

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

ESCUELA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL
CON MENCIÓN EN CARRETERAS, PUENTES Y
TÚNELES**



Tesis para optar el grado de Maestro en Ingeniería Vial

**Modelos de deterioro del pavimento y su correlación con las evaluaciones
funcionales de los años 2010-2016, en la carretera Inambari – Azángaro.**

Autor: Bach. Ríos De la Cruz Isaac

Asesor: Dr. Chavarry Vallejos Carlos Magno

Lima, Perú

2019

Página del jurado

Doctor Carlos Agustín Saito Silva

Presidente

Doctor Andrés Avelino Valencia Gutiérrez

Miembro

Doctor Francisco Antonio Aramayo Pinazo

Miembro

Doctor Carlos Magno Chavarry Vallejos

Asesor

Olga Suarez Avelino

Representante de la EPG

Dedicatoria

En memoria a mis padres Isaac y Dionicia por la valiosa formación que me dieron, a Sonia por su tiempo y el aliento que siempre encontré, a Megumi y Daniella que son mi inspiración.

Agradecimiento

A Dios por sostenerme y guiarme en cada paso que doy en la vida, a mi familia por su paciencia y apoyo incondicional.

Al Doctor Carlos Magno Chavarry Vallejos, asesor de tesis, por su orientación y guía.

Al Doctor Andrés Sotil Chávez por sus aportes en el desarrollo de la presente investigación.

Índice de contenido

Página del jurado	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice de contenido	v
Listado de tablas	viii
Listado de figuras	x
Resumen	xii
Abstract	xiii
Introducción	1
Capítulo I:	4
Planteamiento del problema	4
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Formulación del problema	8
1.2.1 Problema general	8
1.2.2 Problemas específicos	8
1.3 Importancia y justificación del estudio	8
1.4 Delimitación del estudio	11
1.5 Objetivos de la investigación	13
1.5.1 Objetivo general	13
	v

1.5.2	Objetivos específicos	13
Capítulo II:		15
Marco teórico		15
2.1	Marco histórico	15
2.1.1	Antecedentes de los modelos de deterioro de pavimentos	16
2.1.2	Índice de Regularidad Internacional (IRI)	22
2.1.3	Características de la carretera del Tramo 4: Inambari – Azángaro	24
2.1.4	Artículos técnicos	30
2.2	Investigaciones relacionadas con el tema	35
2.2.1	Investigaciones internacionales	35
2.2.2	Investigaciones nacionales	39
2.3	Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	42
2.3.1	Deterioro del pavimento	42
2.3.2	Causas del deterioro del pavimento	47
2.3.3	Indicadores de deterioro	49
2.3.4	Sistema de gestión de pavimentos	51
2.3.5	Modelos de deterioro de pavimentos	55
2.3.6	Metodología para el análisis de modelos de deterioro	65
2.3.7	Correlación	73
2.4	Definición de términos básicos	75
2.5	Fundamentos teóricos que sustentan a las hipótesis	77
2.6	Hipótesis	78
2.6.1	Hipótesis general	78
2.6.2	Hipótesis específicas	79
2.7	Variables	79
Capítulo III:		82

Marco Metodológico	82
3.1 Tipo y alcance de la investigación	82
3.2 Diseño de la investigación	83
3.3 Población y muestra	84
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	84
3.5 Descripción de procedimientos de análisis	86
3.5.1 Procesamiento de datos para el modelo estocástico probabilístico	94
3.5.2 Procesamiento de datos para el desarrollo del modelo empírico	106
Capítulo IV:	117
Resultados y análisis de resultados	117
4.1 Resultados	117
4.2 Análisis de resultados o discusión de resultados	124
Capítulo V:	126
Conclusiones y recomendaciones	126
5.1 Conclusiones	126
5.2 Recomendaciones	127
Referencias bibliográficas	129
Anexos	132

Listado de tablas

Tabla 1. Coordenadas geográficas del Tramo 4: Inambari – Azángaro	13
Tabla 2. Altitudes del Tramo 4: Inambari - Azángaro	25
Tabla 3. Temperaturas mínimas absoluta en el área de estudio	26
Tabla 4. Temperaturas máximas absoluta en el área de estudio	27
Tabla 5. Precipitaciones mensuales del área de estudio	27
Tabla 6. Velocidad del viento del área de estudio	28
Tabla 7. Características técnicas de la vía	28
Tabla 8. Estructura del pavimento	29
Tabla 9. Características de la mezcla producida	29
Tabla 10. Clasificación general de los deterioros de los pavimentos asfálticos	50
Tabla 11. Clasificación de modelos de deterioro	55
Tabla 12. Correlación lineal entre dos variables	74
Tabla 13. Operacionalización de variable dependiente (R^2 e-p; e)	80
Tabla 14. Operacionalización de variable dependiente (IRI)	80
Tabla 15. Operacionalización de variable independiente (e-p)	80
Tabla 16. Operacionalización de variable independiente (e)	81
Tabla 17. Mediciones de rugosidad	86
Tabla 18. Nivel de servicio de rugosidad (IRI)	88
Tabla 19. Valores promedio del IRI por kilómetro	88
Tabla 20. Sectores homogéneos asumidos	93
Tabla 21. Estado de condición del IRI	98
Tabla 22. Estado de condición del IRI	98
Tabla 23. Estado de condición del IRI	98
Tabla 24. Distribución de segmentos y estado de condición	101
Tabla 25. Cambio de estado de condición al año 2016	101
Tabla 26. Cambio de estado de condición al año 2018	102
Tabla 27. Cambio de estado de condición al año 2018	104
Tabla 28. Vectores de condición de estado	106

Tabla 29. Curva de deterioro funcional	106
Tabla 30. Tiempos relativos por secciones	109
Tabla 31. Resumen matriz de predicción años 2017 y 2018	118
Tabla 32. Matriz de IRI medido vs predecido año 2018	119

Listado de figuras

Figura 1. Plano de ubicación del Tramo 4: Inambari – Azángaro	12
Figura 2. Modelo de cuarto de carro	23
Figura 3. Escala de valores del IRI empleado por el Banco Mundial	24
Figura 4. Principales localidades del Tramo 4: Inambari – Azángaro	25
Figura 5. Edad del pavimento	30
Figura 6. Modelo de deterioro de un pavimento	46
Figura 7. Ciclo de vida fatal y deseable de un pavimento	46
Figura 8. Esquema de deterioro de un pavimento 1° y 2° fase	47
Figura 9. Modelo agregado	60
Figura 10. Modelo incremental	61
Figura 11. Distribución de probabilidades acumulada del PCI	62
Figura 12. Ejemplo de curva de supervivencia	62
Figura 13. Ejemplo de matriz de transición para un ciclo	63
Figura 14. Inicio y progresión de los deterioros	67
Figura 15. Progresión creciente, decreciente y sigmoïdal	68
Figura 16. Extrapolación lineal	69
Figura 17. Distribución de probabilidades	71
Figura 18. Mapa conceptual	77
Figura 19. Grafico operacional	78
Figura 20. Diferencias acumuladas para sectores homogéneos	91
Figura 21. Medición de IRI Km 51+000 al Km 75+000	92
Figura 22. Diferencias acumuladas Km 51+000 al Km 75+000	92
Figura 23. Medición de IRI Km 100+000 al Km 182+000	93
Figura 24. Diferencias acumuladas Km 100+000 al Km 182+000	93
Figura 25. Comportamiento asumido de un pavimento	107
Figura 26. Perfil de deterioro de un pavimento	108
Figura 27. Grafico del IRI medido 2010 al 2016	117
Figura 28. Correlación IRI medido vs IRI pronosticado estocástico	119
Figura 29. Curva de deterioro del IRI	120
Figura 30. IRI medido vs IRI predecido Km 51+000 al Km 56+000	120
Figura 31. IRI medido vs IRI predecido Km 57+000 al Km 61+000	121

Figura 32. IRI medido vs IRI predecido Km 62+000 al Km 66+000	121
Figura 33. IRI medido vs IRI predecido Km 67+000 al Km 75+000	121
Figura 34. IRI medido vs IRI predecido Km 100+000 al Km 125+000	122
Figura 35. IRI medido vs IRI predecido Km 126+000 al Km 151+000	122
Figura 36. IRI medido vs IRI predecido Km 152+000 al Km 181+000	122
Figura 37. IRI medido vs IRI pronosticado	123
Figura 38. Correlación IRI medido vs IRI pronosticado empírico	124

Resumen

El problema de la presente investigación “Modelos de deterioro del pavimento y su correlación con las evaluaciones funcionales de los años 2010-2016, en la carretera Inambari – Azángaro” es determinar cuál de los modelos de deterioro estocástico-probabilístico o empírico presenta mejor correlación, teniendo como objetivo desarrollar dichos modelos en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 y determinar su correlación para predecir el comportamiento funcional del pavimento flexible.

La fundamentación teórica sostiene que el desarrollo de modelos de deterioro estocástico probabilístico y empírico en función a las mediciones del IRI en los años 2010 al 2016, presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

La investigación es cuantitativa, aplicada, de diseño experimental. El alcance es descriptivo y correlacional ya que se confronta la teoría con los datos experimentales de las mediciones de campo, las mismas que han servido para desarrollar los modelos de deterioro y aspectos importantes del presente trabajo hasta contrastar la hipótesis.

Como resultado se tiene que el modelo estocástico probabilístico presenta una correlación de 0.6731 y se encuentra en el rango de $0.5 < R^2 < 0.8$ considerado como positivo moderado. La correlación obtenida con el modelo de deterioro empírico es de 0.8449 y se encuentra dentro del rango $0.80 \leq R^2 < 1$ considerado como positivo fuerte, concluyendo que dichos resultados presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

Palabras claves: Índice de Rugosidad Internacional (IRI), modelos de deterioro, correlación.

Abstract

The problem of the present investigation “Models of pavement deterioration and its correlation with the functional evaluations of the years 2010-2016, on the Inambari - Azángaro road” is to determine which of the stochastic-probabilistic or empirical deterioration models has the best correlation, with the objective of developing these models based on measurements of the International Roughness Index (IRI) from 2010 to 2016 and determining their correlation to predict the functional behavior of the flexible pavement.

The theoretical foundation argues that the development of probabilistic and empirical stochastic deterioration models based on IRI measurements in the years 2010 to 2016, have a good correlation to predict the functional deterioration of the flexible pavement.

The research is quantitative, applied, experimental design. The scope is descriptive and correlational since the theory is confronted with the experimental data of the field measurements, the same ones that have served to develop the deterioration models and important aspects of the present work until the hypothesis is tested.

As a result, the probabilistic stochastic model has a correlation of 0.6731 and is in the range of $0.5 < R^2 < 0.8$ considered as moderate positive. The correlation obtained with the empirical deterioration model is 0.8449 and is within the range $0.80 \leq R^2 < 1$ considered as strong positive, concluding that these results have a good correlation to predict the functional deterioration of the flexible pavement.

Keywords: International Roughness Index (IRI), deterioration models, correlation.

Introducción

El presente trabajo de investigación desarrolla el tema “Modelos de deterioro del pavimento y su correlación con las evaluaciones funcionales de los años 2010-2016, en la carretera Inambari – Azángaro”. La formulación del problema general plantea la pregunta ¿Cuál de los modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, desarrollados en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro, presenta mejor correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible?

La calidad de la superficie del pavimento flexible, se va deteriorando gradualmente con el tiempo, al estar expuesto a la intemperie y a factores externos como el incremento del tránsito vehicular y sollicitaciones de carga, efectos medioambientales, edad del pavimento, calidad de los materiales, entre los más importantes, que son causantes de otras fallas funcionales además del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), como las deformaciones, ondulaciones, hundimientos, ahuellamientos, baches, fisuras, grietas y desprendimientos. Mientras mayor deterioro presenta el pavimento, mayor repercusión genera en los aspectos económicos y sociales, reflejados en mayores costos de operación de los vehículos, incomodidad, inseguridad y mayores tiempos de movilización de los usuarios, además de mayores costos de mantenimiento del pavimento.

Es propósito de la presente investigación conocer el comportamiento del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento y evolución de su deterioro en el tiempo, mediante el desarrollo de modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, basado en las mediciones del IRI de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, que nos permitirá pronosticar los valores del IRI en el corto, mediano y largo plazo, con la finalidad de mejorar el sistema de gestión del pavimento flexible.

El tema es relevante porque el desarrollo de dichos modelos de deterioro, según el criterio de serviciabilidad permite pasar de la visión tradicional de analizar el IRI vs

kilómetros, que es una visión descriptiva, a una visión de IRI vs tiempo, que permite inferir futuros comportamientos respecto al deterioro de la regularidad del pavimento, contribuyendo de esta manera a incentivar e incrementar el conocimiento científico sobre el uso de modelos de deterioro. Asimismo, permitirá comprender de una mejor manera el estado de condición actual del IRI y su comportamiento a lo largo del tiempo.

Las ventajas y beneficios de su aplicación se verán reflejados en la mejora de la gestión del pavimento flexible y por consiguiente adecuados niveles de servicio de la vía, relacionado con el confort y seguridad de los usuarios, ahorros significativos en los costos de operación vehicular, menores tiempos de movilización y menores índices de accidentabilidad, entre otros, beneficiando de esta manera principalmente a los pobladores de la región sur del país (Arequipa, Puno y Madre de Dios).

La motivación hacia este trabajo es conocer el comportamiento y evolución de la regularidad (IRI) del pavimento flexible en el tiempo. El objetivo general es desarrollar modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, en función a las mediciones realizadas en los años 2010 al 2016 y determinar su correlación para predecir el comportamiento funcional del pavimento flexible. Dichos pronósticos permitirán mejorar la gestión del pavimento e implementar estrategias de mantenimientos preventivos de manera oportuna que conlleven a mantener las condiciones de serviciabilidad y seguridad en la carretera Inambari – Azángaro.

Dentro del marco general descrito, en la presente investigación se desarrolla los capítulos siguientes:

El capítulo 1 describe las características generales de la carretera y el deterioro funcional que involucran la serviciabilidad y seguridad que brinda la infraestructura vial. Se realiza el planteamiento y formulación del problema general y problemas específicos, explicando la importancia y justificación del estudio, la delimitación y objetivos de la investigación.

El capítulo 2 del marco teórico, abarca los antecedentes y rasgos históricos de investigación científica sobre orígenes, evolución y características de los diferentes modelos de deterioro del pavimento, así como artículos técnicos, investigaciones nacionales e internacionales y en general el estado del arte de los aspectos relacionados con el tema en estudio. Se describe la teoría de deterioros del pavimento, causas, indicadores, sistema de gestión de pavimentos, desarrollo de los modelos de deterioro y características técnicas de la carretera Inambari – Azángaro. Se presenta el mapa conceptual y gráfico operacional que sustenta la hipótesis. Finalmente, se describe la hipótesis general y específicas, además de la descripción y operacionalización de las variables de investigación.

El capítulo 3 comprende el marco metodológico destacando el tipo, método y diseño de la investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y descripción de procedimientos de análisis de datos. Se presentan resúmenes de los resultados obtenidos en las diferentes mediciones de rugosidad de los años 2010, 2012, 2015 y 2018, así como el procedimiento de análisis empleado para el desarrollo de los modelos de deterioro.

En el capítulo 4 se muestran los resultados y se realiza el análisis o discusión de resultados obtenidos, permitiendo validar o descartar las hipótesis planteadas. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Capítulo I

Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

La carretera IIRSA Sur Tramo 4: Inambari – Azángaro de 305.06 kilómetros de longitud, forma parte de la infraestructura de integración con Brasil y Bolivia, atravesando zonas muy variadas de topografía plana, ondulada y accidentada; transcurre a diferentes altitudes, desde los 3,850 m.s.n.m. en Azángaro, 4,880 m.s.n.m. en el Abra Oquepuño, para luego bajar hasta los 370 m.s.n.m., en el Puente Inambari, lo que implica una serie de diferentes temperaturas y microclimas diversos. Esta carretera es de vital importancia para el desarrollo social y económico de la región sur del país y tiene un impacto directo a nivel macro y microeconómico en la productividad de la región Puno.

La construcción de dicha vía ha significado una gran inversión principalmente por la variada topografía y a la incorporación de más de 1,737 ml de puentes y 7 túneles a la fecha, con una longitud acumulada de 2,373.40 m., constituyéndose en un activo importante y un patrimonio vial que debe preservarse. El pavimento es uno de los elementos de la carretera que requiere de mayor atención en la etapa de operación y explotación de la vía, para mantener adecuados niveles de servicio y garantizar la seguridad de los usuarios.

De otra parte, conservar los diferentes elementos de una infraestructura vial, (estructura del pavimento, obras de arte y drenaje, derecho de vía, elementos de seguridad vial, puentes y viaductos, túneles, entre otros), se fundamenta principalmente en una adecuada gestión vial que involucra el mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico, mantenimiento de emergencia, complementado con evaluaciones funcionales, evaluaciones estructurales, control de la edad del pavimento y monitoreo de las condiciones climáticas, así como la caracterización del tránsito vehicular y el control de vehículos de carga para que no excedan los límites permitidos por las normas peruanas de peso por eje y el peso bruto total.

Chang A., (2013), sostiene que los pavimentos que componen la red vial de carreteras requieren de mantenimiento y rehabilitación para preservarse en buen estado y proveer un sistema confiable para la población y los transportistas. Los tres elementos principales que afectan el desempeño de los pavimentos son: las cargas de tráfico, el medio ambiente, y la edad del pavimento. Dentro de estos factores, la magnitud y frecuencia de las cargas de tráfico tienen un impacto significativo en la vida útil del pavimento y deben controlarse tomando las medidas correctivas necesarias para evitar el deterioro prematuro.

Dujisin y Arroyo, (1995), en su investigación sostienen que la serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, que a la vez se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la carretera. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, entre otras; que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural). El concepto de serviciabilidad está basado en cinco aspectos fundamentales resumidos como sigue:

1. Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del usuario.
2. El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.

3. La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad (PSR).
4. Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
5. El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodamiento que depende de la regularidad superficial del pavimento. Este parámetro define el concepto de Clasificación de Serviciabilidad Presente (PSR, por sus siglas en inglés)”.

El Índice de Rugosidad Internacional (IRI) propuesto por el Banco Mundial en 1986, es un parámetro de referencia de medición de la calidad superficial del pavimento, que relaciona la magnitud y frecuencia de las irregularidades superficiales con el confort, seguridad, velocidad de viaje y desgaste de partes del vehículo. Para carreteras en servicio es una herramienta para monitorear el comportamiento de la vía a través del tiempo, permitiendo fijar umbrales de alerta para proceder a un estudio detallado de los daños o para realizar labores de mantenimiento.

En 1988 Michael S. Janoff del JMJ Research, estudió el efecto de la regularidad inicial sobre el rendimiento del pavimento a largo plazo. Los resultados fueron presentados en 1990 en la reunión anual de la NAPA, en la publicación titulada “The Effect of Increased Pavement Smoothness On Long Term Pavement Performance & Annual Pavement Maintenance Cost”. Algunos de los resultados obtenidos de este estudio fueron:

- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen niveles más bajos de regularidad para los siguientes 10 años a la construcción.

- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tiene niveles más bajos de agrietamiento para los siguientes 10 años a la construcción.
- Los pavimentos con una menor regularidad inicial tienen costos anuales medios de mantenimiento más bajos para los siguientes 10 años a la construcción.

La evaluación funcional del pavimento está relacionada básicamente con los daños en la calidad de la superficie (IRI, deformaciones en el perfil topográfico, ondulaciones, hundimientos, ahuellamientos y en menor medida en fisuras, grietas, desprendimientos), que se van deteriorando gradualmente con el tiempo e inciden en los costos de operación vehicular y afectan a la seguridad de los usuarios. Dicho nivel de servicio considera al IRI como uno de los parámetros principales a cumplir y la obligación contractual en la carretera Inambari – Azángaro, es el de mantener los valores por debajo del límite admisible de 3.5 en calzada y bermas.

De la incertidumbre en el deterioro gradual de la calidad de superficie del pavimento, surge la necesidad de la presente investigación, que pretende conocer el comportamiento y evolución de la regularidad del pavimento mediante el desarrollo de modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, en función a las mediciones del IRI realizadas en el periodo 2010 al 2016, para predecir el deterioro de la regularidad superficial (IRI) del pavimento flexible en la carretera Inambari – Azángaro. A efectos de validar el modelo matemático se determina la correlación existente entre los valores del IRI medidos y los valores del IRI pronosticados con los modelos de deterioro para el año 2018. La elección del modelo será determinada por la correlación que presente el valor más cercano a la unidad. Dichos modelos estocástico probabilístico y empírico, pueden aplicarse en la gestión de pavimentos flexibles de carreteras con características similares al Tramo 4: Inambari - Azángaro, de tal forma que coadyuven a la implementación de estrategias rentables de mantenimiento preventivo y adecuadas condiciones de serviciabilidad, contribuyendo a preservar la vida útil de la infraestructura vial, con el consiguiente ahorro que ello significaría.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál de los modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, desarrollados en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro, presenta mejor correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro estocástico probabilístico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016?
- b. ¿Cuál es la correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016?

1.3 Importancia y justificación del estudio

La justificación del estudio responde a las preguntas del porque se está haciendo la investigación y para que se investiga. La respuesta a la primera pregunta está relacionada con el desarrollo de modelos de deterioros del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento flexible, que está vinculado a las condiciones de serviciabilidad y seguridad que la carretera brinda a los usuarios. Mientras mayor deterioro funcional presenta el pavimento, mayor repercusión se genera en los usuarios por los aspectos económicos y sociales debido a mayores costos de operación de los vehículos que afectan la velocidad de circulación, el desgaste de neumáticos, el mayor

consumo de combustible y en mayores costos de mantenimiento del pavimento, además del aspecto social por la incomodidad, inseguridad y mayores tiempos de movilización.

Los modelos de deterioro del (IRI) son expresiones matemáticas que permiten predecir la evolución del estado funcional del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones al inicio de la puesta en servicio (valores medidos en campo) y al momento de la realización del análisis. Bajo dicha premisa, la presente investigación intenta conocer el comportamiento del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) del pavimento y su deterioro en el tiempo, mediante el desarrollo de modelos de deterioro en función a las mediciones reales del IRI de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, que predicen la condición funcional de la vía en el tiempo.

La segunda pregunta para que se investiga, está relacionada con los resultados de predicción del modelo de deterioro, que posibilitaran conocer a futuro el comportamiento del IRI, permitiendo a las agencias viales mejorar el sistema de gestión del pavimento flexible con la implementación de acciones oportunas de mantenimiento preventivo, con el objetivo de mantener siempre las condiciones de seguridad y serviciabilidad en beneficio de los usuarios, con las consiguientes ventajas económicas que ello representa.

“Una investigación llega a ser conveniente por diversos motivos: tal vez ayude a resolver un problema social, a formular una teoría o a generar nuevas inquietudes de investigación. Lo que algunos consideran relevante para investigar puede no serlo para otros, pues suele diferir la opinión de las personas. Sin embargo, es posible establecer criterios para evaluar la utilidad de un estudio propuesto, los cuales evidentemente son flexibles y de ninguna manera son exhaustivos” (Hernández S.).

Valor teórico:

La presente investigación es relevante porque el desarrollo de modelos de deterioro funcional según el criterio de serviciabilidad, permite pasar de la visión tradicional de analizar el IRI vs kilómetros, que es una visión descriptiva, a una visión de

IRI vs tiempo, que permite inferir futuros comportamientos respecto al deterioro de la rugosidad del pavimento. Conocer la tendencia del deterioro en el tiempo facilitará la evaluación e implementación oportuna de diversas alternativas en la gestión del pavimento flexible, contribuyendo de esta manera a incentivar e incrementar el conocimiento científico sobre el uso de modelos de deterioro.

Conocer la condición de regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio del periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, es de suma importancia para la generación de políticas de administración de pavimentos basado en condiciones de deterioro relevantes.

Relevancia social:

Las ventajas y beneficios del desarrollo de modelos de deterioro y su aplicación, se verán reflejados en la toma de decisiones e implementación de alternativas de mantenimiento para un sostenido nivel servicio de la vía, relacionado con el confort y seguridad de los usuarios, ahorros significativos en los costos de operación vehicular, menores tiempos de movilización y menores índices de accidentabilidad, entre otros, beneficiando de esta manera principalmente a los pobladores de la región sur del país (Arequipa, Puno y Madre de Dios).

Relevancia económica:

La influencia de condiciones de serviciabilidad de la carretera en los costos de operación del vehículo es significativa. La buena condición de circulación por una carretera bien conservada facilita que el costo de operación sea mínimo; por el contrario, el deterioro o deficiencias en la superficie afectan los costos de operación de los vehículos (combustibles, lubricantes, llantas, reparación, depreciación, tiempo de transporte, etc.) e incrementan el riesgo por el costo de accidentes fatales.

Utilidad metodológica:

La relevancia que se propone con esta investigación, es el proporcionar herramientas matemáticas, estadísticas y el uso de recursos y tecnologías disponibles en el país, mediante el desarrollo de modelos de deterioro funcional que aporten en la mejora de la gestión del pavimento flexible, evitando mayores deterioros y mayores costos de mantenimiento y/o rehabilitación, mientras más tarde se intervenga.

El nivel de servicio del IRI del pavimento flexible y la tendencia de su deterioro debe ser cuantificada de tal forma que tenga relación directa con los factores que provocan su deterioro, tales como la edad del pavimento, el incremento del tráfico vehicular y las solicitaciones de carga, condiciones climáticas, entre los más importantes.

Para su implementación, dentro de un sistema de administración de pavimentos, los modelos desarrollados utilizan sólo parámetros medidos físicamente y obtenidos mediante equipos debidamente calibrados como el perfilometro laser. Se deberá tener en cuenta los conceptos estadísticos de probabilidad y confiabilidad asociados a las predicciones que realizan los modelos.

Implicancias prácticas:

La información generada mediante el desarrollo de modelos de deterioro permitirá comprender de una mejor manera el estado de condición funcional actual de la carretera y su comportamiento a lo largo del tiempo respecto al IRI. Asimismo, conocer la evolución y el deterioro del IRI a corto, mediano y largo plazo ayudará a encontrar una alternativa optima de mantenimiento.

1.4 Delimitación del estudio

La carretera del Tramo 4: Inambari – Azángaro, forma parte del Proyecto Corredor Vial Interoceánico Sur, Perú – Brasil, que permite la integración con Brasil y Bolivia, cuyos alcances se orientan a promover el desarrollo económico y social de la

región sur del país. Dicha concesión incluye la construcción, mantenimiento, transitabilidad y explotación de 305.06 kilómetros de carretera.

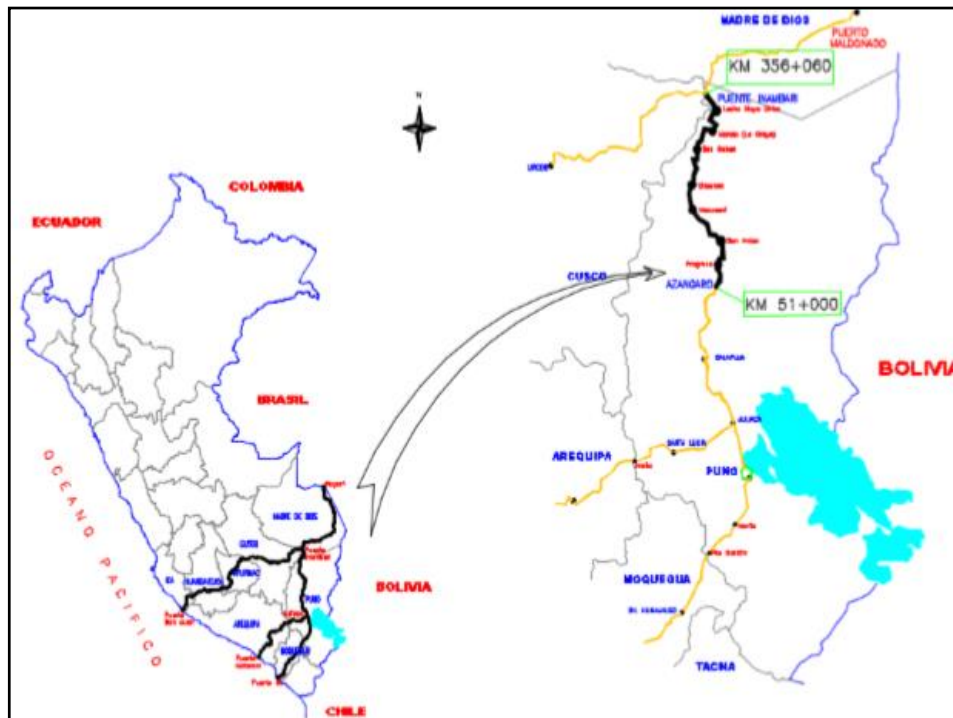


Figura 1 Plano de ubicación del Tramo 4: Inambari – Azángaro
Fuente: PID INTERSUR Concesiones S.A.

