia y a lo establecido en el modelo de HDM-III para pavimentadora regular.

#### **A.4. Estudio de Raymond, C. M. et al. (2003)**

Utilizando las secciones de prueba del experimento SPS-5 de la base de datos LTPP, (Raymond et al., 2003) estudiaron la influencia de 4 factores de diseño en el IRI de construcción de refuerzos sobre pavimentos asfálticos existentes; (1) grado de preparación de la superficie pre-refuerzo (básico o intensivo), (2) espesor del refuerzo, (3) tipo de material de refuerzo (nuevo o reciclado) y (4) regularidad previa existente en la superficie a reforzar.

La regularidad existente previa a la colocación del refuerzo resultó ser un factor influyente en el IRI obtenido post-refuerzo, y presentó un efecto conjunto cuando se analiza su influencia en combinación tanto con el grado de reparación superficial previo como con el espesor del refuerzo. El tipo de material empleado en el refuerzo (nuevo o reciclado) no demostró ser estadísticamente significativo para la regularidad de construcción. A partir de los resultados obtenidos, los autores propusieron ecuaciones de predicción para estimar el IRI de construcción según el nivel de IRI pre-refuerzo y distintas combinaciones de grado de reparación previo (básico e intensivo) y espesor del refuerzo (delgado y grueso).

a) Preparación superficial básica y refuerzo delgado ( $R^2 = 0,28$ )

$$IRI_{as-built} = 0.44 + 0.31 \times IRI_{prior} \quad (A.8)$$

b) Preparación superficial básica y refuerzo grueso ( $R^2 = 0,28$ )

$$IRI_{as-built} = 0.52 + 0.25 \times IRI_{prior} \quad (A.9)$$

c) Preparación superficial intensiva y refuerzo delgado ( $R^2 = 0,29$ )

$$IRI_{as-built} = 0.40 + 0.29 \times IRI_{prior} \quad (A.10)$$

d) Preparación superficial intensiva y refuerzo grueso ( $R^2 = 0,13$ )

$$IRI_{as-built} = 0.63 + 0.17 \times IRI_{prior} \quad (A.11)$$

La reparación intensiva consiste en el fresado previo del pavimento existente, sello de grietas y bacheo de los sectores deteriorados, y posterior reposición del pavimento previo a la colocación del refuerzo. La reparación básica consistió en el bacheo previo de sectores deteriorados y colocación de una capa nivelante en zonas de roderas mayores a 12 mm. Los refuerzos delgados fueron de 50 mm y los gruesos de 125 mm.

Las ecuaciones propuestas por los autores establecen que el valor de IRI post-refuerzo ( $IRI_{as-built}$ ) solo depende del IRI previo a la colocación de refuerzo ( $IRI_{prior}$ ); y dependiendo de la preparación superficial y espeso de refuerzo, es igual a un valor mínimo de IRI que varía desde 0.40 hasta 0.63 m/km más una reducción de regularidad respecto del valor previo que varía desde el 69% hasta el 83%. En todos los casos se obtuvo una baja bondad de ajuste  $R^2$ , es decir, que en los modelos propuestos el IRI pre-refuerzo explica solo entre un 13% a 29% la variación observada en el IRI post-refuerzo.

## A.5. Modelos de HDM-4 versión 2 (2004)

Revisiones posteriores del modelo incluido en HDM-4 (versión 1) concluyeron que la relación lineal simple incluida inicialmente no consideraba de forma adecuada un doble efecto de los refuerzos; la irregularidad de corta longitud de onda corregida por refuerzos delgados, y la irregularidad de longitud de onda media corregida por refuerzos de mayor espesor. De este modo, dos nuevos modelos fueron propuestos para su inclusión en la versión actual de HDM-4 (versión 2), estableciendo una relación bi-lineal entre refuerzo y regularidad IRI para un determinado espesor de refuerzo, técnica constructiva y tipo de pavimento (Morosiuk et al., 2004).

a) Método 1

$$\Delta RI = \max\{0, a_0[\min(a_1, RI_{bw}) - a_2] + a_3 \times \max[0, (RI_{bw} - a_1)]\} \quad (A.12)$$

$$RI_{bw} = \max(1.0, RI_{ap}) \quad (A.13)$$

$$RI_{aw} = RI_{bw} - \Delta RI \quad (A.14)$$

Dónde:

$\Delta RI$  : Reducción de regularidad IRI post-refuerzo (m/km)

$RI_{bw}$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (m/km)

$RI_{aw}$  : Regularidad IRI después del refuerzo (m/km)

$RI_{ap}$  : Regularidad ajustada post-bacheos previos al refuerzo (m/km)

$a_0$  : Pendiente de la primera recta. Por defecto 0.9

$a_1$  : Regularidad IRI antes del refuerzo en que se interceptan ambas rectas (m/km)

$a_2$  : Regularidad IRI mínima después del refuerzo (m/km)

$a_3$  : Pendiente de la segunda recta

Los coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  se calculan como función del espesor del refuerzo según las siguientes expresiones.

$$a_1 = \max[4.0, 2.1 \times e^{(0.019 \times H)}] \quad (\text{A.15})$$

$$a_2 = 1 + 0.018 \times \max[0, (100 - H)] \quad (\text{A.16})$$

$$a_3 = \min\{a_0, \max[0, (0.01 \times H - 0.15)]\} \quad (\text{A.17})$$

Dónde:

H : Espesor del refuerzo en mm (rango válido entre 5 y 150 mm)

A partir del análisis de la Ecuación (A.13) se puede observar que el modelo establece un valor mínimo de 1.0 m/km para la rugosidad pre-refuerzo ( $RI_{bw}$ ), es decir, valores menores de IRI serán considerados como 1.0 m/km en el cálculo. Por otro lado, según la Ecuación (A.16) se deduce que la regularidad mínima post-refuerzo ( $a_2$ ) está fijada por defecto en 1.0 m/km a partir de los 100 mm de espesor. Se puede concluir que refuerzos delgados (menores a 50 mm) solo producirán una reducción en la regularidad ( $\Delta RI$ ) cuando el IRI pre-refuerzo sea mayor a 2 m/km.

#### b) Método 2

La reducción de la rugosidad post-refuerzo está dada por la menor de las ordenadas desde el eje-x hasta la recta 1 (XZ) o hasta la recta 2 (XY). Esta relación queda dada por la siguiente expresión.

$$\Delta RI = \max\{0, \min[a_0(RI_{bw} - a_2), a_0(a_1 - a_2) + a_3 \times \max[0, (RI_{bw} - a_1)]]\} \quad (\text{A.18})$$

Dónde:

$\Delta RI$  : Reducción de regularidad IRI post-refuerzo (m/km)

$RI_{bw}$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (m/km)

Del mismo modo que en el Método 1, el coeficiente  $a_0$  se define como la pendiente de la recta 1 (por defecto 0.9) y los coeficientes,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  se calculan como función del espesor del refuerzo según las Ecuaciones (8), (9) y (10). Ambos

métodos arrojan el mismo resultado para la reducción de la rugosidad post-refuerzo ( $\Delta$ IRI).

## A.6. Estudio de Dong, Q. & Huang, B. (2012)

(Dong and Huang, 2012) investigaron la eficiencia y beneficio de una serie de rehabilitaciones de pavimento disponibles en la base de datos LTPP. El indicador de desempeño empleado para el análisis fue la rugosidad IRI. La efectividad de refuerzos asfálticos fue evaluada, entre otros parámetros, mediante su efecto en la reducción de irregularidad (IRI-drop).

Los autores utilizaron el método de regresión múltiple para evaluar la influencia de distintos factores en la reducción del IRI producto del refuerzo. En la Tabla A.1 se presenta un resumen del modelo de regresión obtenido para estimar la reducción IRI-drop en función de la regularidad existente antes del refuerzo (Pre\_IRI), el espesor de refuerzo (Overlay thickness) y la ejecución de fresado previo al refuerzo (Mill). Para el análisis se emplearon 379 secciones, obteniendo una bondad de ajuste  $R^2 = 0.87$ .

Tabla A.1: Resultados de regresión múltiple para IRI-drop

Term	Estimate	Std. Error	t Ratio
Pre_IRI	0.4692681	0.014359	32.68
Overlay thickness (in)	0.027611	0.005603	4.93
Mill	0.0402655	0.008532	4.72

Fuente: (Dong and Huang, 2012)

De este modo, el modelo de regresión obtenido se puede expresar por la siguiente ecuación.

$$IRI_{drop} = 0.47 \times Pre\_IRI + 0.03 \times Overlay\ thickness + 0.04 \times Mill \quad (A.19)$$

A partir de los resultados se puede observar que la regularidad previa al refuerzo (Pre\_IRI) es la variable más significativa ( $t = 32.68$ ). Por cada incremento de 1 m/km en la regularidad previa (Pre\_IRI) se obtiene un aumento de 0.47 m/km en la reducción de regularidad (IRI\_Drop) producto del refuerzo. Del mismo modo,

aunque en menor medida, un incremento de 2.54 cm (1 in) en el espesor de refuerzo se traduce en un aumento de 0.03 m/km en el IRI\_Drop, y la ejecución de fresado produce un aumento de 0.04 m/km en el IRI\_Drop.

### **A.7. Estudio de Kwon, O. et al. (2015)**

Utilizando como premisa los diversos estudios que destacan la importancia del IRI de la capa subyacente en el valor de IRI alcanzable en la construcción de un refuerzo; (Kwon et al., 2015) desarrollaron una relación probabilística entre las características de regularidad en la construcción de la capa asfáltica intermedia y la capa de rodado. Para el estudio, los autores utilizaron 1,870 datos de IRI evaluados a nivel de capa asfáltica intermedia ( $IRI_S$ ) y capa superficial ( $IRI_F$ ) en 5 proyectos piloto de refuerzo asfáltico ejecutados por el Departamento de Transporte de Florida en EE.UU (FDOT). Todos los proyectos consideraron el fresado de la superficie existente, la colocación de una capa estructural intermedia de 3.8 a 6.4 cm de espesor (1.5 a 2.5 in) dependiendo del proyecto, y luego una capa superficial de 1.9 cm (0.75 in). A continuación se presenta el modelo de regresión obtenido.

$$IRI_P = 0.47 \cdot IRI_S + 15.69 \quad (A.20)$$

Los autores indican que, si bien la regresión lineal obtiene un modelo aceptable con bondad de ajuste  $R^2 = 0.51$ , este resultado no es capaz de explicar la dispersión de datos observada por encima y debajo de la recta de regresión. Por ejemplo, para un valor de  $IRI_S = 0.79$  m/km (50 in/mile) el valor predicho por el modelo es de  $IRI_P = 0.62$  m/km (39 in/mile), sin embargo, los datos empleados para el análisis indican que para ese valor de  $IRI_S$  los valores reales (observados) de  $IRI_F$  están en el rango de 0.40 a 0.95 m/km (25 a 60 in/mile). De acuerdo con lo anterior, para el desarrollo del modelo se incluyó otra variable que tome en cuenta el efecto de los residuos de la regresión ( $\varepsilon$ ), definidos como la diferencia entre el valor de  $IRI_F$  observado y el predicho ( $IRI_P$ ).

$$IRI_F = IRI_P + \varepsilon = 0.47 \cdot IRI_S + 15.69 + \varepsilon \quad (A.21)$$

Este planteamiento implica que, para un determinado valor de  $IRI_S$ , la distribución de los valores observados  $IRI_F$  siguen una función de densidad de probabilidad normal centrada en el valor predicho  $IRI_P$  con desviación estándar  $\sigma = \sigma_\varepsilon = 0.1$  m/km (6.1 in/mile). Matemáticamente, esta función de probabilidad se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$f_{IRI_F}(x) = \frac{1}{\sigma_\varepsilon \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[ \frac{IRI_P - 0.47 \cdot IRI_S - 15.69}{\sigma_\varepsilon} \right]^2\right) \quad (A.22)$$

Respecto de otros modelos revisados, la principal ventaja de la Ecuación (A.22) es que permite calcular la probabilidad de obtener una cierta rugosidad  $IRI_F$  a nivel de capa superficial dado un determinado valor de rugosidad  $IRI_S$  a nivel de capa inferior. En el caso de ejemplo anterior, para un valor de  $IRI_S = 0.79$  m/km (50 in/mile) se obtiene una baja probabilidad, del 6.5%, de que el valor real de  $IRI_F$  sea igual al valor predicho  $IRI_P = 0.62$  m/km (39 in/mile).

## A.8. Estudio de Qiao, Y. et al. (2016)

Considerando la información disponible en el Sistema de Gestión de Pavimentos (*Pavement Management System*, PMS) del Departamento de Transporte de Virginia en EE.UU (VDOT), (Qiao et al., 2016) propusieron un método para validar modelos del efecto correctivo inmediato de acciones de conservación en pavimentos flexibles. Dos modelos fueron desarrollados, efecto del mantenimiento en la reducción de la regularidad IRI y las roderas, obteniendo ajustes de cada modelo para tres alternativas de rehabilitación: (1) refuerzo asfáltico de 2.54 a 5.1 cm de espesor (1 a 2 in); (2) capa de base asfáltica de 7.6 cm (3 in) y refuerzo asfáltico de 3.8 cm de espesor (1.5 in); y (3) fresado y reposición de pavimento asfáltico en 5.1 cm de espesor (2 in). El método propuesto consideró un proceso de *data mining* para la extracción de información de la base de datos y análisis de regresión para el ajuste de los modelos a las alternativas de mantenimiento. Los *outliers* fueron detectados por el método de la distancia de Cook y removidos del análisis.

A partir del análisis de regresión los autores proporcionaron los factores de calibración para las tres alternativas de rehabilitación, y presentaron los modelos

validados para el efecto correctivo inmediato de las actuaciones como resultado de aplicar el método de selección de datos propuesto.

a) Opción de conservación 1: Refuerzo capa de rodadura (espesor 3.8 – 5.1 cm)

$$\Delta IRI_n = 0.6307 \cdot IRI_{n0} - 22.491 \quad (A.23)$$

b) Opción de conservación 2: Refuerzo capa intermedia + rodadura (espesor 7.6 + 3.8 cm)

$$\Delta IRI_n = 0.5234 \cdot IRI_{n0} - 8.0962 \quad (A.24)$$

c) Opción de conservación 3: Fresado y reposición capa de rodadura (5.1 cm)

$$\Delta IRI_n = 0.811 \cdot IRI_{n0} - 39.71 \quad (A.25)$$

Dónde:

$\Delta IRI_n$  : Reducción de la regularidad (in/mile)

$IRI_{n0}$  : Regularidad IRI antes del mantenimiento (in/mile)

La interpretación del modelo de reducción inicial de regularidad producto del refuerzo asfáltico (opción 1), por ejemplo, indica que luego del refuerzo se produce una reducción de IRI equivalente al 63% de la regularidad existente previa al refuerzo más un valor de IRI de 0.36 m/km (dado por la constante -22.491). La baja bondad de ajuste  $R^2 = 0.59$  obtenida indica que en el modelo propuesto el IRI pre-refuerzo ( $IRI_{n0}$ ) explica solo en un 59% la variación observada en la reducción de regularidad post-refuerzo ( $\Delta IRI_n$ ).

## **A.9. Estudio de Lu, Q. & Xin, C. (2018)**

Utilizando las secciones de prueba de los experimentos SPS-3, SPS-5 y SPS-6 de la base de datos LTPP; (Lu and Xin, 2018) estudiaron el efecto de distintos factores del diseño de refuerzos asfálticos en la reducción inicial de regularidad (IRI-drop) y la progresión futura de IRI después del refuerzo. Para el análisis del IRI-drop, los autores realizaron modelos de regresión lineal múltiple con parámetros aleatorios corregidos por autocorrelación de primer orden. Este

enfoque de análisis permitió considerar variabilidad de algunos parámetros entre secciones de pavimento y así tomar en cuenta el efecto de heterogeneidad no observada en los datos de IRI, en vez de considerarlos fijos como en un modelo de regresión lineal tradicional. Para la estimación del modelo fueron simuladas distintas distribuciones posibles para los parámetros aleatorios (normal, lognormal y uniforme) utilizando un enfoque de máxima verosimilitud.

A partir del análisis realizado, se propuso un modelo de regresión para estimar la reducción IRI-drop en función de las siguientes variables explicativas: (1) IRI pre-refuerzo, (2) espesor del refuerzo, (3) indicador de ejecución de fresado, (4) termino de interacción entre zona centro-norte e IRI pre-refuerzo, (5) termino de interacción entre agrietamiento por fatiga severo e IRI pre-refuerzo, (6) termino de interacción entre ahuellamiento severo e IRI pre-refuerzo, y (7) termino de interacción entre indicador de endogeneidad e IRI pre-refuerzo.

$$IRI^d = -34.72 + 0.65 \cdot IRI_c + 1.85 \cdot Thk + 6.91 \cdot Mill + 0.085 \cdot (Nc \times IRI_c) + 0.082 \cdot (Fc \times IRI_c) - 0.017 \cdot (Rt \times IRI_c) + 0.007 \cdot (En \times IRI_c) \quad (A.26)$$

Dónde:

$IRI^d$  : Reducción de regularidad IRI-drop (in/mile)

$IRI_c$  : Regularidad IRI antes del refuerzo (in/mile)

$Thk$  : Espesor del refuerzo (in)

$Mill$  : Indicador de ejecución de fresado (Si = 1, No = 0)

$Nc$  : Termino de interacción zona centro-norte (Si = 1, No = 0)

$Fc$  : Termino de interacción agrietamiento por fatiga severo (Si = 1, No = 0)

$Rt$  : Termino de interacción ahuellamiento severo (Si = 1, No = 0)

$En$  : Termino de interacción endogeneidad (Si = 1, No = 0)

(\*) 1 in/mile = 0.0158 m/km

La condición existente del pavimento previo a la colocación del refuerzo demostró tener un efecto significativo en el desempeño del refuerzo. La interpretación del modelo indica que, permaneciendo constante el resto de variables, por cada incremento de 1 m/km en la regularidad pre-refuerzo ( $IRI_c$ ) se incrementa en 0.65 m/km la reducción de regularidad producto del refuerzo. Del mismo modo, cada incremento de 2.54 cm (1 in) en el espesor de refuerzo ( $Thk$ ) se traduce en

una reducción de 1.85 m/km en la regularidad final post-refuerzo. En cuando a la ejecución de fresados previo, los autores mencionan que su efecto es aleatorio, aunque tendría influencia en mejorar la regularidad de construcción en casi todas las secciones estudiadas, observando una disminución promedio de 0.12 m/km en el IRI post-refuerzo. Llama la atención que, independiente de los valores que adopten las variables explicativas, el modelo siempre predice un aumento fijo de 0.55 m/km en la regularidad post-refuerzo dado por la constante -34.72.

El tipo de mezcla asfáltica empleada en el refuerzo (nueva o 30% reciclada) no demostró ser un factor contribuyente en la reducción inicial de regularidad IRI-drop. Respecto de los términos de interacción, si bien fueron estadísticamente significativos, su impacto en la reducción IRI-drop es bajo respecto de las otras variables antes mencionadas.

## Anexo B. Proceso base de datos LTPP

### B.1. Introducción

El programa norteamericano *Long-Term Pavement Performance* (LTPP) fue diseñado como un estudio de largo plazo (+20 años) que comenzó el año 1987 con los siguientes objetivos.

- Evaluar métodos existentes de diseño.
- Desarrollar mejores métodos de diseño y estrategias para la rehabilitación de pavimentos existentes.
- Desarrollar mejores ecuaciones de diseño para pavimentos nuevos y reconstruidos.
- Determinar el efecto de la sollicitación de carga, ambiental, propiedades de los materiales y variabilidad, calidad constructiva, y niveles de mantenimiento en el deterioro y desempeño de los pavimentos.
- Determinar el efecto de propiedades específicas de diseño en el desempeño de pavimento.
- Establecer una base de datos de pavimentos nacional de largo plazo para respaldar los objetivos del SHRP y necesidades futuras.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, el programa LTPP fue dividido entre dos programas complementarios. El primer programa, denominado *General Pavement Studies* (GPS), utiliza secciones de prueba de pavimentos en servicio tanto en su fase de diseño original o en su fase posterior al primer refuerzo. El segundo programa, denominado *Specific Pavement Studies* (SPS), investiga el efecto de propiedades específicas de diseño en el desempeño de los pavimentos.