A lo largo de la carretera se encuentran ubicados diferentes centros poblados en ambos lados de la vía, tales como la provincia de Azángaro (Km 51+000), Punta Tallapizi (Km 63+000), Carapunco (Km 67+000), Desvío Asillo (km 75+300), distrito de San Antón (Km 101+000), Choquesani (Km 116+900), San Isidro (Km 122+100), provincia de Carabaya (Macusani Km 182+250), distrito de Ollachea (km 233+000), distrito de San Gabán (Km 289+000), Tantamayo, El Carmen, Lechemayo, entre otros caseríos pequeños conformados por unas pocas viviendas a lo largo de toda la carretera.

Geográficamente se encuentra ubicado en el departamento de Puno, entre las provincias de Azángaro y Carabaya. Las coordenadas de la carretera son las siguientes:

Tabla 1

Coordenadas geográficas del Tramo 4: Inambari – Azángaro

Localidad	Coordenada este	Coordenada norte
Inicio: Azangaro	371,657	8°352,315
Fin: Puente Inambari	350,096	8°541,963

Fuente: PID INTERSUR Concesiones S.A

La población del estudio está representada por los 305.06 kilómetros de carretera del Tramo 4: Inambari – Azángaro.

La muestra de la presente investigación evalúa el sub tramo Azángaro (Km 51+000) - Macusani (Km 182+000). Se eligió el mencionado sub tramo debido a las condiciones adversas del clima, en el que se presentan importantes gradientes térmicas que bordean los 42 °C, con temperaturas ambientales mínimas de -20 °C y máximas de 22 °C, el mayor tráfico registrado en todo el Tramo y por ser el pavimento con mayor antigüedad. La delimitación temporal para la elaboración de los modelos de deterioro se realiza en función de las mediciones del IRI realizados en el periodo 2011 al 2016.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar modelos de deterioro estocástico–probabilístico y empírico, en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro y determinar su correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar la correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro

estocástico-probabilístico, desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016.

- b. Determinar la correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico, desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016.

Capítulo II

Marco teórico

2.1 Marco histórico

Respecto a los antecedentes y rasgos históricos de investigación científica sobre orígenes, evolución y características de los diferentes modelos de deterioro del pavimento para ser aplicado en la carretera en evaluación, en los siguientes párrafos se desarrolla el estado del arte de los aspectos relacionados con el tema en estudio.

El objeto del estudio se origina en la carretera Inambari (Km 51+000) – Azángaro (Km 356+060) de 305.06 kilómetros de longitud, específicamente en el sub tramo Azángaro (Km 51+000) – Macusani (Km 182+000) de 131 kilómetros de longitud. El pavimento de dicho sub tramo a la fecha se encuentra en un periodo que sobrepasó la vida útil para la cual fue diseñada (10 años) y para las condiciones de tráfico que incluso se han cuadruplicado en ciertos sectores en relación a las proyecciones de diseño iniciales.

Por lo descrito, el pavimento de la carretera en estudio ha ingresado a una etapa de deterioro progresivo y lo que se pretende en la presente investigación es conocer específicamente la progresión del deterioro funcional del pavimento, que está relacionado

con las condiciones de serviciabilidad (comodidad, confort y seguridad) cuyo parámetro principal es el Índice Internacional de Rugosidad.

Para ello se toma la información de las mediciones de campo realizadas en el periodo del 2010 al 2016 y, mediante el desarrollo de modelos de deterioro estocástico probabilístico y empírico que son expresiones matemáticas, se busca pronosticar la evolución del IRI a lo largo del tiempo y mejorar la gestión del pavimento flexible para implementar oportunamente acciones preventivas de mantenimiento.

Considerando que la variable principal de la presente investigación se desarrolla en función de los modelos de deterioro de pavimentos basados en las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), consecutivamente se describe los rasgos históricos y como evolucionaron en el tiempo estos temas.

2.1.1 Antecedentes de los modelos de deterioro de pavimentos

En 1968, el Banco Mundial dio el paso inicial para producir un modelo de evaluación de proyectos carreteros. El primer modelo nació en respuesta a los términos de referencia para la realización de un estudio de diseño de carreteras preparados por el Banco Mundial, con la colaboración del Laboratorio de Investigación en Transportes y Carreteras (Transport and Road Research Laboratory) (TRRL) y del Laboratorio Central de Puentes y Caminos (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) (LCPC). Más tarde, el Banco Mundial le encargó al Instituto Tecnológico de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology) (MIT) que llevara a cabo una investigación bibliográfica y que construyera un modelo con base en la información recabada. Como resultado, el MIT (Moavenzadeh 1971, 1972) creó el Modelo de Costos de Carreteras (HCM), el cual representó un avance considerable en comparación con los modelos que se empleaban para examinar las interacciones entre los siguientes rubros:

- Costos de los trabajos
- Costos de operación vehicular

El modelo HCM puso de relieve las áreas donde era necesario investigar en mayor profundidad para poder generar un modelo más adecuado para el entorno de países en desarrollo, con relaciones adicionales específicas para estos países.

Posteriormente, el TRRL, en colaboración con el Banco Mundial, emprendieron un extensivo estudio de campo en Kenia para investigar el deterioro de carreteras pavimentadas y no pavimentadas, así como los factores que tienen un impacto en los costos de operación vehicular en un país en vías de desarrollo. El TRRL empleó los resultados de dicho estudio para crear la primera versión prototipo del Modelo de Inversión en Transporte por Carretera (Road Transport Investment Model) (RITM) para países en desarrollo (Abaynayaka, 1977). En 1976, el Banco Mundial financió desarrollos adicionales de HCM en el MIT donde se produjo la primera versión del modelo de Estándares para la Conservación y Diseño de Carreteras (Highway Design and Maintenance Standards model) (HDM) (Harral, 1979).

A fin de ampliar el alcance geográfico de los modelos RTIM y HDM, se realizaron estudios complementarios en varios países:

- Estudio del Caribe (TRRL)
Investigó los efectos que tiene la geometría de las carreteras en los costos de operación vehicular (Morosiuk and Abaynayaka 1982; Hide, 1982).
- Estudio de la India (Instituto Central de Investigación de Carreteras – CRRI).
Analizó problemas operativos específicos de los caminos de la India, en lo que respecta a pavimentos angostos y a la alta circulación de transporte no motorizado (CRRI, 1982).
- Estudio de Brasil (financiado por el UNDP)
Amplió la validez de todas las relaciones de los modelos (GEIPOT, 1982).

Los resultados de los estudios del TRRL se emplearon para desarrollar el modelo RTIM2 (Parsley and Robinson, 1982); por su parte, el Banco Mundial desarrolló un modelo más completo conjuntando los hallazgos de todos los estudios anteriores y esto llevó a la creación de HDM-III (Watanatada et al., 1987). Originalmente, los dos modelos se diseñaron para operar en computadoras centrales, pero con el avance de la tecnología informática, la Universidad de Birmingham (Kerali et al., 1985), a solicitud del TRRL, creó una versión de RTMI2 para microcomputadoras. Posteriormente, el Banco Mundial presentó HDM-PC, una versión del HDM-III para microcomputadoras (Archondo-Callao y Purohit, 1989).

El desarrollo de ambos modelos continuó con la producción del RTMI3 por parte del TRRL en 1993, para ofrecer una versión del software que fuera fácil de usar en formato de hoja de cálculo (Cundill y Withnall, 1995). En 1994, el Banco Mundial creó dos versiones adicionales de HDM:

- HDM-Q
Incorporó los efectos del congestionamiento vial en el programa HDM-III (Hoban, 1987).
- HDM Manager
Proporcionó una interfaz de usuario basada en menús para HDM-III (Archondo-Callao, 1994).

Las distintas versiones de los modelos se han utilizado ampliamente en distintos países y han jugado un papel crucial para justificar incrementos a los presupuestos de conservación y rehabilitación de carreteras en muchos de ellos. Asimismo, se han empleado para verificar la viabilidad económica de proyectos carreteros en más de 100 países y para optimizar los beneficios económicos para los usuarios de las carreteras bajo distintos niveles de gasto. De esta manera, los modelos representan herramientas avanzadas para el análisis de inversiones en carreteras y ofrecen una gran variedad de posibles aplicaciones para diferentes climas y condiciones. Sin embargo, en un momento dado, se reconoció la necesidad de desarrollar nuevamente los

diversos modelos desde sus fundamentos, no solo para incorporar una gama más amplia de pavimentos y condiciones de uso, sino también para responder a las expectativas y las prácticas de la informática moderna.

Para 1995, las relaciones técnicas contenidas en los modelos RTIM3 y HDM-III excedían los 10 años de antigüedad. Aunque gran parte de los modelos de deterioro de carreteras aun eran válidos, existía la necesidad de incorporar los resultados obtenidos de la extensa investigación realizada alrededor del mundo durante ese periodo. En el caso de los costos de operación vehicular, se reconoció que la tecnología vehicular había mejorado drásticamente desde 1980, lo que significaba que los costos típicos de operación podrían ser mucho menores a los estimados por los modelos RTMI3 y HDM-III. Por lo tanto, era necesario actualizar las relaciones técnicas para que reflejaran los avances más recientes. Aunque la mayoría de las aplicaciones de los modelos se han utilizado en países en vías de desarrollo, en los últimos años muchos países industrializados han comenzado a emplear el modelo. Esto creó la necesidad de incluir nuevas funciones, por ejemplo, modelos para:

- Efectos de congestionamiento vial
- Efectos de climas fríos
- Una gama más amplia de tipos de pavimentos y estructuras
- Seguridad vial
- Efectos ambientales (consumo de energía, ruido y emisiones de los vehículos).

Estos antecedentes sirvieron como fundamento para el desarrollo del HDM-4. (G. Kerali, J.B. Odoki, E. Stannard, HDM-4 vol. 1, pág. 3 al 4).

En las últimas décadas, el diseño de pavimentos de carreteras y aeropuertos ha venido desarrollándose de forma prescriptiva y determinista: de forma prescriptiva porque se definían los límites de algunos parámetros, tales como las deflexiones, con el tentativo de controlar el deterioro del pavimento más que intentar

prever o cuantificar el nivel de deterioro que podría verificarse a lo largo del tiempo en determinadas condiciones; y de forma determinista porque el diseño estaba ligado a la misma naturaleza de las ecuaciones o de los modelos empleados, los cuales daban una respuesta univoca a los datos de ingreso sin considerar la variabilidad estadística y sin introducir factores de fiabilidad (Nicolosi, 2015).

Al mismo tiempo, los análisis históricos efectuados por diversos entes gestores han puesto en evidencia que la cuestión de proyectar estas infraestructuras para una vida de 20 años es generalmente irreal, dado que las pavimentaciones de carreteras aseguran unas condiciones de servicio adecuadas por un límite de 8 a 12 años, sin efectuar acciones de mantenimiento o rehabilitación. A través de la aplicación de estas intervenciones, es posible garantizar condiciones de servicio adecuadas para periodos de 20 o 25 años, o incluso mayores. En consecuencia, se ha reconocido la necesidad de considerar la planificación el diseño, la construcción y el mantenimiento de las carreteras como actividades interrelacionadas, explicitando el nexo existente entre las diversas etapas, y la necesidad de desarrollar la tecnología relativa a la gestión global de sistemas de pavimentos.

La evidencia de que los conceptos base relativos al paquete de pavimentos, introducidos ya en la mitad de los años 60, deberían encontrar su aplicación no solo en las actividades de diseño, sino también en el proceso de gestión, apareció casi inmediatamente a su planteamiento. Esto se ha hecho efectivo en 1970 en la “Conference on structural design of asphalt pavement system”, organizada por la Federal Highway Administration (FHWA) y por la Universidad de Texas. En el ámbito de esta conferencia, se desprendió que la tecnología ligada a los sistemas de firmes era ya una realidad y que los conceptos relativos a los sistemas de gestión de los mismos tenían que representar la base cultural para permitir a tal tecnología desarrollarse de manera eficaz.

A partir de los años setenta se comienza a desarrollar diversas investigaciones e implementación de los sistemas de gestión de firmes, surgiendo varias aplicaciones, como el Project 123, del Texas Highway Departament, o el Project 1-10 de

la NCHRP, hasta culminar con el proyecto SHRP de 1988 realizado por 14 estados norteamericanos y 6 provincias canadienses y el proyecto ISOHDM, financiado por el Banco Mundial y concluido en 1999, como hitos reseñables (Odoki & Kerali, 2006).

Con este nuevo enfoque, se desarrolla el concepto de la gestión de pavimentos Pavement Management System (PMS): disciplina que abarca todas las actividades involucradas en la planificación, diseño, construcción, mantenimiento y conservación de los pavimentos de una red de carreteras (AASHTO, 1993). Para ello, las autoridades pertinentes encargadas de tomar decisiones deben elegir entre una serie de opciones proporcionadas por los departamentos técnicos, que abarcan desde las características iniciales de las vías en su etapa de diseño, hasta la frecuencia de las actuaciones de conservación y mantenimiento, así como los estándares de calidad de las mismas a lo largo de su ciclo de vida. Todas estas decisiones, a su vez tienen una fuerte repercusión en el usuario final: en su confort, en su seguridad y en el costo de operación del vehículo y, por lo tanto, en el costo de flotas y transporte de pasajeros. El número de combinaciones de aspectos de diseño/políticas es muy amplio y complejo de abarcar, pero es necesario remarcar que las decisiones que se toman hoy, influirán en las operaciones y costos en los años venideros (Banco Mundial, 1897).

Esta toma de decisiones debe asumirse, por lo tanto, como un análisis de inversiones. Para ello, es necesario disponer de una potente herramienta de gestión que nos permita introducir las variables que intervienen en el proceso. En este sentido, la modelización del comportamiento del pavimento, la cual permite predecir el desempeño del mismo a lo largo de su vida útil, es fundamental ya que este es un componente crítico dentro de las variables que influyen en el usuario final y, por lo tanto, en la inversión a realizar. Esto es posible llevarlo a cabo mediante los llamados Modelos de Deterioro, que son herramientas (generalmente expresiones matemáticas), que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento a lo largo del tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo en el momento de su puesta en servicio y en el momento de la realización del análisis. De esta manera, posteriormente es posible pronosticar los efectos a corto y largo plazo del mantenimiento efectuado sobre el pavimento, con el

objetivo de realizar estimaciones tanto de los resultados de las operaciones de conservación, como de su nivel de deterioro posterior a la aplicación de las mismas, ayudando así a la toma de decisiones para las inversiones en la infraestructura (FICEM, 1996), (Turrado R. 2016, pág. 15 al 18).

2.1.2 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

Con el objetivo de unificar los diferentes parámetros que se utilizaban en diferentes países para determinar la regularidad superficial de las carreteras, se realizó en Brasil en 1982, el proyecto International Road Roughness Experiment (IRRE), promocionado por el Banco Mundial; en el cual participaron equipos de investigación de Brasil, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Bélgica. En este proyecto se realizó la medición controlada de la regularidad superficial de pavimentos para un número de vías bajo diferentes condiciones y con una variedad de instrumentos y métodos. A partir de dicho proyecto se seleccionó un parámetro de medición de la regularidad superficial, el cual satisface completamente criterios de ser estable en el tiempo, transferible y relevante, denominado Índice de Regularidad Internacional (IRI, International Roughness Index) (Badilla V., Elizondo A., Barrantes J., 2008 pág. 10)

El Índice Internacional de Rugosidad, mejor conocido como IRI (International Roughness Index), fue propuesto por el Banco Mundial en 1986 como un estándar estadístico de la rugosidad y sirve como parámetro de referencia en la medición de la calidad de rodadura de un camino. El Índice Internacional de Rugosidad tiene sus orígenes en un programa norteamericano llamado Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP) y está basado en un modelo llamado "Golden Car" descrito en el reporte 228 del NCHRP. (Arriaga P., Garnica A., Rico R., 1998 pág. 9).

El Índice Internacional de Rugosidad es el primer índice de perfil ampliamente utilizado, donde el método de análisis está adaptado para trabajar con diferentes tipos de equipos de medición de rugosidad y se puede decir que es una propiedad del perfil de un camino. Las ecuaciones de análisis fueron desarrolladas y

ensayadas para minimizar los efectos de algunos parámetros de mediciones de perfil, tales como el intervalo de muestreo.

Paterson en 1986, define el IRI como: “El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la rugosidad del camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS80, Reference Veragüe Rectified Slope, razón entre el movimiento acumulado de la suspensión y la distancia recorrida) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, (RQCS, Reference Quarter Car Simulation), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h”. (Badilla V., Elizondo A., Barrantes J., 2008 pág. 11)

El cálculo del Índice Internacional de Rugosidad se basa en un modelo matemático llamado Cuarto de Carro (Quarter-Car). El sistema del Cuarto de Carro calcula la deflexión de la suspensión de un sistema mecánico simulado como una respuesta similar a la que tuviera el pasajero, Los desplazamientos de la suspensión del modelo son acumulados y divididos entre la distancia recorrida para dar el Índice Internacional de Rugosidad, en unidades de m/km., mm/m, in/mi, etc.

El modelo se muestra en la figura siguiente, que incluye una rueda representada por un resorte vertical, la masa del eje soportada por la llanta, un resorte de la suspensión, un amortiguador y la masa del vehículo soportada por la suspensión de dicha rueda. (Arriaga P., Garnica A., Rico R., 1998 pág. 10).

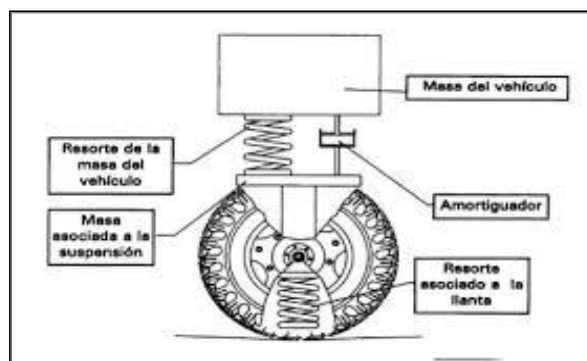


Figura 2 Modelo de cuarto de carro
Fuente: Publicación Técnica 67 IMT.

El rango de la escala del IRI para un camino pavimentado es de 0 a 12 m/km. (0 a 760 in/mi), donde 0 es una superficie perfectamente uniforme y 12 un camino intransitable. En la Figura 3 se presentan las características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según las experiencias recogidas por el Banco Mundial en diversos países. (Arriaga P., Garnica A., Rico R., 1998 pág. 11).

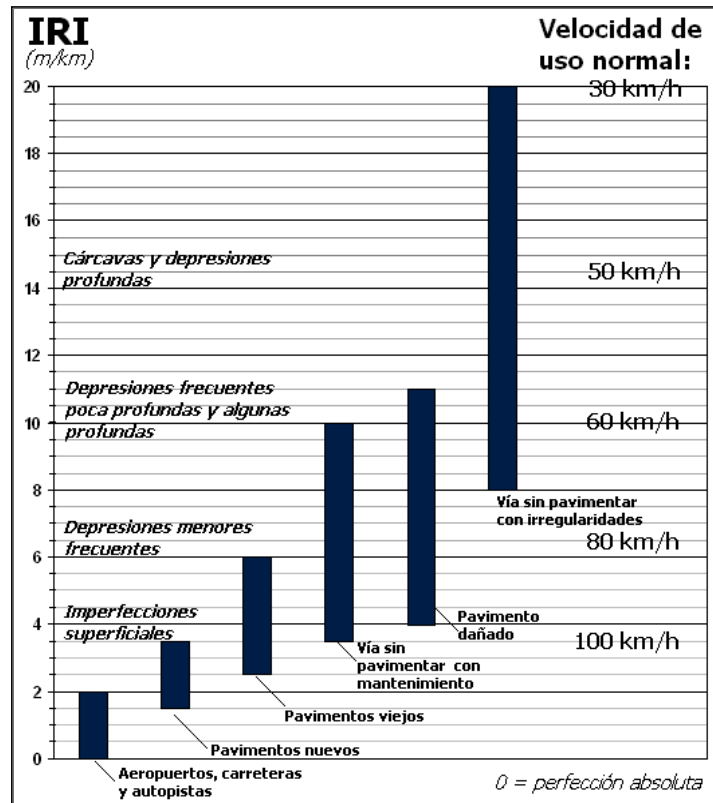


Figura 3 Escala de valores del IRI empleada por el Banco Mundial
Fuente: Adaptado de UMTRI Research Review 2002

2.1.3 Características de la carretera del Tramo 4: Inambari – Azángaro

La carretera Inambari – Azángaro atraviesa zonas muy variadas, pasando por sectores de topografía plana, ondulada y accidentada; transcurre a diferentes altitudes, desde los 3,850 m.s.n.m., en Azángaro, sube hasta los 4,873 m.s.n.m., en el abra Oquepuño, para luego bajar hasta los 370 m.s.n.m., en el Puente Inambari.

En resumen, la vía se inicia en el altiplano en la provincia de Azángaro (Km 51+000), para luego bajar hasta la región de la selva en Inambari (km 356+060), lo que implica una serie de diferentes temperaturas y microclimas diversos.

Tabla 2.

Altitudes del Tramo 4: Inambari - Azángaro

Localidad	Progresiva (Km)	Altitud (m.s.n.m.)
Azángaro	51+000	3847
San Antón	101+600	3947
Abra Oquepuño	164+760	4873
Macusani	182+000	4349
Ollachea	233+000	2700
San Gabán	292+000	628
Puente Inambari	356+094	371

Fuente: OSITRAN

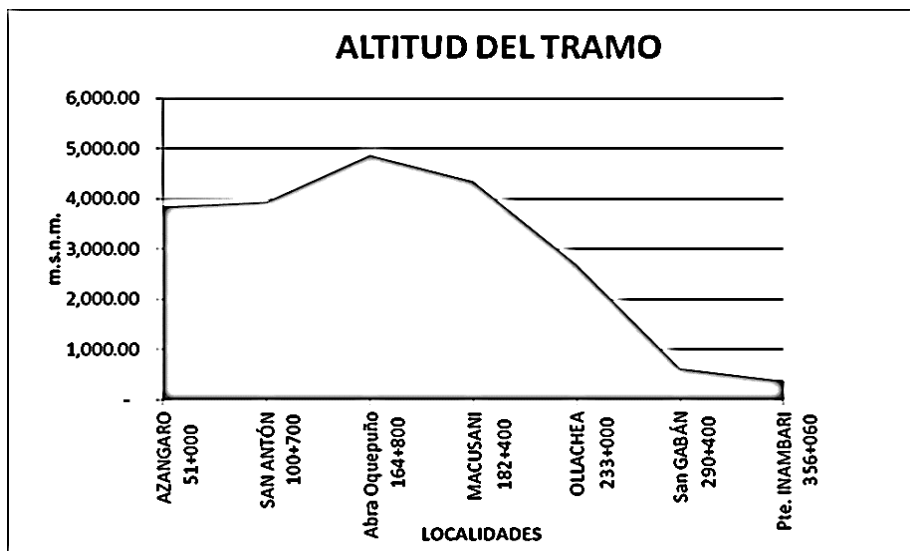


Figura 4 Principales localidades del Tramo 4: Inambari – Azángaro

Fuente: PID INTERSUR Concesiones S.A.

Según su función pertenece al Sistema Nacional de Carreteras PE-34B ubicado íntegramente en la Región Puno, atravesando las provincias de Azángaro y Carabaya. La clasificación por demanda y de acuerdo a datos para la elaboración del Proyecto de Ingeniería, fue clasificado como una carretera de tercera clase con un tránsito

de hasta 400 vehículos día, sin embargo, a la fecha el sub tramo en evaluación supera ampliamente los 1000 vehículos día. Por las condiciones orográficas corresponde a una topografía accidentada (Tipo 3).

El clima en el sub tramo en estudio es frío todo el año, las temperaturas mínimas absolutas durante el año en la estación de Progreso, registran temperaturas desde -12 °C a 3.6 °C y las temperaturas máximas absolutas registran valores de 16.4 °C a 21.6 °C. De igual modo, según la estación de Crucero, las temperaturas mínimas absolutas registran valores desde -20 °C a 2.6 °C y las temperaturas máximas absolutas registran valores de 15°C a 20 °C. Finalmente la estación de Macusani registra temperaturas mínimas absolutas desde -16.4 °C a 0 °C y las temperaturas máximas absolutas registran valores de 12.6 °C a 18 °C.

Las condiciones térmicas evidencian su recurrencia prácticamente durante todo el año, siendo más críticos entre los meses de mayo a agosto, donde los gradientes térmicos presentan valores más elevados, dado los extremos térmicos que se reportan. Esta condición contribuye y repercute significativamente en el desempeño de la estructura del pavimento y sobre todo en la superficie de rodadura asfáltica existente.

Tabla 3.
Temperaturas mínimas absoluta en el área de estudio

Estación	Escenario	Temperatura (°C)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Progreso (3905 msnm)	Mínimo	-5.6	-4.2	-5.8	-7.2	-10.4	-11.6	-12	-11.2	-9.8	-5.4	-6.2	-4.4
	Promedio	0.4	1.1	-1.3	-4.7	-8.3	-9.3	-9.7	-8.5	-6.3	-3.4	-2.1	0.4
	Máxima	3	3.4	2.8	2.2	-6.6	-6.8	-7.8	-6.2	-3.2	2.2	3.2	3.6
Crucero (4130 msnm)	Mínimo	-4.5	-2.8	-5.5	-8.7	-15.6	-17	-20	-16.5	-14.5	-11.2	-8.8	-5.6
	Promedio	-0.7	-0.7	-2.9	-5.8	-11.9	-13.2	-15.5	-13.6	-11.1	-6.3	-6	-3.2
	Máxima	2.6	1	-0.5	-3	-8.4	-10	-12.6	-11.3	-6.4	-3.1	-3.8	0
Macusani (4331 msnm)	Mínimo	-4.2	-3	-3.8	-9	-14	-13.4	-16	-16.4	-13.8	-11	-7.2	-6
	Promedio	-2.3	-1.6	-2.2	-4.6	-9.8	-11.8	-13.8	-12.9	-10.6	-6.1	-5.9	-3
	Máxima	0	0	-0.4	-3	-7	-10.4	-10.6	-10	-7.4	-2.4	-3.4	-1

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID Km 51+000 – Km 107+000

Tabla 4.
Temperaturas máximas absoluta en el área de estudio

Estación	Escenario	Temperatura (°C)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Progreso (3905 msnm)	Mínimo	16.4	18.2	17.4	17.4	17.8	17.4	17.6	18.2	17.8	19.8	19.4	18.6
	Promedio	18.6	19	18.7	18.4	18.4	18.5	18.2	19	19.8	20.3	20.6	19.6
	Máxima	20.2	20.8	20.4	19.6	19.4	20.4	19.4	20.4	21.6	21.2	21.6	20.8
Crucero (4130 msnm)	Mínimo	15.3	15.1	16	15.1	16.2	15.3	15	16.8	15.3	16.6	17.5	16.3
	Promedio	16.3	16.2	17	16.4	17	16.8	16.4	17.7	18.1	17.9	18.5	17.4
	Máxima	17.6	16.8	20	17.5	18	18.5	17.2	19	19.9	19.1	20	18.9
Macusani (4331 msnm)	Mínimo	12.8	12.6	13.4	13	13.8	14	13.6	14	13.2	14.8	15	13.8
	Promedio	14.3	14.2	14.8	14.5	14.8	14.7	14.6	15.2	15.4	15.8	16.4	15.2
	Máxima	16.4	16	16.2	16.2	15.6	15.6	15.6	16.2	18	16.6	17.6	16.8

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID Km 51+000 – Km 107+000

Respecto a las precipitaciones, se distinguen claramente dos periodos o estaciones. La estación húmeda que va desde octubre hasta abril, mientras que la estación seca que va desde mayo hasta setiembre. La precipitación media anual registradas en las estaciones de Progreso, Crucero y Macusani, alcanzan valores del orden de 593 mm, 498 mm y 684 mm, respectivamente.

Tabla 5
Precipitaciones mensuales del área de estudio

Estación	Escenario	Precipitación Mensual (mm)												Total
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Progreso (3905 msnm)	Año seco	130	73	52.4	4.6	6.2	0	0	0	7.6	49.6	26.5	156	506
	Año promedio	119	123	92.1	34.6	5.6	0.5	1.5	3.9	22.4	43.4	47.1	111	593
	Año húmedo	136	181	123	43.6	8	2.4	2.9	4.2	8.2	81.4	30.4	124	744
Crucero (4130 msnm)	Año seco	103	67.9	61	18.4	3.5	0.2	4.4	0	36.7	38.7	21.5	S/D	355
	Año promedio	116	78.5	65	21	7.6	4.1	1.5	5.2	22.2	43.5	50.8	90.7	498
	Año húmedo	123	142	41.8	23.1	20	14.8	0	17.4	10.6	78.1	56.8	103	630
Macusani (4331 msnm)	Año seco	109	82.2	101	31.7	7.5	0	1	0	4	59.1	53.6	96.8	547
	Año promedio	142	116	94.4	69.1	8.8	2.5	1.8	6.2	18.4	46.3	60.8	131	684
	Año húmedo	93.5	126	56.8	329	11.5	0	1.7	0	14.5	23	103	112	870

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID Km 51+000 – Km 107+000

Finalmente se incluyen las condiciones de vientos registrados en estaciones de Progreso, Crucero y Macusani, las mismas que alcanzan valores promedio de 4.4 m/s, 1.7 m/s y 3.0 m/s respectivamente. Los datos se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 6.
Velocidad del viento del área de estudio

Estación	Escenario	Velocidad del viento (m/s)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Progreso (3905 msnm)	Mínimo	2.3	1.9	3	3.2	3.4	3.5	3.8	4.1	4.8	4	3.3	3
	Promedio	3.7	3.7	3.8	3.8	4.1	4.1	4.6	5	5.7	5.6	5	4.2
	Máximo	4.6	5.4	4.7	5	5.1	5.6	5.5	5.9	6.5	6.6	6.1	5.4
Crucero (4130 msnm)	Mínimo	1.4	1.1	1.5	1.2	0.7	1	0.9	1.1	1.2	1	1.2	1.2
	Promedio	1.8	1.7	1.9	1.6	1.4	1.3	1.5	1.7	2	1.7	1.6	1.7
	Máximo	2.2	2	2.3	2	1.9	1.6	1.9	2.6	3	2.3	1.9	2.2
Macusani (4331 msnm)	Mínimo	2.8	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.8	2.8	2.7	1.6	2.6	2.7
	Promedio	3	3	3	3	2.9	2.9	3.1	3	3.3	2.8	2.9	3
	Máximo	3.2	3.3	3.3	3.4	3.1	3.4	3.2	3.2	4.3	3.2	3.3	3.2

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID Km 51+000 – Km 107+000

Las condiciones de temperatura, precipitaciones y vientos del área en evaluación, demuestran las condiciones severas y efectos de deterioro ambiental a los que está expuesto el pavimento existente, que se suman a los efectos del tránsito vehicular.