La base de datos LTPP contiene información de más de 2500 secciones de pavimento distribuidas a lo largo de Estados Unidos y Canadá, y se encuentra disponible para su consulta y descarga *online* desde el sitio web LTPP InfoPave (<https://infopave.fhwa.dot.gov/>).

El programa GPS consiste en más de 800 secciones de prueba consideradas representativas de los diseños y materiales utilizados en la práctica común de ingeniería en los Estados Unidos y Canadá. El objetivo de las secciones en el programa GPS es utilizar la información recolectada para el desarrollo de procedimientos mejorados de diseño de pavimentos.

En cuanto a estudios específicos SPS. Los proyectos SPS-1 y SPS-2 involucran la construcción de nuevos pavimentos asfálticos (AC) y de hormigón (PCC) respectivamente. Diferentes propiedades estructurales son utilizadas en la construcción de las distintas secciones de prueba. Los experimentos SPS-3 y SPS-4 fueron diseñados para estudiar el efecto de distintas estrategias de mantenimiento en pavimentos existentes de AC y PCC. En los experimentos SPS-5 y SPS-6 se utilizan diferentes técnicas de rehabilitación en pavimentos existentes de AC y PCC respectivamente. Los experimentos SPS-7 estudian recapeos ligados de PCC sobre pavimentos existentes de PCC. Los experimentos SPS-8 consisten en secciones de prueba de AC y PCC que son construidas en caminos de bajo volumen de tránsito y diseñadas para estudiar el efecto de las condiciones ambientales sobre dichas secciones. El experimento SPS-9 consiste en secciones de prueba construidas con mezclas asfálticas SuperPave desarrolladas en el programa SHRP.

Dado el objetivo de la presente investigación, se utilizaron exclusivamente las secciones del experimento SPS-5, diseñado específicamente para evaluar el desempeño en el tiempo de distintas alternativas de recapeos asfálticos sobre pavimentos asfálticos existentes.

## **B.2. Secciones SPS-5 para el desarrollo del modelo**

El experimento SPS-5 está compuesto originalmente por 18 proyectos de recapeo distribuidos entre Estados Unidos y Canadá. Cada proyecto incluye 9 secciones de prueba con distintas alternativas de rehabilitación estandarizadas, totalizando 162 secciones principales. Además, algunos estados incluyeron secciones suplementarias con alguna modificación respecto de las alternativas estándar, totalizando 48 secciones adicionales en todo el experimento.

Tabla B.1: Experimento SPS-5

SHRP ID	REHABILITATION	SURFACE PREPARATION
501	Control—no treatment	
502	Thin overlay (51 mm)—recycled HMA mix	Minimal
503	Thick overlay (127 mm)—recycled HMA mix	Minimal
504	Thick overlay—virgin mix	Minimal
505	Thin overlay—virgin mix	Minimal
506	Thin overlay—virgin mix— with milling	Intensive
507	Thick overlay—virgin mix—with milling	Intensive
508	Thick overlay—recycled mix—with milling	Intensive
509	Thin overlay—recycled mix—with milling	Intensive

Para la investigación se han considerado solo aquellas secciones de preparación superficial mínima (502, 503, 504 y 505), es decir, donde no se ejecutaron fresados o reparaciones excesivas sobre la superficie existente previo a la ejecución del recapeo. De esta forma, los datos de perfilometría post-obra responden principalmente a la nivelación efectuada por la extendedora como respuesta al perfil longitudinal de la superficie original de la cual se tiene perfilometría pre-obra. Por lo tanto, de las 162 secciones principales, se consideran solo 72 secciones (18 proyectos x 4 secciones cada uno). En la Tabla B.2 se muestran las 72 secciones iniciales.

Tabla B.2: Secciones iniciales para el estudio

SPS-5 Test Site			BACKGROUND INFORMATION	CN_CHANGE_REASON_EXP
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID		
1	Alabama	0502	Construction Report Deviation Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
4	Arizona	0502	Construction Report Deviation Report	Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0503		Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0504		Mill Off AC and Overlay with AC
		0505		Mill Off AC and Overlay with AC
6	California	0502	Construction Report Deviation Report	Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0503		Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0504		Mill Off AC and Overlay with AC
		0505		Mill Off AC and Overlay with AC
8	Colorado	0502	Construction Report Deviation Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
12	Florida	0502	Construction Report Deviation Report	Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0503		Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0504		Mill Off AC and Overlay with AC
		0505		Mill Off AC and Overlay with AC
13	Georgia	0502	Construction Report Deviation Report	Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0503		Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0504		Mill Off AC and Overlay with AC
		0505		Mill Off AC and Overlay with AC
23	Maine	0502	Construction Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
24	Maryland	0502	Construction Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
27	Minnesota	0502	Construction Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
28	Mississippi	0502	Construction Report Deviation Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay

SPS-5 Test Site			BACKGROUND INFORMATION	CN_CHANGE_REASON_EXP
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID		
29	Missouri	0502	Construction Report FALTA IRI-pre FALTA IRI-post	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
30	Montana	0502	Construction Report Deviation Report	Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0503		Mill Existing Pavement and Overlay with Hot-Mix Recycled AC
		0504		Mill Off AC and Overlay with AC
		0505		Mill Off AC and Overlay with AC
34	New Jersey	0502	Construction Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
35	New Mexico	0502	Construction Report Deviation Report FALTA IRI-pre	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
40	Oklahoma	0502	Construction Report Deviation Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
48	Texas	A502	Construction Report Deviation Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		A503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		A504		Asphalt Concrete Overlay
		A505		Asphalt Concrete Overlay
81	Alberta	0502	Construction Report Deviation Report	Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0503		Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete Overlay
		0504		Asphalt Concrete Overlay
		0505		Asphalt Concrete Overlay
83	Manitoba	0502	Construction Report FALTA IRI-pre	
		0503		
		0504		
		0505		

De este resultado, se descartaron todas aquellas secciones que utilizaron modelos de extendedoras sobre orugas para la colocación del refuerzo (Minnesota y Oklahoma). Secciones adicionales fueron descartadas por presentar información incompleta y/o por desviaciones de la obra real ejecutada respecto de la rehabilitación proyectada; por ejemplo, la ausencia de la evaluación de perfilometría anterior o posterior a la obra (como los proyectos de Missouri, New Mexico y Manitoba), o secciones proyectadas como de reparación superficial

mínima en las cuales finalmente se ejecutó fresado (como los casos de Arizona, California, Florida, Georgia y Montana). De la pre-selección resultaron un total de 32 secciones candidatas. A partir de las 32 secciones resultantes a utilizar en el estudio, se identificaron aquellas obras que utilizaron nivelación asistida. Esta información estuvo disponible de forma explícita para algunas secciones en los reportes de construcción, en otros casos, fue deducida a partir del análisis de densidad espectral de los perfiles longitudinales antes y después de la obra.

Tabla B.3: Pre-selección de secciones para el estudio

SPS-5 Test Site			ASPHALT PAVER			Levelling
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID	MANUFACTURER	MODEL	UNDERCARRIAGE	
1	Alabama	0502	BARBER GREENE	BG-240B	Wheeled	Manual
1	Alabama	0503	BARBER GREENE	BG-240B	Wheeled	Manual
1	Alabama	0504	BARBER GREENE	BG-240B	Wheeled	Manual
1	Alabama	0505	BARBER GREENE	BG-240B	Wheeled	Manual
8	Colorado	0502	BARBER GREENE	BG-260B	Wheeled	Automatic
8	Colorado	0503	BARBER GREENE	BG-260B	Wheeled	Automatic
8	Colorado	0504	BARBER GREENE	BG-260B	Wheeled	Automatic
8	Colorado	0505	BARBER GREENE	BG-260B	Wheeled	Automatic
23	Maine	0502	BLAW-KNOX	PF-180H	Wheeled	Automatic
23	Maine	0503	BLAW-KNOX	PF-180H	Wheeled	Automatic
23	Maine	0504	BLAW-KNOX	PF-180H	Wheeled	Automatic
23	Maine	0505	BLAW-KNOX	PF-180H	Wheeled	Automatic
24	Maryland	0502	BARBER GREENE	BG-240	Wheeled	Automatic
24	Maryland	0503	BARBER GREENE	BG-240	Wheeled	Automatic
24	Maryland	0504	BARBER GREENE	BG-240	Wheeled	Automatic
24	Maryland	0505	BARBER GREENE	BG-240	Wheeled	Automatic
28	Mississippi	0502	CEDARAPIDS	BSF531	Wheeled	Manual
28	Mississippi	0503	CEDARAPIDS	BSF531	Wheeled	Manual
28	Mississippi	0504	CEDARAPIDS	BSF531	Wheeled	Manual
28	Mississippi	0505	CEDARAPIDS	BSF531	Wheeled	Manual
34	New Jersey	0502	BARBER GREENE	BG-260	Wheeled	Automatic
34	New Jersey	0503	BARBER GREENE	BG-260	Wheeled	Automatic
34	New Jersey	0504	BARBER GREENE	BG-260	Wheeled	Automatic
34	New Jersey	0505	BARBER GREENE	BG-260	Wheeled	Automatic
48	Texas	A502	BARBER GREENE	BG-260	Wheeled	Manual
48	Texas	A503	BARBER GREENE	BG-260	Wheeled	Manual
48	Texas	A504	BARBER GREENE	SB-140	Wheeled	Manual
48	Texas	A505	BARBER GREENE	SB-140	Wheeled	Manual
81	Alberta	0502	BLAW-KNOX	PF-220	Wheeled	Manual
81	Alberta	0503	BLAW-KNOX	PF-220	Wheeled	Manual

Anexo B. Proceso base de datos LTPP

SPS-5 Test Site			ASPHALT PAVER			Levelling
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID	MANUFACTURER	MODEL	UNDERCARRIAGE	
81	Alberta	0504	BLAW-KNOX	PF-220	Wheeled	Manual
81	Alberta	0505	BLAW-KNOX	PF-220	Wheeled	Manual



## **Anexo C. Resultados modelo base**



## C.1. Base de datos para calibración del modelo base

Tabla C.1: Calibración modelo base – Base de datos para calibración – Excluyendo secciones inconsistentes

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
1	Alabama	0502	1	0	20	20.0	1.27		0.74		-0.54	
1	Alabama	0502	1	20	40	20.0	0.89		0.45		-0.43	
1	Alabama	0502	1	40	60	20.0	0.91		0.57		-0.33	
1	Alabama	0502	1	60	80	20.0	1.12		0.88		-0.25	
1	Alabama	0502	1	80	100	20.0	1.49	1.14	0.73	0.67	-0.76	-0.46
1	Alabama	0502	1	100	120	20.0	1.33		0.59		-0.74	
1	Alabama	0502	1	120	140	20.0	1.49		0.77		-0.72	
1	Alabama	0503	2	0	20	20.0	1.12		0.48		-0.65	
1	Alabama	0503	2	20	40	20.0	1.07		0.43		-0.64	
1	Alabama	0503	2	40	60	20.0	1.14		0.50		-0.64	
1	Alabama	0503	2	60	80	20.0	1.11		0.77		-0.33	
1	Alabama	0503	2	80	100	20.0	1.21	1.13	0.45	0.53	-0.76	-0.60
1	Alabama	0503	2	100	120	20.0	1.23		0.73		-0.50	
1	Alabama	0503	2	120	140	20.0	0.96		0.69		-0.27	
1	Alabama	0504	2	0	20	20.0	1.33		0.60		-0.73	
1	Alabama	0504	2	20	40	20.0	1.44		0.90		-0.54	
1	Alabama	0504	2	40	60	20.0	1.05		0.58		-0.47	
1	Alabama	0504	2	60	80	20.0	1.03		0.95		-0.08	
1	Alabama	0504	2	80	100	20.0	1.22	1.21	1.00	0.81	-0.22	-0.41
1	Alabama	0504	2	100	120	20.0	1.48		0.66		-0.82	
1	Alabama	0504	2	120	140	20.0	1.34		1.00		-0.33	
1	Alabama	0505	1	0	20	20.0	1.43		0.55		-0.89	
1	Alabama	0505	1	20	40	20.0	1.20		0.66		-0.53	

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
1	Alabama	0505	1	40	60	20.0	1.17		0.58		-0.59	
1	Alabama	0505	1	60	80	20.0	1.94		0.99		-0.95	
1	Alabama	0505	1	80	100	20.0	1.34	1.42	0.58	0.67	-0.75	-0.74
1	Alabama	0505	1	100	120	20.0	1.13		0.40		-0.73	
1	Alabama	0505	1	120	140	20.0	1.10		0.84		-0.26	
28	Mississippi	0502	1	0	20	20.0	3.16		1.63		-1.53	
28	Mississippi	0502	1	20	40	20.0	2.89		1.57		-1.32	
28	Mississippi	0502	1	40	60	20.0	2.69		1.23		-1.46	
28	Mississippi	0502	1	60	80	20.0	2.36		2.09		-0.27	
28	Mississippi	0502	1	80	100	20.0	2.74	2.77	0.75	1.46	-1.98	-1.31
28	Mississippi	0502	1	100	120	20.0	2.53		2.11		-0.42	
28	Mississippi	0502	1	120	140	20.0	1.58		0.56		-1.02	
28	Mississippi	0503	3	0	20	20.0	2.78		2.11		-0.66	
28	Mississippi	0503	3	20	40	20.0	2.68		1.77		-0.92	
28	Mississippi	0503	3	40	60	20.0	3.08		2.93		-0.15	
28	Mississippi	0503	3	60	80	20.0	2.46		1.48		-0.98	
28	Mississippi	0503	3	80	100	20.0	3.27	2.85	1.41	1.94	-1.86	-0.92
28	Mississippi	0503	3	100	120	20.0	3.16		2.33		-0.83	
28	Mississippi	0503	3	120	140	20.0	5.50		1.00		-4.51	
28	Mississippi	0504	3	0	20	20.0	3.10		1.52		-1.59	
28	Mississippi	0504	3	20	40	20.0	2.33		0.82		-1.52	
28	Mississippi	0504	3	40	60	20.0	2.80		1.67		-1.13	
28	Mississippi	0504	3	60	80	20.0	2.53		1.68		-0.85	
28	Mississippi	0504	3	80	100	20.0	2.04	2.56	0.82	1.30	-1.22	-1.26
28	Mississippi	0504	3	100	120	20.0	1.95		1.03		-0.91	
28	Mississippi	0504	3	120	140	20.0	1.90		1.23		-0.67	
28	Mississippi	0505	1	0	20	20.0	1.56		1.71		0.15	
28	Mississippi	0505	1	20	40	20.0	2.62		2.07		-0.55	
28	Mississippi	0505	1	40	60	20.0	2.41		2.07		-0.34	
28	Mississippi	0505	1	60	80	20.0	2.56		2.07		-0.49	
28	Mississippi	0505	1	80	100	20.0	1.67	2.16	1.50	1.88	-0.17	-0.28
28	Mississippi	0505	1	100	120	20.0	1.86		1.28		-0.59	

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
28	Mississippi	0505	1	120	140	20.0	0.88		1.55		0.67	
48	Texas	A502	1	0	20	20.0	0.87		0.87		-0.01	
48	Texas	A502	1	20	40	20.0	2.01		1.36		-0.66	
48	Texas	A502	1	40	60	20.0	1.47		1.19		-0.28	
48	Texas	A502	1	60	80	20.0	1.32		1.17		-0.15	
48	Texas	A502	1	80	100	20.0	1.24	1.38	1.28	1.17	0.04	-0.21
48	Texas	A502	1	100	120	20.0	1.35		1.46		0.11	
48	Texas	A502	1	120	140	20.0	1.32		1.34		0.02	
48	Texas	A503	3	0	20	20.0	1.73		1.02		-0.70	
48	Texas	A503	3	20	40	20.0	1.70		1.32		-0.38	
48	Texas	A503	3	40	60	20.0	1.14		0.88		-0.26	
48	Texas	A503	3	60	80	20.0	1.63		0.93		-0.71	
48	Texas	A503	3	80	100	20.0	1.31	1.50	1.40	1.11	0.09	-0.39
48	Texas	A503	3	100	120	20.0	1.38		1.05		-0.33	
48	Texas	A503	3	120	140	20.0	1.35		1.15		-0.21	
48	Texas	A505	1	0	20	20.0	1.57		1.48		-0.09	
48	Texas	A505	1	20	40	20.0	1.60		1.14		-0.46	
48	Texas	A505	1	40	60	20.0	1.68		1.26		-0.43	
48	Texas	A505	1	60	80	20.0	1.81		1.14		-0.66	
48	Texas	A505	1	80	100	20.0	2.01	1.73	1.66	1.34	-0.34	-0.40
48	Texas	A505	1	100	120	20.0	1.63		1.53		-0.10	
48	Texas	A505	1	120	140	20.0	1.67		1.33		-0.34	
81	Alberta	0502	1	0	20	20.0	1.36		0.64		-0.72	
81	Alberta	0502	1	20	40	20.0	1.54		1.25		-0.30	
81	Alberta	0502	1	40	60	20.0	2.38		0.83		-1.55	
81	Alberta	0502	1	60	80	20.0	2.79		1.12		-1.67	
81	Alberta	0502	1	80	100	20.0	2.44	2.10	1.09	0.99	-1.35	-1.12
81	Alberta	0502	1	100	120	20.0	2.19		0.95		-1.24	
81	Alberta	0502	1	120	140	20.0	1.62		1.04		-0.57	
81	Alberta	0503	2	0	20	20.0	2.59		1.20		-1.39	
81	Alberta	0503	2	20	40	20.0	1.44		1.00		-0.44	

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
81	Alberta	0503	2	40	60	20.0	1.65		0.97		-0.68	
81	Alberta	0503	2	60	80	20.0	1.57		1.06		-0.51	
81	Alberta	0503	2	80	100	20.0	1.56	1.76	0.79	1.00	-0.77	-0.76
81	Alberta	0503	2	100	120	20.0	2.08		1.19		-0.89	
81	Alberta	0503	2	120	140	20.0	3.38		1.21		-2.18	
81	Alberta	0504	2	0	20	20.0	1.59		0.86		-0.73	
81	Alberta	0504	2	20	40	20.0	1.92		1.10		-0.82	
81	Alberta	0504	2	40	60	20.0	3.21		1.26		-1.95	
81	Alberta	0504	2	60	80	20.0	3.58		1.67		-1.91	
81	Alberta	0504	2	80	100	20.0	2.61	2.58	0.88	1.16	-1.73	-1.43
81	Alberta	0504	2	100	120	20.0	2.39		1.72		-0.67	
81	Alberta	0504	2	120	140	20.0	2.22		1.35		-0.88	
81	Alberta	0505	1	0	20	20.0	0.90		0.71		-0.19	
81	Alberta	0505	1	20	40	20.0	1.19		0.72		-0.46	
81	Alberta	0505	1	40	60	20.0	1.38		1.15		-0.23	
81	Alberta	0505	1	60	80	20.0	1.96		1.54		-0.42	
81	Alberta	0505	1	80	100	20.0	0.97	1.28	1.50	1.13	0.54	-0.15
81	Alberta	0505	1	100	120	20.0	1.58		0.90		-0.68	
81	Alberta	0505	1	120	140	20.0	1.84		1.44		-0.40	

## C.2. Calibración modelo base - simulaciones

Tabla C.2: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alabama 502

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.36	0.41	0.47	0.53	0.58	0.64	0.70	0.75	0.81	0.86	0.91	0.96	1.01	1.05	1.10	1.14	1.17	1.21	1.24	1.27	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41
40	0.27	0.31	0.35	0.39	0.43	0.47	0.51	0.55	0.59	0.63	0.66	0.70	0.73	0.76	0.79	0.82	0.85	0.88	0.91	0.93	0.95	0.97	0.99	1.00	1.02
60	0.24	0.27	0.31	0.35	0.40	0.44	0.48	0.53	0.57	0.61	0.65	0.68	0.72	0.75	0.79	0.82	0.85	0.88	0.91	0.93	0.96	0.99	1.01	1.03	1.05
80	0.36	0.39	0.43	0.46	0.50	0.54	0.58	0.62	0.66	0.71	0.76	0.80	0.84	0.89	0.93	0.96	1.00	1.03	1.07	1.10	1.13	1.16	1.19	1.21	1.24
100	0.51	0.57	0.63	0.69	0.75	0.81	0.86	0.91	0.96	1.01	1.05	1.09	1.13	1.17	1.21	1.25	1.29	1.32	1.36	1.39	1.42	1.45	1.48	1.50	1.53
120	0.32	0.38	0.44	0.50	0.56	0.62	0.68	0.74	0.80	0.86	0.92	0.98	1.03	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28	1.32	1.36	1.41	1.45	1.49	1.52	1.56
140	0.39	0.46	0.53	0.60	0.67	0.74	0.81	0.88	0.94	1.00	1.05	1.11	1.16	1.21	1.25	1.29	1.33	1.38	1.41	1.45	1.49	1.52	1.56	1.59	1.62