Los parámetros de diseño presentan cuatro sub tramos definidos y se muestran en el cuadro siguiente:

Tabla 7.
Características técnicas de la vía

Característica	Sub tramo 1	Sub tramo 2	Sub tramo 3	Sub tramo 4
Inicio	Km 51+000	Km 75+200	Km 100+500	Km 140+000
Final	Km 75+200	Km 100+500	Km 140+000	Km 182+500
Longitud real (campo)	24 Km + 200 m	25 Km +300 m	39 Km +500 m	42 km + 500 m
Velocidad directriz	30 y 40 km/h	30 y 40 km/h	30 y 40 Km./h	30 y 40 Km./h
Ancho de superficie de rodadura	6.60 m.	6.60 m.	6,60 m	6,00 m
Ancho de bermas	1.20 m. a c/lado	0.50 m. a c/lado	1.20 m	0.70 m

Característica	Sub tramo 1	Sub tramo 2	Sub tramo 3	Sub tramo 4
Ancho total	9.00 m	7.00 m	9.00 m	7.40 m
Radio mínimo	25 y 50 m	25 y 50 m	25.00 y 50.00 m	25.00 y 50.00 m
Radio mínimo excep	15 m	15 m	15 m	15 m
Pendiente máxima	8 y 12	8 y 12	8 y 12	8 y 12
Bombeo	2.50%	2.50%	2.5%	2.5%
Cunetas revestidas	1.00 m x 0.50 m, 0.80 x 0.30 m	1.00 m x 0.50 m, 0.80 x 0.30 m	1.00 m. x 0.50 m, Rectangular 0.70 x 0.70 m	1.00 m. x 0.50 m, Rectangular 0.70 x 0.70 m
Talud de relleno	1.5 H : 1 V	1.5 H : 1 V	1.5 H : 1 V - 2.0 H : 1 V	1.5 H : 1 V - 2.0 H : 1 V
Talud de corte	De acuerdo al material	De acuerdo al material	De acuerdo al material	De acuerdo al material

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID ITMP Km 51+000 al Km 182+000

La estructura del pavimento y características de las mezclas del pavimento se muestran a continuación:

Tabla 8.

Estructura del pavimento

Tramo de carretera		EAL diseño	Estructura Pavimento según diseño (espesores cm)			Parámetros Resistentes	
Del	Al	10 años	Carpeta Asfáltica	Base Granular	Sub base Granular	Numero Estructural SN (PID)	Mr subrasante psi (PID)
51+000	75+200	2,11E+06	9,00	20,0 y 15,0	20,0 y 30,0	3,73	13165
100+480	140+000	1,59E+06	7,50	15,0 y 20,0	25,0 y 20,0	3,30	13201
140+000	182+250	1,16E+06	7,50	20,00	20,0	3,20	13201

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID ITMP Km 51+000 al Km 182+000

Tabla 9.

Características de la mezcla producida para la carpeta asfáltica

Del	Al	Cantera	Filler	Cemento Asfáltico	Contenido PEN	Vacíos de aire
51+000	75+200	San Antón y Progreso	1% Cemento	PEN 120/150	6.85%	2.65%
102+500	122+000	San Antón y Progreso	1 % Cemento	PEN 120/150	6.85%	2.65%
122+000	137+000	Antauta	1 % Cal hidr	PEN 120/150	7.30%	2.55%
137+000	162+500	Antauta	1 % Cal hidr	PEN 120/150	7.30%	2.55%
162+500	182+250	Macusani	1 % Cal hidr	PEN 120/150	730%	2.60%

Fuente: INTERSUR Concesiones S.A. PID ITMP Km 51+000 al Km 182+000

La antigüedad del pavimento del sub tramo en estudio, a la fecha supera los 10 años de vida útil, existiendo un sector entre el Km 75+000 al Km 100+000 de mayor antigüedad (construido con anterioridad al inicio de la concesión), en el que se realizó una intervención con la colocación de un micropavimento en el año 2015. La edad del pavimento, el incremento del tránsito y la agresividad de los agentes medioambientales hacen necesaria las intervenciones de Mantenimiento Periódico.

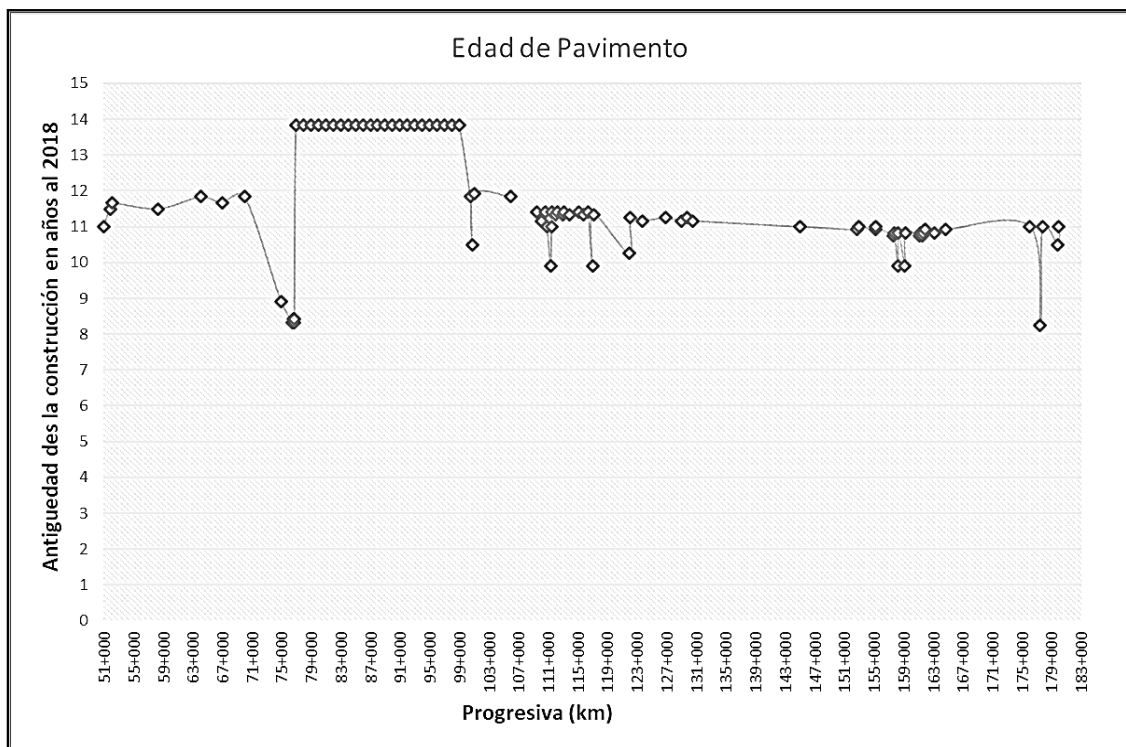


Figura 5 Edad del pavimento
Fuente: PID INTERSUR Concesiones S.A

2.1.4 Artículos técnicos

George, K P., Rajagopal, A S., Lim, L K. (1989), sostienen que la medición y la predicción del rendimiento del pavimento es un elemento crítico de cualquier sistema de gestión del pavimento (PMS). La calificación de condición de pavimento (PCR), es una estadística compuesta derivada de condiciones funcionales y estructurales y se utiliza como medida de la capacidad de servicio. Luego de la revisión

de los diferentes tipos de modelos de predicción, los autores concluyeron que un modelo empírico-mecánico es el más adecuado, con una base de datos sistemática que incluye información estructural, volumen de tráfico y datos de condición para cada sección "homogénea" de la carretera. Los pavimentos con una superficie de hormigón asfáltico se agrupan en tres categorías (pavimentos sin revestimiento, pavimentos con revestimiento y pavimentos compuestos), y se desarrollan ecuaciones de predicción para cada uno de ellos. Las ecuaciones se validan comparándolas con varios modelos existentes, tanto de forma empírica como mecánica. En los tres modelos de predicción, la edad es, con mucho, el predictor más significativo de capacidad de servicio.

A. Sotil y K Kaloush (2004), esta ponencia presenta el desarrollo de una familia de curvas maestras que servirían para predecir con exactitud cuánto es lo que resta de vida útil a un pavimento. Este concepto está basado en principios mecanísticos-empíricos ya que toma en cuenta el comportamiento típico de pavimentos, así como también una gran cantidad de datos tomados en el campo. La forma de caracterizar la vida del pavimento es mediante el uso del Índice de Condición del Pavimento (Pavement Condition Index – PCI). Este PCI está basado en un sistema de deducción de puntos basado en el Tipo, Extensión y Severidad de las fallas más comunes en los pavimentos. El modelo escogido fue la curva sigmoideal (o en forma de S) ya que representa el comportamiento más común en un pavimento; esto es, una disminución lenta de la condición del pavimento en los primeros años, para luego empezar una disminución más acentuada, para terminar con una disminución lenta ya que se llega a un límite en donde mayor deterioro al pavimento no puede ser posible. El modelo fue calibrado usando datos reales obtenidos en la ciudad de Delhi, Ohio, teniendo en consideración variables como el tipo de pavimento, el valor promedio de tráfico diario, el tipo de uso de la vía, y el tiempo para llegar a fallar.

H.P. Hong, S.S. Wang (2007) en su investigación de modelado estocástico de rendimiento del pavimento, sostienen que el deterioro del rendimiento del pavimento no se puede predecir precisamente porque el tráfico y las acciones

ambientales, así como las propiedades del material y las variables geométricas de los sistemas de pavimento son inciertas. Por lo tanto, la predicción del rendimiento del pavimento debe llevarse a cabo sobre la base de un marco probabilístico. En este estudio se desarrolla un enfoque probabilístico simple para predecir el rendimiento del pavimento. El enfoque se basa en una cadena de Markov continua no homogénea. Se explora su uso junto con los modelos de deterioro de pavimento flexible en el Análisis de costo de pavimento de Ontario (OPAC) y en la guía AASHTO. El enfoque propuesto es más eficiente que los encontrados en la literatura, ya que la matriz de transición de probabilidad en este estudio depende solo de dos parámetros del modelo, uno que controla la intensidad de la transición y el otro que controla la transformación del tiempo. El enfoque propuesto parece ser capaz de imitar bien el proceso de degradación del pavimento predicho por los modelos OPAC y AASHTO.

Badilla Vargas. (2011), afirma que diferentes investigaciones realizadas, revelan que los costos de operación de los vehículos dependen de la magnitud de las irregularidades superficiales del pavimento que afectan la velocidad de circulación, el desgaste de las llantas y el consumo de combustible. Los efectos dinámicos producidos por las irregularidades de las carreteras, se reflejan no sólo en los vehículos, sino también en modificaciones de estado de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento, lo que puede incrementar los costos en las actividades de conservación y rehabilitación. Conocer la regularidad superficial del pavimento en cualquier momento desde el inicio de su periodo de servicio o en cualquier momento de la vida útil, permitirá definir las acciones de conservación o rehabilitación necesarias en el momento pertinente. Debido a que el Índice de Regularidad Internacional (IRI) es geográficamente transferible, repetible y estable con el tiempo, se ha convertido en medición atractiva y conveniente para el control de calidad de la construcción de nuevos pavimentos. Además de permitir evaluar la regularidad superficial de la carretera, reflejar el confort y seguridad de los usuarios, garantiza indirectamente el desempeño estructural del pavimento.

Rodríguez M., Theoux Z., Gonzales V., (2013), en su investigación de evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos asfálticos en carreteras de Chile, sostienen que los modelos de comportamiento permiten predecir la condición de deterioro de un pavimento y el desarrollo de programas de mantenimiento. Normalmente cuando se evalúa el desempeño de un pavimento a través del modelo de deterioro, el pronóstico corresponde a un valor determinista. Sin embargo, los proyectos de ingeniería de pavimentos tienen un grado de incertidumbre, lo que implica que el adecuado desempeño de la solución no puede ser totalmente asegurado. El objetivo de esta investigación es el de incorporar la probabilidad en el pronóstico del modelo de agrietamiento estructural, para lo cual se utilizó el modelo de iniciación y progresión del agrietamiento del programa HDM-4 bajo diferentes escenarios, definidos según la ubicación geográfica, tránsito y capacidad estructural de carreteras chilenas. Para incorporar la probabilidad en el modelo de comportamiento, se desarrolló un simulador que reproduce el deterioro para un ciclo de veinticinco años de vida, en el cual las variables descriptivas del modelo de comportamiento se representan como variables aleatorias gracias a datos recolectados en terreno. La investigación entrega como resultado una serie de funciones de densidad de probabilidad que representan la respuesta probabilística del modelo de deterioro de catorce grupos de rutas chilenas.

Khavassefat, P., Jelagin, D., & Birgisson, B. (2016), en este documento, se investiga el deterioro de la superficie del pavimento basándose en las mediciones de campo de los perfiles de rugosidad de la superficie obtenidos en Suecia. Proponen una función predictiva para el deterioro de la superficie, basada en el gradiente promedio de las mediciones anuales del perfil de la superficie de la carretera en la red de carreteras de Suecia. Para caracterizar las cargas dinámicas inducidas en el pavimento mediante el tránsito de tráfico, se utiliza un cuarto de modelo de automóvil. Posteriormente, se utiliza un enfoque estocástico no estacionario para obtener la respuesta anual del pavimento a las cargas en movimiento.

Picado M., (2016), en el estudio de desarrollo de curvas de deterioro para pavimentos flexible y factor de incertidumbre, señala que el conocimiento del tiempo adecuado para llevar a cabo una intervención es un factor muy importante, ya que muchas veces se procede con estos trabajos, una vez que el estado de las carreteras es deplorable. Incluso, por desconocimiento del comportamiento de las vías a lo largo del tiempo, se pueden aplicar técnicas de intervención que no son las más adecuadas, según el estado en que se encuentra el camino. La importancia de dicho estudio radica en que la información generada es necesaria para comprender de una mejor manera cómo se encuentran las carreteras actualmente y su comportamiento a lo largo del tiempo. El método utilizado permite acercarse al problema y establecer una caracterización visual de los tipos de deterioros existentes. Con la información obtenida en campo y los historiales de intervención de las carreteras, se pueden generar las denominadas curvas de deterioro.

Saha, P., Ksaibati, K., & Atadero, R. (2017), señalan que, en el estado de Colorado, el Departamento de Transporte de Colorado (CDOT) utiliza su sistema de gestión de pavimentos (PMS) para administrar aproximadamente 9,100 millas de carreteras interestatales, autopistas y carreteras de bajo volumen. Actualmente se están utilizando tres tipos de modelos de deterioro en el PMS existente: curvas de opinión de expertos, familiares y para sitios específicos. Estas curvas se desarrollan utilizando técnicas deterministas. En la técnica determinista, no se consideran las incertidumbres del deterioro del pavimento relacionado con el tráfico y el clima. Los modelos probabilísticos que toman en cuenta las incertidumbres dan como resultado curvas más precisas. En este estudio, se desarrollaron modelos probabilísticos que utilizan el proceso de Markov de tiempo discreto para cinco índices de deterioro: transversales, longitudinales, de fatiga, de rutina y de conducción, como un estudio de caso en carreteras de bajo volumen. Se utilizaron técnicas de regresión para desarrollar las rutas de deterioro utilizando la distribución pronosticada de índices estimados a partir del proceso de Markov. Los resultados indicaron que los índices longitudinales, de fatiga y de rutina tuvieron un deterioro muy lento con el tiempo, mientras que los índices transversales y de marcha mostraron un deterioro más rápido. Los modelos de deterioro desarrollados tuvieron un

coeficiente de determinación (R^2) por encima de 0.84. Como los modelos probabilísticos proporcionan resultados más precisos, se recomienda que estos modelos se usen como curvas familiares en el CDOT PMS para carreteras de bajo volumen.

Sérgio Pacífico Soncim, Igor Castro Sá, d. O., & Felipe Brandão Santos. (2019), desarrollaron modelos difusos para el rendimiento del pavimento asfáltico. La lógica difusa puede convertir variables lingüísticas o cualitativas en valores cuantitativos. Esta característica hace posible reunir la experiencia de los expertos sobre el conocimiento que tienen sobre los factores que afectan el rendimiento del pavimento y su estado. Se aplicaron formularios desarrollados de manera organizada para adquirir el conocimiento de expertos en construcción y mantenimiento de pavimentos. Las variables edad del pavimento, tráfico, Índice de rugosidad internacional (IRI) e Índice de condición del pavimento flexible (FPCI) se asociaron con escalas numéricas y conceptos lingüísticos como nuevo, antiguo, ligero, pesado, bueno, regular y pobre. A partir de la información obtenida mediante la aplicación de formularios, las variables se modelaron con la ayuda del software InFuzzy y se desarrollaron modelos difusos para IRI y FPCI. Para validar el modelo, se usó un ajuste de línea recta para relacionar el pronóstico con los datos observados. Además, se calculó el coeficiente de correlación correspondiente (r) y se analizaron los residuos. Los modelos desarrollados se ajustaron a los datos observados y al coeficiente de correlación $r = 0.71$ y 0.70 , respectivamente.

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Investigaciones internacionales

Andrade V. (2018), en su tesis de mejora de la gestión del mantenimiento de pavimentos urbanos en la ciudad de Valencia a través de la predicción de su deterioro, sostiene que para planificar el mantenimiento del pavimento en el momento adecuado se necesita conocer la evolución del deterioro, o lo que es lo mismo, la predicción del estado futuro de las vías. En este sentido, aparecen nuevas metodologías,

como las curvas de regresión, las cadenas de Markov o las redes neuronales. Estos métodos deben calibrarse para poder predecir la evolución del deterioro bajo diferentes características, condiciones y particularidades de las vías.

Efectúa la revisión de los métodos de predicción de la condición del pavimento para la realización de sistemas de gestión de mantenimiento, mencionando que dentro de los métodos comunes utilizados para la predicción de la condición se encuentran los empíricos de regresión y de cadenas de Markov, siendo de naturaleza determinística y probabilística respectivamente, sin embargo, con el paso de los años a su vez han ido apareciendo otros métodos que han sistematizado la evaluación como las Redes Neuronales, el HDM-4, etc.

El modelo de Análisis de Regresión realiza un análisis de tendencia del comportamiento en el tiempo, a través de datos históricos que han sido recolectados durante la vida útil de la infraestructura. Los datos necesarios para el uso del modelo de regresión deben ser agrupados con características similares como: estructura, tránsito, clima, etc.

Las metodologías a través de las cadenas de Markov son utilizadas para determinar a través de análisis probabilísticos el estado futuro de la infraestructura de un pavimento basándose de su estado actual. El análisis probabilístico se realiza en base a la Matriz de Transición de Probabilidades (MTP), el mismo que describe el comportamiento con variaciones probabilísticas de un estado a otro.

Los métodos realizados en base a cadenas de Markov entregan resultados de tipo probabilísticos para la evolución de deterioros los mismos que pueden ser cuantitativos y cualitativos a partir de datos como la distribución de información histórica y encuestas a expertos.

Márquez M., (2013), en su tesis de aplicación de cadenas Markov al modelado de deterioros de pavimentos en México, utiliza cadenas de Markov

homogéneas apoyándose de la simulación Monte Carlo para obtener curvas representativas de deterioro del pavimento. Existen diversos métodos para evaluar la predicción del deterioro los cuales se pueden categorizar en cuatro tipos: subjetivo, puramente mecanicista, regresión y empírico-mecanicista; estos a su vez pueden ser categorizados en probabilísticos y deterministas. Aborda una metodología basada en cadenas de Markov apoyada en la simulación de Monte Carlo, el cual es un proceso estocástico que depende únicamente del estado actual del proceso y no de los estados anteriores al mismo. La modelación del deterioro estudiada se enfoca únicamente en la progresión de IRI como un indicador de deterioro del pavimento. Se prepararon series de datos consistentes de IRI de dos tramos carreteros en México, estos valores se promediaron para segmentos de cien metros de longitud y se agruparon en rangos para estimar el cambio de la regularidad del pavimento al pasar de un año a otro. Los resultados de los modelos elaborados denotan un comportamiento típico de degradación del pavimento en los tramos estudiados. El modelo de predicción del deterioro con base en IRI utilizando cadenas de Markov presenta varias ventajas entre ellas destaca el hecho que se requieren pocos datos para su implementación, lo que se traduce en un menor costo comparado con otras alternativas.

Las cadenas de Markov aplicadas al deterioro de pavimentos se pueden a su vez clasificar en homogéneas y no homogéneas. Las cadenas homogéneas suponen que las variables como tráfico (expresados en ejes equivalentes o espectros de carga) clima (temperatura, precipitación, etc) se mantienen constantes a través del periodo de análisis, en contraparte las cadenas no homogéneas suponen la variabilidad del tráfico, clima, etc.

Expuso la aplicabilidad de las Cadenas de Markov para predecir el deterioro del pavimento en carreteras de México en función del Índice de Regularidad Internacional (IRI).

Cirera B, Cataluña (2010), enfoca su investigación en el indicador funcional I.R.I. (Índice de Regularidad Internacional) que mide el grado de

comodidad con el que el conductor circula por una carretera, sin embargo, es un parámetro del que no se conoce a ciencia cierta su evolución en el tiempo, al depender de una gran variedad de variables, algunas de ellas difíciles de cuantificar. Se puede resumir en: los ejes pesados que circulan por la carretera, los factores climáticos como la lluvia, la nieve, las variaciones de temperatura experimentadas y la zona climática en la que se encuentra, el tipo y estructura del firme (rígido, semirrígido, flexible, semiflexible), el porcentaje de fisuras que presenta y la profundidad que abarcan (tanto a nivel longitudinal como transversal), la presencia de roderas u otras degradaciones, las condiciones de puesta en obra de las diferentes capas del firme, el propio tiempo en servicio de la carretera, las actuaciones de mantenimiento y de refuerzo que se han realizado. Todos estos condicionantes influyen en mayor o menor medida en la regularidad y en su variación con el tiempo.

El objetivo de su investigación es el estudio en profundidad del indicador funcional llamado Índice de Rugosidad Internacional (IRI), analiza las auscultaciones de IRI realizadas en un conjunto de carreteras de la Red Básica de Cataluña entre los años 2003 y 2009, para observar la tendencia que tiene el parámetro en cuestión y ver las variables de las que depende, tanto a nivel cualitativo como poder cuantificar dicho grado de dependencia en alguna ecuación simplificada. Además, analiza los modelos planteados a nivel mundial que existen desde los que son bastante más complejos basados en los sistemas de redes neuronales, hasta otros muchos más sencillos que relacionan el IRI de final de proyecto, con los ejes pesados que han pasado por la carretera o el grado de fisuración que presenta esta.

Prozzi J.A. (2001), en su investigación señala que la predicción precisa del rendimiento del pavimento es importante para la gestión eficiente de la infraestructura de transporte de superficie. Al reducir el error de la predicción de deterioro del pavimento, las agencias pueden obtener importantes ahorros presupuestarios a través de una intervención oportuna y una planificación precisa.

El objetivo de su investigación fue la elaboración de una metodología para desarrollar modelos precisos de deterioro del pavimento que se utilizarán principalmente para la gestión de la infraestructura vial. La pérdida de la calidad de condición del pavimento fue seleccionada como el indicador de rendimiento. Se utilizaron dos medidas de calidad de condición: capacidad de servicio (índice de servicio actual, PSI) y rugosidad (índice de rugosidad internacional, IRI).

Los modelos incrementales iniciales desarrollados en esta tesis predicen la capacidad de servicio en función de las propiedades del material, las características estructurales del pavimento, la configuración del eje de tráfico, la carga por eje y las variables ambientales. Estos modelos se desarrollaron aplicando técnicas de estimación no lineales utilizando un conjunto de datos de panel desequilibrado experimental (AASHO Road Test). La heterogeneidad no observada entre las secciones del pavimento se explicó utilizando el enfoque de efectos aleatorios.

Los modelos de capacidad de servicio se actualizaron utilizando la estimación conjunta con un conjunto de datos de panel de campo (Proyecto MnRoad). El modelo actualizado estima la calidad de condición en términos de rugosidad. Esto fue posible aplicando un modelo de error de medición para combinar ambas fuentes de datos.

2.2.2 Investigaciones nacionales

Ochoa M., Tupac M., Lima (2017), su trabajo se enfoca en determinar si la aplicación de un Sistema de Gestión de Pavimento (SGP) basado en el método estocástico – probabilístico conocido como Markoviano, permite optimizar la asignación de recursos económicos en la conservación de carreteras rurales de tercera clase en el Perú. Para ello, utilizaron como muestra, la base de datos de inspección visual de los pavimentos pertenecientes de la Red Vial 3 Cusco del año 2015, los cuales fueron divididos en cuatro tramos de análisis, cada uno con características diferentes.

En su investigación sostienen que para que un SGP sea eficiente es necesario predecir el comportamiento que tendrá el pavimento, esto se basa en modelos de deterioro que simulen el comportamiento del pavimento en el tiempo. Los modelos de predicción de deterioro son importantes para desarrollar un SGP completo, ya que sin ellos no se podría estimar la condición final de un pavimento después de un tiempo dado. Dichos modelos se basan en métodos probabilísticos (aquellos donde algún elemento no se conoce con anticipación, incorporándose así la incertidumbre), y determinísticos (aquellos donde los datos se conocen con certeza; es decir, no contemplan el azar ni el principio de incertidumbre), ellos pueden ser clasificados como:

- Estocásticos – Probabilísticos (1 - 2 años de datos históricos)
- Empíricos (5 - 8 años de datos históricos)
- Mecánicos – Empíricos (15 – 20 años de datos históricos)

El objetivo general fue determinar si la aplicación de un SGP basado en el método estocástico – probabilístico, permite optimizar la asignación de recursos económicos destinados a la conservación de pavimentos rurales de tercera clase.

Tenorio M., Lima (2005), desarrolla la tesis modelos de predicción del deterioro de pavimentos con el objeto de elaborar una guía o texto básico de los modelos de predicción del deterioro de pavimentos, presentar los diferentes modelos de predicción existentes y mostrar las técnicas desarrolladas para el modelamiento.

Sostiene que la predicción del deterioro de los pavimentos es un componente importante de en un sistema de gestión de pavimentos. De esta manera a fin de predecir el deterioro que pueden sufrir los pavimentos a lo largo de su vida útil, se utilizan distintos tipos de modelos de comportamiento (o modelos de deterioro). Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, basándose en las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del

análisis. Además, permiten pronosticar los efectos, a corto y a largo plazo, del mantenimiento efectuado sobre ellos, con el objetivo de realizar estimaciones razonables tanto de las oportunidades en que sea necesario llevar a cabo alguna conservación, como del nivel de deterioro resultante luego de la misma y su progresión en el tiempo.

Por lo anterior, es necesario el conocimiento claro de los modelos de deterioro de pavimentos, de tal manera que su aplicación sea la correcta, tomando en cuenta no solo las características propias del lugar en las que se pretende utilizar, sino también, los recursos disponibles de las Agencias de Caminos que planeen emplearlas.

Jaña, A, Lima (2016), su investigación está basado en la necesidad de adoptar la guía de diseño M-E para el trabajo futuro de diseño de pavimentos y otorgar una herramienta de diseño actualizada en el Perú, siendo el objetivo principal el de calibrar los modelos tráfico y clima de la guía de diseño M-E a las condiciones locales de la región de Piura a través de datos y resultados generados a partir de este proyecto de investigación.

Establece los lineamientos y pasos a seguir para implementar los modelos de tráfico y clima de MEPDG en Piura. Adicionalmente empleando los modelos de deterioro calibrados en Norte América (fisuramiento, deformación plástica y regularidad superficial) se realizan modelaciones y aplicaciones para diseños específicos en la región. Finalmente se entregan las conclusiones, observaciones y consideraciones que el ingeniero de pavimentos deberá de tener en cuenta al momento de diseñar.

En relación a las condiciones de entrada, refiere que todos los modelos de rendimiento de la guía de diseño M-E fueron calibrados a nivel mundial para el desempeño fiel observado a partir de una muestra representativa de sitios de prueba de pavimentos a lo largo de América del Norte. Para conocer el rendimiento de los pavimentos a largo plazo se utilizaron secciones de prueba que participaron ampliamente en el proceso de calibración proporcionado por la base de datos del LTTP, debido a la

consistencia en los datos monitoreados a través del tiempo y la diversidad de las secciones de prueba repartidas por toda Norteamérica. Sin embargo, existen políticas de conservación de pavimento y especificaciones de mantenimiento, construcción y materiales que varían entre los mismos estados que forman Estados Unidos y sobre todo en otros lugares del mundo y que no se consideran directamente en la guía de diseño M-E. Estos factores pueden ser considerados indirectamente a través de los parámetros de calibración locales incluidos en la guía de diseño M-E. El propósito de esta tesis fue proporcionar una guía en la calibración de la guía de diseño M-E a las condiciones locales y materiales que no hayan sido incluidos en el proceso de calibración mundial y que son propios del departamento Piura.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1 Deterioro del pavimento

El grado de deterioro de un pavimento flexible es función del tipo de defecto observado, de su severidad y de su densidad (o área afectada de pavimento). La estructura de un pavimento es sometida a diversos factores que modifican su condición (Márquez M., 2013, pág. 6).

Un pavimento inicia su vida en una condición cercana a la perfección y después es sujeto a una secuencia de ciclos pesados que le causa una condición de deterioro (MacLeod y Walsh, 1998; Waqar et al., 2011). Comúnmente un ciclo pesado se define como la duración de un año de clima y tránsito.

Los pavimentos representan las evaluaciones más extensas y caras para las agencias de transporte. Los sistemas de gestión de pavimentos proveen modelos de deterioro y de expectativa de vida sensitivo a los factores que son importantes para cada agencia (Thompson et al., 2012).

El deterioro del pavimento a través del tiempo es un proceso continuo originado por diversos factores como el tránsito, clima, propiedades de los materiales que

constituyen la estructura del pavimento, edad del pavimento, las acciones de mantenimiento llevadas a cabo, entre otros.

De acuerdo con su diseño y calidad de construcción, un pavimento inicia su vida en operación, a un nivel cercano a la perfección y se va degradando gradualmente por los factores antes mencionado.

Si bien el proceso de deterioro es un proceso continuo, su comportamiento en el tiempo no es lineal. Durante los primeros años el estado del pavimento tiende a decaer más rápidamente y conforme transcurre el tiempo, el estado tiende a estabilizarse para reflejar una curva más o menos definida. (Márquez M., 2013, pág. 8).

En términos generales se entenderá por deterioro de pavimentos a una serie de manifestaciones superficiales de la capa de rodadura, haciendo que la circulación vehicular sea menos segura, menos confortable y que los costos de operación sean mayores.

El comportamiento de los pavimentos a lo largo de su vida útil es regido generalmente por un ciclo, el cual ha llegado a considerarse como normal debido a la frecuencia con que se presenta, los indicadores (deterioros del pavimento) de cada una de las etapas de este ciclo son diferentes según el tipo de pavimento, sin embargo, la tendencia en la evolución de la estructura a través del tiempo es común y puede describirse de la siguiente manera:

a. Etapa de Construcción

Un pavimento puede haber tenido una buena construcción o haber presentado algunos defectos durante esta etapa, o bien haber sido claramente deficientes tanto la etapa de diseño como la de ejecución. De cualquier manera, cuando la estructura del pavimento entra en servicio, suele encontrarse en ese momento en

excelentes condiciones de niveles de servicio para satisfacer las necesidades de los usuarios.

b. Etapa de deterioro lento y poco visible

Durante algunos años, el pavimento experimenta un proceso de desgaste y debilitamiento lento, principalmente en la superficie de rodadura y en menor medida en el resto de su estructura. Este desgaste es producto de los diversos tipos de vehículos livianos y pesados que circulan sobre él, también por la influencia que ejercen otros factores como el clima, la radiación solar, el agua de lluvias, cambios de temperatura, etc. La calidad de la construcción inicial también incide en el desgaste y evolución del deterioro.

A través de toda esta etapa el pavimento se mantiene aparentemente en buen estado que el usuario no lo percibe fácilmente. A pesar del aumento gradual de fallas menores aisladas, el camino presta buen servicio a los usuarios y está en condiciones de ser conservado para disminuir el proceso de desgaste y debilitamiento del pavimento.

c. Etapa de deterioro acelerado

Luego de varios años de servicio, el pavimento entra en una etapa de deterioro acelerado y resiste cada vez menos el tránsito. Al inicio de esta etapa, la estructura básica del pavimento se conserva intacta y las fallas en la superficie son menores, por ello el usuario común tiene la impresión que este se mantiene aún bastante sólido. Sin embargo, cada vez se pueden observar más daños en la superficie y comienza a deteriorarse la estructura básica, la cual no es visible.

Entonces, se puede aseverar que cuando en la superficie de un pavimento se detectan graves fallas a simple vista, la estructura básica del pavimento está seriamente dañada. Los daños al inicio son puntuales, pero luego se van extendiendo en

la mayor parte del pavimento. Cuando esto ocurre la destrucción es acelerada; si no se interviene en algún momento durante esta etapa el pavimento llega al punto de quiebre en el cual se produce una falla generalizada, tanto en la superficie como en la estructura básica. Esta fase es relativamente corta y su destrucción es acelerada.

A medida que se desarrolla esta etapa, los vehículos que circulan experimentan crecientes molestias a causa de las irregularidades de la superficie, tales como: grietas, baches, depresiones y deformaciones.

d. Etapa de descomposición total

La descomposición total es la última etapa de la existencia de un pavimento, y puede durar varios años, lo primero que se observa es la pérdida de la capa de rodadura, ya que cada vez que pasa un vehículo pesado se desprenden trozos de ésta, por lo que al final la vía termina siendo un camino de grava, y a la larga, de tierra. El paso de vehículos se dificulta, la velocidad promedio de circulación baja bruscamente y la capacidad del camino queda reducida considerablemente. Los vehículos comienzan a presentar daños en neumáticos, ejes, amortiguadores y en el chasis; los costos de operación vehicular suben de manera considerable y se incrementa la cantidad de accidentes graves. En esta última etapa llega un momento en que ya no pueden transitar los automóviles normales, sólo algunos camiones y vehículos todo terreno.

Los detalles del ciclo de vida de los pavimentos varían dependiendo de su tipo, pero en general, el mensaje que debe atenderse es el mismo y consiste en que las acciones de conservación de cualquier pavimento deben planificarse debidamente de modo que nunca se permita el deterioro excesivo o la destrucción de su estructura básica. (Argueta M., Castro H., 2009, pág. 48 al 51).

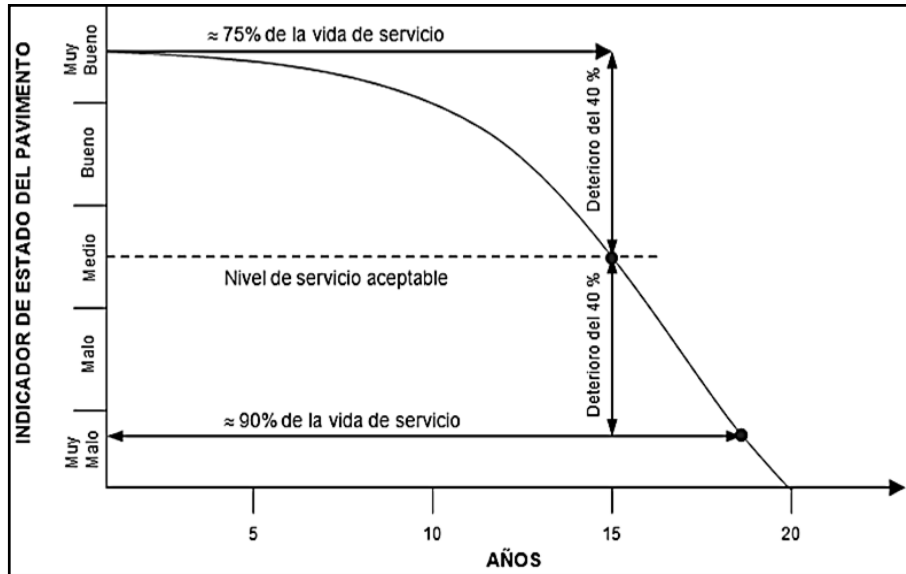


Figura 6: Modelo de deterioro de un pavimento

Fuente: Solminihac, (2001).

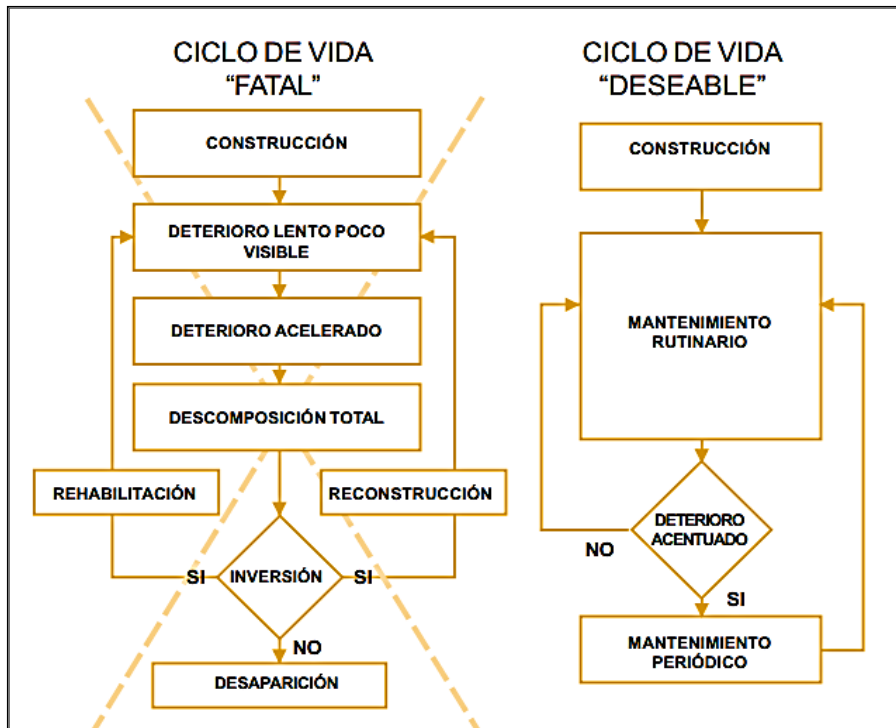


Figura 7: Diagrama del ciclo de vida fatal y deseable de un pavimento

Fuente: Manual técnico OIT (2003).

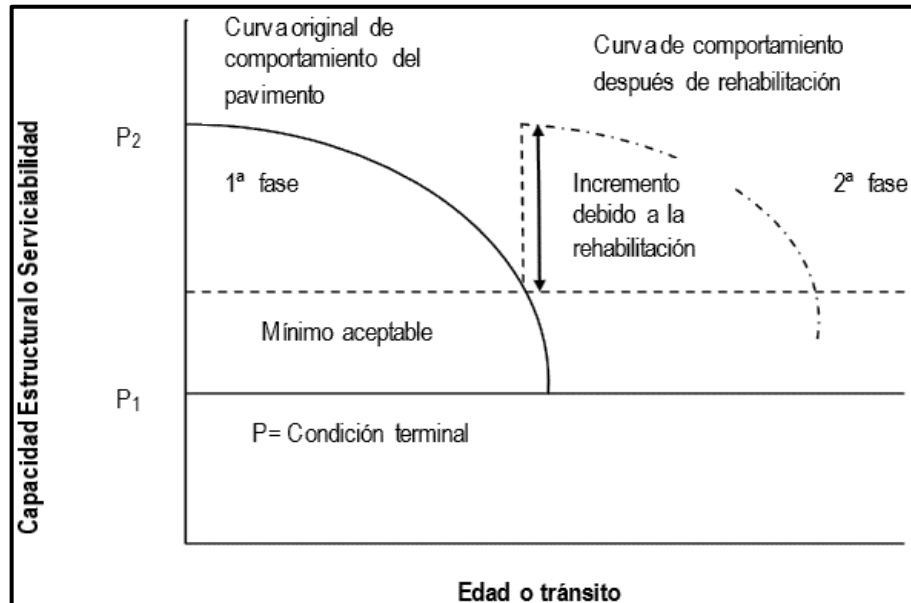


Figura 7: Esquema de deterioro de pavimentos de 1ª y 2ª fase

Fuente: FHWA - Ibíd

Los sistemas de apoyo para las decisiones de gestión de infraestructura deben contar con alguna forma de modelar el deterioro del pavimento. El objetivo del modelo es predecir la condición futura y los efectos de los trabajos de conservación.

2.3.2 Causas del deterioro del pavimento

Son múltiples las causas que determinan el deterioro de los pavimentos, entre ellas se encuentran los siguientes:

- Diseño original
- Tipo de materiales y calidad de construcción
- Volumen de tránsito y carga por eje
- Alineamiento geométrico de la carretera
- Edad del pavimento
- Condiciones ambientales
- Políticas de mantenimiento

El diseño del pavimento es un factor determinante en el desempeño del mismo, La carencia de un diseño adecuado se refleja en deterioros prematuros del pavimento, los cuales se conjugan con otros factores como la calidad de los materiales, tránsito, clima, entre otros.

El efecto del daño de pasada de un eje con cierta más carga puede ser representado por un número de ejes de carga de 18 mil libras o bien llamados ejes sencillos equivalentes (ESALS, por sus siglas en inglés), (AASHTO 1993). Cada eje de carga provoca un daño en el pavimento, expresado en términos de factores de daño o pérdida del nivel de servicio del pavimento (PSI, por sus siglas en inglés).

El tránsito que circula por una vía, su composición vehicular y sus repeticiones de carga expresados en términos de ejes equivalentes sencillo de 8.2 toneladas o bien de espectros de carga juegan un papel importante en el desempeño de un pavimento.

Un buen pavimento provee un confort de marcha satisfactoria, integridad estructural y una segura resistencia a la fricción (Yongqi Li, 2004).

Las variaciones de humedad, temperatura y precipitación afectan el desempeño de un pavimento a lo largo de su vida útil.

Es importante llevar a cabo un adecuado control de calidad durante la fase de construcción y conservación del pavimento, en apego a las consideraciones del diseño realizado para cumplir con su vida útil y el nivel de servicio para el cual fue diseñado.

Realizar acciones de conservación del pavimento puede retardar la manifestación de deterioros en el mismo, dependiendo del tipo de conservación.

Identificar y analizar los factores que afectan el ciclo de vida del desempeño de estructuras de pavimento son esenciales para desarrollar modelos de desempeño. Hudson et al (1997), agrupa los factores que afectan el deterioro de la

infraestructura en 5 categorías: i) carga/uso ii) medio ambiente iii) material iv) calidad de construcción v) efectos de interacción (Márquez M., 2013 pág. 7 y 8).

2.3.3 Indicadores de deterioro

Los indicadores de deterioro del pavimento flexible se agrupan en capacidad funcional, deterioros superficiales y capacidad estructural.

2.3.3.1 Capacidad funcional

Relacionado con la calidad del rodado y la serviciabilidad. Tiene que ver con la regularidad, resistencia al deslizamiento (fricción) y textura. La regularidad del pavimento es la medida más usada para representar el desempeño del mismo, tanto por su costo como por reflejar directamente el confort del usuario (Hunt y Bunker, 2003).

La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción entre el contacto neumático – pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos (López y Garnica, 2001).

La macrotextura es necesaria para una adecuada resistencia al deslizamiento a velocidades medias y elevadas (López y Garnica, 2001).

2.3.3.2 Deterioros superficiales

Relacionado directamente con la pérdida del nivel de servicio del pavimento (Haas et al., 1994).

El grupo de deterioros superficiales está relacionado con los agrietamientos, desprendimientos, baches y roderas.

Tabla 10

Clasificación general de los deterioros de los pavimentos asfálticos

Clase	Tipo de deterioro	Causado originalmente por el tránsito	Causado generalmente por los materiales, el clima o la construcción
Fisuramientos	Fisuramiento por fatiga (grietas longitudinales en la huella y piel de cocodrilo)	X	
	Fisuramiento en bloque		X
	Fisuramiento de borde		X
	Fisuramiento longitudinal (no de fatiga)		X
	Fisuramiento transversal		X
	Fisuras parabólicas		X
	Fisuras de reflexión	X	X
Deformaciones	Ahuellamiento	X	
	Abultamiento		X
	Depresiones (baches)		X
	Desplazamientos de borde		X
	Deterioro de parches	X	X
	Expansiones		X
Desprendimientos	Separación entre calzada y berma		X
	Pulimiento de agregados	X	
	Ojos de pescado	X	
	Descascaramiento		X
	Perdida de película de ligante		X
	Perdida de agregado		X
Afloramientos	Exudación		X
	Afloramiento de agua		X
	Afloramiento de finos	X	X
Otros deterioros	Desintegración de los bordes del pavimento	X	
	Escalonamiento entre calzada y berma		X
	Erosión de las bermas		X
	Segregación		X

Fuente: Elaborado a partir de ASTM D5340, 2013

2.3.3.3 Capacidad estructural

Relacionado directamente con la capacidad estructural del pavimento para soportar adecuadamente las cargas de tránsito diseñadas, entre las que se encuentran las deflexiones y espesores de las capas.

La evaluación de la capacidad estructural del pavimento provee información sobre el comportamiento esperado del pavimento y se realizan generalmente mediante los deflectómetros de impacto que son equipos que transmiten una carga específica al pavimento y miden la deflexión generada en la estructura del mismo.

Es un importante método de evaluación del pavimento ya que la magnitud y forma de deflexión del pavimento es función de su sección estructural, tránsito, temperatura y humedad, afectando la estructura del pavimento (Anastasopoulos et al., 2009).

2.3.4 Sistema de gestión de pavimentos

La gestión de pavimentos es una disciplina que engloba todas las actividades involucradas en la planeación, diseño, construcción, evaluación y conservación de los pavimentos de una red de carreteras (AASHTO, 1993).

Un sistema de gestión de pavimentos (SGP) es un conjunto de herramientas o métodos que asisten a quienes toman decisiones a encontrar la estrategia óptima para proveer, evaluar y mantener pavimentos en buenas condiciones de serviciabilidad en un periodo determinado de tiempo.

Un PMS (por sus siglas en inglés) sirve como un medio por el cual el desempeño del pavimento de un camino, en ambos niveles de red y de proyecto pueden ser monitoreados eficazmente, y los planes de mantenimiento y de rehabilitación adaptados para abordar el deterioro previsto en los caminos. El sistema de gestión de pavimentos incluye las siguientes actividades: colección de datos del inventario de todos los caminos en la red, análisis de datos para evaluar la condición del pavimento de los caminos e identificar cualquier tendencia en la condición del pavimento, y seleccionar la alternativa más económica y factible que atenderá las necesidades del pavimento, asimismo maximizar su capacidad para desempeñarse eficientemente. Sin embargo, hacer esto requiere del uso de modelos de desempeño del pavimento que sean capaces de reflejar los atributos pasados del pavimento y predecir la condición futura del pavimento (Mills et al., 2012).

Los principales objetivos de un sistema de gestión de pavimentos para nivel de red, son desarrollar en el corto y largo plazo requerimientos de presupuestos y producir una lista de proyectos potenciales con presupuesto disponible (Butt et al., 1994).

Se considera un sistema de gestión de pavimentos como un conjunto de operaciones que se ejecutan con el objetivo de conservar por determinado tiempo, las condiciones de seguridad, comodidad y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía en cuestión, minimizando los costos económicos, sociales y ambientales involucrados (Solminihaç, 2001).

De acuerdo con Haas, Hudson y Zaniewski (1994), algunos de los requerimientos esenciales para los sistemas de gestión de pavimentos son los siguientes:

- Capacidad de ser fácilmente actualizados y/o modificados cuando se disponga de nueva información y mejores modelos.
- Capacidad de considerar estrategias alternativas
- Capacidad de identificar la alternativa o estrategia óptima
- Capacidad para tomar decisiones con base en procedimientos racionales con atributos cuantificables, criterios y restricciones.
- Capacidad para usar información para retroalimentar con respecto a las consecuencias de las decisiones.

De acuerdo con las recomendaciones de la Norma ASTM E1166-00, la adopción de un sistema de gestión de pavimentos involucra la integración de las siguientes componentes (ASTM, 2010):

1. Sistema de referencia. Se refiere a un método único y estable para la identificación y referencia espacial de los tramos que constituyen la red de carreteras, así como la información sobre las características y el estado físico de los mismos. Entre los métodos más utilizados pueden mencionarse el sistema arco-nodo, el cadenamamiento, y las coordenadas geográficas.

2. Información requerida por el sistema. Normalmente, los sistemas de gestión utilizan datos pertenecientes a las siguientes categorías:

a. Inventario del pavimento, el cual comprende la clasificación funcional, longitud, número de carriles, ancho de carril y acotamientos, pendiente y curvatura de cada uno de los tramos; diseño estructural de la sección, incluyendo espesores y propiedades de los materiales de las capas constitutivas; características del drenaje e historial de reparaciones.

b. Estado del pavimento, expresado en términos de la irregularidad de la superficie de rodadura; presencia y magnitud de deterioros; deflexiones y otros parámetros de la capacidad estructural del pavimento; espesores y propiedades reales de las capas constitutivas; resistencia al deslizamiento y textura y estado del drenaje.

c. Características del tránsito: volumen, composición vehicular y cargas por tipo de vehículo.

d. Datos climatológicos, entre los cuales pueden mencionarse precipitación, humedad, promedios de temperatura y rangos de variación de la misma.

e. Costos, incluyendo, por una parte, los costos de construcción, mantenimiento, rehabilitación y modernización de los pavimentos, y por otra, los costos relacionados con el uso de la infraestructura por parte de los usuarios, es decir costos de operación vehicular, costos asociados con el valor del tiempo de pasajeros y la demora de mercancías, y costos de accidentes.

3. Manejador de base de datos. Dependiendo del tamaño de la red por analizar, el volumen de información requerido por los sistemas de gestión de pavimentos puede llegar a tener una magnitud considerable, por lo que, en la mayoría de los casos, implica el uso de un manejador de base de datos y de procedimientos computarizados para el almacenamiento, consulta y análisis de la información. Como consecuencia de la vinculación de las carreteras con el entorno y el desarrollo de tecnologías, como los

sistemas de posicionamiento global y los sistemas de información geográfica, en los últimos años se ha observado una tendencia mundial hacia el uso de bases de datos georreferenciadas como respaldo para el desarrollo de sistemas de gestión de pavimentos.

4. Herramientas de análisis. Se refieren a un conjunto de modelos matemáticos que se utilizan como apoyo para las siguientes tareas:

a. Predicción del deterioro del pavimento a lo largo de su vida útil, y estimación de los efectos de las acciones de conservación.

b. Evaluación económica de proyectos de conservación y mejoramiento para tramos específicos, así como de políticas aplicables a toda la red o a partes de ella. Para este propósito se utilizan métodos como el análisis del ciclo de vida o el de costo-beneficio.

c. Definición de prioridades con respecto a los requerimientos de conservación y mejoramiento de la red, a través del análisis de proyectos candidatos, y la programación de los trabajos. Usualmente, los algoritmos para definir prioridades utilizan criterios como el estado del pavimento, tasa del deterioro del mismo, y volumen de tránsito, entre otros.

d. Optimización de los programas de conservación con objeto de maximizar los niveles de desempeño del pavimento o la rentabilidad de las inversiones correspondientes. En la mayoría de los casos, los modelos de optimización utilizan técnicas de programación matemática.

e. Evaluación del impacto de distintas estrategias de conservación y niveles de disponibilidad de recursos en el desempeño de la red.

De acuerdo con la Norma ASTM E 1166-00, la puesta en operación de un sistema de gestión de pavimentos requiere un estudio previo en el que se evalúe su compatibilidad con otros procesos institucionales existentes; su utilidad real en la planeación y programación de los trabajos de conservación y desarrollo de la red; y su

aceptación por parte de los responsables de la gestión de los pavimentos al interior de la organización operadora.

Asimismo, se requiere un plan en el que se definan el equipo y programas de cómputo; equipo de medición; personal y estructura organizacional necesarios para la operación del sistema, así como un programa para su implantación por etapas. El plan debe incluir también, procedimientos para la recopilación; ingreso; validación y actualización de información; generación de informes; y la revisión, calibración y mejoramiento de los modelos del sistema (Márquez M., 2013 pág. 15 al 18).

2.3.5 Modelos de deterioro de pavimentos

Los modelos de deterioro pueden clasificarse según su metodología de cálculo (Has et al., 1994), distinguiéndose entre modelos deterministas, probabilísticos y de lógica Fuzzy; por otro lado, pueden distinguirse según su naturaleza o procedencia de los datos empleados (Robinson et al., 1998), resultando modelos empíricos, empíricos – mecanicistas y mecanicistas, según se muestra en la tabla siguiente: (Turrado R. 2016, pág. 23)

Tabla 11:
Clasificación de modelos de deterioro

		Tipos de modelos de deterioro									
		Deterministas					No deterministas				
		Regresión lineal	Regresiones no lineales				Curvas de supervivencia	Regresión con metodo bayesiano	Proceso de transición		Regresión Fuzy
Regresión parabolica	Regresión exponencial		Regresión hiperbolica	Regresión sigmoideal	Método markoviano	Método semi markoviano					
Nivel de análisis	Red Nacional						X	X	X	X	X
	Red Regional, provincial o concesional	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Proyecto	X	X	X	X	X					
Naturaleza	Mecanicista						X	X	X	X	X
	Empirico mecanicista	X	X	X	X	X					
	Empirico	X	X	X	X	X					

Fuente: Elaborado a partir de SGMS Nicolosi, Has, R. 1994 y Robinson, R. 1998

2.3.5.1 Modelos deterministas

Son modelos de tipo empírico o empírico-mecanicista, por lo que son óptimos para análisis a nivel de proyecto o red local. Se realizan a partir de análisis estadísticos de tendencias de deterioro observadas localmente, pudiendo no ser aplicables fuera de las condiciones específicas en las cuales se basan. Sin embargo, en algunos modelos es posible desarrollar factores de corrección que disminuyan la desviación de dichos modelos, en temas de temperatura, tráfico o características del paquete de firmes (modelos empírico-mecanicista). Existen varias clases de modelos deterministas, dependiendo del tipo de curva que se emplee para realizar la regresión: lineal, parabólica, exponencial, hiperbólica y sigmoideal. Los más empleados son los de tipo regresión lineal, ofreciendo grandes resultados en la mayoría de casos. Hay que resaltar que, en las regresiones estadísticas, el concepto de linealidad se refiere a los parámetros calculados, independientemente del tipo de función asociada a las variables independientes de referencia. Por lo tanto, puede ser que la curva final sea una función logarítmica, calculada a partir de una regresión lineal. Se dice en estos casos, que se trata de una regresión lineal en sus parámetros. Es decir, son regresiones lineales del tipo:

$$f(Y) = Y = \alpha + \beta \cdot f(x) \quad \text{Ec. (1)}$$

Y es el valor estimado del parámetro en análisis

α, β son los coeficientes de la regresión que vienen calculados con el método de mínimos cuadrados.

X es la variable independiente en función de la cual se estima el valor del parámetro en análisis.

f(x) es una función cualquiera de (por ejemplo, X^2 , X^n , o $\ln(x)$)

Como se puede apreciar, la función mostrada es no lineal en función de X, pero lineal en función de los parámetros desconocidos α, β . Este es el sentido del término lineal en el contexto de regresión estadística. Por lo tanto, pueden resultar curvas no lineales, es decir, polinómicas o exponenciales, por ejemplo, tratadas a partir de

regresiones lineales. Así, Modelos de Deterioro no lineales pueden ser considerados, con fines estadísticos, como una regresión lineal, cuyas constantes se calculan por el método de mínimos cuadrados (Nicolosi, 2015), (Turrado R. 2016, pág. 100 al 101).

Modelos Empíricos: son desarrollados en base a datos reales de pavimentos existentes. En dichas bases de datos se han registrado gran cantidad de información referida a diversos aspectos, entre los que tenemos: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc), características de drenaje y de las bermas, datos de tránsito, de condiciones climáticas y de deterioros a lo largo de su vida útil. Luego de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se realiza con ellas un análisis estadístico (análisis de regresión) que da origen al modelo que predice el comportamiento futuro del pavimento.

En los modelos empíricos, la variable dependiente es algún indicador del desempeño del pavimento. Como por ejemplo indicadores del desempeño integrales o compuestos (tales como el PSI, el índice de confort de rodado (RCI), o el PCI), o, indicadores del desempeño individual (tales como: la resistencia al deslizamiento, el ahuellamiento o el agrietamiento). Estas variables dependientes están relacionadas a una o más variables explicativas que representan la resistencia estructural del pavimento, la carga de tránsito, y las condiciones del medio ambiente.