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.43	1.45	1.47	1.49	1.51	1.52	1.54	1.55	1.57	1.58	1.59	1.60	1.61	1.62	1.63	1.64	1.64	1.65	1.66	1.66	1.67	1.67	1.68	1.68	1.68
40	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.12	1.13	1.14	1.14	1.15	1.15	1.16	1.16	1.16	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
60	1.07	1.09	1.10	1.12	1.13	1.15	1.17	1.18	1.19	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.26	1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.30	1.31	1.31	1.31
80	1.26	1.28	1.31	1.33	1.34	1.36	1.38	1.39	1.40	1.42	1.43	1.44	1.45	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.49	1.50	1.50	1.51	1.51	1.52	1.52
100	1.55	1.58	1.60	1.62	1.63	1.65	1.67	1.68	1.69	1.71	1.72	1.73	1.74	1.75	1.76	1.77	1.77	1.78	1.79	1.79	1.80	1.80	1.81	1.81	1.82
120	1.59	1.62	1.66	1.68	1.71	1.74	1.76	1.79	1.81	1.83	1.85	1.86	1.88	1.89	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.96	1.97	1.98	1.99	2.00	2.01
140	1.65	1.67	1.70	1.72	1.74	1.76	1.78	1.80	1.82	1.84	1.85	1.86	1.88	1.89	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.94	1.95	1.96	1.96	1.97	1.97

Tabla C.3: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alabama 503

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.26	0.28	0.29	0.30	0.32	0.34	0.36	0.40	0.44	0.48	0.53	0.59	0.65	0.71	0.77	0.83	0.89	0.95	1.01	1.07	1.13	1.18	1.24	1.29	1.34
40	0.09	0.10	0.13	0.16	0.20	0.24	0.29	0.34	0.40	0.46	0.52	0.58	0.65	0.71	0.77	0.84	0.91	0.97	1.04	1.10	1.16	1.21	1.27	1.33	1.38
60	0.15	0.17	0.19	0.21	0.24	0.28	0.33	0.38	0.43	0.49	0.55	0.62	0.68	0.75	0.82	0.89	0.96	1.03	1.10	1.16	1.23	1.29	1.35	1.42	1.48
80	0.29	0.31	0.33	0.33	0.34	0.35	0.37	0.40	0.44	0.48	0.53	0.57	0.63	0.68	0.74	0.80	0.86	0.92	0.98	1.05	1.11	1.17	1.23	1.29	1.35
100	0.14	0.15	0.17	0.20	0.25	0.31	0.37	0.43	0.50	0.57	0.65	0.73	0.81	0.88	0.96	1.03	1.11	1.17	1.24	1.31	1.38	1.44	1.50	1.56	1.61
120	0.17	0.19	0.22	0.26	0.30	0.34	0.39	0.45	0.51	0.57	0.63	0.70	0.76	0.83	0.90	0.96	1.03	1.10	1.16	1.23	1.30	1.37	1.43	1.50	1.56
140	0.16	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.31	0.35	0.39	0.43	0.47	0.52	0.57	0.62	0.67	0.73	0.78	0.84	0.89	0.95	1.00	1.05	1.11	1.16	1.22

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.40	1.45	1.50	1.54	1.58	1.62	1.66	1.70	1.74	1.77	1.81	1.84	1.87	1.91	1.94	1.96	1.99	2.02	2.04	2.07	2.09	2.11	2.13	2.14	2.16
40	1.43	1.49	1.54	1.59	1.63	1.68	1.72	1.76	1.80	1.83	1.87	1.91	1.94	1.98	2.01	2.04	2.07	2.10	2.12	2.15	2.17	2.19	2.22	2.23	2.25
60	1.54	1.60	1.65	1.71	1.76	1.81	1.86	1.91	1.96	2.01	2.05	2.09	2.14	2.18	2.22	2.25	2.28	2.31	2.34	2.37	2.40	2.42	2.44	2.47	2.49
80	1.41	1.46	1.52	1.57	1.62	1.67	1.71	1.75	1.79	1.83	1.87	1.90	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06	2.08	2.11	2.13	2.16	2.18	2.20	2.21	2.23
100	1.66	1.70	1.75	1.79	1.82	1.86	1.89	1.93	1.96	1.99	2.02	2.04	2.07	2.09	2.11	2.12	2.14	2.16	2.18	2.20	2.21	2.23	2.24	2.26	2.27
120	1.61	1.67	1.72	1.77	1.82	1.87	1.92	1.96	2.00	2.04	2.08	2.11	2.15	2.18	2.21	2.24	2.26	2.29	2.31	2.33	2.35	2.37	2.38	2.40	2.42
140	1.27	1.32	1.37	1.42	1.46	1.51	1.54	1.58	1.62	1.66	1.70	1.74	1.77	1.81	1.84	1.87	1.90	1.92	1.94	1.96	1.98	2.00	2.02	2.03	2.05

Tabla C.4: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alabama 504

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.33	0.37	0.40	0.44	0.48	0.53	0.58	0.63	0.68	0.73	0.78	0.84	0.89	0.95	1.01	1.07	1.12	1.17	1.22	1.27	1.32	1.36	1.41	1.45	1.50
40	0.22	0.26	0.28	0.31	0.33	0.36	0.41	0.46	0.53	0.60	0.67	0.75	0.83	0.91	1.00	1.08	1.16	1.25	1.33	1.42	1.50	1.59	1.68	1.77	1.86
60	0.29	0.32	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.42	0.45	0.49	0.53	0.58	0.62	0.67	0.72	0.77	0.83	0.89	0.95	1.01	1.07	1.13	1.20	1.26	1.32
80	0.19	0.22	0.24	0.25	0.27	0.29	0.31	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.66	0.71	0.76	0.82	0.87	0.93	0.98	1.03	1.09	1.13	1.18	1.23
100	0.18	0.21	0.23	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.47	0.54	0.60	0.67	0.74	0.81	0.88	0.95	1.02	1.10	1.17	1.23	1.30	1.37	1.43	1.50	1.55
120	0.19	0.22	0.25	0.29	0.33	0.37	0.42	0.48	0.54	0.61	0.68	0.76	0.84	0.92	1.00	1.08	1.16	1.24	1.32	1.40	1.47	1.55	1.62	1.69	1.76
140	0.16	0.19	0.23	0.28	0.32	0.37	0.43	0.49	0.55	0.61	0.68	0.75	0.83	0.90	0.97	1.05	1.13	1.20	1.27	1.34	1.41	1.48	1.54	1.61	1.67

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.53	1.57	1.61	1.65	1.68	1.71	1.75	1.78	1.82	1.85	1.88	1.91	1.94	1.97	2.00	2.03	2.06	2.08	2.11	2.13	2.15	2.17	2.19	2.21	2.22
40	1.94	2.02	2.10	2.18	2.24	2.31	2.38	2.45	2.51	2.58	2.64	2.70	2.75	2.80	2.85	2.89	2.94	2.98	3.01	3.05	3.08	3.11	3.14	3.16	3.19
60	1.38	1.44	1.50	1.56	1.61	1.67	1.73	1.78	1.83	1.88	1.93	1.98	2.03	2.08	2.12	2.17	2.21	2.25	2.29	2.32	2.36	2.39	2.42	2.45	2.48
80	1.28	1.32	1.37	1.41	1.45	1.49	1.52	1.56	1.59	1.62	1.65	1.68	1.71	1.74	1.76	1.79	1.81	1.84	1.86	1.88	1.90	1.92	1.93	1.95	1.96
100	1.61	1.66	1.71	1.76	1.81	1.86	1.90	1.94	1.98	2.01	2.04	2.07	2.10	2.12	2.15	2.17	2.19	2.21	2.23	2.25	2.27	2.28	2.29	2.31	2.32
120	1.82	1.88	1.95	2.00	2.06	2.11	2.16	2.21	2.25	2.29	2.34	2.38	2.43	2.47	2.51	2.55	2.59	2.62	2.65	2.68	2.70	2.72	2.74	2.76	2.78
140	1.73	1.79	1.85	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10	2.14	2.18	2.21	2.25	2.28	2.31	2.34	2.38	2.40	2.43	2.45	2.47	2.49	2.51	2.53	2.54	2.56

Tabla C.5: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alabama 505

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.40	0.46	0.53	0.59	0.66	0.72	0.78	0.83	0.89	0.94	0.99	1.04	1.08	1.12	1.16	1.20	1.23	1.26	1.29	1.32	1.34	1.37	1.39	1.41	1.43
40	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.89	0.94	0.98	1.03	1.07	1.10	1.14	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33	1.35
60	0.57	0.61	0.65	0.67	0.69	0.72	0.74	0.77	0.79	0.82	0.85	0.88	0.90	0.93	0.96	0.99	1.01	1.03	1.05	1.08	1.10	1.11	1.13	1.15	1.17
80	1.05	1.14	1.20	1.25	1.29	1.33	1.36	1.40	1.44	1.48	1.53	1.57	1.62	1.66	1.70	1.75	1.79	1.83	1.87	1.90	1.94	1.98	2.01	2.04	2.07
100	0.44	0.50	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.77	0.82	0.87	0.92	0.97	1.03	1.07	1.12	1.16	1.20	1.24	1.28	1.32	1.35	1.38	1.41	1.43	1.46
120	0.41	0.45	0.49	0.53	0.57	0.62	0.66	0.70	0.74	0.78	0.82	0.85	0.89	0.92	0.95	0.98	1.01	1.04	1.06	1.09	1.11	1.13	1.15	1.17	1.19
140	0.41	0.43	0.46	0.48	0.51	0.55	0.58	0.63	0.67	0.71	0.75	0.79	0.83	0.87	0.91	0.94	0.97	1.01	1.04	1.07	1.09	1.12	1.15	1.17	1.19

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.45	1.47	1.48	1.50	1.51	1.53	1.55	1.56	1.57	1.58	1.60	1.61	1.62	1.63	1.63	1.64	1.65	1.65	1.66	1.66	1.67	1.67	1.68	1.68	1.69
40	1.37	1.39	1.41	1.43	1.45	1.46	1.48	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54	1.54	1.55	1.55	1.56	1.57	1.57	1.57	1.58	1.58	1.58	1.59	1.59
60	1.18	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26	1.27	1.28	1.29	1.29	1.30	1.31	1.31	1.32	1.32	1.33	1.33	1.34	1.34	1.35	1.35	1.35	1.35
80	2.10	2.13	2.16	2.19	2.21	2.24	2.27	2.29	2.31	2.33	2.35	2.37	2.39	2.40	2.42	2.43	2.45	2.46	2.47	2.48	2.49	2.50	2.50	2.51	2.52
100	1.48	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.61	1.62	1.64	1.65	1.66	1.67	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.72	1.73	1.74	1.74	1.75	1.75	1.76
120	1.21	1.23	1.25	1.26	1.28	1.29	1.30	1.31	1.32	1.34	1.35	1.35	1.36	1.37	1.38	1.38	1.39	1.40	1.40	1.41	1.41	1.42	1.42	1.42	1.43
140	1.22	1.23	1.25	1.27	1.29	1.30	1.32	1.33	1.34	1.36	1.37	1.38	1.39	1.40	1.41	1.41	1.42	1.43	1.44	1.44	1.45	1.45	1.46	1.46	1.47

Tabla C.6: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Mississippi 502

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.75	0.88	1.01	1.15	1.29	1.42	1.55	1.67	1.79	1.91	2.02	2.14	2.24	2.35	2.45	2.55	2.65	2.74	2.83	2.92	3.00	3.08	3.16	3.23	3.30
40	0.90	1.00	1.12	1.23	1.35	1.46	1.57	1.69	1.80	1.91	2.01	2.11	2.21	2.31	2.40	2.49	2.58	2.66	2.74	2.82	2.90	2.97	3.03	3.10	3.16
60	0.68	0.78	0.88	0.98	1.09	1.19	1.30	1.41	1.53	1.64	1.74	1.85	1.95	2.06	2.15	2.25	2.35	2.44	2.53	2.61	2.69	2.77	2.84	2.91	2.98
80	0.62	0.71	0.81	0.92	1.02	1.13	1.24	1.34	1.45	1.55	1.65	1.74	1.83	1.92	2.01	2.09	2.17	2.24	2.32	2.39	2.46	2.52	2.58	2.64	2.70
100	0.75	0.85	0.95	1.06	1.16	1.27	1.38	1.49	1.60	1.71	1.81	1.91	2.01	2.11	2.20	2.30	2.39	2.47	2.56	2.64	2.72	2.79	2.87	2.93	3.00
120	0.78	0.88	0.98	1.08	1.17	1.26	1.36	1.45	1.54	1.63	1.72	1.81	1.90	1.98	2.07	2.15	2.24	2.32	2.39	2.47	2.54	2.61	2.68	2.75	2.81
140	0.48	0.54	0.60	0.66	0.71	0.77	0.82	0.88	0.94	0.99	1.05	1.11	1.16	1.22	1.27	1.32	1.37	1.42	1.47	1.51	1.55	1.59	1.63	1.67	1.71

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	3.37	3.43	3.49	3.56	3.61	3.67	3.72	3.78	3.82	3.87	3.91	3.96	3.99	4.03	4.06	4.10	4.13	4.16	4.19	4.21	4.24	4.26	4.29	4.31	4.33
40	3.22	3.28	3.33	3.38	3.43	3.48	3.53	3.57	3.61	3.65	3.69	3.73	3.76	3.79	3.82	3.85	3.88	3.90	3.93	3.95	3.97	3.99	4.01	4.02	4.04
60	3.05	3.11	3.17	3.23	3.29	3.34	3.39	3.44	3.48	3.53	3.57	3.61	3.64	3.68	3.71	3.74	3.77	3.79	3.82	3.84	3.87	3.89	3.91	3.92	3.94
80	2.75	2.80	2.85	2.89	2.94	2.98	3.02	3.05	3.09	3.12	3.15	3.17	3.20	3.22	3.25	3.27	3.29	3.31	3.33	3.35	3.37	3.39	3.40	3.42	3.43
100	3.06	3.11	3.17	3.22	3.27	3.32	3.36	3.41	3.45	3.49	3.53	3.57	3.60	3.63	3.66	3.69	3.72	3.74	3.77	3.79	3.81	3.83	3.85	3.86	3.88
120	2.87	2.93	2.99	3.04	3.09	3.13	3.18	3.22	3.26	3.30	3.34	3.37	3.41	3.44	3.47	3.49	3.52	3.54	3.57	3.59	3.61	3.62	3.64	3.65	3.67
140	1.74	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.92	1.94	1.97	1.99	2.01	2.03	2.05	2.07	2.09	2.11	2.12	2.14	2.15	2.16	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22

Tabla C.7: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Mississippi 503

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.26	0.28	0.31	0.35	0.39	0.45	0.51	0.59	0.69	0.80	0.93	1.07	1.23	1.40	1.58	1.78	1.97	2.18	2.39	2.62	2.85	3.08	3.32	3.55	3.79
40	0.29	0.36	0.42	0.46	0.50	0.55	0.60	0.65	0.73	0.83	0.95	1.10	1.27	1.46	1.66	1.87	2.10	2.33	2.57	2.81	3.08	3.35	3.62	3.90	4.18
60	0.37	0.44	0.49	0.52	0.53	0.55	0.60	0.67	0.75	0.84	0.96	1.09	1.24	1.41	1.58	1.78	1.99	2.22	2.46	2.70	2.94	3.21	3.47	3.74	4.02
80	0.30	0.36	0.39	0.40	0.41	0.44	0.49	0.58	0.67	0.79	0.92	1.08	1.25	1.44	1.63	1.82	2.04	2.27	2.50	2.76	3.01	3.27	3.52	3.78	4.04
100	0.23	0.28	0.32	0.35	0.40	0.48	0.58	0.70	0.85	1.01	1.20	1.40	1.61	1.84	2.08	2.33	2.60	2.86	3.13	3.40	3.67	3.93	4.22	4.48	4.73
120	0.41	0.49	0.56	0.62	0.66	0.70	0.73	0.78	0.86	0.97	1.11	1.27	1.45	1.65	1.86	2.09	2.34	2.59	2.85	3.12	3.39	3.66	3.92	4.19	4.47
140																									

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	4.02	4.24	4.47	4.70	4.94	5.17	5.39	5.60	5.79	5.98	6.19	6.39	6.58	6.75	6.92	7.08	7.23	7.37	7.50	7.62	7.74	7.87	7.99	8.11	8.21
40	4.44	4.69	4.94	5.20	5.45	5.70	5.95	6.20	6.45	6.68	6.91	7.13	7.33	7.53	7.73	7.93	8.13	8.32	8.53	8.73	8.91	9.08	9.23	9.39	9.55
60	4.29	4.55	4.80	5.06	5.33	5.61	5.88	6.16	6.42	6.68	6.93	7.17	7.40	7.62	7.82	8.02	8.22	8.43	8.63	8.82	9.00	9.18	9.37	9.54	9.71
80	4.32	4.59	4.84	5.10	5.34	5.60	5.85	6.09	6.32	6.55	6.77	6.97	7.16	7.35	7.55	7.74	7.93	8.12	8.29	8.45	8.60	8.74	8.87	8.99	9.10
100	4.99	5.24	5.47	5.69	5.90	6.10	6.29	6.47	6.65	6.83	7.00	7.15	7.29	7.42	7.55	7.67	7.79	7.91	8.03	8.14	8.23	8.31	8.40	8.47	8.54
120	4.76	5.05	5.32	5.60	5.87	6.13	6.41	6.69	6.95	7.20	7.44	7.66	7.87	8.07	8.27	8.47	8.69	8.92	9.13	9.33	9.51	9.66	9.80	9.92	10.04
140																									

Tabla C.8: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Mississippi 504

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.16	0.20	0.26	0.33	0.40	0.48	0.58	0.68	0.78	0.90	1.04	1.21	1.39	1.59	1.80	2.02	2.25	2.49	2.73	2.97	3.23	3.49	3.76	4.04	4.32
40	0.29	0.35	0.39	0.42	0.44	0.45	0.48	0.52	0.57	0.65	0.74	0.85	0.98	1.12	1.27	1.43	1.60	1.78	1.96	2.15	2.34	2.54	2.74	2.93	3.12
60	0.26	0.31	0.36	0.40	0.44	0.50	0.58	0.66	0.76	0.87	1.01	1.17	1.34	1.53	1.73	1.95	2.18	2.41	2.66	2.92	3.19	3.46	3.74	4.01	4.29
80	0.22	0.27	0.32	0.37	0.40	0.43	0.47	0.53	0.61	0.71	0.83	0.97	1.12	1.28	1.46	1.66	1.87	2.09	2.31	2.54	2.78	3.02	3.26	3.50	3.74
100	0.14	0.17	0.21	0.23	0.27	0.31	0.37	0.43	0.51	0.60	0.70	0.82	0.95	1.08	1.23	1.39	1.55	1.72	1.89	2.07	2.24	2.41	2.59	2.76	2.94
120	0.28	0.34	0.39	0.43	0.48	0.54	0.59	0.64	0.70	0.75	0.81	0.89	0.97	1.07	1.17	1.29	1.41	1.54	1.68	1.82	1.96	2.11	2.25	2.40	2.55
140																									

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	4.61	4.91	5.20	5.49	5.78	6.08	6.37	6.66	6.93	7.20	7.46	7.72	7.98	8.23	8.46	8.70	8.94	9.16	9.40	9.63	9.84	10.04	10.24	10.43	10.60
40	3.31	3.49	3.68	3.86	4.05	4.23	4.41	4.57	4.73	4.88	5.03	5.17	5.31	5.44	5.56	5.68	5.80	5.91	6.02	6.13	6.24	6.34	6.44	6.53	6.61
60	4.57	4.86	5.16	5.45	5.72	5.99	6.24	6.49	6.76	7.04	7.30	7.55	7.79	8.01	8.22	8.42	8.64	8.86	9.06	9.27	9.45	9.63	9.79	9.94	10.07
80	3.99	4.23	4.46	4.69	4.92	5.15	5.37	5.58	5.78	5.97	6.16	6.35	6.53	6.71	6.88	7.05	7.21	7.37	7.53	7.68	7.82	7.95	8.08	8.19	8.30
100	3.12	3.29	3.46	3.62	3.78	3.92	4.07	4.21	4.35	4.49	4.62	4.75	4.88	5.00	5.11	5.21	5.31	5.41	5.49	5.59	5.67	5.75	5.81	5.88	5.95
120	2.70	2.86	3.01	3.17	3.33	3.49	3.63	3.77	3.91	4.04	4.17	4.30	4.43	4.57	4.69	4.81	4.93	5.03	5.13	5.22	5.31	5.40	5.48	5.56	5.64
140																									

Tabla C.9: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Mississippi 505

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.64	0.69	0.74	0.78	0.82	0.86	0.90	0.93	0.97	1.00	1.03	1.06	1.09	1.11	1.13	1.16	1.18	1.20	1.22	1.24	1.26	1.27	1.29	1.31	1.32
40	1.12	1.24	1.34	1.44	1.53	1.61	1.68	1.76	1.82	1.89	1.95	2.01	2.06	2.12	2.17	2.22	2.27	2.32	2.36	2.41	2.46	2.50	2.55	2.59	2.63
60	1.75	1.79	1.81	1.81	1.82	1.84	1.87	1.90	1.93	1.96	1.99	2.02	2.05	2.08	2.10	2.12	2.15	2.17	2.20	2.22	2.24	2.26	2.28	2.30	2.32
80	1.55	1.65	1.73	1.77	1.81	1.83	1.86	1.88	1.90	1.91	1.94	1.96	1.98	2.00	2.03	2.05	2.08	2.11	2.14	2.17	2.19	2.22	2.24	2.27	2.29
100	0.70	0.74	0.77	0.81	0.86	0.91	0.97	1.03	1.10	1.16	1.21	1.27	1.32	1.37	1.42	1.47	1.52	1.56	1.60	1.64	1.68	1.72	1.76	1.80	1.83
120	1.13	1.20	1.26	1.29	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40	1.43	1.46	1.49	1.51	1.54	1.57	1.60	1.62	1.64	1.67	1.69	1.71	1.73	1.75	1.77	1.78
140	0.32	0.34	0.37	0.39	0.42	0.44	0.47	0.50	0.53	0.55	0.58	0.61	0.63	0.66	0.68	0.70	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.87

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.34	1.35	1.36	1.38	1.39	1.40	1.41	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.47	1.48	1.48	1.49	1.50	1.50	1.50	1.51	1.51	1.52	1.52	1.52
40	2.67	2.71	2.75	2.78	2.81	2.85	2.87	2.90	2.92	2.95	2.97	2.99	3.01	3.03	3.05	3.06	3.08	3.10	3.11	3.13	3.14	3.15	3.17	3.18	3.19
60	2.33	2.35	2.36	2.37	2.39	2.40	2.41	2.43	2.44	2.45	2.46	2.47	2.48	2.49	2.50	2.50	2.51	2.52	2.52	2.53	2.53	2.54	2.54	2.55	2.55
80	2.31	2.33	2.35	2.37	2.39	2.42	2.44	2.45	2.47	2.49	2.50	2.52	2.53	2.54	2.55	2.57	2.58	2.59	2.60	2.61	2.62	2.63	2.63	2.64	2.65
100	1.87	1.90	1.93	1.96	1.99	2.01	2.04	2.06	2.09	2.11	2.13	2.15	2.17	2.19	2.20	2.22	2.24	2.25	2.26	2.28	2.29	2.30	2.31	2.32	2.33
120	1.80	1.81	1.83	1.84	1.85	1.86	1.87	1.88	1.89	1.90	1.91	1.91	1.92	1.92	1.93	1.93	1.94	1.94	1.94	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95	1.95
140	0.89	0.90	0.91	0.92	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05

Tabla C.10: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Texas A502

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.42	0.44	0.45	0.47	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.67	0.70	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.98
40	0.82	0.92	1.01	1.10	1.18	1.25	1.30	1.35	1.39	1.43	1.47	1.51	1.54	1.58	1.61	1.64	1.67	1.69	1.72	1.74	1.77	1.79	1.81	1.83	1.85
60	0.43	0.50	0.57	0.64	0.71	0.78	0.84	0.90	0.96	1.02	1.08	1.13	1.18	1.23	1.28	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57	1.60	1.63	1.66
80	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.67	0.72	0.77	0.82	0.87	0.92	0.97	1.01	1.05	1.09	1.13	1.17	1.21	1.24	1.28	1.31	1.34	1.37	1.40	1.42
100	0.46	0.50	0.54	0.58	0.61	0.65	0.70	0.74	0.78	0.82	0.86	0.90	0.94	0.98	1.02	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21	1.24	1.26	1.29	1.31
120	0.51	0.57	0.62	0.67	0.72	0.77	0.81	0.85	0.89	0.93	0.97	1.01	1.05	1.09	1.12	1.16	1.19	1.22	1.26	1.29	1.31	1.34	1.37	1.39	1.41
140	0.44	0.50	0.55	0.59	0.64	0.68	0.73	0.77	0.82	0.86	0.91	0.95	0.99	1.03	1.07	1.10	1.14	1.18	1.21	1.24	1.28	1.30	1.33	1.36	1.38

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	0.99	1.01	1.02	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.13	1.14	1.15	1.15	1.16	1.16	1.17	1.17	1.18	1.18	1.19	1.19
40	1.87	1.88	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.96	1.97	1.98	1.99	1.99	2.00	2.01	2.02	2.02	2.03	2.04	2.04	2.04	2.05	2.05	2.05	2.06
60	1.69	1.71	1.74	1.76	1.78	1.80	1.82	1.83	1.85	1.87	1.88	1.89	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.96	1.97	1.98	1.98	1.99	2.00	2.00	2.01
80	1.45	1.47	1.50	1.52	1.54	1.55	1.57	1.59	1.60	1.62	1.63	1.64	1.66	1.67	1.68	1.69	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73	1.73	1.74	1.74	1.75
100	1.33	1.35	1.37	1.39	1.41	1.43	1.44	1.46	1.47	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54	1.55	1.56	1.57	1.57	1.58	1.59	1.59	1.60	1.60	1.61
120	1.44	1.46	1.48	1.49	1.51	1.53	1.54	1.55	1.57	1.58	1.59	1.60	1.61	1.62	1.63	1.64	1.65	1.65	1.66	1.66	1.67	1.67	1.68	1.68	1.68
140	1.40	1.42	1.45	1.46	1.48	1.50	1.52	1.53	1.55	1.56	1.57	1.58	1.59	1.60	1.61	1.62	1.63	1.63	1.64	1.65	1.65	1.66	1.66	1.67	1.67

Tabla C.11: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Texas A503

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.23	0.29	0.34	0.39	0.42	0.46	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	0.62	0.67	0.73	0.80	0.87	0.95	1.03	1.12	1.21	1.30	1.39	1.49	1.59	1.69
40	0.17	0.21	0.24	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.45	0.50	0.54	0.60	0.66	0.73	0.80	0.88	0.96	1.04	1.14	1.23	1.33	1.43	1.54	1.64	1.75
60	0.19	0.23	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.32	0.35	0.39	0.43	0.47	0.53	0.58	0.65	0.72	0.79	0.86	0.94	1.02	1.09	1.17	1.25	1.33	1.41
80	0.14	0.18	0.23	0.27	0.30	0.33	0.36	0.40	0.46	0.53	0.61	0.70	0.79	0.90	1.01	1.13	1.24	1.36	1.48	1.61	1.74	1.86	1.99	2.12	2.24
100	0.13	0.16	0.19	0.21	0.22	0.24	0.27	0.30	0.34	0.39	0.45	0.51	0.58	0.66	0.74	0.82	0.91	1.00	1.10	1.19	1.29	1.38	1.48	1.57	1.67
120	0.13	0.16	0.19	0.21	0.23	0.26	0.28	0.32	0.36	0.42	0.48	0.55	0.62	0.71	0.80	0.89	0.99	1.10	1.21	1.32	1.44	1.55	1.66	1.77	1.88
140																									

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.78	1.88	1.98	2.07	2.17	2.26	2.35	2.43	2.51	2.59	2.68	2.77	2.85	2.93	3.00	3.07	3.13	3.18	3.23	3.28	3.34	3.40	3.45	3.50	3.54
40	1.85	1.96	2.07	2.17	2.27	2.38	2.48	2.59	2.69	2.79	2.88	2.98	3.07	3.15	3.24	3.33	3.41	3.49	3.56	3.63	3.70	3.77	3.84	3.90	3.96
60	1.49	1.57	1.64	1.72	1.80	1.87	1.94	2.01	2.07	2.14	2.21	2.27	2.33	2.39	2.45	2.50	2.55	2.59	2.64	2.68	2.72	2.77	2.81	2.84	2.88
80	2.36	2.48	2.59	2.70	2.81	2.92	3.04	3.15	3.25	3.34	3.43	3.52	3.61	3.68	3.76	3.84	3.91	3.98	4.04	4.11	4.17	4.22	4.27	4.32	4.37
100	1.76	1.85	1.94	2.03	2.11	2.20	2.28	2.36	2.43	2.50	2.57	2.64	2.70	2.77	2.83	2.89	2.94	2.99	3.04	3.09	3.14	3.18	3.23	3.27	3.31
120	1.98	2.09	2.19	2.29	2.39	2.48	2.56	2.65	2.74	2.82	2.89	2.96	3.03	3.09	3.15	3.22	3.28	3.33	3.38	3.43	3.48	3.52	3.55	3.59	3.63
140																									

Tabla C.12: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Texas A505

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.43	0.50	0.57	0.65	0.72	0.79	0.85	0.92	0.98	1.03	1.09	1.13	1.18	1.23	1.27	1.31	1.35	1.39	1.43	1.46	1.49	1.52	1.55	1.57	1.60
40	0.53	0.60	0.67	0.73	0.80	0.86	0.92	0.98	1.03	1.09	1.14	1.18	1.23	1.27	1.31	1.35	1.38	1.41	1.44	1.47	1.50	1.53	1.55	1.57	1.59
60	0.52	0.58	0.65	0.72	0.79	0.86	0.93	1.00	1.07	1.14	1.21	1.27	1.34	1.39	1.45	1.50	1.55	1.60	1.64	1.69	1.72	1.76	1.79	1.82	1.85
80	0.76	0.84	0.92	0.99	1.05	1.11	1.16	1.21	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42	1.46	1.50	1.53	1.57	1.60	1.63	1.66	1.69	1.72	1.75	1.78	1.81
100	0.59	0.69	0.78	0.88	0.96	1.05	1.12	1.20	1.26	1.33	1.39	1.45	1.51	1.57	1.62	1.67	1.72	1.77	1.81	1.86	1.90	1.94	1.97	2.01	2.04
120	0.42	0.49	0.57	0.65	0.73	0.81	0.88	0.95	1.02	1.08	1.14	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.44	1.49	1.53	1.56	1.60	1.63	1.66	1.68	1.71
140	0.49	0.55	0.62	0.69	0.75	0.82	0.89	0.95	1.02	1.08	1.14	1.20	1.26	1.31	1.36	1.41	1.46	1.51	1.55	1.59	1.63	1.67	1.70	1.74	1.77

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.62	1.65	1.67	1.69	1.71	1.73	1.74	1.76	1.77	1.79	1.80	1.81	1.82	1.84	1.85	1.86	1.86	1.87	1.88	1.89	1.89	1.90	1.90	1.91	1.91
40	1.61	1.63	1.64	1.66	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73	1.74	1.74	1.75	1.75	1.76	1.76	1.77	1.77	1.77	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
60	1.88	1.91	1.94	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.06	2.07	2.08	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15	2.16	2.16	2.17	2.18	2.19	2.19	2.20	2.20
80	1.83	1.86	1.88	1.90	1.93	1.95	1.97	1.98	2.00	2.02	2.03	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.09	2.10	2.10	2.11	2.12	2.12	2.13	2.13	2.14
100	2.07	2.10	2.12	2.15	2.17	2.19	2.21	2.23	2.25	2.26	2.28	2.30	2.31	2.32	2.34	2.35	2.36	2.37	2.38	2.39	2.39	2.40	2.41	2.41	2.42
120	1.73	1.75	1.77	1.78	1.80	1.82	1.83	1.85	1.86	1.87	1.88	1.90	1.91	1.92	1.92	1.93	1.94	1.94	1.95	1.95	1.96	1.96	1.96	1.97	1.97
140	1.80	1.83	1.85	1.88	1.90	1.93	1.95	1.97	1.99	2.01	2.02	2.04	2.05	2.06	2.08	2.09	2.10	2.11	2.11	2.12	2.13	2.14	2.14	2.15	2.15

Tabla C.13: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alberta 502

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.29	0.36	0.43	0.49	0.56	0.62	0.67	0.73	0.77	0.82	0.87	0.91	0.95	0.99	1.02	1.06	1.09	1.12	1.15	1.18	1.21	1.23	1.26	1.29	1.31
40	0.47	0.55	0.62	0.70	0.76	0.83	0.89	0.94	0.99	1.04	1.08	1.12	1.15	1.18	1.21	1.24	1.26	1.28	1.31	1.32	1.34	1.36	1.37	1.39	1.40
60	0.74	0.84	0.94	1.04	1.13	1.22	1.30	1.39	1.47	1.55	1.62	1.69	1.76	1.83	1.89	1.95	2.01	2.07	2.11	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.35
80	1.07	1.21	1.35	1.47	1.58	1.66	1.73	1.79	1.83	1.87	1.91	1.94	1.97	2.01	2.04	2.07	2.10	2.13	2.16	2.19	2.22	2.25	2.28	2.31	2.33
100	0.77	0.87	0.97	1.07	1.16	1.26	1.35	1.44	1.52	1.60	1.68	1.75	1.81	1.87	1.93	1.99	2.04	2.08	2.13	2.17	2.21	2.24	2.28	2.31	2.34
120	0.89	1.00	1.09	1.16	1.21	1.26	1.31	1.35	1.38	1.41	1.43	1.45	1.47	1.49	1.51	1.52	1.54	1.55	1.57	1.59	1.60	1.61	1.63	1.64	1.65
140	0.69	0.77	0.84	0.90	0.95	1.00	1.04	1.08	1.11	1.14	1.18	1.20	1.23	1.26	1.29	1.31	1.33	1.35	1.37	1.39	1.41	1.42	1.43	1.45	1.46

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.33	1.36	1.38	1.40	1.41	1.43	1.45	1.46	1.48	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54	1.55	1.56	1.56	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.60	1.60
40	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.47	1.48	1.49	1.50	1.50	1.51	1.52	1.52	1.53	1.53	1.53	1.54	1.54	1.55	1.55	1.55	1.55	1.56	1.56	1.56
60	2.38	2.40	2.43	2.45	2.47	2.49	2.51	2.53	2.55	2.56	2.57	2.59	2.60	2.61	2.62	2.63	2.64	2.64	2.65	2.65	2.66	2.66	2.67	2.67	2.67
80	2.36	2.38	2.40	2.42	2.44	2.46	2.47	2.49	2.50	2.51	2.52	2.53	2.54	2.55	2.56	2.57	2.57	2.58	2.58	2.59	2.59	2.59	2.60	2.60	2.60
100	2.36	2.38	2.41	2.43	2.44	2.46	2.48	2.49	2.51	2.52	2.53	2.54	2.55	2.56	2.57	2.58	2.58	2.59	2.59	2.60	2.60	2.60	2.60	2.61	2.61
120	1.66	1.67	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.73	1.73	1.74	1.75	1.75	1.76	1.76	1.77	1.77	1.78	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79	1.79	1.80	1.80
140	1.47	1.48	1.49	1.50	1.51	1.51	1.52	1.53	1.53	1.54	1.54	1.55	1.55	1.55	1.56	1.56	1.56	1.56	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57	1.57

Tabla C.14: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alberta 503

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.29	0.34	0.40	0.46	0.52	0.58	0.65	0.73	0.80	0.89	0.97	1.05	1.13	1.22	1.31	1.40	1.48	1.57	1.66	1.75	1.83	1.91	1.98	2.05	2.12
40	0.25	0.30	0.32	0.35	0.38	0.41	0.46	0.51	0.56	0.61	0.67	0.73	0.79	0.85	0.91	0.97	1.03	1.09	1.14	1.19	1.24	1.29	1.33	1.38	1.42
60	0.25	0.31	0.36	0.41	0.45	0.48	0.52	0.56	0.61	0.66	0.73	0.80	0.87	0.95	1.02	1.10	1.18	1.26	1.34	1.42	1.49	1.57	1.64	1.71	1.77
80	0.12	0.15	0.20	0.25	0.32	0.39	0.46	0.53	0.60	0.67	0.74	0.81	0.88	0.96	1.03	1.10	1.18	1.24	1.31	1.37	1.44	1.50	1.56	1.61	1.67
100	0.33	0.41	0.47	0.52	0.57	0.61	0.65	0.68	0.71	0.74	0.77	0.81	0.84	0.88	0.92	0.96	0.99	1.03	1.08	1.12	1.17	1.21	1.26	1.30	1.35
120	0.41	0.43	0.46	0.50	0.57	0.64	0.73	0.81	0.90	0.99	1.07	1.15	1.23	1.32	1.39	1.47	1.55	1.63	1.71	1.78	1.84	1.91	1.98	2.04	2.10
140	0.91	1.12	1.30	1.44	1.54	1.61	1.65	1.67	1.67	1.67	1.68	1.69	1.70	1.71	1.72	1.72	1.73	1.75	1.77	1.79	1.81	1.83	1.86	1.88	1.91

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	2.19	2.25	2.31	2.37	2.42	2.47	2.52	2.57	2.62	2.66	2.70	2.73	2.77	2.80	2.83	2.86	2.89	2.92	2.94	2.96	2.99	3.01	3.03	3.04	3.05
40	1.47	1.51	1.55	1.58	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.78	1.81	1.84	1.87	1.90	1.92	1.94	1.96	1.99	2.01	2.02	2.04	2.06	2.08	2.09	2.10
60	1.84	1.90	1.95	2.01	2.06	2.11	2.16	2.20	2.24	2.28	2.32	2.35	2.38	2.41	2.44	2.47	2.49	2.52	2.54	2.56	2.57	2.59	2.60	2.61	2.62
80	1.73	1.78	1.83	1.88	1.92	1.96	2.01	2.05	2.09	2.13	2.17	2.20	2.23	2.26	2.29	2.32	2.35	2.38	2.40	2.42	2.44	2.46	2.48	2.50	2.52
100	1.39	1.43	1.47	1.51	1.54	1.58	1.61	1.64	1.67	1.70	1.73	1.76	1.78	1.81	1.83	1.85	1.87	1.89	1.90	1.92	1.93	1.95	1.97	1.98	1.99
120	2.15	2.20	2.25	2.30	2.34	2.38	2.41	2.44	2.47	2.50	2.53	2.56	2.59	2.61	2.63	2.65	2.67	2.69	2.70	2.72	2.73	2.74	2.74	2.75	2.76
140	1.93	1.96	1.98	2.01	2.03	2.05	2.07	2.09	2.11	2.13	2.15	2.17	2.19	2.21	2.22	2.23	2.24	2.25	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.31

Tabla C.15: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alberta 504

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.29	0.33	0.36	0.39	0.43	0.48	0.53	0.59	0.66	0.73	0.79	0.86	0.93	1.00	1.07	1.14	1.20	1.27	1.32	1.38	1.43	1.49	1.55	1.60	1.66
40	0.41	0.48	0.55	0.61	0.66	0.72	0.77	0.82	0.87	0.92	0.96	1.01	1.06	1.11	1.17	1.23	1.29	1.35	1.41	1.47	1.53	1.59	1.66	1.72	1.77
60	1.29	1.47	1.61	1.70	1.75	1.79	1.82	1.84	1.87	1.91	1.95	1.99	2.03	2.08	2.12	2.17	2.21	2.25	2.30	2.35	2.41	2.46	2.52	2.58	2.63
80	0.99	1.19	1.33	1.40	1.42	1.44	1.43	1.41	1.41	1.42	1.46	1.50	1.55	1.61	1.67	1.74	1.81	1.87	1.94	2.00	2.06	2.13	2.19	2.25	2.30
100	0.62	0.75	0.87	0.98	1.07	1.14	1.19	1.24	1.28	1.32	1.36	1.41	1.45	1.50	1.57	1.63	1.70	1.77	1.83	1.90	1.97	2.04	2.10	2.16	2.21
120	0.45	0.51	0.57	0.64	0.71	0.78	0.85	0.93	1.00	1.08	1.17	1.27	1.36	1.46	1.56	1.65	1.75	1.84	1.93	2.02	2.10	2.18	2.26	2.33	2.41
140	0.85	0.94	0.97	0.97	0.96	0.95	0.94	0.96	0.98	1.03	1.08	1.14	1.20	1.27	1.34	1.42	1.49	1.57	1.64	1.71	1.78	1.86	1.93	1.99	2.06