En alguno de estos modelos, las variables explicativas son usadas y descartadas solamente basadas en consideraciones de disponibilidad y las estadísticas de sus parámetros. A menudo, variables relevantes son descartadas debido a su baja importancia estadística (usualmente basadas en la t estadística del parámetro correspondiente). Por otro lado, variables irrelevantes son a menudo incorporados dentro de los modelos basados en algunas consideraciones. Cualquier modelo desarrollado siguiendo tales consideraciones indudablemente sufriría errores de formulación.

La mayoría de las formulaciones disponibles en la literatura son simplemente regresiones lineales. Comúnmente el criterio usado para seleccionar la

mejor formulación entre varias alternativas es obtener el mejor ajuste posible de datos (usualmente medida por el coeficiente de correlación, R^2). Las formulaciones de los mejores modelos empíricos, están basados en las leyes físicas, o al menos, ellos intentan simular el proceso físico real del deterioro.

En ciertos casos el modelo empírico generado puede tener la desventaja de no ser aplicable a pavimentos en condiciones diferentes de aquellas en las que se tomaron los datos.

Modelos Mecanicistas: El desarrollo de modelos mecanicistas se basa en las características de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos, específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de la sub base, la base granular o estabilizada y el pavimento propiamente (de concreto o asfalto). Los modelos mecanicistas representan físicamente el proceso de deterioro del pavimento. Sin embargo, debido a la complejidad del proceso de deterioro y a que se usan parámetros que son difíciles de cuantificar en el campo, esta aproximación es impracticable.

Estos modelos de deterioro usan el comportamiento de los materiales y modelos de respuesta del pavimento, que se cree representa el comportamiento real de la estructura del pavimento bajo la acción combinada del tráfico y el medioambiente. Estos modelos de comportamiento y respuesta son usados para estimar tensiones, esfuerzos y deflexiones en varios puntos de la estructura del pavimento. Estas respuestas críticas son, a su vez, usadas para predecir el desempeño (performance) en términos de deformación superficial y progresión del agrietamiento (agrietamiento por fatiga). Por ejemplo: un modelo de agrietamiento se basa en la determinación del nivel de fatiga acumulado en las losas, el que para ser calculado requiere la utilización de conceptos mecanicistas que permitan conocer las tensiones y deformaciones críticas generadas en función de las cargas de tránsito y del alabeo térmico (wade, 1995).

Aunque ha habido varios esfuerzos, un modelo compresivo y confiable puramente mecanicista no ha sido desarrollado. El Comportamiento de los materiales y

los modelos de respuesta del pavimento actualmente usados son muy simplistas y solo representan el material y la respuesta estructural bajo condiciones limitadas.

Modelos Empíricos – Mecanicistas: Los modelos empíricos – mecanicistas combinan la modelación mecánica con las observaciones del comportamiento de los pavimentos existentes.

Estos modelos usan la caracterización de los materiales (usualmente mediante pruebas de laboratorio) y los modelos de respuesta del pavimento (empleando modelos lineales elásticos o modelos de elementos finitos) para calcular la respuesta del pavimento (tensiones, deformaciones unitarias y deflexiones en varios puntos de la estructura del pavimento). Esta respuesta es causada por las cargas de tránsito, clima o una combinación de ambas. El cálculo de la respuesta del pavimento constituye el componente mecanicista.

Las tensiones y deformaciones calculadas de esta manera se emplean como parámetros de entrada (variables independientes) de modelos empíricos de regresión para predecir el comportamiento del pavimento. Esta parte constituye el componente empírico.

Por lo tanto, un modelo desarrollado usando técnicas de regresión con la respuesta del pavimento como variable independiente se denomina modelo empírico-mecanicista.

Los modelos empíricos basados en análisis de regresión han sido usados por muchos años y constituyen uno de los modelos de deterioro más ampliamente usados. Sin embargo, desde hace 20 años ha habido una tendencia de las agencias de caminos a dirigir sus esfuerzos hacia los modelos empíricos-mecanicistas por el interés desde el punto de vista de la ingeniería.

La principal ventaja de los modelos empíricos-mecanicistas, es su capacidad para extrapolar predicciones fuera del rango de datos y condiciones bajo los

que fueron desarrollados, produciendo predicciones determinísticas del desempeño del pavimento. Sin embargo, es imposible evaluar la confiabilidad de las predicciones cuando estos modelos son usados fuera del rango original de datos del que fueron desarrollados. A pesar de sus limitaciones los modelos empíricos-mecanicistas son actualmente los modelos de deterioro más usados (Tenorio M., 2005 pág. 20 al 23)

Según la forma de predicción existen dos tipos de modelos (independientemente a si estos son empíricos o empíricos-mecanicistas) y son modelos agregados (acumulados) y modelos incrementales. (Solminihac, H).

- Modelos de deterioro agregados: Requieren para predecir un deterioro futuro conocer por completo la historia previa del comportamiento del pavimento, es decir se necesita contar con datos tales como tasa de crecimiento del tránsito a lo largo de la vida del pavimento (medida o estimada), tránsito medio diario anual al inicio del servicio del pavimento, ejes equivalentes acumulados al momento de la evaluación, nivel de servicio inicial (fisuras, agrietamientos, IRI), etc.

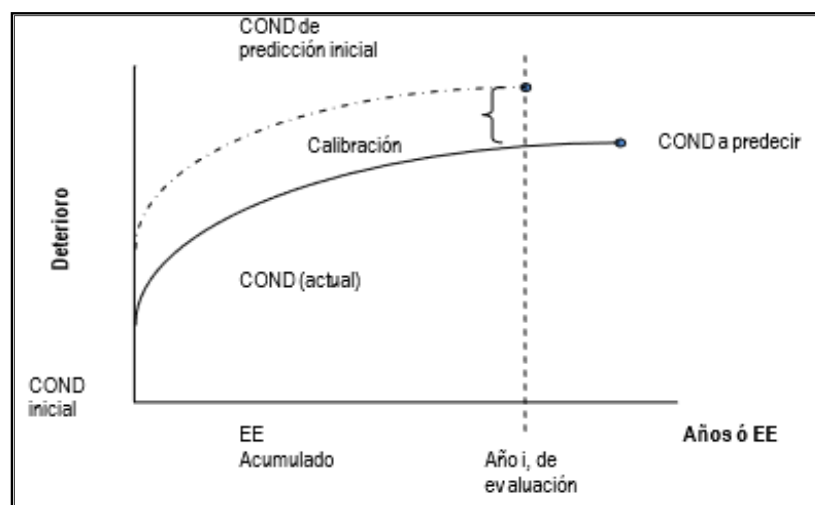


Figura 9: Modelo agregado
Fuente: Vidal, 1998

- Modelos de deterioro incrementales: No se requiere conocer la historia previa para predecir los comportamientos futuros, sino que lo hacen en base a un conjunto de ecuaciones y operaciones lógicas, necesitando conocer solo el estado o

condición actual del pavimento (medida de terreno), además de las características estructurales y climáticas existentes y el tránsito que circula en el año de evaluación por dicho pavimento. (Tenorio M., 2005 pág. 29)

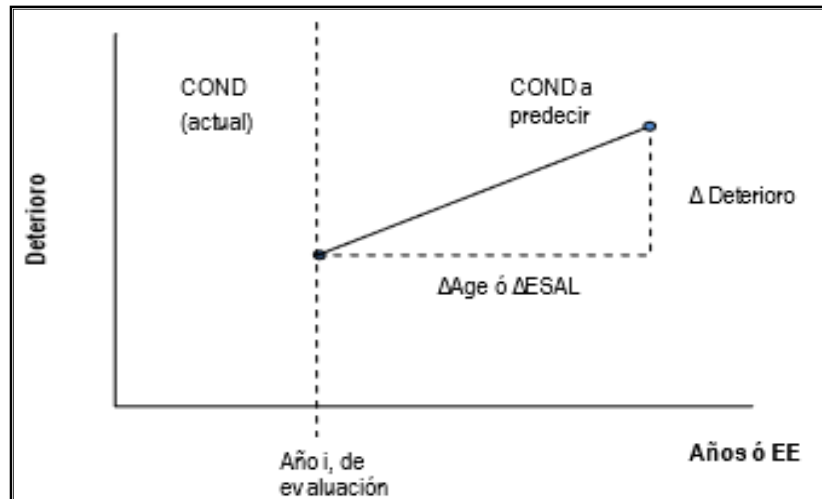


Figura 10: Modelo incremental

Fuente: Vidal, 1998

2.3.5.2 Modelos probabilísticos

En los modelos probabilísticos utilizados en los sistemas de gestión de conservación de carreteras, podemos encontrar en la literatura tres enfoques: curvas de supervivencia, procesos de Markov y regresión bayesiana.

1. Curvas de supervivencia: Los indicadores de desempeño (IRI, CRT, PCI, etc), pueden ser tratados como variables aleatorias, asociado a los valores que dicho índice puede tomar, una probabilidad relativa que pueda verificarse en unas determinadas condiciones. La variable aleatoria “Indicador de desempeño” será caracterizada por cada momento de la vida útil del pavimento, mediante una determinada distribución de probabilidad y mediante su distribución de probabilidad acumulada correspondiente, que representará la probabilidad de que dicho indicador tome valores menores o iguales a los indicados en el eje de abscisas.

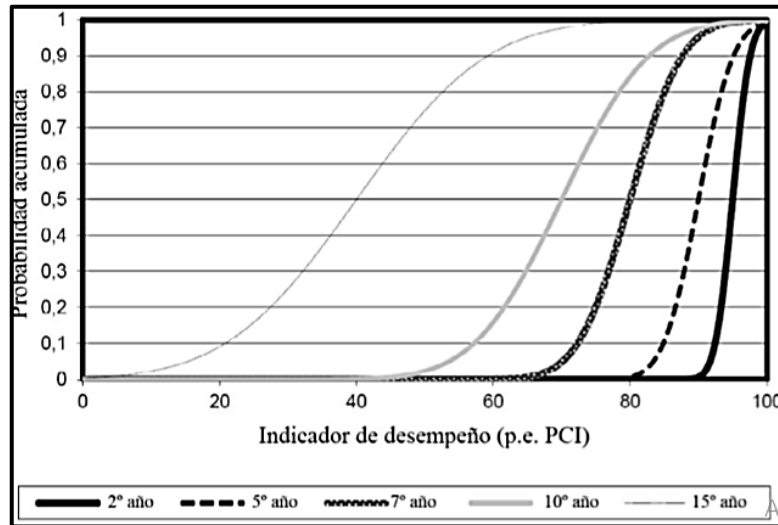


Figura 11 Distribución de probabilidad acumulada del PCI
Fuente: Nicolosi, U. Tor Vergata

Tal distribución varía en el tiempo, por lo que se puede representar de modo que a cada instante de tiempo le corresponda la probabilidad de que dicho indicador sea mayor o igual (o menor o igual) a un valor prefijado. Esta representación es la que se denomina “curva de supervivencia”. Por ejemplo, la curva de supervivencia de la figura 12 se interpreta de la siguiente forma: el valor sobre el eje de ordenadas representa la probabilidad de que en un año (valor del eje de abscisas), el indicador asuma un valor mayor o igual al predefinido, en este caso $PCI = 85$ (calculada en base a la distribución de probabilidad acumulada de la figura 11).

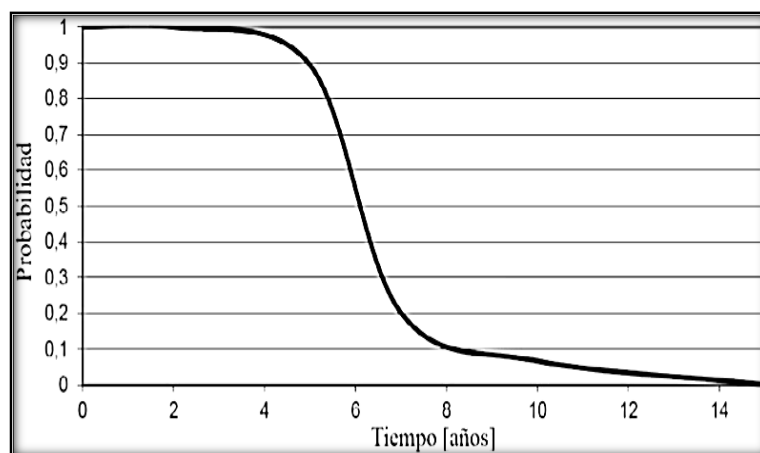


Figura 12 Ejemplo de curva de supervivencia
Fuente: Nicolosi, U. Tor Vergata

2. Modelos de deterioros basados en procesos Markovianos y semi-Markovianos. Estos modelos han sido desarrollados a partir de la definición de una serie de estados de deterioro que la superestructura puede asumir durante su ciclo de vida. Los estados de deterioro son individualizados asociándoles intervalos de valores de uno o más indicadores preseleccionados. Por ejemplo, como muestra el ejemplo de la figura 13, el indicador PCI, puede ser subdividido en 10 intervalos de amplitud 10 puntos, los cuales individúan un estado, estado 0 $0 < PCI < 9$, estado 1 $10 < PCI < 20$, etc. Esta técnica está basada en la determinación de la probabilidad de que durante un ciclo (por ejemplo 1 año), se verifique uno de los siguientes eventos:

- a. Que el pavimento permanezca en el mismo estado de deterioro.
- b. Transición del estado de deterioro inicial a uno superior.

Por lo tanto, es posible definir una matriz de transición en la cual cada elemento p_{ij} representa la probabilidad de que la pavimentación, encontrándose en un estado i -ésimo, transite durante un ciclo, al estado j -ésimo. Dicha probabilidad es estimada a partir de datos históricos medidos, relativos a la evolución del deterioro, a través de métodos de programación lineal, minimizando una función objetivo, consistente en la suma de las diferencias entre los valores previstos y los observados.

ESTADO INICIAL	ESTADO FINAL									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
9 $90 \leq PCI \leq 100$	0.90	0.1								
8 $80 \leq PCI < 90$	0.05	0.65	0.3							
7 $70 \leq PCI < 80$		0.05	0.55	0.25	0.15					
6 $60 \leq PCI < 70$			0.05	0.45	0.25	0.2	0.05			
5 $50 \leq PCI < 60$				0.05	0.25	0.4	0.3			
4 $40 \leq PCI < 50$					0.05	0.2	0.75			
3 $30 \leq PCI < 40$						0.05	0.65	0.3		
2 $20 \leq PCI < 30$							0.1	0.8	0.1	
1 $10 \leq PCI < 20$								0.05	0.95	
0 $00 \leq PCI < 10$										1

Figura 13 Ejemplo de matriz de transición para un ciclo. Método Markoviano
Fuente: Nicolosi, U. Tor Vaergata

Para representar la probabilidad de que una sección de carretera este en cada uno de los estados posibles del ciclo determinado k-ésimo, se emplea un vector de estado P_k , por ejemplo, en la figura 13, si al inicio la sección de carretera en estudio se encontraba en la clase 9, el vector de estado en ese instante será P_0 (1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0); el vector de estado relativo al primer ciclo será P_1 (0.90, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0), etc. El vector de estado para cada ciclo k puede ser, por lo tanto, obtenido como la multiplicación de los valores iniciales del vector de estado P_0 por la matriz de transición T elevada a la potencia k :

$$P_1=P_0*T; P_2=P_1*T=P_0*T^2; [...] P_k=P_{k-1}*T =P_0*T^k \quad \text{Ec. (2)}$$

De esta forma, a través de procesos Markovianos, es posible estimar las condiciones futuras del pavimento únicamente a partir de la condición inicial del mismo. Otros factores que afectan al comportamiento del pavimento, tales como condiciones ambientales, volumen de tráfico, etc, viene considerados definiendo una matriz de transición para cada combinación de factores tenido en consideración.

3. Modelos de deterioros basados en análisis Bayesiano. Este método está basado en la teoría de la probabilidad subjetiva, desarrollada en torno a 1950 por Finetti y Savage (AHEP, 2006), que integra el teorema de Bayes en una lógica que permite combinar o corregir la información subjetiva, derivada de la experiencia, con la objetiva, sacada a partir de medidas experimentales, con el fin de desarrollar un Modelo de Deterioro a través de regresiones estadísticas. Una aplicación exitosa de este método fue la realizada en la investigación SHRP para el desarrollo de Modelos de Deterioro relativos a la regularidad longitudinal y transversal, en el que se realizó una regresión estadística a partir de datos históricos de la Alberta Pavement Management System Database (datos históricos), de encuestas a expertos realizada por la Alberta Transportation (datos subjetivos), y de datos tomados a posteriori (los correspondientes al análisis bayesiano).

2.3.5.3 Modelos de lógica Fuzzy

La lógica de Fuzzy ha encontrado aplicación en muchos sectores de la ingeniería en cuanto se presta a describir fenómenos caracterizados de un cierto grado de indeterminación o vaguedad, la cual no se debe confundir con la aleatoriedad en el ámbito del método probabilístico. En el caso de los Modelos de Deterioro de pavimentos, la vaguedad de los datos (indicadores de estado o variables independientes), pueden ser determinadas por dos factores: la presencia de errores de tipo sistemático en las medidas efectuadas y el empleo de variables del tipo lingüístico. En estos casos, los datos no pueden ser tratados con los anteriores métodos descritos, debiéndose recurrir, por tanto, a la lógica de Fuzzy.

La mayor parte de las aplicaciones desarrolladas hasta la fecha, en el ámbito de los Modelos de Deterioro de pavimentos, consiste en la transformación de datos medidos u observados en números fuzzy, sobre los cuales se realizan regresiones fuzzy, obteniendo las curvas de evolución deseadas, cuyas constantes son a su vez números fuzzy.

Los números fuzzy vienen representados de forma que, al conjunto de números de referencia, viene asociada una función de pertenencia que asume valores del intervalo $[0, 1]$. Por ejemplo, dado un conjunto de referencia E , un subconjunto fuzzy A de E , definido a través de la función de pertenencia $\mu_A(x)$, donde $x \in E$ y $\mu_A(x) \in [0, 1]$. (Zimmermann, 1991), (Turrado R. 2016, pág. 104 al 105).

2.3.6 Metodología para el análisis de modelos de deterioro

Los modelos de deterioro permiten ser utilizados para estimar las condiciones del pavimento en un futuro y reconocer el tipo de acción de mantenimiento y rehabilitación, y el momento en el que se debe realizar.

Investigaciones desarrolladas por Tsunokawa et al (2006) se enfocaron en la búsqueda de intervenciones óptimas para distintos tipos de pavimentos en función de su nivel de deterioro medido en términos de IRI.

Prozzi y Hong (2008) proponen un modelo de predicción de estado genérico para todos los tipos de pavimentos cuya adaptación a cada caso particular se efectúa con las variables de entrada que requiere para la modelación.

Para la predicción del deterioro existen diferentes enfoques, (Has et al., 1994) describe los diferentes métodos de proyección de condición y los categorizan en cuatro tipos:

- **Subjetivo:** La experiencia es empleada de manera formal o estructurada para desarrollar los modelos de predicción del deterioro
- **Puramente mecanicista:** Basada en algunas respuestas primarias o parámetros de comportamiento tales como la fatiga, esfuerzos o deflexiones
- **Regresión:** Donde la variable dependiente de lo observado o el deterioro medido es relacionado con una o más variables independientes, como esfuerzos en la subrasante, aplicaciones de ejes cargados, espesores y propiedades de capas del pavimento, factores ambientales y sus interacciones.
- **Empírico mecanicista:** Donde la forma de ecuación requerida se define, basada en principios mecanicistas, para relacionar una variable dependiente con los deterioros medidos, tales como la regularidad, y entonces se utiliza el análisis de regresión para determinar los coeficientes reales y los parámetros dentro de esa forma predefinida.

Los métodos anteriores se pueden agrupar, a su vez, en dos clases básicas (Robinson et al, 1998).

- **Probabilísticos:** Donde la condición se predice como una función de probabilidad en un rango de posibles condiciones.

- **Deterministas:** Donde la condición se predice con un valor preciso sobre la base de funciones matemáticas de observaciones de medición del deterioro. Esta clase incluye modelos mecanicistas, modelos de regresión y modelos empírico mecanicista.

Los modelos probabilísticos de deterioro fueron implantados para explicar directamente la naturaleza estocástica del deterioro del pavimento en la cual muchos factores no pueden ser recolectados por la disponibilidad de datos (Mishalani y Madanat, 2002)

2.3.6.1 Forma funcional del modelo

La forma funcional de un modelo está referido a la estructura funcional de las ecuaciones, así como a su representación gráfica respecto a variables que involucran el paso del tiempo.

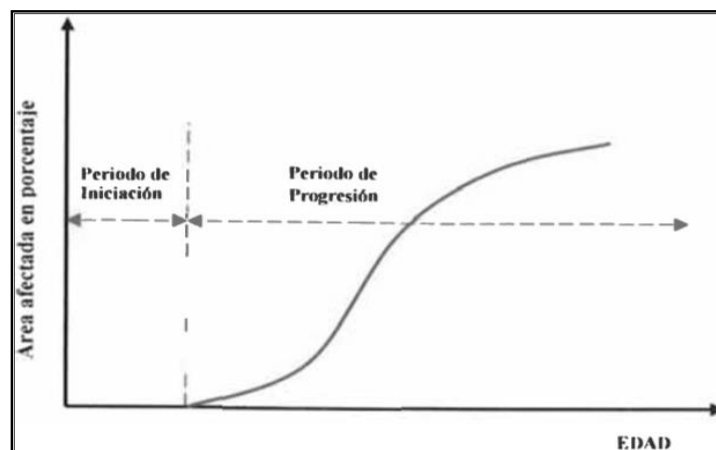


Figura 14: Inicio y progresión de los deterioros
Fuente: Argueta M., Castro H.

Los distintos tipos de deterioro presentan una de las tres formas generales de evolución o progresión:

- **Progresión creciente:** A partir del inicio del deterioro los incrementos por unidad de tiempo van aumentando en magnitud (curva de tipo exponencial);
- **Progresión decreciente:** Los incrementos de deterioro son relativamente elevados al principio y posteriormente van disminuyendo (curva de tipo logarítmica).
- **Progresión sigmoïdal:** Existe una primera etapa de progresión creciente, seguida de otra etapa de progresión decreciente (curva tipo S).

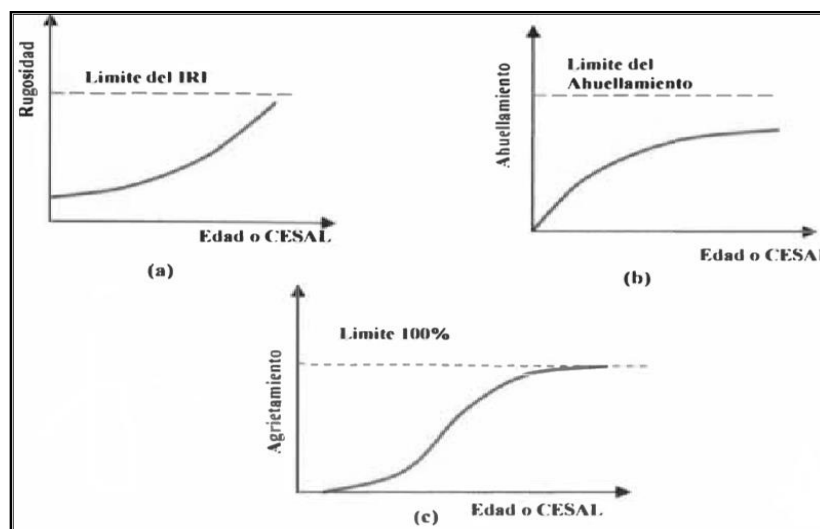


Figura 15: (a) progresión creciente, (b) progresión decreciente, (c) progresión sigmoïdal

2.3.6.2 Técnicas para desarrollar modelos

Existen muchas técnicas para el desarrollo de modelos de deterioro, las más utilizadas son: extrapolación lineal, regresión (empírico), distribución de probabilidad, mecanicista-empírico y markoviano. La precisión de los modelos es un punto de gran importancia y dependerá del uso que se desee dar a los resultados. Los modelos para nivel de proyecto necesitan mayor precisión que para nivel de red. A continuación, se describen brevemente las principales técnicas para desarrollar modelos.

a. Extrapolación lineal

Este método se basa en la extrapolación lineal de los dos últimos puntos de la condición del pavimento, sus principales características son:

- Es aplicable sólo a secciones individuales de pavimentos y no puede usarse en otras secciones.
- Se requiere al menos una medición de la condición del pavimento además de la realizada al final de la etapa de construcción.
- Asume que las cargas de tránsito, los niveles de mantenimientos y tasas de deterioro se mantendrán en el futuro, por lo tanto, no es precisa para periodos largos de tiempo. En el caso de aplicar este tipo de modelos en nuestro país es este punto especialmente importante dada la variabilidad principalmente de las cargas y actividades de mantenimiento.
- No es aplicable predecir tasas de deterioros de pavimentos recién construidos o que hayan sufrido recientemente una rehabilitación mayor.
- Para una sección de pavimento específica, los factores de suelo de cimentación, clima, estructura de pavimentos y tránsito pesado se consideran explícitamente en el análisis.

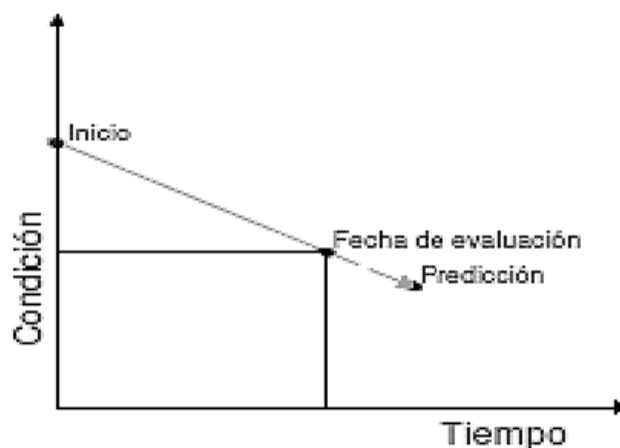


Figura 16: Extrapolación lineal

Fuente: Argueta M., Castro H.

b. Regresión

El análisis de regresión es usado para establecer una relación empírica entre dos o más variables. Cada variable es descrita en términos de media y su variación. Los distintos tipos de variación se describen a continuación.

Regresión lineal entre dos variables, se describe con el modelo siguiente:

$$Y_i = a + b x_i + \text{error} \quad \text{Ec. (3)}$$

Regresión lineal múltiple, en este caso se asume que la variable dependiente es una función lineal de las variables independientes y se describe:

$$Y = a + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + \text{error} \quad \text{Ec. (4)}$$

Regresión no lineal, se puede utilizar cuando la relación entre la variable dependiente y la independiente es no lineal. Una relación no lineal puede ser analizada como un modelo lineal transformando la variable dependiente.

c. Distribución de probabilidad

La condición de un pavimento, como PCI, IRI, etc. puede ser tratada como una variable aleatoria con una probabilidad asociada a sus valores. Una distribución de probabilidades describe la probabilidad asociada con todos los valores de la variable aleatoria. Por ejemplo: si la variable aleatoria es PCI, entonces la distribución de probabilidad puede ser descrita como la función de distribución acumulada de la Figura siguiente.

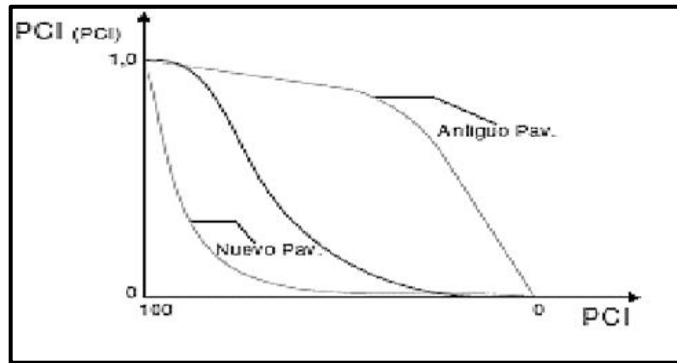


Figura 17: Distribución de probabilidades
Fuente: Shahin., 1994).

En la figura anterior, el eje vertical es la probabilidad de que el PCI sea igual o menor que un determinado valor de PCI. Esta figura presenta además distribuciones acumuladas en diferentes puntos de la vida del Pavimento y podría representar la probabilidad en el tiempo de un determinado valor de PCI, la que se conoce como curva de supervivencia.

d. Modelos empíricos

Siguen modelos estadísticos que se basan en información observada y subjetiva; normalmente sobre un análisis estadístico del deterioro en tramos específicos y, por lo tanto, podrían no ser aplicables en condiciones distintas a las prevalecientes durante las observaciones. Usan modelos estadísticos tales como:

Modelos estocásticos:

- Regresiones lineales con una o varias variables
- Regresiones no lineales con una o varias variables

Modelos Probabilísticos:

- La curva Survivor
- Modelo Markov
- Modelo de Construcción
- Modelo Semi-Markov

Dentro del modelo empírico se procesa la información de acuerdo a la familiarización con la información, análisis y selección de la Información, construcción del modelo y análisis estadístico

e. Modelos mecanicistas

Este método se basa en la teoría mecanicista donde se utilizan parámetros basados en lo mecánico. En la modelación del deterioro de pavimentos este modelo busca obtener respuestas primarias tales como esfuerzos y deflexiones que se presentan en el pavimento, cuando este está en una condición crítica sometido a cargas de tráfico tanto estáticas como dinámicas.

Los modelos mecanicistas tienen fundamento en teorías del comportamiento de pavimentos con la validez ampliamente reconocida, sin embargo, estos modelos requieren de una gran cantidad de datos de entrada, entre los cuales se encuentran parámetros difíciles de obtener en campo.

Para el desarrollo de este modelo se utilizan las siguientes teorías y análisis:

- Teoría de la capa elástica.
- Teoría Visco elástica.
- Mecánica de Fractura.
- Análisis de elementos finitos.

f. Modelos de markov

En la técnica Markoviana se utilizan matrices probabilísticas de transición, es decir, la información que utiliza es con variables que presentan el deterioro de un nivel a otro. En éste modelo se asume que la condición futura está en función de la condición presente y no depende del comportamiento en el pasado. Esta técnica está basada en determinar la probabilidad asociada con una sección de

pavimento en un determinado estado de condición, ya sea que se queda en ese determinado estado o que se deteriora para pasar al siguiente estado, después de un determinado ciclo. (Argueta M., Castro H., 2009, pág. 93 al 98)

2.3.7 Correlación

Antoni V., (1995), señala que la correlación hace referencia al grado de relación entre dos variables. El problema que se nos plantea es el de encontrar una medida que nos indique el grado de intensidad de la relación entre variables.

En otras palabras, pretendemos hallar un valor que nos dé una medida del grado de ajuste de la curva a la nube de puntos.

Una manera de obtener esa medida es calculando la varianza de los residuos o varianza residual.

En efecto, cuanto mayores sean la diferencia entre los valores observados y los valores teóricos de la variable dependiente, menor será la intensidad de la relación entre las variables.

Se dará una dependencia funcional cuando todos los puntos de la nube caigan sobre la gráfica de la función ajustada, en cuyo caso la varianza residual será nula.

2.3.7.1 Coeficiente de correlación general de Pearson

Estuardo A., (2012), mide el grado de relación existente entre la variable independiente y la variable dependiente, lo que más se utiliza es el (r de Pearson).

El valor de r se encuentra en el intervalo de (-1, 1)

Si $r=0$, entonces no existe correlación entre las variables, es muy débil.

Si $r=-1$, entonces la correlación es perfecta y negativa

Si $r=1$, entonces la correlación es perfecta y positiva

Si r esta entre $(-0.5,0.5)$, entonces la correlación es mala
 Si r no pertenece a $(-0.5,0.5)$, entonces la correlación es buena.

Por su parte Antonio V., (1995), analizando los posibles valores del coeficiente de correlación general de Pearson resulta:

Si $0 < R < 1$, la correlación es positiva, siendo mayor su intensidad cuanto más se aproxima R a 1.

Si $-1 < R < 0$, la correlación es negativa, siendo mayor la intensidad cuanto más se aproxima R a -1.

Si $R=1$ o $R=-1$, será $s^2_{ry}=0$ y habrá una relación de dependencia funcional. En ambos casos se dice que la correlación es perfecta.

Si $R=1$, las dos variables varían en el mismo sentido y la correlación es positiva perfecta.

Si $R=-1$, las variables varían en sentidos opuestos y la correlación es negativa perfecta.

Si $R=0$, es $s^2_{ry}=s^2_y$, luego no hay ningún tipo de dependencia, ya que la relación de Y con X no aporta ninguna explicación sobre Y . Se dice entonces que no hay correlación o que las variables son incorreladas.

Tabla 12
 Correlación lineal entre dos variables

Valores de r	Tipo y grado de correlación
-1	Negativa perfecta
$-1 < r \leq -0.8$	Negativa fuerte
$-0.8 < r < -0.5$	Negativa moderada
$-0.5 \leq r < 0$	Negativa débil
0	No existe
$0 < r \leq 0.5$	Positiva débil
$0.5 < r < 0.8$	Positiva moderada
$0.8 \leq r < 1$	Positiva fuerte
1	Positiva perfecta

Fuente: Nieves H., & Domínguez S., 2010.

2.4 Definición de términos básicos

Correlación:

David S Moore., (2005), mide la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Se simboliza con la letra r .

Modelo de deterioro:

Son expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo y pueden surgir a partir de desarrollos empíricos o mecanísticos.

Modelos Determinísticos:

Prozzi Jorge A., (2001). Constituyen el modelamiento más común en los sistemas de gestión de pavimentos, predicen un único valor de la variable dependiente basado en sus relaciones con una o más variables. Pueden ser correlacionales, empíricas o empíricas mecanísticas, calibrados usando técnicas de regresión.

Modelos Probabilísticos:

Prozzi Jorge A., (2001). Predicen una distribución de la variable. La condición de un pavimento (PCI o IRI) es tratada como una variable aleatoria con una probabilidad asociada a sus valores. Una distribución de probabilidades describe la probabilidad asociada con todos los valores de la variable aleatoria.

Índice de Rugosidad Internacional (IRI):

La regularidad de un camino es definida como la variación en la elevación de la superficie que induce vibraciones transversales en los vehículos (Sayers et al., 1986)

Probabilidad

Estuardo A., (2012). La probabilidad es un mecanismo por medio del cual pueden estudiarse sucesos aleatorios, es decir, operaciones cuyo resultado no puede ser predicho de antemano con seguridad.

Jay L. Devore. Estudio de azar y la incertidumbre en cualquier situación en la cual varios posibles sucesos pueden ocurrir.

Error estándar de la estimación (Se)

Manual Práctico MEPDG AASHTO (2008). Es la desviación estándar de los errores residuales (diferencia entre valores pronosticados y medidos) para las secciones de pavimento incluidos en el conjunto de datos de calibración global. Mide la magnitud de la dispersión de los puntos de datos alrededor de la línea de la igualdad entre los valores observados y pronosticados

2.5 Fundamentos teóricos que sustentan a las hipótesis

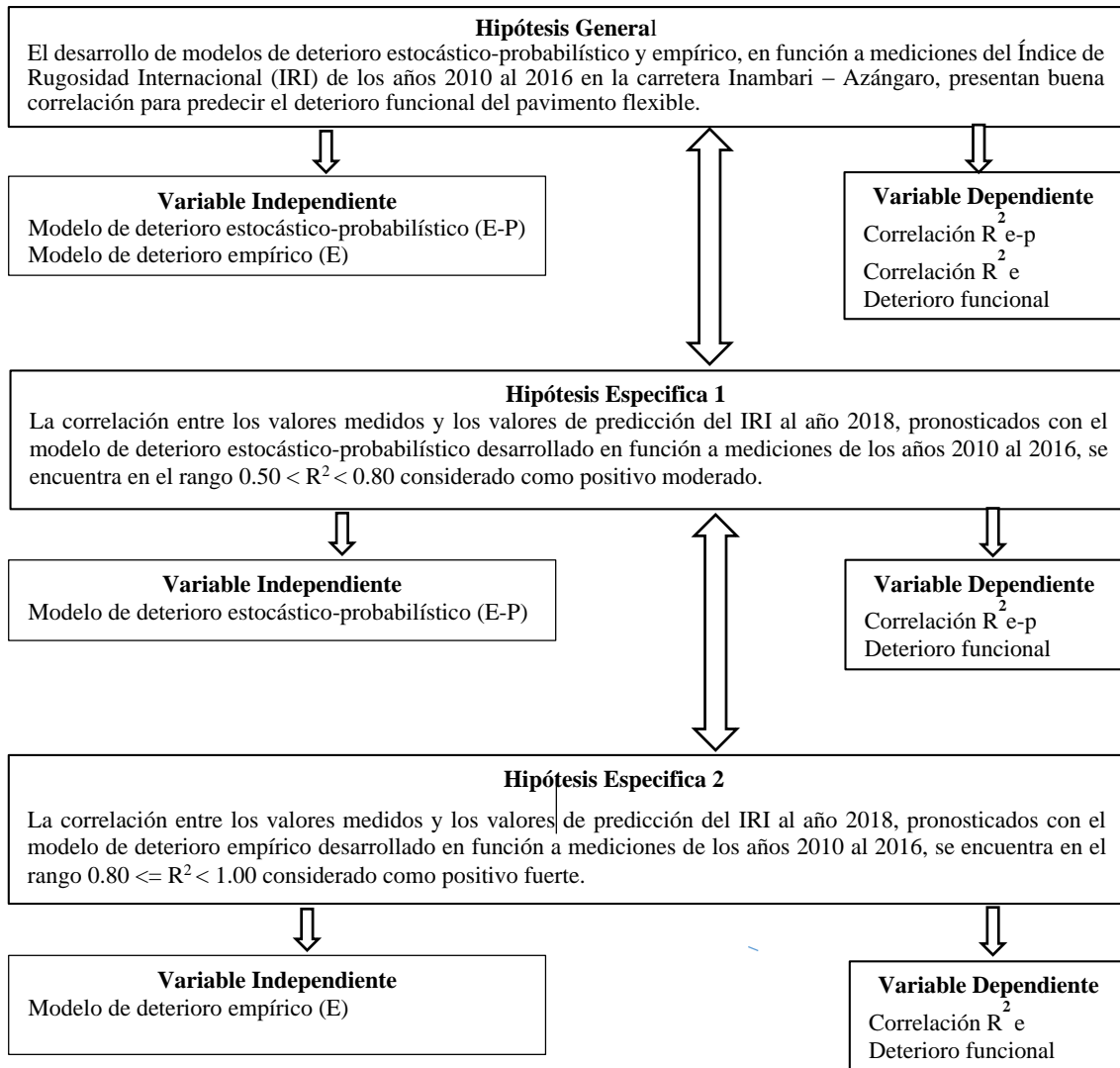


Figura 18: Mapa conceptual

Fuente: Elaboración propia

Con el seguimiento, monitoreo y control de esta metodología se comprueba la hipótesis y se garantiza la eficacia y eficiencia de la presente investigación de desarrollo de modelos de deterioro del pavimento y su correlación con las mediciones del IRI de los años 2010 - 2016, para predecir el comportamiento funcional del pavimento en la carretera Inambari - Azángaro.

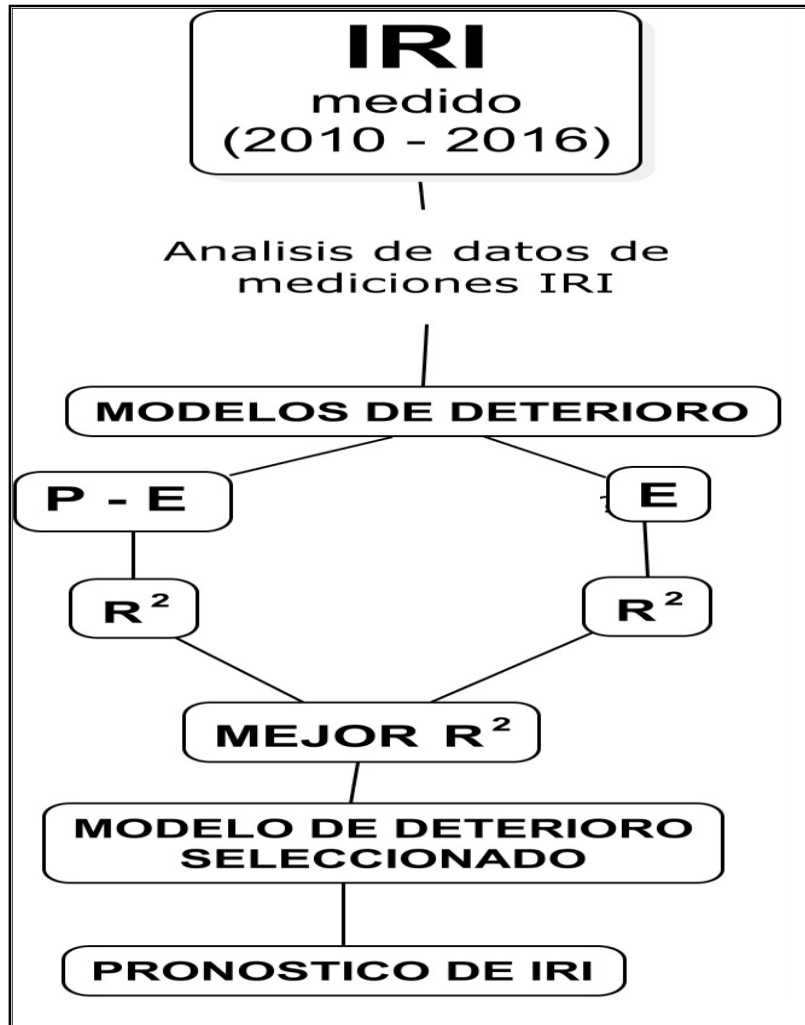


Figura 19: Grafico operacional
Fuente: Elaboración propia

2.6 Hipótesis

2.6.1 Hipótesis general

El desarrollo de modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro, presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

2.6.2 Hipótesis específicas

- a. La correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro estocástico-probabilístico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016, se encuentra en el rango $0.50 < R^2 < 0.80$ considerado como positivo moderado.
- b. La correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016, se encuentra en el rango $0.80 \leq R^2 < 1.00$ considerado como positivo fuerte.

2.7 Variables

Variables Independientes:

Modelo de deterioro estocástico-probabilístico (e-p)

Modelo de deterioro empírico (e)

Variables dependientes

Correlación R^2 e-p (valor medido/valor pronosticado del IRI al 2018)

Correlación R^2 e (valor medido/valor pronosticado del IRI al 2018)

Deterioro funcional (IRI pronosticado)

Tabla 13
Operacionalización de variable dependiente

Variable Dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Correlación (entre medición y predicción del IRI) - R^2_{e-p} - R^2_e	Medida de la tendencia de la evolución de dos variables	Factor entre valores medidos y valores de predicción del IRI obtenidos de los modelos de deterioro estocástico probabilístico y empírico	Factor de ajuste Factor de precisión	Bueno: ($0.50 \leq R^2 < 0.80$) malo: ($0.0 < R^2 < 0.50$) Perfecto: ($0.80 \leq R^2 < 1.00$)	Excel

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14
Operacionalización de variable dependiente

Variable Dependiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Deterioro funcional	Desviación de superficie del camino con respecto a una superficie plana que afectan la dinámica del vehículo, la calidad de circulación, las cargas dinámicas y el drenaje.	Rugosidad definido por el perfil longitudinal del pavimento flexible	Deformaciones en el perfil topográfico Ondulaciones Hundimientos Ahuellamientos	Regularidad superficial Serviciabilidad Confort Seguridad	Perfilometro laser

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15
Operacionalización de variable independiente

Variable Independiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Modelo de deterioro estocástico - probabilístico	Modelo matemático desarrollado en función a mediciones reales del IRI, para pronosticar el deterioro del pavimento	Modelo matemático para predecir la condición futura del IRI (m/km) en el tiempo (años)	No determinista	Mecanicista Empírico-Mecanicista Probabilístico Lógica de Fuzzy Markoviano Semi markoviano	Excel Regresión lineal Método Markoviano Método semi markoviano

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Operacionalización de variable independiente

Variable Independiente	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Modelo de deterioro empírico	Modelo matemático desarrollado en función a mediciones reales del IRI, para pronosticar el deterioro del pavimento	Modelo matemático para predecir la condición futura del IRI (m/km) en el tiempo (años)	Determinista	Empírico Mecanicista Empírico-Mecanicista	Excel Regresión lineal Regresión parabólica Regresión sigmoideal Regresión exponencial

Fuente: Elaboración propia

Capítulo III

Marco Metodológico

3.1 Tipo y alcance de la investigación

Tipo de investigación:

La presente investigación es de tipo aplicado ya que confronta la teoría con la realidad, mediante el desarrollo de los modelos de deterioros estocástico-probabilístico y empírico en función a las mediciones de los años 2010 al 2016. Los valores de predicción de deterioros funcionales obtenidos para el año 2018, se comparan con los valores del IRI medidos el año 2018 con la finalidad de determinar su correlación.

Existe la necesidad de desarrollar modelos de deterioro para predecir el IRI y seleccionar el modelo que mejor se ajusta para predicciones futuras, en base a las mediciones de campo realizadas en el periodo del 2010 al 2016. Con los resultados de los factores de correlación se determinará el modelo de mejor ajuste.

El método se plantea de tal forma que permita ser utilizado como herramienta auxiliar para mejorar la gestión del pavimento flexible, en la toma de decisiones sobre la necesidad de actuar en pavimentos deteriorados y determinar, asimismo, el momento oportuno para la intervención del mantenimiento.

Nivel o alcance de la investigación:

El alcance de la presente investigación es descriptivo y correlacional.

Es descriptivo porque se propone desarrollar modelos estocásticos-probabilísticos y empírico, en base a mediciones realizadas del IRI en el periodo del 2010 al 2016.

Dentro de las características utiliza la estadística sobre la base de datos de las mediciones del IRI realizadas por diferentes empresas consultoras durante el periodo 2010 al 2016 en un sub tramo acotado. Se desarrollan los modelos de deterioro y para verificar la validez de su resultado se determina la correlación existente entre los valores medidos el año 2018 y los valores pronosticados para ese mismo año, con la finalidad de validar el grado de precisión o mejor ajuste. El proceso es deductivo, secuencial, probatorio y analiza la realidad objetiva del comportamiento del deterioro del Índice de Rugosidad Internacional del pavimento.

Es correlacional, porque asocian y cuantifican las relaciones entre variables. En el presente caso, entre las mediciones reales de campo y los valores obtenidos a través de la variable independiente (modelos de deterioro). Se determina la correlación que presenta mejor ajuste y para pronosticar el deterioro funcional (IRI) en el tiempo.

La utilidad principal de los estudios correlacionales es saber como se puede comportar un concepto p una variable al conocer el comportamiento de otras variables vinculadas. Es decir, intentar predecir el valor aproximado que tendrá un grupo de individuos o casos en una variable, a partir del valor que poseen en las variables relacionadas. (Hernández R., et al, pág. 94).

3.2 Diseño de la investigación

La investigación es de diseño experimental, ya que se pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula. El primer requisito es la manipulación intencional de una o más variables independientes. La variable independiente es la que se

considera como supuesta causa en una relación entre variables, es la condición que antecede, y al efecto provocado por dicha causa se le denomina variable dependiente (consecuente). (Hernández R., et al, pág. 130).

Se evalúa y analiza la información del IRI obtenidos de las mediciones de campo durante un periodo determinado. En base a dicho análisis se desarrollan modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico y con el resultado de las correlaciones se determina el modelo de deterioro de mejor ajuste para predecir el comportamiento del IRI, es decir se manipula la variable independiente.

3.3 Población y muestra

El universo o escenario de estudio de la presente investigación está determinado por la carretera del Proyecto Corredor Interoceánico Sur Perú – Brasil, Tramo 4: Inambari – Azángaro, que tiene una longitud de 305.06 kilómetros.

La muestra clasificada como no probabilística, investiga específicamente el sub tramo Km 51+000 (Azángaro) – Macusani (Km 182+000), en una longitud aproximada de 131 kilómetros que une las provincias de Azángaro y Carabaya en la región Puno, seleccionado por el mayor tránsito de vehículos, la antigüedad del pavimento y las condiciones agresivas del medioambiente.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las siguientes técnicas e instrumento de recolección de datos son utilizados en la presente investigación:

Técnicas empleadas:

- Revisión de base de datos
- Análisis documental con análisis de contenido
- Observación directa de campo
- Listas de verificación sobre información utilizada

Instrumentos a utilizar

- Base de datos o sistemas de información
- Registro del contenido del documento
- Registro de observación de campo
- Listas de cotejo

Se realizan investigaciones en base a información técnica como los Proyectos de Ingeniería de Detalle, diseño de pavimentos, calidad de materiales utilizados, además de las evaluaciones funcionales (mediciones del IRI) realizados por el OSITRAN en el periodo 2010 al 2016, así como la información técnica desde el inicio de construcción e inicio del periodo de operación y explotación de la vía, datos sobre la evolución del tráfico, condiciones medioambientales, registro de temperaturas emitidas por las estaciones meteorológicas del SENAMHI, inventarios de los elementos de la infraestructura vial, monitoreo, intervenciones realizadas en el pavimento y otros datos relevantes.

En el análisis documental referido a los modelos de deterioro, se describe los modelos deterministas y no deterministas que incluyen modelos probabilistas y modelos de lógica de Fuzzy. Asimismo, se describe la clasificación de modelos mecanicistas, empírico mecanicista y empírico. De otra parte, se analiza la información referida a las mediciones de rugosidad realizadas a través de diferentes empresas consultoras en representación del OSITRAN durante el periodo del 2010 al 2018.

La observación directa de campo se realizó en los meses de marzo y junio de 2019, que han permitido verificar las características técnicas de la vía, condiciones medioambientales, registrar mediante vistas fotográficas el estado actual de la vía, los centros poblados beneficiados por donde se desarrolla la carretera y observación directa del tipo de tráfico vehicular que circula por la vía.

Se efectúa la lista de verificación y lista de cotejo sobre la disponibilidad de información de las mediciones del IRI en el periodo 2010 al 2016, análisis documental

sobre modelos de deterioro del pavimento, revisión sobre los diferentes Proyectos de Ingeniería de Detalle y revisión del Contrato de Concesión.

En relación al criterio de validez se precisa que la información referida a la base de datos de mediciones del IRI es altamente confiable, puesto que las mediciones fueron realizadas por diferentes empresas consultoras del país contratados por el OSITRAN en los años 2010, 2012, 2015 y 2016.

3.5 Descripción de procedimientos de análisis

La información utilizada en la presente investigación proviene de la base de datos de las mediciones reales de campo en la carretera IIRSA Sur Tramo 4: Inambari – Azángaro, de los años 2010, 2012, 2015, 2016 y 2018 (esta última medición es usada para efectos de determinar la correlación entre el valor medido versus el valor pronosticado a ese año), realizadas por el OSITRAN a través de empresas consultoras especializadas. La data utilizada corresponde al sub tramo Azángaro – Macusani, que se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 17
Mediciones de rugosidad (IRI)

Consultor	Año de medición
Consorcio Supervisor HOB Consultores S.A.	2010
Consorcio Vial Sur III	2012
Consorcio APSA – MTV	2015
APSA Sucursal del Perú	2016
ALAUDA Ingeniería S.A. Sucursal del Perú	2018

Fuente: OSITRAN

Las medidas de campo se efectuaron en forma continua cada 10 m, a lo largo de la vía en cada carril y en cada rodera (huella), lo que permitió calcular el índice de Rugosidad Internacional – IRI (promedio del sub tramo en evaluación). La medición de rugosidad en cada año se efectuó de manera continua con un perfilómetro laser a una velocidad promedio de 60 km/h.

El desarrollo de modelos de deterioro del IRI estocástico-probabilístico, y empírico, está basado en la acumulación de deterioros de la rugosidad en función del tiempo, tomando la base de datos de las mediciones del IRI obtenidos en el periodo de 2010 al 2016, a lo largo del sub tramo evaluado de 131 kilómetros de carretera entre Azángaro (km 51+000) y Macusani (Km 182+000), mencionando que en el sector del Km 75+000 al Km 100+000, se tiene registros de haber colocado un micropavimento en el año 2015 por ser un pavimento de mayor antigüedad. Para efectos del presente análisis y por haber sido intervenido con trabajos de mantenimiento periódico, se excluye este último sector a fin de no alterar los resultados.

De la revisión de los informes presentados por las diferentes empresas consultoras, se observa que en la medición de rugosidad han empleado equipos de similares características como el perfilometro superficial de pavimentos laser de la empresa Dynatest, perfilometro RSP- Mark III (Road Surfacer Profiler), el cual permite medir en forma continua un carril de circulación con un nivel máximo de precisión. Para las mediciones se tuvieron en cuenta el procedimiento establecido en la norma ASTM E 950-98.

El IRI fue medido en forma continua en el carril ascendente y carril descendente, obteniéndose la medida para ambas huellas izquierda y derecha, promediando ambos valores para tener un único valor del IRI.

El software utilizado para el procesamiento del perfil longitudinal es el que viene incorporado con el equipo, con el cual se obtiene el IRI, en m/km, a través de un procedimiento estándar para secciones de 10 m de longitud.

Los criterios utilizados para el procesamiento de datos se basaron en lo indicado en el literal c) del Apéndice 8 del Anexo I del Contrato de Concesión; donde a partir del IRI cada 10 m recopilado por el equipo, se obtuvo el IRI para secciones de 100 m. para que, por último, se calcule la Media Deslizante Máxima con intervalos de 1km.

Los sectores donde no se presentan datos de IRI, corresponden a presencia de singularidades en la vía; es decir eventos que están determinados por zonas de gibas,

desvíos, ingreso y salida de peajes, zonas de puentes y cualquier evento que pueda distorsionar la rugosidad representativa de la calzada.

El parámetro de rugosidad establecido como umbral para la carretera IIRSA Sur Tramo 4: Inambari – Azángaro es el siguiente:

Tabla 18
Nivel de servicio de rugosidad (IRI)

	Concreto asfáltico	Tratamiento superficial
IRI (m/km)	3.5	4.0

Fuente: Contrato de Concesión

En la tabla 19 se presenta los datos procesados y ordenados en sentido ascendente y promediados por cada kilómetro entre las progresivas Km 51+000 al Km 182+000. Un total de 131 kilómetros fueron evaluados con data de los años 2010, 2012, 2015 y 2016.