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	1.72	1.77	1.83	1.88	1.93	1.99	2.04	2.08	2.13	2.18	2.22	2.27	2.31	2.35	2.39	2.43	2.47	2.50	2.53	2.56	2.59	2.62	2.65	2.67	2.69
40	1.83	1.88	1.93	1.97	2.02	2.06	2.11	2.15	2.19	2.22	2.26	2.29	2.32	2.35	2.38	2.40	2.43	2.45	2.47	2.49	2.51	2.53	2.54	2.56	2.57
60	2.69	2.74	2.80	2.85	2.90	2.95	2.99	3.03	3.07	3.12	3.15	3.20	3.23	3.27	3.30	3.33	3.37	3.40	3.42	3.45	3.47	3.50	3.52	3.54	3.55
80	2.36	2.42	2.47	2.51	2.56	2.61	2.65	2.69	2.73	2.77	2.81	2.84	2.87	2.90	2.93	2.96	2.99	3.01	3.03	3.05	3.07	3.08	3.09	3.11	3.12
100	2.26	2.31	2.37	2.41	2.46	2.50	2.54	2.58	2.61	2.64	2.66	2.68	2.70	2.72	2.74	2.76	2.78	2.79	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85	2.86	2.86
120	2.48	2.54	2.60	2.65	2.70	2.75	2.79	2.84	2.88	2.91	2.94	2.97	3.00	3.03	3.05	3.08	3.10	3.13	3.15	3.16	3.18	3.19	3.21	3.22	3.23
140	2.12	2.18	2.24	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.55	2.59	2.63	2.67	2.71	2.74	2.77	2.80	2.83	2.86	2.89	2.92	2.94	2.96	2.98	3.00	3.02

Tabla C.16: Calibración modelo base – Excluyendo secciones inconsistentes – Simulaciones Alberta 505

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
20	0.24	0.28	0.33	0.37	0.42	0.46	0.50	0.54	0.57	0.61	0.64	0.66	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.86	0.88	0.89
40	0.50	0.55	0.58	0.60	0.62	0.64	0.66	0.68	0.70	0.72	0.75	0.77	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.05
60	0.83	0.89	0.95	0.98	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18	1.19
80	0.75	0.86	0.96	1.03	1.08	1.13	1.17	1.21	1.25	1.28	1.32	1.36	1.40	1.43	1.47	1.50	1.54	1.57	1.60	1.63	1.66	1.68	1.71	1.73	1.75
100	0.55	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.80	0.81	0.82	0.82	0.83	0.83	0.84	0.85	0.85	0.85	0.86
120	0.76	0.82	0.87	0.91	0.95	0.99	1.02	1.05	1.08	1.11	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22	1.23	1.25	1.26	1.27	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33
140	1.06	1.15	1.21	1.24	1.26	1.27	1.28	1.28	1.29	1.29	1.29	1.30	1.30	1.31	1.31	1.32	1.33	1.33	1.34	1.35	1.36	1.37	1.38	1.38	1.39

Distancia	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
20	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03
40	1.07	1.08	1.10	1.11	1.12	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18	1.19	1.20	1.21	1.21	1.22	1.22	1.23	1.23	1.23	1.24	1.24	1.24	1.25	1.25
60	1.20	1.20	1.21	1.21	1.22	1.22	1.23	1.23	1.23	1.24	1.24	1.24	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
80	1.77	1.79	1.81	1.82	1.84	1.86	1.87	1.88	1.90	1.91	1.92	1.93	1.94	1.95	1.95	1.96	1.97	1.98	1.98	1.99	1.99	2.00	2.00	2.00	2.01
100	0.86	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
120	1.34	1.35	1.35	1.36	1.37	1.38	1.39	1.39	1.40	1.40	1.41	1.41	1.42	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.43	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
140	1.40	1.40	1.41	1.42	1.42	1.43	1.44	1.44	1.45	1.45	1.45	1.46	1.46	1.46	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48

### C.3. Calibración modelo base - resultados

Tabla C.17: Calibración modelo base – SSE Excluyendo secciones inconsistentes – Todas las Secciones (ALL)

ALL	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
SSE	65.96	58.41	52.35	47.56	43.45	39.63	35.93	32.31	28.88	25.71	22.92	20.76	19.42	19.11	20.04	22.33	26.16	31.60	38.73	47.69	58.52	71.14	85.63	101.80	119.59

ALL	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
SSE	139.22	160.30	182.61	206.25	230.98	256.68	283.46	310.86	338.94	367.66	396.58	425.61	454.12	482.34	510.57	539.11	568.11	597.13	626.16	654.57	681.54	707.83	733.05	756.92	779.82

Min : 19.105  
 RMSE : 0.43  
 $\omega_n$  : 0.070

Tabla C.18: Calibración modelo base – SSE Excluyendo secciones inconsistentes – Extendido en una sola capa (LIFT1)

LIFT1	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
SSE	23.60	19.75	16.57	14.05	12.05	10.53	9.44	8.76	8.47	8.54	8.93	9.62	10.59	11.81	13.24	14.85	16.64	18.55	20.58	22.68	24.87	27.10	29.34	31.58	33.81

LIFT1	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
SSE	36.04	38.26	40.44	42.57	44.66	46.71	48.70	50.62	52.49	54.28	56.01	57.65	59.21	60.70	62.10	63.42	64.67	65.86	67.00	68.07	69.08	70.03	70.92	71.74	72.52

Min : 8.472  
 RMSE : 0.39  
 $\omega_n$  : 0.045

Tabla C.19: Calibración modelo base – SSE Excluyendo secciones inconsistentes – Extendido en dos capas (LIFT2)

LIFT2	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
SSE	10.95	9.50	8.45	7.60	6.81	5.99	5.15	4.33	3.58	2.92	2.43	2.13	2.04	2.19	2.60	3.26	4.17	5.33	6.72	8.35	10.20	12.25	14.46	16.83	19.30

LIFT2	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
SSE	21.88	24.55	27.28	30.00	32.73	35.46	38.19	40.93	43.65	46.31	48.93	51.55	54.10	56.60	59.01	61.35	63.60	65.77	67.81	69.76	71.55	73.27	74.88	76.38	77.83

Min : 2.040  
 RMSE : 0.27  
 $\omega_n$  : 0.065

Tabla C.20: Calibración modelo base – SSE Excluyendo secciones inconsistentes – Extendido en tres capas (LIFT3)

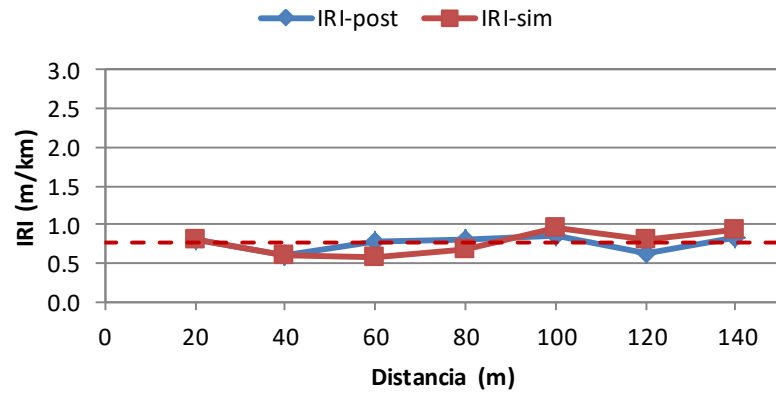
LIFT3	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080	0.085	0.090	0.095	0.100	0.105	0.110	0.115	0.120	0.125
SSE	31.42	29.16	27.32	25.91	24.59	23.11	21.34	19.22	16.83	14.24	11.56	9.00	6.79	5.11	4.20	4.21	5.35	7.72	11.43	16.65	23.45	31.79	41.83	53.39	66.48

LIFT3	Calibración Frecuencia Natural ( $\omega_n$ )																								
	0.130	0.135	0.140	0.145	0.150	0.155	0.160	0.165	0.170	0.175	0.180	0.185	0.190	0.195	0.200	0.205	0.210	0.215	0.220	0.225	0.230	0.235	0.240	0.245	0.250
SSE	81.30	97.49	114.90	133.68	153.59	174.51	196.58	219.31	242.81	267.06	291.64	316.40	340.81	365.04	389.45	414.34	439.84	465.49	491.34	516.75	540.91	564.53	587.26	608.80	629.46

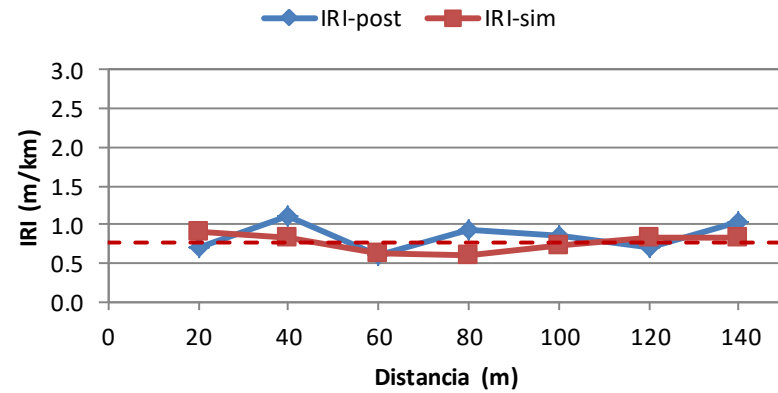
Min : 4.205  
 RMSE : 0.48  
 $\omega_n$  : 0.075

### C.4. Evaluación de resultados modelo base – Intervalos 20 m

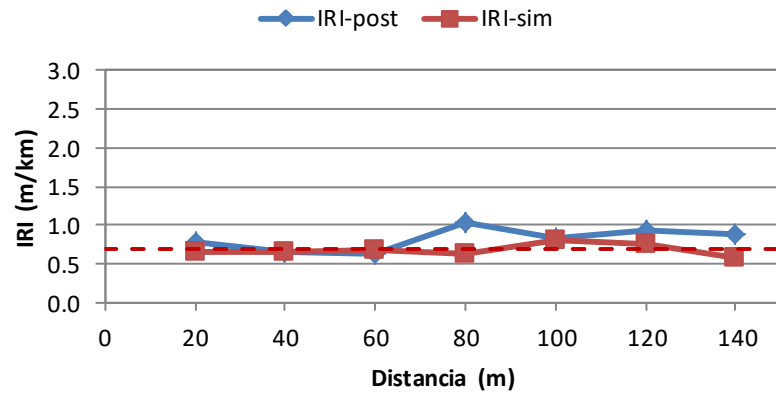
Alabama 0502



Alabama 0504



Alabama 0503



Alabama 0505

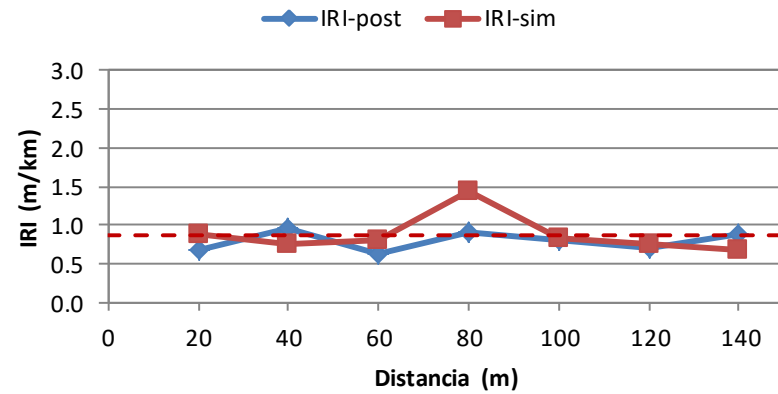
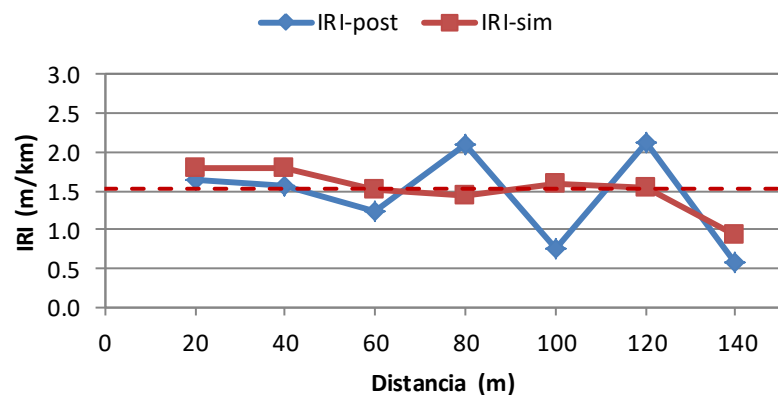
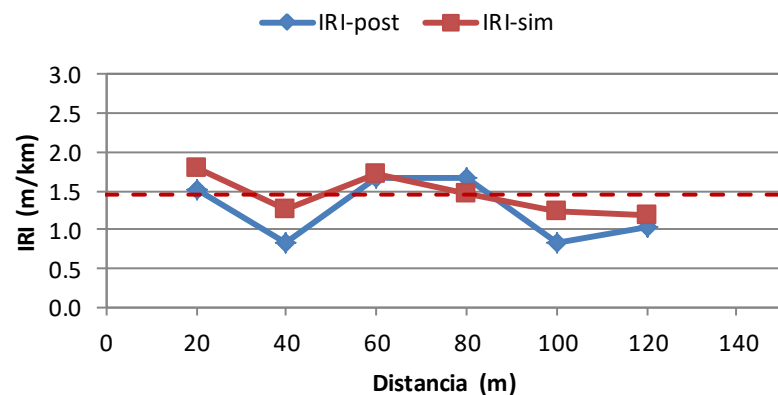


Figura C.1: Evaluación modelo base – Alabama – IRI @ 20m

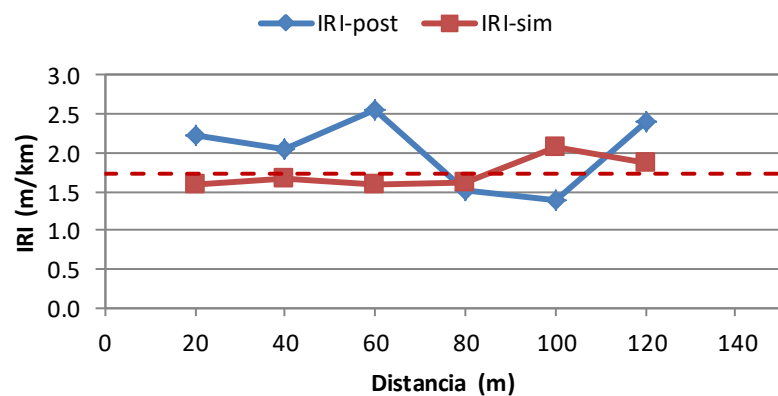
Mississippi 0502



Mississippi 0504



Mississippi 0503



Mississippi 0505

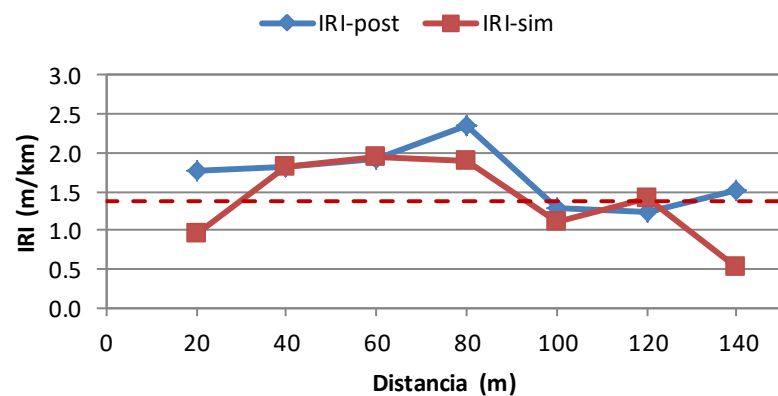
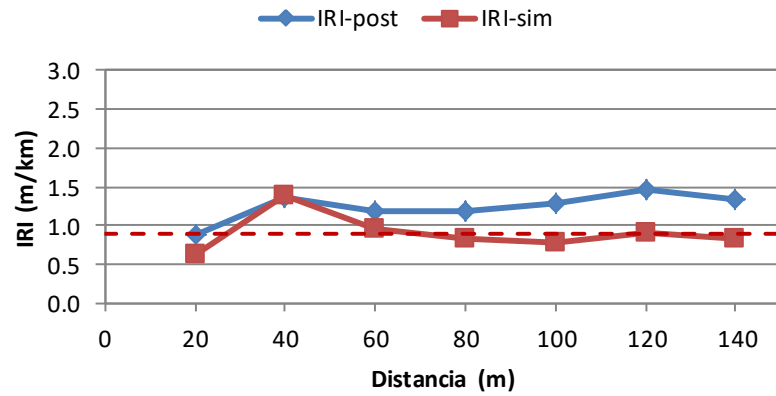
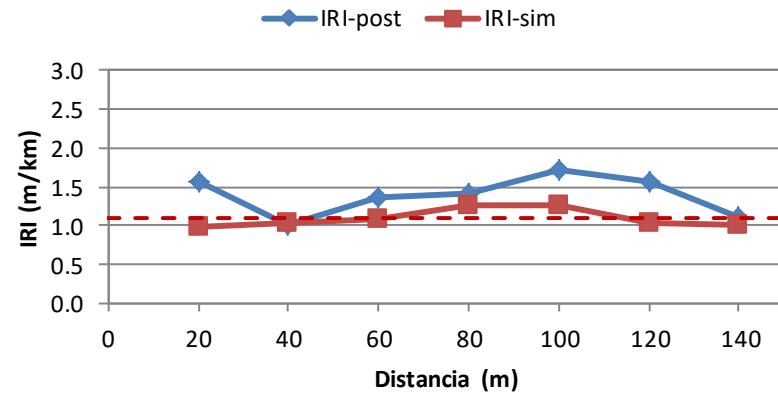


Figura C.2: Evaluación modelo base – Mississippi – IRI @ 20m

Texas A502



Texas A505



Texas A503

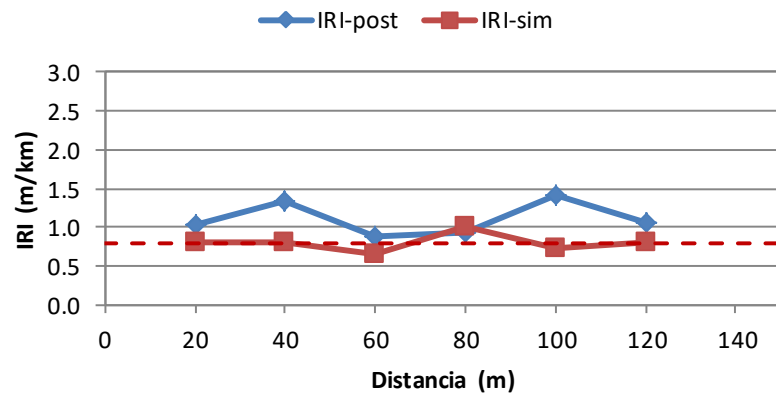
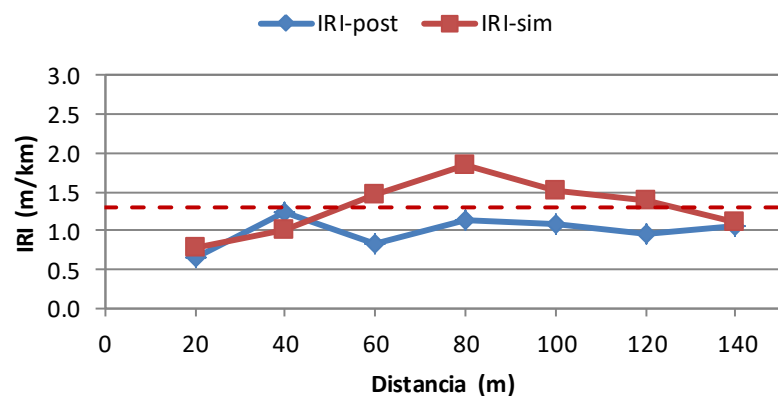
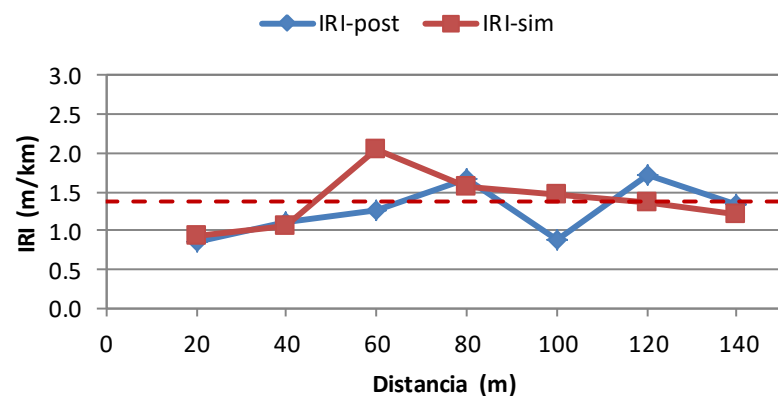