Tabla 19
Valores promedio del IRI por kilómetro

Desde	Hasta	Valor del IRI m/km			
		2010	2012	2015	2016
51.00	52.00	1.21	1.35	1.18	1.20
52.00	53.00	1.08	1.18	1.08	1.14
53.00	54.00	1.03	1.06	1.07	1.07
54.00	55.00	0.99	1.00	1.10	1.11
55.00	56.00	1.00	1.03	1.20	1.16
56.00	57.00	1.03	1.08	1.03	1.09
57.00	58.00	0.94	0.99	1.00	1.09
58.00	59.00	0.96	1.01	1.10	1.12
59.00	60.00	1.03	1.05	1.04	1.07
60.00	61.00	0.97	1.00	1.01	1.07
61.00	62.00	0.94	1.00	1.00	1.05
62.00	63.00	0.90	0.92	1.02	1.11
63.00	64.00	1.01	1.03	1.20	1.17
64.00	65.00	1.10	1.12	0.97	1.06
65.00	66.00	1.02	1.00	0.96	0.96
66.00	67.00	1.02	0.92	1.10	1.22
67.00	68.00	1.04	1.06	1.17	1.28
68.00	69.00	1.10	1.11	1.28	1.32
69.00	70.00	1.13	1.19	1.12	1.24
70.00	71.00	1.01	1.10	1.07	1.16
71.00	72.00	1.22	1.09	1.16	1.33
72.00	73.00	1.17	1.24	1.29	1.29
73.00	74.00	1.18	1.23	1.04	1.05

Desde	Hasta	Valor del IRI m/km			
		2010	2012	2015	2016
74.00	75.00	0.94	0.98	1.45	1.40
75.00	76.00	1.33	1.27	1.48	1.52
76.00	77.00	1.47	1.45	1.47	1.44
77.00	78.00	1.14	1.23	1.34	1.38
78.00	79.00	0.98	1.01	1.17	1.22
79.00	80.00	1.01	0.96	1.64	1.61
80.00	81.00	1.28	1.41	1.75	1.59
81.00	82.00	0.91	0.92	1.56	1.56
82.00	83.00	0.97	0.89	1.68	1.52
83.00	84.00	0.96	0.95	1.33	1.42
84.00	85.00	1.15	0.96	1.22	1.42
85.00	86.00	1.06	1.87	1.74	1.65
86.00	87.00	1.46	1.64	1.61	1.66
87.00	88.00	1.21	1.29	1.62	1.58
88.00	89.00	1.14	1.13	1.77	1.59
89.00	90.00	1.21	1.17	1.95	1.67
90.00	91.00	1.07	1.14	2.06	1.75
91.00	92.00	1.22	1.11	1.96	1.80
92.00	93.00	1.35	1.26	1.92	2.03
93.00	94.00	1.66	1.55	1.79	1.92
94.00	95.00	1.36	1.43	1.78	1.70
95.00	96.00	1.38	1.38	1.91	1.78
96.00	97.00	1.38	1.39	1.62	1.73
97.00	98.00	1.31	1.62	1.61	1.66
98.00	99.00	1.38	1.33	1.88	1.84
99.00	100.00	1.54	1.52	1.75	1.95
100.00	101.00	1.59	1.72	1.08	1.36
101.00	102.00	1.19	1.64	1.23	1.39
102.00	103.00	1.11	1.31	1.10	1.16
103.00	104.00	1.10	1.11	1.32	1.29
104.00	105.00	1.38	1.29	1.29	1.46
105.00	106.00	1.13	1.23	1.21	1.25
106.00	107.00	1.13	1.14	1.61	1.36
107.00	108.00	1.44	1.51	1.58	1.55
108.00	109.00	1.29	1.61	1.46	1.49
109.00	110.00	1.19	1.42	1.30	1.29
110.00	111.00	1.28	1.24	1.06	1.23
111.00	112.00	0.98	1.23	0.91	0.94
112.00	113.00	0.90	0.89	1.15	1.10
113.00	114.00	1.08	1.10	1.38	1.36
114.00	115.00	1.28	1.44	1.17	1.21
115.00	116.00	0.93	1.12	0.94	1.01
116.00	117.00	0.98	0.97	1.23	1.14
117.00	118.00	0.98	1.20	0.98	0.96
118.00	119.00	1.16	0.90	1.06	1.24
119.00	120.00	1.05	1.19	1.10	1.20
120.00	121.00	0.96	1.08	0.98	1.02
121.00	122.00	1.24	0.93	1.42	1.33
122.00	123.00	1.08	1.36	1.17	1.15
123.00	124.00	1.10	1.12	0.95	1.04

Desde	Hasta	Valor del IRI m/km			
		2010	2012	2015	2016
124.00	125.00	0.97	0.96	1.06	1.06
125.00	126.00	1.08	1.02	1.51	1.49
126.00	127.00	1.61	1.47	1.67	1.60
127.00	128.00	1.47	1.53	1.73	1.61
128.00	129.00	1.56	1.48	1.67	1.68
129.00	130.00	1.41	1.56	1.54	1.65
130.00	131.00	1.44	1.43	1.43	1.68
131.00	132.00	1.30	1.39	1.38	1.54
132.00	133.00	1.29	1.32	1.46	1.47
133.00	134.00	1.32	1.33	1.36	1.33
134.00	135.00	1.29	1.34	1.50	1.46
135.00	136.00	1.56	1.41	1.51	1.54
136.00	137.00	1.56	1.44	1.44	1.48
137.00	138.00	1.37	1.49	1.45	1.45
138.00	139.00	1.43	1.37	1.34	1.58
139.00	140.00	1.41	1.34	1.61	1.59
140.00	141.00	1.61	1.51	1.78	1.77
141.00	142.00	1.83	1.66	1.72	1.74
142.00	143.00	1.60	1.65	1.51	1.61
143.00	144.00	1.51	1.47	1.30	1.42
144.00	145.00	1.31	1.29	1.25	1.34
145.00	146.00	1.31	1.27	1.42	1.42
146.00	147.00	1.45	1.35	1.51	1.46
147.00	148.00	1.28	1.33	1.18	1.27
148.00	149.00	1.29	1.14	1.17	1.24
149.00	150.00	1.15	1.14	1.15	1.20
150.00	151.00	1.09	1.11	1.20	1.22
151.00	152.00	1.20	1.11	1.24	1.20
152.00	153.00	1.30	1.11	1.31	1.37
153.00	154.00	1.18	1.26	1.24	1.27
154.00	155.00	1.28	1.20	1.41	1.43
155.00	156.00	1.36	1.43	1.30	1.51
156.00	157.00	1.40	1.40	1.39	1.64
157.00	158.00	1.51	1.52	1.52	1.79
158.00	159.00	1.58	1.64	1.69	1.81
159.00	160.00	1.49	1.68	1.64	1.60
160.00	161.00	1.55	1.51	1.80	1.75
161.00	162.00	1.50	1.71	1.37	1.45
162.00	163.00	1.50	1.33	1.79	1.81
163.00	164.00	1.85	1.80	1.75	1.93
164.00	165.00	1.65	1.84	1.49	1.58
165.00	166.00	1.72	1.53	1.76	1.78
166.00	167.00	1.51	1.75	1.40	1.57
167.00	168.00	1.27	1.45	1.34	1.33
168.00	169.00	1.26	1.20	1.29	1.32
169.00	170.00	1.23	1.24	1.32	1.31
170.00	171.00	1.32	1.28	1.27	1.36
171.00	172.00	1.14	1.33	1.24	1.31
172.00	173.00	1.44	1.31	1.48	1.61
173.00	174.00	1.25	1.62	1.31	1.30

Desde	Hasta	Valor del IRI m/km			
		2010	2012	2015	2016
174.00	175.00	1.14	1.29	1.21	1.19
175.00	176.00	1.15	1.16	1.16	1.19
176.00	177.00	1.11	1.26	1.23	1.18
177.00	178.00	1.25	1.43	1.13	1.24
178.00	179.00	1.09	1.28	1.10	1.17
179.00	180.00	1.19	1.35	1.27	1.24
180.00	181.00	1.15	1.29	1.22	1.23
181.00	182.00	1.21	1.18	1.40	1.57

Fuente: Elaboración propia

Los valores promedios de ambos sentidos muestran que los valores de la rugosidad presentan buen nivel de serviciabilidad y en general una tendencia creciente con el paso de los años. Para efectos de un análisis riguroso se ha realizado la sectorización de toda la longitud evaluada entre el Km 51+000 al Km 182+000, mediante el método de las diferencias acumulada señalado en la metodología AASHTO 1993.

La metodología aplicada para la sectorización es la indicada en el apéndice J de la Guía de Diseño de AASHTO 93, denominado método de las diferencias acumuladas, que permite de manera estadística establecer tramos homogéneos a partir de los resultados medidos. Los sectores están delimitados por los cambios de pendiente de la variable Z_x ,

Distancia	Valor Parámetro (P)	Número de intervalo (n)	Intervalo de distancia (Dx)	Distancia acumulada (ΣDx_i)	Promedio de Parámetro en el intervalo (Π_i)	Area del intervalo (A_i)	Area acumulada (ΣA_i)	$Z_x = (\Sigma A_i) - F^*(\Sigma Dx_i)$
10	P_1	1	Dx_1	Dx_1	$\Pi_1 = P_1$	$A_1 = \Pi_1 Dx_1$	A_1	$A_1 - F^* Dx_1$
20	P_2	2	Dx_2	$Dx_1 + Dx_2$	$\Pi_2 = (P_1 + P_2) / 2$	$A_2 = \Pi_2 Dx_2$	$A_1 + A_2$	$(A_1 + A_2) - F^*(Dx_1 + Dx_2)$
30	P_3	3	Dx_3	$Dx_1 + Dx_2 + Dx_3$	$\Pi_3 = (P_2 + P_3) / 2$	$A_3 = \Pi_3 Dx_3$	$A_1 + A_2 + A_3$	$(A_1 + A_2 + A_3) - F^*(Dx_1 + Dx_2 + Dx_3)$
.....								
L_p	P_n	N_t	Dx_{nt}	$Dx_1 + \dots + Dx_n$	$\Pi_{nt} = (P_{n-1} + P_n) / 2$	$A_{nt} = \Pi_{nt} Dx_{nt}$	$A_1 + \dots + A_{nt}$	$(A_1 + \dots + A_{nt}) - F^*(Dx_1 + \dots + Dx_n)$
$A_t = A_1 + \dots + A_{nt}$								
$F = A_t / L_p$								
$F = A_t / L_p$								

Figura 20: Diferencias acumuladas para cálculo de sectores homogéneos

Fuente: Apéndice J de la Guía AASTHO-93

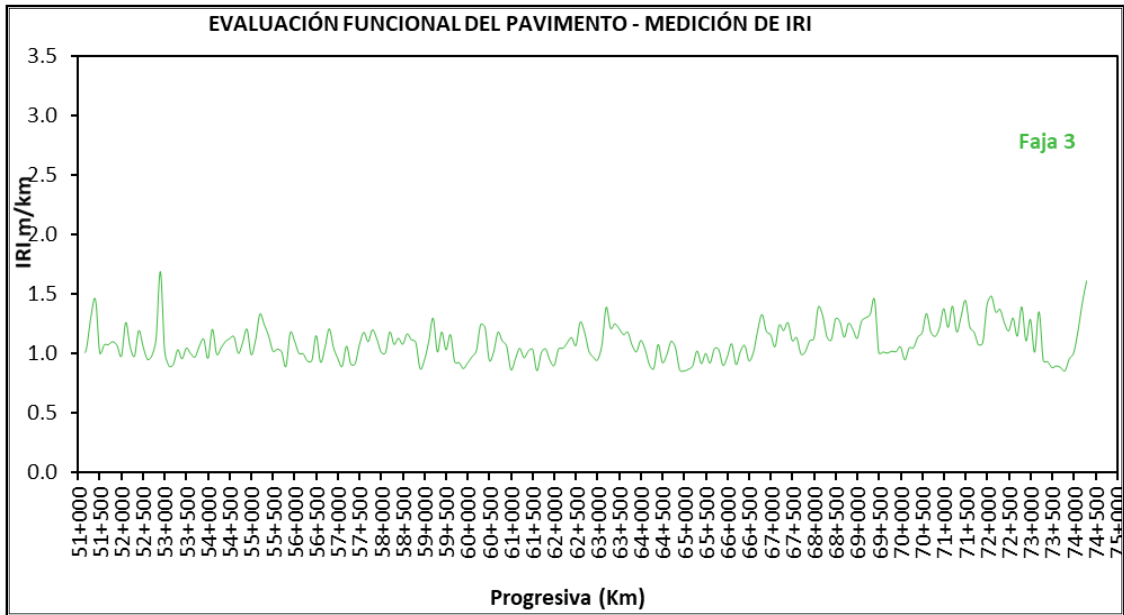


Figura 21: Medición de IRI Km 51+000 al Km 75+000
Fuente: OSITRAN

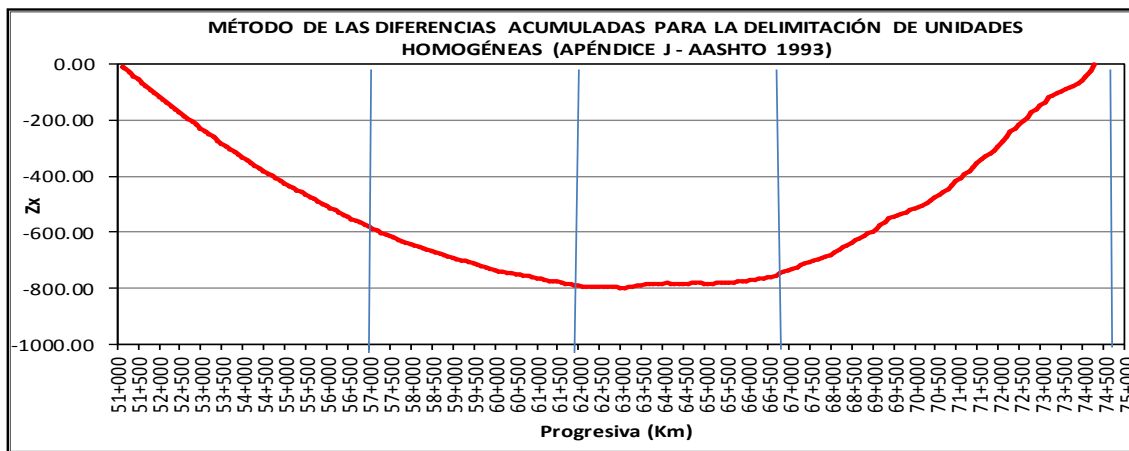


Figura 22: Diferencias acumuladas Km 51+000 al Km 75+000
Fuente: Elaboración propia

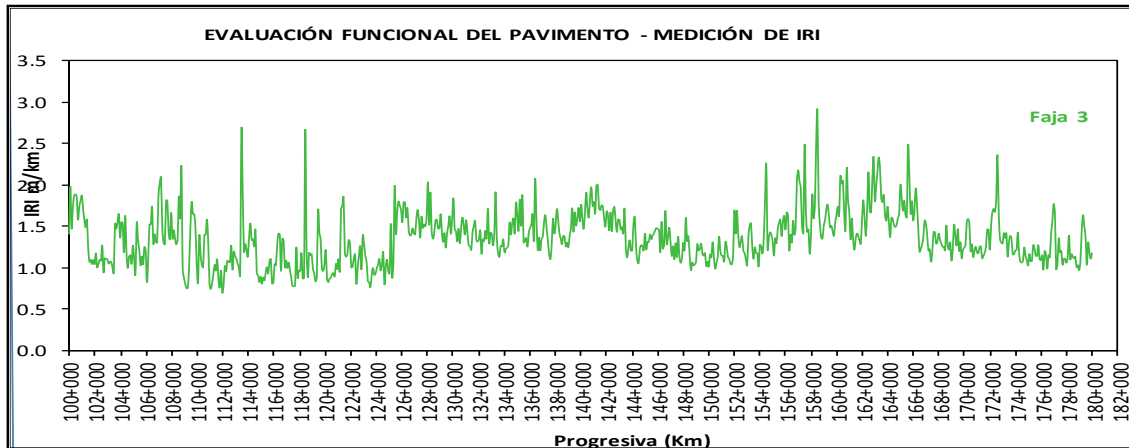


Figura 23: Medición de IRI Km 100+000 al Km 182+000
Fuente: OSITRAN

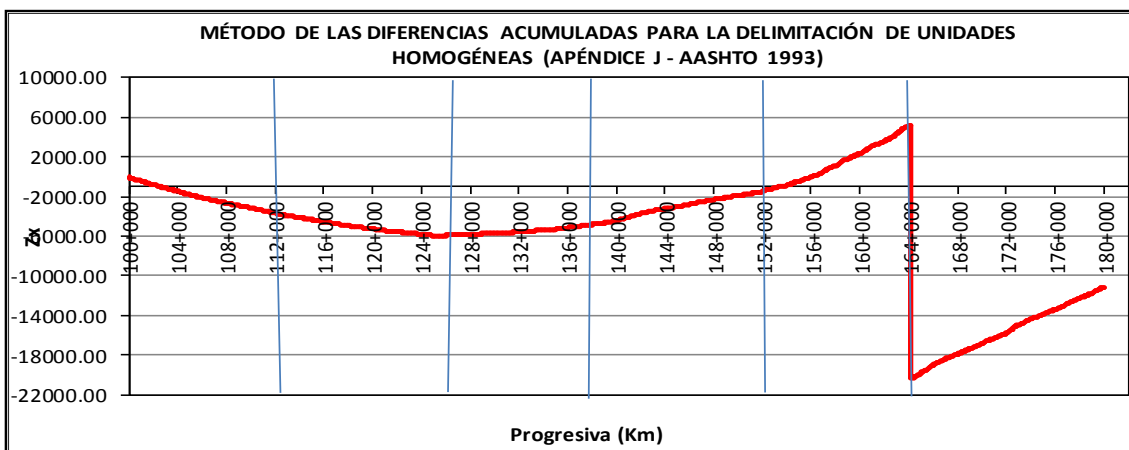


Figura 24: Diferencias acumuladas Km 100+000 al Km 182+000
Fuente: Elaboración propia

Para un mejor análisis se consolidaron los sectores homogéneos obtenidos en función a las mediciones del IRI que nos conduce a una sectorización final asumida conforme se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 20
Sectores homogéneos asumidos

Sector N°	Km inicial	Km final	Distancia (Km)
1	51+000	57+000	6.00
2	57+000	62+000	5.00
3	62+000	67+000	5.00
4	67+000	75+000	8.00
5	100+000	112+000	12.00
6	112+000	126+000	14.00

7	126+000	138+000	12.00
8	138+000	152+000	14.00
9	152+000	164+000	12.00
10	164+000	181+000	17.00

Fuente: Elaboración propia

3.5.1 Procesamiento de datos para el modelo estocástico probabilístico

Se desarrolla el método estocástico-probabilístico conocido como Markoviano, que puede ser aplicado para predecir el deterioro del pavimento, según tres restricciones:

- El método estocástico debe ser discreto en el tiempo

El deterioro del pavimento normalmente es continuo en el tiempo, pero también es posible considerarlo como discreto ya que comúnmente el análisis de la condición del pavimento se realiza en puntos específicos en el tiempo, por lo general anualmente.

- El método estocástico debe tener un número contable o finito de posibles resultados

Aunque el deterioro del pavimento tiene infinitos posibles resultados, se puede expresar en base a un rango de posibles resultados como un conjunto de condiciones discretas. Esto quiere decir un número relativamente pequeño de grupos fijos de condición para un defecto tomado en consideración.

- El método estocástico debe satisfacer la Propiedad de Markov

Lo que significa que la condición futura del pavimento depende del presente y no de la condición pasada. Por medio de la aplicación del Markoviano durante una serie de años, será posible predecir en que condición se encuentra un tramo de la red en el año que se desee. Estas series de predicciones son llamadas Cadenas de Markov.

Adicionalmente a las tres restricciones, la Cadena de Markov discreta en el tiempo será estacionaria u homogénea en el tiempo, si la probabilidad de pasar de un estado a otro es independiente del tiempo que se está analizando. En este caso se considera que la red de carretera va a deteriorarse siguiendo las probabilidades de transición de una única matriz. Sin embargo, si es probable que el patrón de deterioro de una red de carreteras en particular cambie en un cierto punto en el tiempo, “t”, el proceso de deterioro puede ser modelado mediante una cadena no estacionaria. Para esto se necesitará de una matriz de transición diferente antes y después de “t”. En este caso, la distribución de la condición en el tiempo “t” se volverá la distribución de la condición inicial para la segunda cadena, la cual empleará una matriz de transición diferente. Este tipo de arreglo puede realizarse tantas veces como sean necesarias permitiendo tomar en consideración patrones de tráfico (Benedict, S., Somerville, M., Vassiliki, L., Ortiz-Garcia, J., Rupiny, H., 2011).

De acuerdo con Ortiz Gracia et al (2006), es posible demostrar que un proceso de cadena Markov se puede utilizar para determinar el deterioro del pavimento de la siguiente manera:

- El deterioro del pavimento es continuo en el tiempo, sin embargo, para que sea discreto la condición de la red carretera se analiza en los puntos específicos en el tiempo. Estos suelen adoptar la forma de ciclos de trabajo de 1 año.
- El espacio de estado, que es el número de resultados posibles, es infinito. Sin embargo, el espacio, en realidad, es definido como un número finito de bandas de condición de un defecto particular considerado.
- En el deterioro del pavimento, se suponen las propiedades de Markov.

De acuerdo con Lethanh y Bryan (2012), los modelos de Markov, tienen las siguientes ventajas:

- Permiten la generalización del proceso de deterioro dentro del diseño de transición entre los estados de condición, lo cual es adecuado para representar el comportamiento del pavimento.

- Se pueden usar en ausencia de datos históricos, es decir la probabilidad de observación de un estado futuro depende solamente de la probabilidad del estado de condición observado en el presente. Así con un mínimo de dos inspecciones visuales, el progreso de deterioro se puede predecir.

El modelo de Markov requiere el uso consistente de un esquema de evaluación de condición de estado y un intervalo de tiempo uniforme entre observaciones y asume que la probabilidad de hacer una transición para pasar de un estado a otro depende solo del estado inicial, más que de la edad, la condición pasada, o alguna otra información acerca del elemento. Así el modelo es expresado como una simple matriz de probabilidades (Thompson et al., 2012).

Una matriz de probabilidades de transición representa la probabilidad de estados de condición de la red de carretera al pasar de un año a otro, la notación es la siguiente:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}$$

La matriz contiene toda la información necesaria para modelar el movimiento del proceso entre los estados de deterioro. Cada p_{ij} representa la probabilidad de que una porción de la red carretera se mueva del estado i al estado j en un ciclo de trabajo. Un ciclo de trabajo en el deterioro del pavimento se define como un año de tránsito y degradación ambiental (Ortiz-García et al., 2006).

De acuerdo con lo descrito en el reporte 713 de la NCHRP (Thompson et al., 2012), una matriz de probabilidad de transición con propiedades deseables debe cumplir con las siguientes reglas:

1. Matriz cuadrada. Todas las matrices de probabilidad de transición son cuadradas, con un número de columnas y un número de renglones iguales al número de posibles estados de condición.

2. Superior triangular derecha. Solo la diagonal principal y el triángulo superior derecho de la matriz deben tener valores mayores de cero. Esto es otra forma de decir que no se puede pasar de algún estado de condición a uno mejor en un modelo de deterioro.

3. No negativos. Ningún elemento en la matriz puede ser negativo.

4. Diagonal positiva. Los elementos en la diagonal no deben ser ceros. En otras palabras, siempre debe existir la posibilidad de que un tramo permanezca en el mismo estado de condición de una inspección a la siguiente.

5. Normalizado. Todos los renglones de la matriz deben sumar separadamente 100 %. Es decir, la matriz de probabilidad de transición debe considerar todas las posibles transiciones.

6. Debido a la combinación de estas reglas, el elemento en la esquina inferior derecha debe ser 100 %, representando el deterioro del activo a la peor condición.

Seguidamente se elabora la matriz de probabilidad de transición considerando que no se efectúan actividades de conservación y exceptuando el sector ubicado entre el Km 75+000 al Km 100+000, en el que se realizó una intervención el año 2015.

Previamente, en el análisis se eliminaron los valores atípicos de IRI, aquellos que presentaban dispersión respecto a la gama de valores medidos, para ello se utilizó la prueba de tukey con los que se definen los límites superior (Ls) e inferior (Li). Los valores que se encuentran fuera de los extremos de los límites se denominan atípicos.

El estado de condición del IRI se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 21

Estado de condición del IRI. Calidad del pavimento asfáltico

PSI	IRI	Nivel de evaluación
4 - 5	$IRI \leq 1.8$	Muy Buena
3 - 4	$1.8 < IRI \leq 2.8$	Buena
2 - 3	$2.8 < IRI \leq 4.3$	Regular
1 - 2	$4.3 < IRI \leq 6.8$	Mala
0 - 1	$IRI > 6.8$	Muy mala

Fuente: (Hoang., 2017)

Para procesar la información del IRI inicialmente se definieron rangos de valores como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 22

Estado de condición del IRI

Rangos de IRI (m/km)	Estado
De 0.0 a 1.0	B1
De 1.0 a 2.0	B2
De 2.0 a 3.0	B3
De 3.0 a 4.0	B4
De 4.0 a 5.0	B5

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, al tener valores con buen estado de condición y al no presentar variabilidad significativa de un periodo a otro, se adopta un estado de condición más riguroso para poder aplicar el modelo estocástico-probabilístico. Para el desarrollo de este modelo, los estados del proceso de Markov corresponden a los distintos niveles de deterioro del pavimento definidos en la calificación del IRI. El rango del IRI se divide en cinco estados con los siguientes intervalos que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 23

Estado de condición del IRI

Rangos de IRI (m/km)	Estado
De 0.8 a 1.1	B1
De 1.1 a 1.3	B2
De 1.3 a 1.5	B3
De 1.5 a 1.7	B4
De 1.7 a 3.0	B5

Fuente: Elaboración propia

La siguiente ecuación ilustra el vector de estado para un determinado ciclo de servicio.

$$E^{(i)} = [p_i(B1) \ p_i(B2) \ p_i(B3) \ p_i(B4) \ p_i(B5)] \quad \text{Ec. (5)}$$

Vector de estado para el ciclo de servicio “i”

Fuente: Bult et al., 1994

Donde, $p_i(X)$ es la probabilidad de que el pavimento se encuentre en el estado “X” en el ciclo de servicio “i”, el “vector de estado” ($E^{(i)}$) indica la probabilidad de que una sección de pavimento se encuentre en cada uno de los cinco estados en un año de servicio (i) y un “ciclo de servicio” tiene la duración de un año, tiempo en el que el pavimento es sometido a determinados agentes como el clima y tráfico principalmente.

Se asume que todas las secciones del pavimento se encuentran en el estado “B1” (IRI de 0.8 a 1.10) a la edad de cero años (ciclo de servicio “0”), resultando un vector de estado:

$$E^{(0)} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad \text{Ec. (6)}$$

Vector de estado para el ciclo de servicio “0”

Fuente: Bult et al., 1994

Para modelar la manera en que el pavimento se deteriora con el tiempo, es necesario identificar la Matriz de Probabilidades de Transición (MPT).

Se asume que la condición de pavimento sin intervención no puede mejorar durante un ciclo de servicio. Además, el pavimento puede permanecer en su estado o deteriorarse y pasar al siguiente estado en un año. En consecuencia, la MPT tiene la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & P_{BB} & P_{BC} & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & P_{CC} & P_{CD} & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & P_{DD} & P_{DE} \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

Matriz de probabilidades de transición
Fuente: Bult et al., 1994

Donde, p_{ij} es la probabilidad de que el pavimento en estado i , cambie al estado j entre los ciclos de servicio t y $t+1$. El valor de 1 en la última fila de la MPT corresponde al estado “J”, que indica que la condición del pavimento no puede pasar de este estado, a menos que se realice una intervención en el pavimento.

El vector de estado para cualquier año de servicio se obtiene de multiplicar el vector de estado inicial por la MPT, tal como se ilustra en las ecuaciones siguientes:

$$\mathbf{E}_{(1)} = \mathbf{E}_{(0)} \times \mathbf{P} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\mathbf{E}_{(2)} = \mathbf{E}_{(1)} \times \mathbf{P} = \mathbf{E}_{(0)} \times \mathbf{P}^2$$

•

•

$$\mathbf{E}_{(t)} = \mathbf{E}_{(t-1)} \times \mathbf{P} = \mathbf{E}_{(0)} \times \mathbf{P}^t \quad \text{Ec. (8)}$$

Se clasifican los valores que determinan su estado para los años 2010, 2012, 2015 y 2016, en el que se observa los kilómetros que cambiaron su condición de IRI, en rango al pasar de un año a otro. Algunos segmentos mantuvieron su estado al pasar de un año a otro, sin embargo, algunos otros segmentos presentaron inconsistencias en el valor medido de IRI, ya que los valores registrados en las últimas mediciones son menores a años anteriores, lo que no es posible ya que el valor del IRI no puede mejorar su condición si no se realizan acciones de mantenimiento. Para estos segmentos se considera que no cambiaron su condición de estado.

Con los datos procesados de la tabla 19 se obtuvieron el número de segmentos que cambiaron de estado o permanecieron en el mismo estado en el transcurso de un año. En las tablas siguientes se presenta en forma matricial la distribución de segmentos con sus estados de condición.