Figura C.3: Evaluación modelo base – Texas – IRI @ 20m

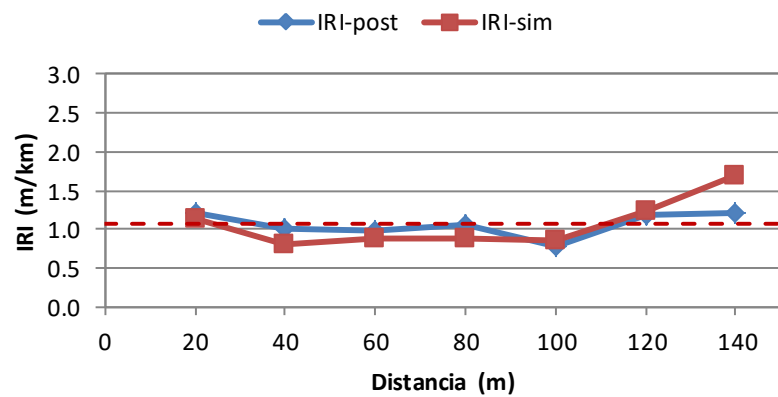
Alberta 0502



Alberta 0504



Alberta 0503



Alberta 0505

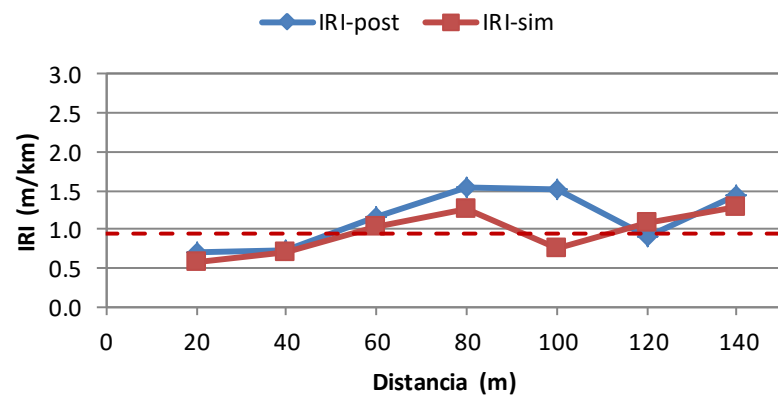


Figura C.4: Evaluación modelo base – Alberta – IRI @ 20m

## **Anexo D. Resultados modelo ampliado**

## D.1. Base de datos para calibración del modelo ampliado

Tabla D.1: Calibración modelo ampliado – Base de datos para calibración

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
8	Colorado	0502	1	0	20	20.0	2.13		0.90		-1.24	
8	Colorado	0502	1	20	40	20.0	1.68		0.90		-0.79	
8	Colorado	0502	1	40	60	20.0	1.46		0.85		-0.60	
8	Colorado	0502	1	60	80	20.0	0.98		0.86		-0.12	
8	Colorado	0502	1	80	100	20.0	1.38	1.53	0.89	0.88	-0.49	-0.65
8	Colorado	0502	1	100	120	20.0	1.30		1.03		-0.27	
8	Colorado	0502	1	120	140	20.0	1.23		0.81		-0.42	
8	Colorado	0503	2	0	20	20.0	2.23		0.64		-1.59	
8	Colorado	0503	2	20	40	20.0	1.82		0.80		-1.02	
8	Colorado	0503	2	40	60	20.0	1.11		0.67		-0.44	
8	Colorado	0503	2	60	80	20.0	1.74		0.81		-0.93	
8	Colorado	0503	2	80	100	20.0	2.17	1.82	0.81	0.75	-1.36	-1.07
8	Colorado	0503	2	100	120	20.0	1.74		0.67		-1.06	
8	Colorado	0503	2	120	140	20.0	1.33		0.75		-0.58	
8	Colorado	0504	2	0	20	20.0	1.15		0.53		-0.62	
8	Colorado	0504	2	20	40	20.0	1.32		0.74		-0.58	
8	Colorado	0504	2	40	60	20.0	1.54		1.22		-0.32	
8	Colorado	0504	2	60	80	20.0	1.49		0.74		-0.75	
8	Colorado	0504	2	80	100	20.0	1.52	1.40	0.64	0.77	-0.89	-0.63
8	Colorado	0504	2	100	120	20.0	1.54		0.98		-0.56	
8	Colorado	0504	2	120	140	20.0	1.56		0.69		-0.87	
8	Colorado	0505	1	0	20	20.0	1.26		1.40		0.14	
8	Colorado	0505	1	20	40	20.0	1.65		0.67		-0.97	

Anexo D. Resultados modelo ampliado

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
8	Colorado	0505	1	40	60	20.0	1.26		0.86		-0.40	
8	Colorado	0505	1	60	80	20.0	1.25		0.63		-0.63	
8	Colorado	0505	1	80	100	20.0	1.50	1.38	0.59	0.83	-0.91	-0.55
8	Colorado	0505	1	100	120	20.0	1.13		0.66		-0.47	
8	Colorado	0505	1	120	140	20.0	1.89		0.69		-1.19	
23	Maine	0502	2	0	20	20.0	1.09		0.75		-0.34	
23	Maine	0502	2	20	40	20.0	1.00		0.90		-0.10	
23	Maine	0502	2	40	60	20.0	1.06		0.65		-0.41	
23	Maine	0502	2	60	80	20.0	1.13		0.48		-0.66	
23	Maine	0502	2	80	100	20.0	0.99	1.05	0.52	0.66	-0.46	-0.39
23	Maine	0502	2	100	120	20.0	1.13		1.50		0.37	
23	Maine	0502	2	120	140	20.0	0.77		0.50		-0.27	
23	Maine	0503	3	0	20	20.0	1.17		0.76		-0.41	
23	Maine	0503	3	20	40	20.0	0.87		1.11		0.24	
23	Maine	0503	3	40	60	20.0	1.00		0.66		-0.34	
23	Maine	0503	3	60	80	20.0	1.38		0.87		-0.51	
23	Maine	0503	3	80	100	20.0	1.30	1.14	0.86	0.85	-0.44	-0.29
23	Maine	0503	3	100	120	20.0	1.27		0.79		-0.48	
23	Maine	0503	3	120	140	20.0	1.34		1.54		0.20	
23	Maine	0504	3	0	20	20.0	0.93		0.82		-0.11	
23	Maine	0504	3	20	40	20.0	1.20		1.04		-0.15	
23	Maine	0504	3	40	60	20.0	1.02		0.67		-0.35	
23	Maine	0504	3	60	80	20.0	1.95		1.18		-0.77	
23	Maine	0504	3	80	100	20.0	1.68	1.36	0.48	0.84	-1.20	-0.52
23	Maine	0504	3	100	120	20.0	1.76		0.88		-0.88	
23	Maine	0504	3	120	140	20.0	1.24		0.56		-0.67	
23	Maine	0505	2	0	20	20.0	1.83		0.83		-1.00	
23	Maine	0505	2	20	40	20.0	0.96		0.69		-0.28	
23	Maine	0505	2	40	60	20.0	1.50		0.44		-1.06	
23	Maine	0505	2	60	80	20.0	1.27		0.47		-0.80	
23	Maine	0505	2	80	100	20.0	0.85	1.28	0.84	0.65	0.00	-0.63
23	Maine	0505	2	100	120	20.0	1.67		0.90		-0.78	

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
23	Maine	0505	2	120	140	20.0	1.04		0.59		-0.46	
24	Maryland	0503	3	0	20	20.0	1.57		0.73		-0.84	
24	Maryland	0503	3	20	40	20.0	2.40		0.90		-1.50	
24	Maryland	0503	3	40	60	20.0	1.87		0.74		-1.13	
24	Maryland	0503	3	60	80	20.0	3.96		1.68		-2.28	
24	Maryland	0503	3	80	100	20.0	2.34	2.43	1.42	1.09	-0.93	-1.34
24	Maryland	0503	3	100	120	20.0	1.16		0.64		-0.52	
24	Maryland	0503	3	120	140	20.0	1.16		0.88		-0.28	
24	Maryland	0504	3	0	20	20.0	1.18		0.82		-0.36	
24	Maryland	0504	3	20	40	20.0	1.23		0.77		-0.45	
24	Maryland	0504	3	40	60	20.0	1.47		1.00		-0.47	
24	Maryland	0504	3	60	80	20.0	2.20		0.98		-1.22	
24	Maryland	0504	3	80	100	20.0	0.97	1.41	0.93	0.90	-0.03	-0.51
24	Maryland	0504	3	100	120	20.0	3.59		1.02		-2.57	
24	Maryland	0504	3	120	140	20.0	4.04		0.75		-3.29	
24	Maryland	0505	1	0	20	20.0	1.69		0.80		-0.89	
24	Maryland	0505	1	20	40	20.0	1.49		1.17		-0.32	
24	Maryland	0505	1	40	60	20.0	2.16		0.90		-1.26	
24	Maryland	0505	1	60	80	20.0	1.31		1.34		0.03	
24	Maryland	0505	1	80	100	20.0	1.69	1.67	0.83	1.01	-0.85	-0.66
24	Maryland	0505	1	100	120	20.0	1.99		1.00		-0.99	
24	Maryland	0505	1	120	140	20.0	1.51		0.92		-0.59	
34	New Jersey	0502	1	0	20	20.0	2.02		0.87		-1.15	
34	New Jersey	0502	1	20	40	20.0	1.52		0.79		-0.73	
34	New Jersey	0502	1	40	60	20.0	1.76		0.68		-1.09	
34	New Jersey	0502	1	60	80	20.0	1.55		1.59		0.03	
34	New Jersey	0502	1	80	100	20.0	1.89	1.75	1.02	0.99	-0.86	-0.76
34	New Jersey	0502	1	100	120	20.0	2.24		1.02		-1.21	
34	New Jersey	0502	1	120	140	20.0	2.74		1.03		-1.72	
34	New Jersey	0503	2	0	20	20.0	1.88		0.53		-1.35	
34	New Jersey	0503	2	20	40	20.0	1.83		0.88		-0.95	
34	New Jersey	0503	2	40	60	20.0	2.14		0.58		-1.56	

Anexo D. Resultados modelo ampliado

SPS-5 Test Site			LIFTS N°	Start Distance	Stop Distance	Length	IRI-pre (m/km)		IRI-post (m/km)		IRI-drop (m/km)	
STATE_CODE	STATE_CODE_EXP	SHRP_ID					AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m	AVG @20m	AVG @100m
34	New Jersey	0503	2	60	80	20.0	2.95		0.64		-2.31	
34	New Jersey	0503	2	80	100	20.0	1.94	2.15	0.56	0.64	-1.38	-1.51
34	New Jersey	0503	2	100	120	20.0	1.59		0.66		-0.93	
34	New Jersey	0503	2	120	140	20.0	1.80		0.84		-0.96	
34	New Jersey	0504	2	0	20	20.0	1.89		0.60		-1.29	
34	New Jersey	0504	2	20	40	20.0	1.47		0.86		-0.62	
34	New Jersey	0504	2	40	60	20.0	1.30		0.53		-0.77	
34	New Jersey	0504	2	60	80	20.0	1.93		0.93		-1.00	
34	New Jersey	0504	2	80	100	20.0	1.95	1.71	0.73	0.73	-1.22	-0.98
34	New Jersey	0504	2	100	120	20.0	1.37		0.75		-0.62	
34	New Jersey	0504	2	120	140	20.0	1.38		0.61		-0.77	
34	New Jersey	0505	1	0	20	20.0	1.26		0.79		-0.47	
34	New Jersey	0505	1	20	40	20.0	1.29		1.07		-0.23	
34	New Jersey	0505	1	40	60	20.0	1.40		0.72		-0.68	
34	New Jersey	0505	1	60	80	20.0	2.11		1.06		-1.05	
34	New Jersey	0505	1	80	100	20.0	2.46	1.71	0.92	0.91	-1.54	-0.80
34	New Jersey	0505	1	100	120	20.0	2.16		0.88		-1.29	
34	New Jersey	0505	1	120	140	20.0	1.81		0.66		-1.15	

## D.2. Calibración modelo ampliado - simulaciones

Tabla D.2: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Colorado 502

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.19	1.17	1.17	1.21	1.21	1.21	1.22	1.22	1.22	1.22	1.21	1.21	1.20
40	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.96	0.97	0.99
60	0.85	0.85	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83	0.83	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85
80	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.60	0.57	0.54	0.52	0.51	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61	0.58	0.55	0.53	0.52
100	0.89	0.90	0.89	0.88	0.86	0.85	0.83	0.81	0.79	0.78	0.90	0.90	0.90	0.89	0.87	0.86	0.84	0.82	0.80	0.79
120	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.79	0.75	0.73	0.71	0.83	0.82	0.83	0.82	0.82	0.82	0.80	0.76	0.74	0.73
140	0.80	0.81	0.80	0.79	0.77	0.75	0.71	0.66	0.63	0.61	0.80	0.80	0.81	0.80	0.78	0.76	0.72	0.68	0.64	0.62

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1.21	1.22	1.21	1.20	1.19	1.20	1.21	1.23	1.26	1.32	1.20	1.19	1.16	1.14	1.17	1.17	1.17	1.18	1.24	1.32
40	0.99	0.98	0.98	0.99	0.97	0.94	0.93	0.94	0.97	1.00	0.97	0.99	0.99	0.99	0.96	0.93	0.91	0.93	0.95	0.99
60	0.85	0.86	0.85	0.84	0.84	0.86	0.87	0.90	0.93	0.95	0.86	0.85	0.85	0.83	0.84	0.85	0.87	0.90	0.92	0.96
80	0.62	0.62	0.62	0.61	0.62	0.64	0.61	0.55	0.53	0.53	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.63	0.60	0.53	0.52	0.52
100	0.90	0.90	0.90	0.90	0.88	0.86	0.82	0.78	0.77	0.78	0.90	0.90	0.90	0.90	0.87	0.86	0.82	0.77	0.77	0.77
120	0.83	0.83	0.82	0.82	0.80	0.78	0.77	0.77	0.75	0.72	0.83	0.83	0.82	0.81	0.77	0.77	0.77	0.77	0.71	0.69
140	0.81	0.81	0.81	0.80	0.79	0.79	0.79	0.73	0.65	0.63	0.81	0.81	0.81	0.79	0.78	0.80	0.78	0.69	0.64	0.61

Tabla D.3: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Colorado 503

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.99	0.98	0.97	0.97	0.95	0.94	0.93	0.92	0.92	0.92	1.01	1.00	1.00	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	0.97
40	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.90	0.92
60	0.65	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.60	0.57	0.55	0.53	0.65	0.66	0.65	0.64	0.64	0.63	0.61	0.57	0.55	0.53
80	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.84	0.84	0.83	0.84	0.91	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.86	0.85	0.86
100	1.07	1.06	1.05	1.04	1.02	1.00	0.98	0.98	0.97	0.97	1.08	1.07	1.06	1.05	1.04	1.01	0.99	0.98	0.97	0.97
120	0.80	0.80	0.79	0.78	0.77	0.75	0.72	0.71	0.69	0.68	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79	0.77	0.74	0.72	0.71	0.70
140	0.67	0.67	0.66	0.65	0.64	0.62	0.61	0.58	0.55	0.53	0.68	0.67	0.67	0.66	0.66	0.64	0.62	0.61	0.58	0.56

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.99	0.98	0.96	0.94	0.92	0.92	0.93	0.95	0.99	1.07	0.99	0.96	0.93	0.91	0.88	0.89	0.91	0.94	0.99	1.08
40	0.87	0.87	0.88	0.86	0.88	0.90	0.91	0.92	0.93	0.97	0.87	0.87	0.86	0.87	0.90	0.90	0.89	0.91	0.92	0.96
60	0.65	0.65	0.66	0.67	0.67	0.67	0.64	0.59	0.55	0.51	0.65	0.65	0.66	0.68	0.68	0.65	0.61	0.56	0.52	0.49
80	0.93	0.94	0.92	0.91	0.89	0.89	0.88	0.87	0.87	0.90	0.93	0.93	0.92	0.92	0.88	0.89	0.86	0.85	0.88	0.90
100	1.08	1.07	1.05	1.02	1.01	1.02	1.02	0.99	0.98	1.06	1.06	1.03	1.03	1.02	1.01	1.00	1.00	0.98	0.96	1.07
120	0.82	0.81	0.80	0.80	0.78	0.75	0.73	0.71	0.70	0.73	0.80	0.79	0.78	0.79	0.76	0.73	0.70	0.68	0.66	0.71
140	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.69	0.67	0.63	0.62	0.61	0.68	0.68	0.68	0.69	0.68	0.69	0.67	0.62	0.60	0.58

Tabla D.4: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Colorado 504

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.54	0.53	0.53	0.51	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.54	0.54	0.53
40	0.65	0.64	0.62	0.60	0.58	0.55	0.53	0.51	0.48	0.45	0.65	0.64	0.63	0.61	0.59	0.56	0.54	0.52	0.49	0.47
60	0.76	0.76	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.74	0.73	0.72	0.70
80	0.73	0.72	0.70	0.69	0.69	0.68	0.66	0.65	0.64	0.64	0.73	0.73	0.72	0.70	0.69	0.68	0.67	0.65	0.64	0.65
100	0.76	0.76	0.76	0.76	0.77	0.77	0.77	0.78	0.78	0.78	0.76	0.76	0.76	0.76	0.77	0.77	0.77	0.79	0.80	0.82
120	0.74	0.74	0.74	0.74	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.75	0.76
140	0.71	0.71	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.69	0.68	0.67	0.71	0.71	0.71	0.70	0.70	0.69	0.68	0.68	0.68	0.68

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56	0.57	0.59	0.61	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55	0.56	0.55	0.55	0.59	0.62
40	0.67	0.66	0.66	0.66	0.65	0.63	0.61	0.57	0.54	0.52	0.67	0.66	0.66	0.66	0.64	0.62	0.60	0.56	0.52	0.50
60	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.74	0.72	0.72	0.77	0.76	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.73	0.71	0.71	0.77
80	0.74	0.73	0.72	0.72	0.70	0.68	0.68	0.66	0.64	0.67	0.74	0.73	0.72	0.70	0.69	0.69	0.68	0.66	0.64	0.68
100	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.78	0.82	0.93	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.76	0.79	0.93
120	0.74	0.74	0.73	0.74	0.72	0.70	0.69	0.70	0.72	0.79	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.67	0.67	0.66	0.69	0.78
140	0.72	0.72	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.68	0.69	0.76	0.72	0.71	0.71	0.71	0.69	0.69	0.67	0.67	0.68	0.77

Tabla D.5: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Colorado 505

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.64	0.63	0.61	0.60	0.59	0.68	0.68	0.69	0.68	0.68	0.66	0.65	0.64	0.62	0.60
40	1.04	1.04	1.03	1.02	1.01	1.00	0.98	0.97	0.96	0.94	1.03	1.02	1.02	1.01	1.00	1.00	0.98	0.97	0.96	0.95
60	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81	0.80	0.78	0.77	0.76	0.76	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.78	0.77	0.78
80	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.73	0.72	0.71	0.75	0.75	0.75	0.75	0.76	0.75	0.74	0.74	0.73	0.73
100	0.84	0.84	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.81	0.85	0.85	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83
120	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.65	0.63	0.60	0.57	0.55	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.61	0.58	0.56
140	1.11	1.11	1.10	1.08	1.05	1.03	1.02	1.02	1.02	1.03	1.12	1.12	1.12	1.10	1.08	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.68	0.67	0.69	0.71	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.70	0.68	0.69	0.69	0.69	0.69	0.72	0.71	0.69	0.68	0.71
40	1.02	1.01	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.97	0.98	1.00	1.02	1.00	0.99	0.99	0.97	0.95	0.94	0.93	0.97	0.99
60	0.79	0.80	0.78	0.79	0.80	0.79	0.78	0.79	0.80	0.84	0.80	0.78	0.82	0.81	0.78	0.78	0.77	0.78	0.80	0.84
80	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.75	0.76	0.77	0.76	0.76	0.75	0.75	0.75	0.74	0.74	0.76	0.75	0.76	0.76	0.76
100	0.84	0.84	0.84	0.85	0.85	0.83	0.83	0.85	0.89	0.91	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.81	0.81	0.84	0.88	0.88
120	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.65	0.61	0.59	0.55	0.56	0.68	0.68	0.68	0.67	0.68	0.60	0.59	0.55	0.54	0.55
140	1.15	1.13	1.10	1.06	1.00	0.99	1.01	1.05	1.09	1.14	1.13	1.12	1.10	1.06	0.98	0.97	1.02	1.07	1.12	1.19

Tabla D.6: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maine 502

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.54	0.54	0.54	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.50	0.51	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.52	0.51	0.51	0.52
40	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52	0.51	0.50	0.50	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52	0.51	0.52
60	0.50	0.50	0.50	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.49	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51
80	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.60	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.62	0.61	0.62
100	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.50	0.48	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50
120	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.59	0.60	0.62	0.63	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.59	0.62	0.65
140	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.38	0.38

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.53	0.52	0.52	0.55	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.52	0.52	0.50	0.50	0.55
40	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.55	0.53	0.53	0.52	0.52	0.53	0.51	0.50	0.51	0.51	0.53
60	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.50	0.48	0.48	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.50	0.48	0.45	0.48
80	0.61	0.60	0.61	0.60	0.60	0.60	0.59	0.58	0.59	0.66	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.59	0.56	0.56	0.64
100	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.54	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51
120	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56	0.57	0.57	0.59	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.56	0.57
140	0.37	0.37	0.37	0.36	0.37	0.36	0.36	0.37	0.39	0.46	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36	0.37	0.39	0.47

Tabla D.7: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maine 503

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.58	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.58	0.59
40	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
60	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	0.46	0.46	0.46
80	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.70	0.69	0.69	0.67	0.67	0.72	0.72	0.72	0.72	0.71	0.70	0.69	0.69	0.67	0.69
100	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59	0.59	0.58	0.56	0.56	0.57	0.61	0.61	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59	0.58	0.58	0.59
120	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50	0.49	0.48	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49
140																				

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.59	0.59	0.61	0.61	0.65	0.57	0.56	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.62	0.62	0.67
40	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.39	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.37
60	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.52	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	0.45	0.48
80	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.69	0.67	0.66	0.64	0.68	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.70	0.68	0.67	0.62	0.62
100	0.61	0.61	0.60	0.60	0.60	0.59	0.58	0.56	0.57	0.66	0.61	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59	0.57	0.54	0.53	0.61
120	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.52	0.52	0.53	0.55	0.60	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.50	0.49	0.50	0.49	0.54
140																				

Tabla D.8: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maine 504

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.41	0.41	0.42	0.43
40	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.57	0.56	0.55	0.56	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.57	0.57
60	0.47	0.47	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.44	0.43	0.43	0.47	0.47	0.47	0.47	0.46	0.46	0.45	0.45	0.44	0.44
80	0.77	0.77	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.71	0.70	0.70	0.77	0.77	0.77	0.76	0.75	0.75	0.74	0.72	0.72	0.72
100	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81	0.80	0.80	0.79	0.77	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81	0.81	0.80
120	0.83	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.86
140																				

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.41	0.41	0.42	0.44	0.50	0.41	0.41	0.41	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.42	0.50
40	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.56	0.53	0.54	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.60	0.58	0.55	0.52	0.51
60	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.48	0.47	0.45	0.45	0.48	0.48	0.49	0.48	0.48	0.49	0.49	0.47	0.44	0.43	0.44
80	0.78	0.78	0.77	0.76	0.76	0.74	0.72	0.69	0.68	0.76	0.78	0.77	0.77	0.75	0.74	0.73	0.72	0.69	0.67	0.67
100	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.84	0.85	0.82	0.83	0.84	0.82	0.82	0.82	0.82	0.83	0.85	0.82	0.79	0.80	0.80
120	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	0.83	0.82	0.82	0.82	0.88	0.82	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80	0.80	0.79	0.80	0.84
140																				

Tabla D.9: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maine 505

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
20	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.90	0.86	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.92
40	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.44	0.44	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.45	0.45
60	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69	0.68	0.67	0.65	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.70	0.68	0.65	0.65
80	0.67	0.67	0.68	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64	0.62	0.59	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.64	0.64	0.63	0.63
100	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.35	0.36	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.37	0.36	0.36
120	0.79	0.78	0.75	0.73	0.70	0.67	0.62	0.58	0.55	0.50	0.80	0.79	0.77	0.74	0.71	0.68	0.64	0.60	0.56	0.51	0.51
140	0.52	0.52	0.52	0.52	0.50	0.49	0.48	0.46	0.45	0.44	0.54	0.53	0.52	0.52	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46	0.45	0.45

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.86	0.86	0.85	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84	0.89	1.00	0.85	0.86	0.85	0.83	0.80	0.79	0.79	0.79	0.84	1.00
40	0.48	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.47	0.46	0.46	0.47	0.49	0.49	0.50	0.49	0.49	0.48	0.46	0.45	0.44	0.45
60	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.72	0.73	0.74	0.77	0.83	0.72	0.72	0.72	0.71	0.72	0.71	0.72	0.71	0.74	0.81
80	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.68	0.66	0.63	0.65	0.68	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.65	0.65	0.62	0.61	0.65
100	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.38	0.37	0.38	0.39	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
120	0.81	0.81	0.80	0.79	0.77	0.74	0.71	0.66	0.61	0.55	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.76	0.73	0.68	0.63	0.56
140	0.56	0.54	0.55	0.55	0.54	0.51	0.52	0.49	0.48	0.45	0.55	0.54	0.56	0.56	0.55	0.53	0.55	0.52	0.47	0.44

Tabla D.10: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maryland 503

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
20	0.67	0.66	0.66	0.66	0.65	0.65	0.65	0.64	0.65	0.66	0.68	0.68	0.67	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.66
40	0.88	0.86	0.84	0.82	0.79	0.76	0.74	0.71	0.70	0.70	0.92	0.89	0.87	0.85	0.82	0.79	0.76	0.73	0.71	0.72	0.72
60	0.79	0.79	0.79	0.78	0.77	0.77	0.76	0.75	0.73	0.71	0.79	0.80	0.80	0.78	0.78	0.77	0.76	0.77	0.76	0.76	0.75
80	1.33	1.30	1.28	1.24	1.21	1.18	1.14	1.11	1.10	1.13	1.36	1.34	1.31	1.28	1.24	1.21	1.18	1.16	1.16	1.16	1.22
100	0.53	0.51	0.48	0.46	0.43	0.41	0.39	0.37	0.37	0.36	0.53	0.51	0.49	0.46	0.44	0.42	0.40	0.38	0.38	0.38	0.38
120	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51	0.50	0.49	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.50
140																					

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
20	0.67	0.67	0.67	0.67	0.64	0.60	0.59	0.60	0.63	0.69	0.66	0.67	0.67	0.67	0.66	0.62	0.60	0.61	0.63	0.74	0.74
40	0.95	0.93	0.90	0.86	0.84	0.81	0.77	0.74	0.72	0.75	0.97	0.97	0.94	0.89	0.87	0.83	0.79	0.75	0.74	0.80	0.80
60	0.80	0.80	0.79	0.79	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.73	0.80	0.80	0.80	0.78	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.75	0.75
80	1.30	1.25	1.21	1.17	1.16	1.12	1.11	1.14	1.24	1.44	1.27	1.22	1.18	1.15	1.11	1.07	1.08	1.10	1.24	1.56	1.56
100	0.55	0.54	0.52	0.48	0.46	0.42	0.41	0.40	0.34	0.37	0.55	0.54	0.51	0.49	0.48	0.43	0.43	0.42	0.36	0.35	0.35
120	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.53	0.52	0.54	0.55	0.59	0.52	0.52	0.52	0.52	0.53	0.52	0.52	0.54	0.55	0.60	0.60
140																					

Tabla D.11: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maryland 504

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.51	0.49	0.48	0.46	0.44	0.41	0.39	0.36	0.34	0.33	0.51	0.50	0.48	0.47	0.45	0.43	0.40	0.37	0.35	0.35
40	0.51	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.51	0.50	0.50	0.50	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47
60	0.68	0.68	0.66	0.65	0.63	0.61	0.58	0.55	0.52	0.50	0.69	0.69	0.68	0.67	0.65	0.63	0.59	0.56	0.53	0.50
80	0.81	0.80	0.80	0.80	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72	0.81	0.81	0.81	0.80	0.80	0.79	0.79	0.79	0.78	0.77
100	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.37	0.34	0.31	0.30	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.39	0.37	0.33	0.31	0.31
120	1.41	1.41	1.40	1.41	1.40	1.40	1.40	1.39	1.37	1.37	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.45	1.44	1.45
140																				

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.53	0.52	0.49	0.48	0.45	0.43	0.40	0.40	0.39	0.39	0.53	0.53	0.52	0.50	0.48	0.45	0.42	0.41	0.40	0.43
40	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50	0.49	0.51	0.52	0.58	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.54	0.64
60	0.70	0.70	0.67	0.65	0.63	0.60	0.57	0.55	0.51	0.51	0.71	0.69	0.68	0.65	0.63	0.63	0.61	0.55	0.52	0.50
80	0.85	0.84	0.84	0.86	0.86	0.87	0.90	0.93	0.97	1.01	0.85	0.85	0.85	0.89	0.89	0.88	0.93	1.01	1.07	1.13
100	0.42	0.41	0.40	0.42	0.41	0.41	0.41	0.37	0.36	0.38	0.42	0.40	0.41	0.42	0.43	0.42	0.43	0.40	0.40	0.42
120	1.46	1.46	1.45	1.48	1.50	1.56	1.66	1.77	1.92	2.09	1.43	1.43	1.45	1.44	1.45	1.52	1.67	1.86	2.09	2.38
140																				

Tabla D.12: Calibración modelo ampliado – Simulaciones Maryland 505

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.96	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.96	0.97	0.98
40	0.93	0.92	0.90	0.88	0.86	0.83	0.79	0.76	0.73	0.70	0.91	0.92	0.91	0.89	0.86	0.83	0.79	0.76	0.74	0.72
60	1.34	1.31	1.27	1.23	1.20	1.16	1.12	1.09	1.06	1.03	1.35	1.34	1.30	1.25	1.21	1.17	1.13	1.09	1.06	1.03
80	0.80	0.79	0.79	0.78	0.76	0.73	0.71	0.69	0.67	0.66	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.72	0.70	0.68	0.66	0.65
100	1.04	1.04	1.03	1.02	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	1.09	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.02	1.01	0.98	0.95
120	1.20	1.19	1.17	1.15	1.13	1.11	1.09	1.08	1.07	1.07	1.21	1.21	1.20	1.18	1.16	1.15	1.14	1.12	1.11	1.10
140	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.82	0.82	0.81	0.80	0.89	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.82

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.97	1.00	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.98	1.04	1.10	0.97	1.00	0.98	0.98	0.97	0.98	1.00	1.02	1.09	1.17
40	0.94	0.97	0.96	0.95	0.91	0.85	0.80	0.77	0.76	0.76	0.94	1.01	1.00	0.96	0.93	0.88	0.81	0.78	0.77	0.79
60	1.52	1.53	1.48	1.43	1.39	1.34	1.31	1.27	1.24	1.21	1.53	1.59	1.56	1.52	1.47	1.41	1.35	1.30	1.27	1.28
80	0.85	0.83	0.82	0.80	0.80	0.81	0.79	0.74	0.71	0.71	0.83	0.80	0.81	0.83	0.84	0.83	0.81	0.77	0.74	0.77
100	1.05	1.06	1.08	1.11	1.12	1.15	1.18	1.16	1.14	1.14	1.01	1.05	1.08	1.10	1.14	1.16	1.18	1.16	1.13	1.15
120	1.27	1.25	1.24	1.25	1.23	1.22	1.19	1.19	1.20	1.23	1.31	1.26	1.24	1.26	1.27	1.27	1.26	1.25	1.27	1.32
140	0.89	0.88	0.85	0.83	0.81	0.80	0.80	0.78	0.80	0.81	0.89	0.85	0.84	0.84	0.83	0.77	0.80	0.78	0.78	0.82

Tabla D.13: Calibración modelo ampliado – Simulaciones New Jersey 502

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1.08	1.06	1.04	1.02	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	0.91	1.12	1.09	1.07	1.05	1.02	1.00	0.97	0.95	0.93	0.92
40	0.96	0.95	0.94	0.92	0.89	0.87	0.84	0.81	0.79	0.78	0.96	0.96	0.95	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.80	0.78
60	0.96	0.95	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89	0.88	0.88	0.88	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.90	0.90	0.89	0.90
80	1.02	1.01	1.01	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86	0.84	0.81	1.03	1.02	1.01	0.99	0.98	0.95	0.92	0.88	0.86	0.83
100	1.36	1.34	1.30	1.27	1.23	1.20	1.18	1.15	1.12	1.10	1.38	1.36	1.34	1.30	1.26	1.23	1.19	1.16	1.14	1.12
120	1.26	1.22	1.18	1.14	1.11	1.08	1.05	1.02	1.00	0.99	1.29	1.25	1.20	1.16	1.12	1.09	1.07	1.04	1.02	1.00
140	1.68	1.63	1.57	1.52	1.47	1.43	1.39	1.35	1.32	1.30	1.71	1.65	1.60	1.54	1.49	1.44	1.40	1.36	1.33	1.30

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1.24	1.23	1.21	1.18	1.14	1.11	1.06	1.01	0.96	0.93	1.23	1.21	1.17	1.14	1.12	1.09	1.03	0.98	0.92	0.89
40	0.98	1.01	1.01	1.00	0.96	0.92	0.90	0.88	0.84	0.84	0.99	1.03	1.03	0.97	0.94	0.92	0.90	0.89	0.83	0.82
60	0.97	0.97	0.96	0.94	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.91	0.97	0.97	0.94	0.93	0.95	0.93	0.91	0.88	0.87	0.88
80	1.08	1.07	1.06	1.08	1.07	1.05	0.99	0.95	0.94	0.94	1.08	1.08	1.09	1.10	1.08	1.04	0.97	0.96	0.94	0.93
100	1.40	1.32	1.31	1.29	1.29	1.27	1.25	1.21	1.19	1.19	1.40	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29	1.23	1.19	1.18	1.20
120	1.37	1.30	1.24	1.19	1.13	1.08	1.06	1.04	1.03	1.04	1.38	1.30	1.24	1.19	1.14	1.09	1.05	1.03	1.01	1.03
140	1.83	1.74	1.66	1.60	1.54	1.49	1.45	1.43	1.41	1.44	1.80	1.69	1.62	1.55	1.49	1.44	1.40	1.38	1.37	1.43

Tabla D.14: Calibración modelo ampliado – Simulaciones New Jersey 503

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.88	0.86	0.84	0.83	0.81	0.79	0.78	0.76	0.73	0.71	0.91	0.89	0.87	0.86	0.84	0.82	0.81	0.78	0.76	0.75
40	0.79	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.80	0.79	0.77	0.76	0.75	0.72	0.69	0.68	0.66	0.64
60	1.06	1.03	0.99	0.95	0.92	0.89	0.85	0.80	0.77	0.73	1.09	1.06	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.82	0.78	0.75
80	0.93	0.90	0.86	0.82	0.78	0.74	0.71	0.68	0.66	0.64	0.92	0.88	0.85	0.81	0.76	0.73	0.70	0.67	0.64	0.62
100	0.77	0.75	0.72	0.70	0.67	0.64	0.62	0.59	0.55	0.53	0.78	0.76	0.73	0.71	0.68	0.65	0.62	0.58	0.55	0.53
120	0.87	0.87	0.86	0.84	0.82	0.80	0.77	0.75	0.73	0.69	0.87	0.87	0.86	0.85	0.84	0.82	0.79	0.77	0.76	0.72
140	0.76	0.75	0.74	0.73	0.71	0.70	0.69	0.69	0.70	0.70	0.76	0.75	0.74	0.73	0.71	0.70	0.69	0.70	0.71	0.72

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	1.01	0.99	0.99	0.97	0.94	0.90	0.88	0.85	0.83	0.84	1.01	1.00	0.99	0.97	0.93	0.90	0.88	0.84	0.83	0.82
40	0.83	0.83	0.83	0.81	0.79	0.76	0.76	0.73	0.71	0.68	0.83	0.83	0.82	0.79	0.77	0.76	0.74	0.74	0.68	0.66
60	1.15	1.11	1.10	1.05	1.05	0.95	0.90	0.87	0.80	0.81	1.16	1.12	1.10	1.06	1.03	0.94	0.90	0.81	0.77	0.80
80	1.06	1.03	0.99	0.92	0.85	0.79	0.74	0.71	0.70	0.69	1.03	1.00	0.94	0.87	0.81	0.77	0.73	0.69	0.67	0.66
100	0.80	0.79	0.75	0.71	0.69	0.67	0.65	0.64	0.61	0.59	0.76	0.73	0.71	0.70	0.67	0.68	0.67	0.64	0.60	0.58
120	0.88	0.88	0.87	0.88	0.88	0.87	0.87	0.84	0.80	0.78	0.89	0.88	0.86	0.86	0.87	0.88	0.86	0.80	0.76	0.74
140	0.77	0.74	0.72	0.69	0.67	0.67	0.67	0.68	0.66	0.71	0.74	0.71	0.70	0.68	0.68	0.67	0.68	0.67	0.64	0.73

Tabla D.15: Calibración modelo ampliado – Simulaciones New Jersey 504

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.77	0.76	0.74	0.72	0.71	0.69	0.66	0.64	0.62	0.61	0.77	0.76	0.74	0.72	0.70	0.69	0.67	0.64	0.63	0.61
40	0.72	0.72	0.71	0.70	0.69	0.67	0.65	0.61	0.59	0.57	0.73	0.73	0.72	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63	0.60	0.58
60	0.62	0.62	0.61	0.60	0.60	0.59	0.59	0.57	0.55	0.53	0.62	0.62	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58	0.57	0.56	0.54
80	0.85	0.82	0.80	0.78	0.75	0.71	0.67	0.63	0.59	0.56	0.86	0.84	0.82	0.80	0.77	0.73	0.68	0.64	0.60	0.55
100	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.86	0.82	0.79	0.76	0.75	0.94	0.94	0.94	0.93	0.92	0.90	0.86	0.83	0.79	0.76
120	0.64	0.63	0.62	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53	0.52	0.50	0.65	0.64	0.62	0.60	0.59	0.57	0.55	0.53	0.52	0.51
140	0.66	0.66	0.65	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54	0.53	0.67	0.66	0.65	0.64	0.64	0.61	0.59	0.56	0.54	0.53

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.84	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.71	0.69	0.70	0.74	0.84	0.81	0.80	0.78	0.75	0.71	0.68	0.66	0.69	0.75
40	0.76	0.76	0.75	0.73	0.71	0.69	0.66	0.62	0.59	0.56	0.77	0.75	0.73	0.71	0.68	0.66	0.62	0.60	0.56	0.53
60	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.62	0.58	0.55	0.55	0.59	0.62	0.62	0.61	0.61	0.62	0.61	0.57	0.55	0.54	0.59
80	0.91	0.90	0.88	0.87	0.83	0.79	0.76	0.70	0.66	0.66	0.91	0.91	0.89	0.84	0.81	0.78	0.70	0.68	0.65	0.66
100	0.96	0.93	0.93	0.95	0.95	0.94	0.90	0.86	0.82	0.86	0.92	0.92	0.94	0.94	0.92	0.91	0.85	0.84	0.79	0.84
120	0.65	0.63	0.60	0.59	0.56	0.54	0.53	0.53	0.52	0.52	0.63	0.63	0.60	0.57	0.57	0.55	0.51	0.53	0.50	0.52
140	0.68	0.67	0.66	0.67	0.67	0.63	0.60	0.58	0.57	0.55	0.68	0.67	0.67	0.66	0.65	0.63	0.58	0.57	0.56	0.56

Tabla D.16: Calibración modelo ampliado – Simulaciones New Jersey 505

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 1/4										Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.77	0.77	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72	0.71	0.69	0.67	0.78	0.77	0.77	0.76	0.76	0.75	0.74	0.72	0.70	0.68
40	0.82	0.82	0.81	0.81	0.80	0.78	0.75	0.72	0.70	0.68	0.83	0.83	0.83	0.82	0.81	0.79	0.77	0.74	0.72	0.70
60	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.73	0.70	0.66	0.63	0.61	0.88	0.87	0.85	0.82	0.80	0.76	0.72	0.69	0.66	0.64
80	1.34	1.31	1.29	1.26	1.24	1.21	1.19	1.17	1.16	1.14	1.35	1.33	1.30	1.27	1.25	1.22	1.19	1.18	1.16	1.14
100	1.45	1.43	1.40	1.37	1.34	1.31	1.28	1.25	1.24	1.23	1.49	1.46	1.42	1.39	1.37	1.34	1.31	1.28	1.25	1.24
120	1.45	1.43	1.41	1.37	1.33	1.29	1.26	1.23	1.21	1.18	1.47	1.46	1.44	1.40	1.36	1.32	1.29	1.26	1.23	1.20
140	1.13	1.11	1.09	1.07	1.06	1.03	1.02	1.00	0.99	1.00	1.13	1.11	1.10	1.08	1.07	1.04	1.03	1.01	1.01	1.02

Distancia	Sensibilidad – Punto de control 2/3										Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	0.80	0.80	0.80	0.78	0.76	0.75	0.73	0.72	0.70	0.68	0.79	0.82	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67	0.66
40	0.83	0.83	0.84	0.82	0.80	0.79	0.78	0.76	0.72	0.70	0.83	0.85	0.85	0.80	0.80	0.79	0.77	0.73	0.72	0.69
60	0.95	0.93	0.92	0.92	0.90	0.87	0.84	0.79	0.75	0.73	0.95	0.95	0.95	0.92	0.88	0.88	0.83	0.76	0.72	0.71
80	1.47	1.46	1.42	1.39	1.35	1.33	1.30	1.27	1.25	1.23	1.45	1.45	1.40	1.37	1.34	1.31	1.27	1.22	1.20	1.20
100	1.45	1.40	1.36	1.36	1.38	1.32	1.30	1.29	1.30	1.30	1.46	1.38	1.40	1.39	1.35	1.29	1.27	1.28	1.30	1.32
120	1.46	1.45	1.43	1.41	1.36	1.32	1.29	1.26	1.24	1.25	1.46	1.43	1.43	1.38	1.31	1.28	1.24	1.23	1.23	1.24
140	1.14	1.11	1.10	1.07	1.04	1.03	1.02	1.03	1.02	1.04	1.13	1.11	1.09	1.06	1.03	1.01	1.02	1.02	0.98	1.01

### D.3. Calibración modelo ampliado - resultados

Tabla D.17: Calibración modelo ampliado – SSE – Todas las Secciones (ALL)

ALL	Sensibilidad – Punto de control 1/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SSE	9.57	9.36	9.16	9.04	9.00	9.08	9.30	9.62	9.87	10.08

Min : 9.00  
 RMSE : 0.298  
 SEN : 5

ALL	Sensibilidad – Punto de control 1/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SSE	9.84	9.63	9.40	9.21	9.11	9.10	9.24	9.53	9.74	9.86

Min : 9.10  
 RMSE : 0.300  
 SEN : 6

ALL	Sensibilidad – Punto de control 2/3									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SSE	10.54	10.18	9.87	9.59	9.37	9.36	9.63	10.02	10.64	10.85

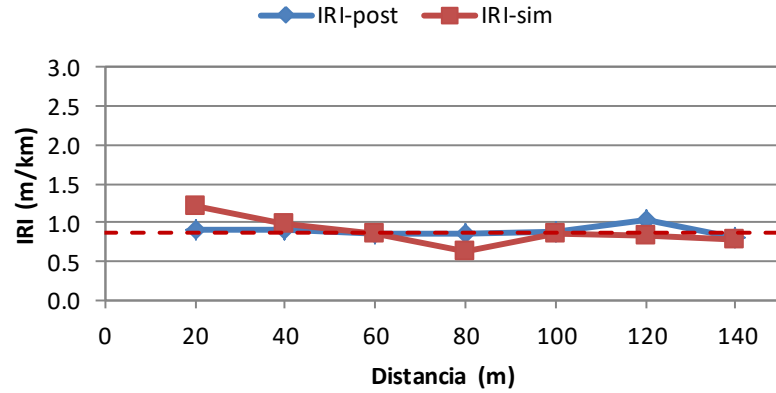
Min : 9.36  
 RMSE : 0.304  
 SEN : 6

ALL	Sensibilidad – Punto de control 3/4									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SSE	10.45	10.05	9.80	9.47	9.18	9.23	9.52	10.07	10.96	11.89

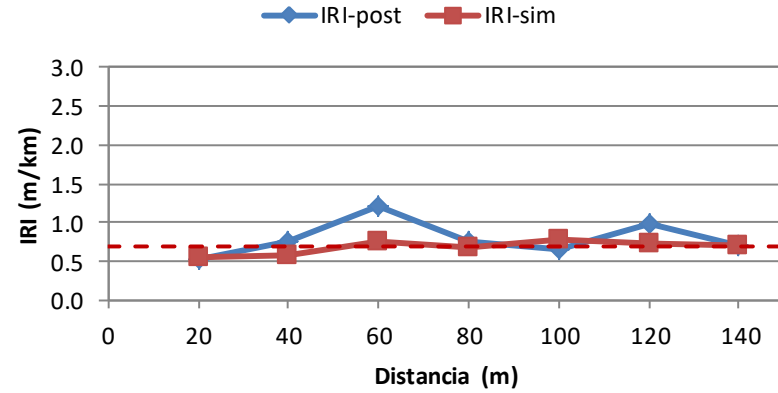
Min : 9.18  
 RMSE : 0.301  
 SEN : 5

### D.4. Evaluación de resultados modelo ampliado - Intervalos 20 m

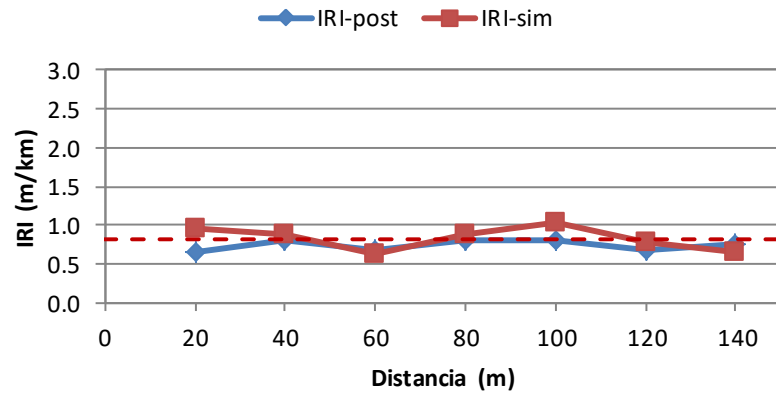
Colorado 0502



Colorado 0504



Colorado 0503



Colorado 0505

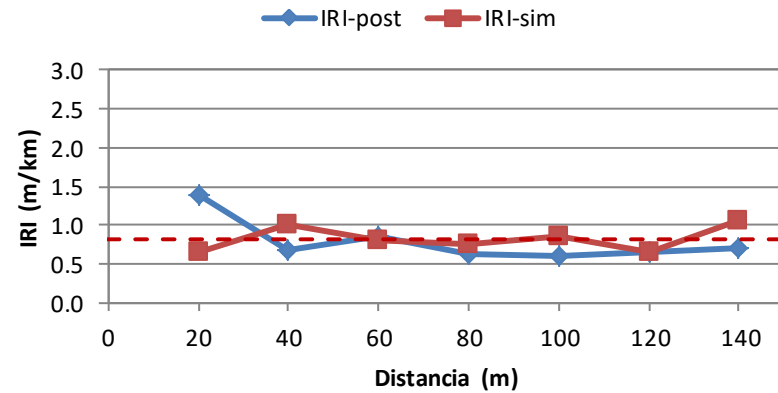
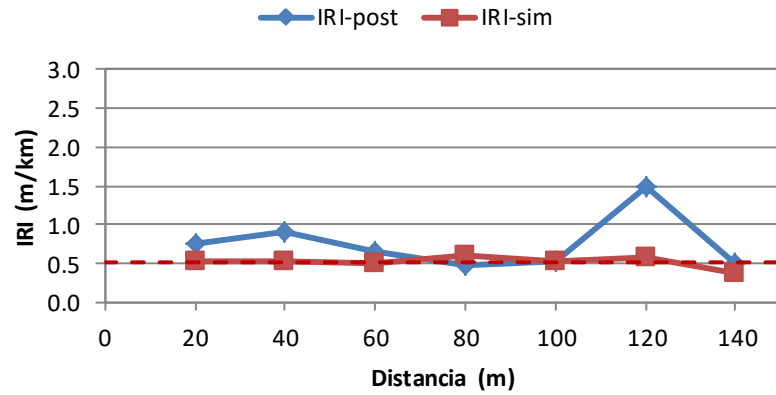
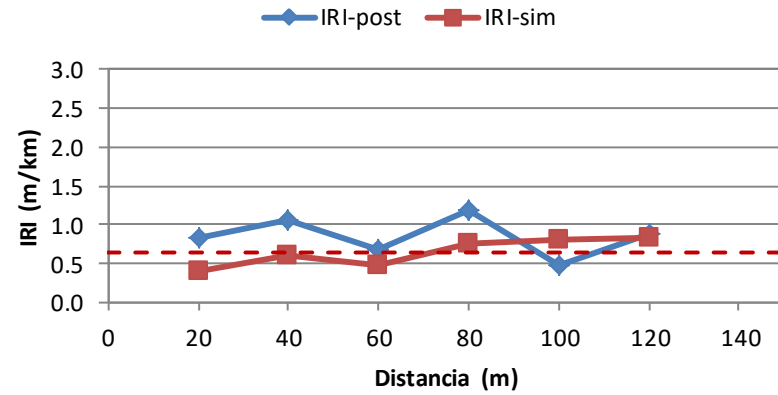


Figura D.1: Evaluación modelo ampliado – Colorado – IRI @ 20m

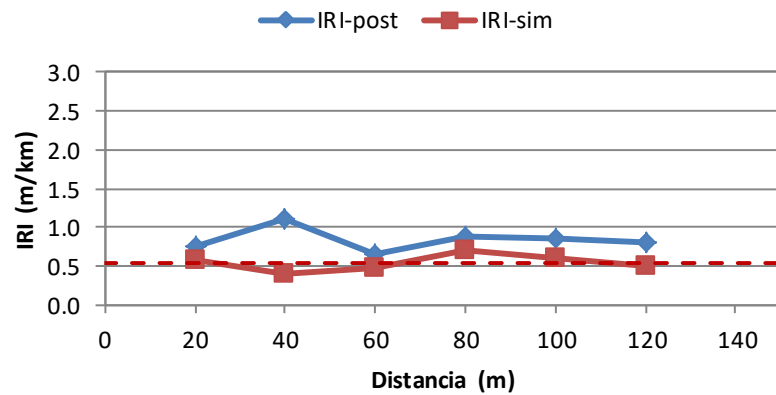
Maine 0502



Maine 0504



Maine 0503



Maine 0505

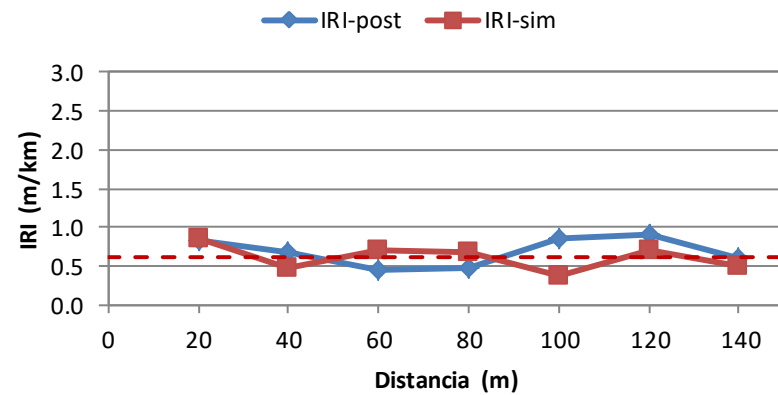
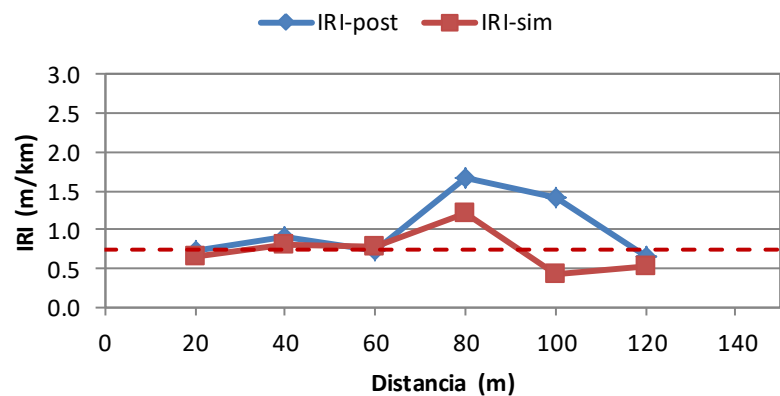
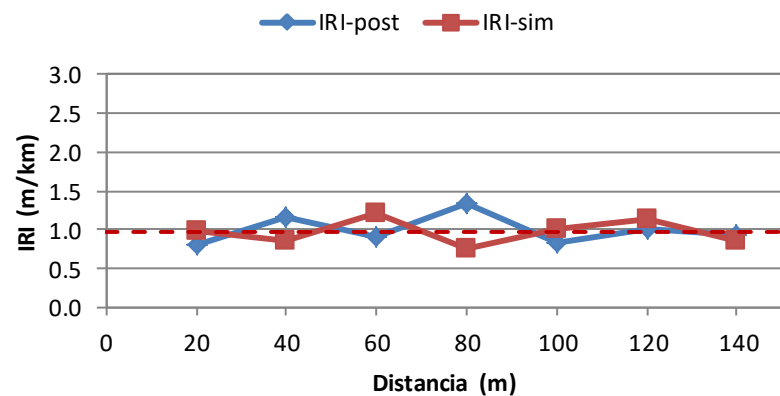


Figura D.2: Evaluación modelo ampliado – Maine – IRI @ 20m

Maryland 0503



Maryland 0505



Maryland 0504

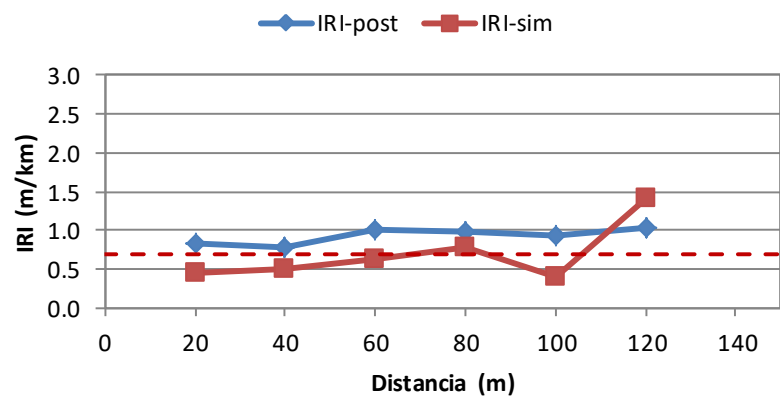
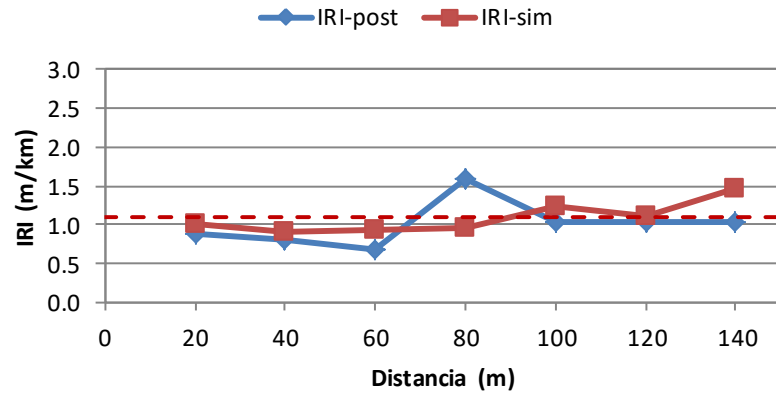
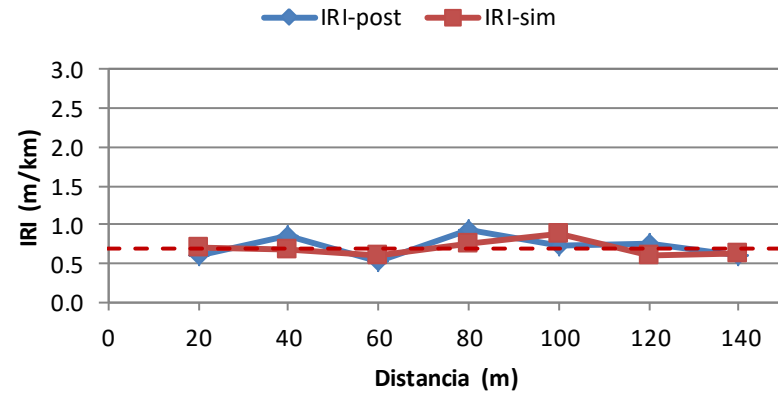


Figura D.3: Evaluación modelo ampliado – Maryland – IRI @ 20m

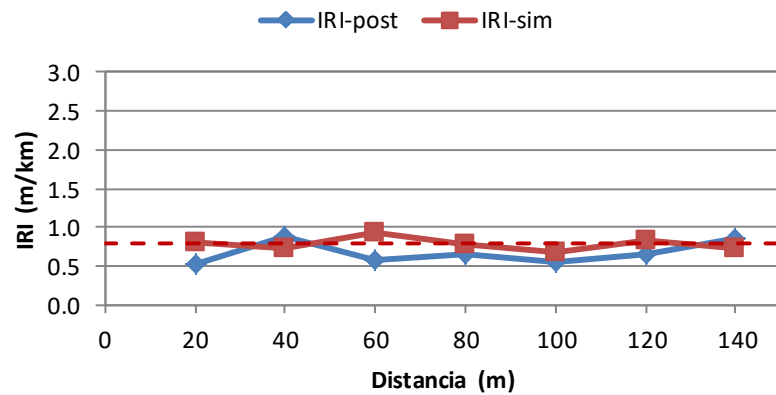
New Jersey 0502



New Jersey 0504



New Jersey 0503



New Jersey 0505

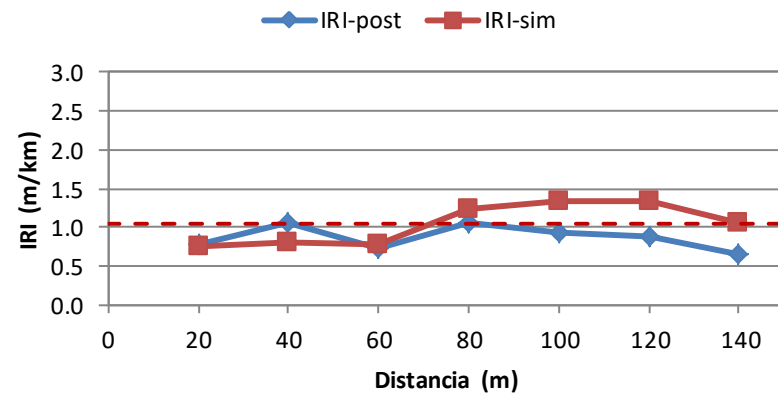


Figura D.4: Evaluación modelo ampliado – New Jersey – IRI @ 20m