Tabla 24

Resumen de distribución de segmentos y estado de condición años 2010 al 2016

	B1	B2	B3	B4	B5
	0.8	1.1	1.3	1.5	1.7
	1.1	1.3	1.5	1.7	3
¿Mantiene condición?					
SI	87	92	42	21	5
NO	34	34	20	10	0
TOTAL	121	126	62	31	5
%SI	0.72	0.73	0.68	0.68	1.00
%NO	0.28	0.27	0.32	0.32	0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Cambio de estado de condición al año 2016

		% MED
		2016
B1 %	34	0.35
B2 %	34	0.35
B3 %	20	0.20
B4 %	10	0.10
B5 %	0	0.0
Total	98	

Fuente: Elaboración propia

	B1	B2	B3	B4	B5
B1	0.72	0.28	0.00	0.00	0.00
B2	0.00	0.73	0.27	0.00	0.00
B3	0.00	0.00	0.68	0.32	0.00
B4	0.00	0.00	0.00	0.68	0.32
B5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Matriz de probabilidades de transición

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26
Cambios de estado de condición del año 2016 al año 2018

Kilómetros	IRI m/km 2016	IRI m/km 2018	B1	B2	B3	B4	B5
			0.8	1.1	1.3	1.5	1.7
			1.1	1.3	1.5	1.7	3
51.00	1.20	1.16					
52.00	1.14	1.14		1			
53.00	1.07	1.12		1			
54.00	1.11	1.09					
55.00	1.16	1.09					
56.00	1.09	1.12		1			
57.00	1.09	1.03					
58.00	1.12	1.06					
59.00	1.07	1.08	1				
60.00	1.07	1.03					
61.00	1.05	1.02					
62.00	1.11	1.00					
63.00	1.17	1.09					
64.00	1.06	1.14		1			
65.00	0.96	0.97	1				
66.00	1.22	0.98					
67.00	1.28	1.04					
68.00	1.32	1.15					
69.00	1.24	1.24		1			
70.00	1.16	1.10					
71.00	1.33	1.19					
72.00	1.29	1.24					
73.00	1.05	1.26		1			
74.00	1.40	1.00					
75.00	1.52	1.46					
76.00	1.44	1.52					
77.00	1.38	1.32					
78.00	1.22	1.18					
79.00	1.61	1.20					
80.00	1.59	1.73					
81.00	1.56	1.36					
82.00	1.52	1.33					
83.00	1.42	1.47					
84.00	1.42	1.13					
85.00	1.65	1.14					
86.00	1.66	1.62					
87.00	1.58	1.45					
88.00	1.59	1.51					
89.00	1.67	1.60					
90.00	1.75	1.53					
91.00	1.80	1.56					
92.00	2.03	1.80					
93.00	1.92	1.96					
94.00	1.70	1.68					
95.00	1.78	1.64					
96.00	1.73	1.73					
97.00	1.66	1.54					
98.00	1.84	1.53					

Kilómetros	IRI m/km 2016	IRI m/km 2018	B1 0.8	B2 1.1	B3 1.3	B4 1.5	B5 1.7
			1.1	1.3	1.5	1.7	3
99.00	1.95	1.71					
100.00	1.36	1.64				1	
101.00	1.39	1.47			1		
102.00	1.16	1.15					
103.00	1.29	1.06					
104.00	1.46	1.37					
105.00	1.25	1.20					
106.00	1.36	1.15					
107.00	1.55	1.56				1	
108.00	1.49	1.42					
109.00	1.29	1.26					
110.00	1.23	1.56				1	
111.00	0.94	1.01	1				
112.00	1.10	0.91					
113.00	1.36	1.10					
114.00	1.21	1.34			1		
115.00	1.01	0.99					
116.00	1.14	0.97					
117.00	0.96	1.10	1				
118.00	1.24	0.91					
119.00	1.20	1.17					
120.00	1.02	1.05	1				
121.00	1.33	1.03					
122.00	1.15	1.28		1			
123.00	1.04	1.13		1			
124.00	1.06	0.96					
125.00	1.49	1.04					
126.00	1.60	1.51					
127.00	1.61	1.47					
128.00	1.68	1.53					
129.00	1.65	1.49					
130.00	1.68	1.45					
131.00	1.54	1.43					
132.00	1.47	1.37					
133.00	1.33	1.35			1		
134.00	1.46	1.27					
135.00	1.54	1.48					
136.00	1.48	1.46					
137.00	1.45	1.35					
138.00	1.58	1.39					
139.00	1.59	1.28					
140.00	1.77	1.59					
141.00	1.74	1.79					1
142.00	1.61	1.66				1	
143.00	1.42	1.51				1	
144.00	1.34	1.40			1		
145.00	1.42	1.23					
146.00	1.46	1.38					
147.00	1.27	1.35			1		
148.00	1.24	1.24		1			
149.00	1.20	1.17					

Kilómetros	IRI m/km 2016	IRI m/km 2018	B1	B2	B3	B4	B5
			0.8 1.1	1.1 1.3	1.3 1.5	1.5 1.7	1.7 3
150.00	1.22	1.12					
151.00	1.20	1.13					
152.00	1.37	1.26					
153.00	1.27	1.24					
154.00	1.43	1.18					
155.00	1.51	1.42					
156.00	1.64	1.54					
157.00	1.79	1.64					
158.00	1.81	1.69					
159.00	1.60	1.78					1
160.00	1.75	1.60					
161.00	1.45	1.75					1
162.00	1.81	1.40					
163.00	1.93	1.86					
164.00	1.58	1.88					1
165.00	1.78	1.59					
166.00	1.57	1.80					1
167.00	1.33	1.39			1		
168.00	1.32	1.26					
169.00	1.31	1.26					
170.00	1.36	1.27					
171.00	1.31	1.25					
172.00	1.61	1.29					
173.00	1.30	1.51				1	
174.00	1.19	1.23		1			
175.00	1.19	1.11					
176.00	1.18	1.12					
177.00	1.24	1.19					
178.00	1.17	1.16					
179.00	1.24	1.09					
180.00	1.23	1.23		1			
181.00	1.57	1.21					
			5	11	6	6	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27
Cambio de estado al año 2018

	% MED	
		2018
B1 %	5	0.15
B2 %	11	0.33
B3 %	6	0.18
B4 %	6	0.18
B5 %	5	0.15
Total	33	

Fuente: Elaboración propia

$$\begin{array}{c}
2016 \\
\left[\begin{array}{l} B1 = 0.35 \\ B2 = 0.35 \\ B3 = 0.20 \\ B4 = 0.10 \\ B5 = 0.00 \end{array} \right] * \left[\begin{array}{c|ccccc} & B1 & B2 & B3 & B4 & B5 \\ \hline B1 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 & 0 \\ B2 & 0 & 0.73 & 0.27 & 0 & 0 \\ B3 & 0 & 0 & 0.68 & 0.32 & 0 \\ B4 & 0 & 0 & 0 & 0.68 & 0.32 \\ B5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|ccccc} & B1 & B2 & B3 & B4 & B5 \\ \hline B1 & 0.25 & 0.10 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ B2 & 0.00 & 0.25 & 0.09 & 0.00 & 0.00 \\ B3 & 0.00 & 0.00 & 0.14 & 0.07 & 0.00 \\ B4 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.07 & 0.03 \\ B5 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{array} \right] \\
\mathbf{0.25 \quad 0.35 \quad 0.23 \quad 0.13 \quad 0.03}
\end{array}$$

Matriz de predicción 2017
Fuente: Elaboración propia

$$\begin{array}{c}
2017 \\
\left[\begin{array}{l} B1 = 0.25 \\ B2 = 0.35 \\ B3 = 0.23 \\ B4 = 0.13 \\ B5 = 0.03 \end{array} \right] * \left[\begin{array}{c|ccccc} & B1 & B2 & B3 & B4 & B5 \\ \hline B1 & 0.72 & 0.28 & 0 & 0 & 0 \\ B2 & 0 & 0.73 & 0.27 & 0 & 0 \\ B3 & 0 & 0 & 0.68 & 0.32 & 0 \\ B4 & 0 & 0 & 0 & 0.68 & 0.32 \\ B5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|ccccc} & B1 & B2 & B3 & B4 & B5 \\ \hline B1 & 0.18 & 0.07 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ B2 & 0.00 & 0.26 & 0.09 & 0.00 & 0.00 \\ B3 & 0.00 & 0.00 & 0.16 & 0.07 & 0.00 \\ B4 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.09 & 0.04 \\ B5 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.03 \end{array} \right] \\
\mathbf{0.18 \quad 0.33 \quad 0.25 \quad 0.17 \quad 0.08}
\end{array}$$

Matriz de predicción 2018
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las bandas definidas y estado de condición para el IRI, se toma el promedio y se obtiene el siguiente vector.

$$\mathbf{a_0 = (0.95, 1.20, 1.40, 1.60, 2.60)} \quad \text{Ec. (9)}$$

Con la multiplicación reiterada de a_0 por la Matriz de Probabilidad de Transición para un periodo de análisis de 20 años, se generan los vectores de estado y la curva de deterioro del valor esperado del IRI para cada año, el cual se calcula como el producto interior del vector de estado y el vector de estado de condición inicial del IRI tal como se muestra en las tablas siguientes:

Tabla 28
Vectores de condición de estado

t	B1	B2	B3	B4	B5
2016	0.35	0.35	0.20	0.10	0.00
2017	0.25	0.35	0.23	0.13	0.03
2018	0.18	0.33	0.25	0.16	0.07
2019	0.13	0.29	0.26	0.19	0.13
2020	0.09	0.25	0.26	0.21	0.19
2021	0.07	0.21	0.24	0.23	0.26
2022	0.05	0.17	0.22	0.23	0.33
2023	0.04	0.14	0.20	0.23	0.40
2024	0.03	0.11	0.17	0.22	0.48
2025	0.02	0.09	0.15	0.20	0.55
2026	0.01	0.07	0.12	0.18	0.61
2027	0.01	0.05	0.10	0.16	0.67
2028	0.01	0.04	0.08	0.14	0.72
2029	0.00	0.03	0.07	0.13	0.77
2030	0.00	0.03	0.06	0.11	0.81
2031	0.00	0.02	0.04	0.09	0.84
2032	0.00	0.01	0.04	0.08	0.87
2033	0.00	0.01	0.03	0.06	0.90
2034	0.00	0.01	0.02	0.05	0.92
2035	0.00	0.01	0.02	0.04	0.93
2036	0.00	0.01	0.01	0.03	0.95

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29
Curva de deterioro funcional

t	IRIt
2016	1.19
2017	1.28
2018	1.37
2019	1.47
2020	1.58
2021	1.68
2022	1.79
2023	1.89
2024	1.98
2025	2.07
2026	2.15
2027	2.22
2028	2.28
2029	2.34
2030	2.38
2031	2.42
2032	2.46
2033	2.49
2034	2.51
2035	2.53
2036	2.54

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Procesamiento de datos para el desarrollo del modelo empírico

A continuación, se presenta la modelación del deterioro empírico del pavimento en función a las mediciones del IRI de los años 2010, 2012, 2015 y 2016. Por lo general, las diversas formas usadas para medir la condición del IRI, tienen la tendencia a seguir comportamientos en forma de funciones exponenciales, logísticas o sigmoidales. La curva sigmoideal está representada en la figura siguiente:

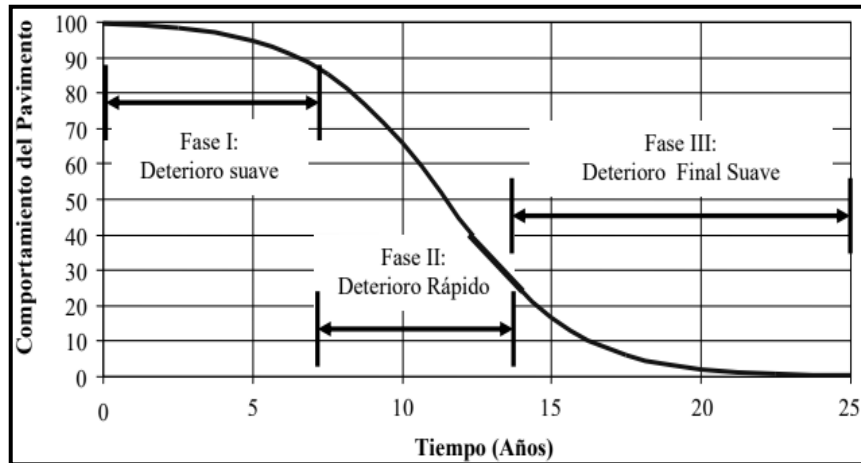


Figura 25: Comportamiento asumido de un pavimento
Fuente: FHWA

El modelo matemático que lo representa es el siguiente:

$$A = a + \frac{b}{1 + e^{-(c \cdot B) + d}} \quad \text{Ec. (10)}$$

Dónde: A = Valor deseado

B = Variable independiente

a = Mínimo valor de A

a+b = Máximo valor de A

c, d = Parámetros que describen la forma de la función sigmoideal

Sin embargo, los valores medidos en campo indican un buen estado de condición del IRI por lo que la tendencia de su comportamiento se asemeja a una función polinomial representada por la línea azul de la siguiente figura

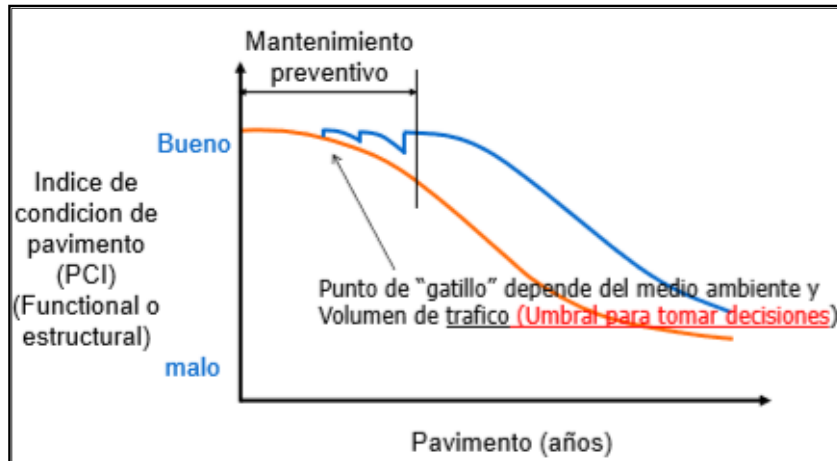


Figura 26: Perfil de deterioro de un pavimento con una oportunidad de Mantenimiento preventivo

Fuente: Delmar Salomón

El modelo matemático que lo representa es el siguiente:

$$IRI = a + b \cdot T + c \cdot T^2 \quad \text{Ec. (11)}$$

Dónde: IRI = Valor pronosticado

T = Variable independiente

a, b, c = Parámetros que describen la función polinomial

Analizando las variaciones de la data de campo de manera individual en cada sección por kilómetro, se observa que los valores se incrementan al paso de los años y en muchos casos esa tendencia disminuye para luego nuevamente seguir la tendencia creciente. La explicación a dichas variaciones obedece principalmente a los diferentes procedimientos y criterios de medir el IRI por parte de las diversas empresas consultoras o posibles intervenciones de mantenimiento de la calzada.

En los sectores donde se presentan dichos cambios, la sección es subdividida según los periodos de medición. La primera sección considera los puntos antes de cualquier intervención y se obtiene un tiempo relativo, empezando en 0 con el primer punto disponible. La segunda sección empezaba en la fecha de mejoramiento hasta el siguiente punto o hasta donde otra mejora fuese indicada. El tiempo reducido es obtenido al convertir el tiempo real, quedando entonces la curva polinomial relacionada con una

curva y ecuación de factores de conversión. La ecuación de conversión del tiempo está definida por la siguiente ecuación:

$$B = t + a(\text{IRI}) \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde: B = Tiempo reducido

t = Tiempo desde última intervención o primera fecha disponible

a(IRI) = Factor de conversión del valor IRI

A manera de ejemplo a continuación desarrollamos la sección Km 51+000 al Km 52+000.

El valor en el año 2010 es 1.21 y le corresponde el número 0, luego observamos el año 2012 y su valor creciente de 1.35 que le correspondería el número 2 (2012-2010), sin embargo, para el año 2015 observamos el valor de 1.18 que se considera como mejora ya que se sabe que el IRI no se “auto mejora” (que obedecería a los distintos procedimientos de medición), empezando nuevamente con 0 en este punto y por último el año 2016 presenta un valor de 1.20 indicando un ligero deterioro correspondiendo el número 1 (2016-2015).

Tabla 30

Tiempos relativos por secciones del Km 51+000 al Km 182+000

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	51-1	1.21	0
2012	51-1	1.35	2
2015	51-2	1.18	0
2016	51-2	1.20	1
2010	52-1	1.08	0
2012	52-1	1.18	2
2015	52-2	1.08	0
2016	52-2	1.14	1
2010	53-1	1.03	0
2012	53-1	1.06	2
2015	53-1	1.07	5
2016	53-1	1.07	6
2010	54-1	0.99	0
2012	54-1	1.00	2
2015	54-1	1.10	5
2016	54-1	1.11	6

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	55-1	1.00	0
2012	55-1	1.03	2
2015	55-1	1.20	5
2010	56-1	1.03	0
2012	56-1	1.08	2
2015	56-2	1.03	0
2016	56-2	1.09	1
2010	57-1	0.94	0
2012	57-1	0.99	2
2015	57-1	1.00	5
2016	57-1	1.09	6
2010	58-1	0.96	0
2012	58-1	1.01	2
2015	58-1	1.10	5
2016	58-1	1.12	6
2010	59-1	1.03	0
2012	59-1	1.05	2
2015	59-2	1.04	0
2016	59-2	1.07	1
2010	60-1	0.97	0
2012	60-1	1.00	2
2015	60-1	1.01	5
2016	60-1	1.07	6
2010	61-1	0.94	0
2012	61-1	1.00	2
2015	61-2	1.00	0
2016	61-2	1.05	1
2010	62-1	0.90	0
2012	62-1	0.92	2
2015	62-1	1.02	5
2016	62-1	1.11	6
2010	63-1	1.01	0
2012	63-1	1.03	2
2015	63-1	1.20	5
2010	64-1	1.10	0
2012	64-1	1.12	2
2015	64-2	0.97	0
2016	64-2	1.06	1
2015	65-3	0.96	0
2016	65-3	0.96	1
2012	66-2	0.92	0
2015	66-2	1.10	3
2016	66-2	1.22	4
2010	67-1	1.04	0
2012	67-1	1.06	2
2015	67-1	1.17	5
2016	67-1	1.28	6
2010	68-1	1.10	0
2012	68-1	1.11	2
2015	68-1	1.28	5
2016	68-1	1.32	6

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	69-1	1.13	0
2012	69-1	1.19	2
2015	69-2	1.12	0
2016	69-2	1.24	1
2010	70-1	1.01	0
2012	70-1	1.10	2
2015	70-2	1.07	0
2016	70-2	1.16	1
2012	71-2	1.09	0
2015	71-2	1.16	3
2016	71-2	1.33	4
2010	72-1	1.17	0
2012	72-1	1.24	2
2015	72-1	1.29	5
2010	73-1	1.18	0
2012	73-1	1.23	2
2015	73-2	1.04	0
2016	73-2	1.05	1
2010	74-1	0.94	0
2012	74-1	0.98	2
2015	74-1	1.45	5
2012	75-2	1.27	0
2015	75-2	1.48	3
2016	75-2	1.52	4
2010	101-1	1.19	0
2012	101-1	1.64	2
2015	101-2	1.23	0
2016	101-2	1.39	1
2010	102-1	1.11	0
2012	102-1	1.31	2
2015	102-2	1.10	0
2016	102-2	1.16	1
2010	103-1	1.10	0
2012	103-1	1.11	2
2015	103-1	1.32	5
2012	104-2	1.29	0
2015	104-3	1.29	3
2010	105-1	1.13	0
2012	105-1	1.23	2
2015	105-2	1.21	0
2016	105-2	1.25	1
2010	106-1	1.13	0
2012	106-1	1.14	2
2015	106-1	1.61	5
2010	107-1	1.44	0
2012	107-1	1.51	2
2015	107-1	1.58	5
2010	108-1	1.29	0
2012	108-1	1.61	2
2015	108-2	1.46	0
2016	108-2	1.49	1

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	109-1	1.19	0
2012	109-1	1.42	2
2015	110-3	1.06	0
2016	110-3	1.23	1
2010	111-1	0.98	0
2012	111-1	1.23	2
2015	111-2	0.91	0
2016	111-2	0.94	1
2012	112-2	0.89	0
2015	112-2	1.15	3
2010	113-1	1.08	0
2012	113-1	1.10	2
2015	113-1	1.38	5
2010	114-1	1.28	0
2012	114-1	1.44	2
2015	114-2	1.17	0
2016	114-2	1.21	1
2010	115-1	0.93	0
2012	115-1	1.12	2
2015	115-2	0.94	0
2016	115-2	1.01	1
2010	116-2	0.97	0
2012	116-2	1.23	3
2015	117-1	0.98	0
2016	117-1	1.20	2
2012	118-2	0.90	0
2015	118-2	1.06	3
2016	118-2	1.24	4
2010	119-1	1.05	0
2012	119-1	1.19	2
2015	119-2	1.10	0
2016	119-2	1.20	1
2010	120-1	0.96	0
2012	120-1	1.08	2
2015	120-2	0.98	0
2016	120-2	1.02	1
2010	121-2	0.93	0
2012	121-2	1.42	3
2015	122-1	1.08	0
2016	122-1	1.36	2
2010	123-1	1.10	0
2012	123-1	1.12	2
2015	123-2	0.95	0
2016	123-2	1.04	1
2012	124-2	0.96	0
2015	124-2	1.06	3
2016	124-2	1.06	4
2012	125-2	1.02	0
2015	125-2	1.51	3
2012	126-2	1.47	0
2015	126-2	1.67	3

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	127-1	1.47	0
2012	127-1	1.53	2
2015	127-1	1.73	5
2012	128-2	1.48	0
2015	128-2	1.67	3
2016	128-2	1.68	4
2010	129-1	1.41	0
2012	129-1	1.56	2
2015	129-2	1.54	0
2016	129-2	1.65	1
2012	130-2	1.43	0
2015	130-2	1.43	3
2016	130-2	1.68	4
2010	131-1	1.30	0
2012	131-1	1.39	2
2015	131-2	1.38	0
2016	131-2	1.54	1
2010	132-1	1.29	0
2012	132-1	1.32	2
2015	132-1	1.46	5
2016	132-1	1.47	6
2010	133-1	1.32	0
2012	133-1	1.33	2
2015	133-1	1.36	5
2010	134-1	1.29	0
2012	134-1	1.34	2
2015	134-1	1.50	5
2012	135-2	1.41	0
2015	135-2	1.51	3
2016	135-2	1.54	4
2015	136-3	1.44	0
2016	136-3	1.48	1
2010	137-1	1.37	0
2012	137-1	1.49	2
2015	137-2	1.45	0
2016	137-2	1.45	1
2015	138-3	1.34	0
2016	138-3	1.58	1
2012	139-2	1.34	0
2015	139-2	1.61	3
2012	140-2	1.51	0
2015	140-2	1.78	3
2012	141-2	1.66	0
2015	141-2	1.72	3
2016	141-2	1.74	4
2010	142-1	1.60	0
2012	142-1	1.65	2
2015	142-2	1.51	0
2016	142-2	1.61	1
2015	143-3	1.30	0
2016	143-3	1.42	1

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2015	144-3	1.25	0
2016	144-3	1.34	1
2012	145-2	1.27	0
2015	145-2	1.42	3
2016	145-2	1.42	4
2012	146-2	1.35	0
2015	146-2	1.51	3
2010	147-1	1.28	0
2012	147-1	1.33	2
2015	147-2	1.18	0
2016	147-2	1.27	1
2012	148-2	1.14	0
2015	148-2	1.17	3
2016	148-2	1.24	4
2012	149-2	1.14	0
2015	149-2	1.15	3
2016	149-2	1.20	4
2010	150-1	1.09	0
2012	150-1	1.11	2
2015	150-1	1.20	5
2016	150-1	1.22	6
2012	151-2	1.11	0
2015	151-2	1.24	3
2012	152-2	1.11	0
2015	152-2	1.31	3
2016	152-2	1.37	4
2010	153-1	1.18	0
2012	153-1	1.26	2
2015	153-2	1.24	0
2016	153-2	1.27	1
2012	154-2	1.20	0
2015	154-2	1.41	3
2016	154-2	1.43	4
2010	155-1	1.36	0
2012	155-1	1.43	2
2015	155-2	1.30	0
2016	155-2	1.51	1
2015	156-3	1.39	0
2016	156-3	1.64	1
2010	157-1	1.51	0
2012	157-1	1.52	2
2015	157-2	1.52	0
2016	157-2	1.79	1
2010	158-1	1.58	0
2012	158-1	1.64	2
2015	158-1	1.69	5
2016	158-1	1.81	6
2010	159-1	1.49	0
2012	159-1	1.68	2
2012	160-2	1.51	0
2015	160-2	1.80	3

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	161-1	1.50	0
2012	161-1	1.71	2
2015	161-2	1.37	0
2016	161-2	1.45	1
2012	162-2	1.33	0
2015	162-2	1.79	3
2016	162-2	1.81	4
2015	163-3	1.75	0
2016	163-3	1.93	1
2010	164-1	1.65	0
2012	164-1	1.84	2
2015	164-2	1.49	0
2016	164-2	1.58	1
2012	165-2	1.53	0
2015	165-2	1.76	3
2016	165-2	1.78	4
2010	166-1	1.51	0
2012	166-1	1.75	2
2015	166-2	1.40	0
2016	166-2	1.57	1
2010	167-1	1.27	0
2012	167-1	1.45	2
2012	168-2	1.20	0
2015	168-2	1.29	3
2016	168-2	1.32	4
2010	169-1	1.23	0
2012	169-1	1.24	2
2015	169-1	1.32	5
2015	170-3	1.27	0
2016	170-3	1.36	1
2010	171-1	1.14	0
2012	171-1	1.33	2
2015	171-2	1.24	0
2016	171-2	1.31	1
2012	172-2	1.31	0
2015	172-2	1.48	3
2016	172-2	1.61	4
2010	173-1	1.25	0
2012	173-1	1.62	2
2010	174-1	1.14	0
2012	174-1	1.29	2
2010	175-1	1.15	0
2012	175-1	1.16	2
2015	175-2	1.16	0
2016	175-2	1.19	1
2010	176-1	1.11	0
2012	176-1	1.26	2
2010	177-1	1.25	0
2012	177-1	1.43	2
2015	177-2	1.13	0
2016	177-2	1.24	1

Años	Sección	IRI med	Sin mejora
2010	178-1	1.09	0
2012	178-1	1.28	2
2015	178-2	1.10	0
2016	178-2	1.17	1
2010	179-1	1.19	0
2012	179-1	1.35	2
2010	180-1	1.15	0
2012	180-1	1.29	2
2015	180-2	1.22	0
2016	180-2	1.23	1
2012	181-2	1.18	0
2015	181-2	1.40	3
2016	181-2	1.57	4

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente la conversión de los datos en curvas sigmoidales se realiza usando una optimización no lineal de los factores de conversión en el espacio aritmético usando la función Solver del MS Excel.

Capítulo IV

Resultados y análisis de resultados

4.1 Resultados

Los resultados obtenidos antes del desarrollo de los modelos de deterioro, muestran los valores del IRI de los años 2010, 2012, 2015 y 2016 por cada kilómetro del sub tramo en evaluación entre Azángaro Km 51+000 - Macusani Km 182+000:

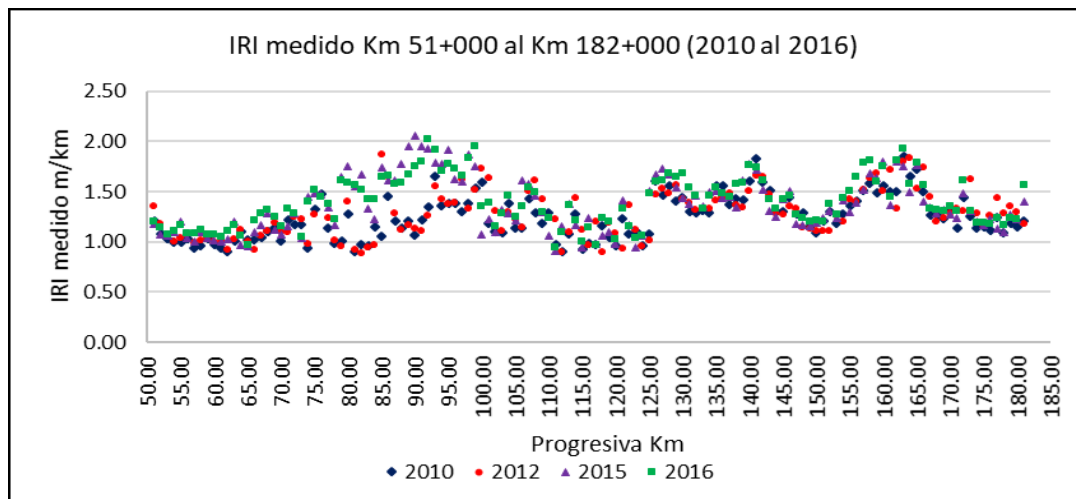


Figura 27: Grafico del IRI Km 51+000 al Km 182+000
Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Resultados del modelo estocástico probabilístico

Mediante la aplicación del método estándar y la distribución de segmentos que cambian de estado de condición al año 2016, se obtienen las matrices de transición para el desarrollo del modelo estocástico probabilístico:

	B1	B2	B3	B4	B5
B1	0.25	0.10	0.00	0.00	0.00
B2	0.00	0.25	0.09	0.00	0.00
B3	0.00	0.00	0.14	0.07	0.00
B4	0.00	0.00	0.00	0.07	0.03
B5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.35	0.23	0.13	0.03

Matriz de predicción al año 2017

Fuente: Elaboración propia

	B1	B2	B3	B4	B5
B1	0.18	0.07	0.00	0.00	0.00
B2	0.00	0.26	0.09	0.00	0.00
B3	0.00	0.00	0.16	0.07	0.00
B4	0.00	0.00	0.00	0.09	0.04
B5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
	0.18	0.33	0.25	0.17	0.08

Matriz de predicción al año 2018

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31

Resumen Matriz de predicción años 2017 y 2018

	% PRED	% PRED
	2017	2018
B1 %	0.25	0.18
B2 %	0.35	0.33
B3 %	0.23	0.25
B4 %	0.13	0.17
B5 %	0.03	0.08

Fuente: Elaboración propia

Para validar los valores del IRI pronosticados para el año 2018 por el modelo de deterioro estocástico probabilístico desarrollado en función a las mediciones de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, se compara con las mediciones de campo realizado en el año 2018 y la correlación obtenida se muestra en el grafico siguiente:

Tabla 32

Matriz de IRI medido y predecido año 2018

	% MED	% PRED
B1	15.15	17.94
B2	33.33	32.62
B3	18.18	25.17
B4	18.18	16.62
B5	15.15	7.65

Fuente: Elaboración propia

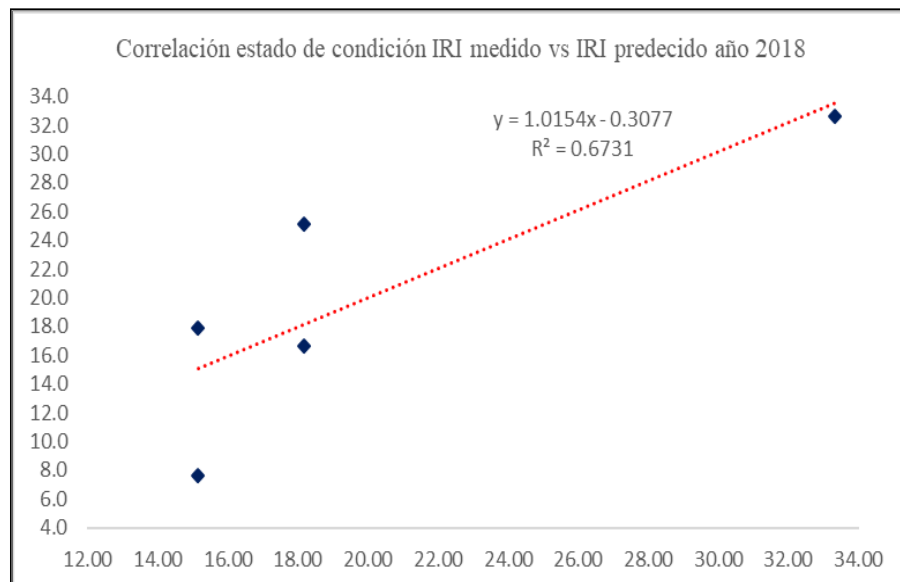


Figura 28: Correlación del IRI medido vs IRI pronosticado

Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura muestra la representación gráfica de la curva de deterioro del estado de condición de los valores esperados del IRI para cada año en los siguientes 20 años.

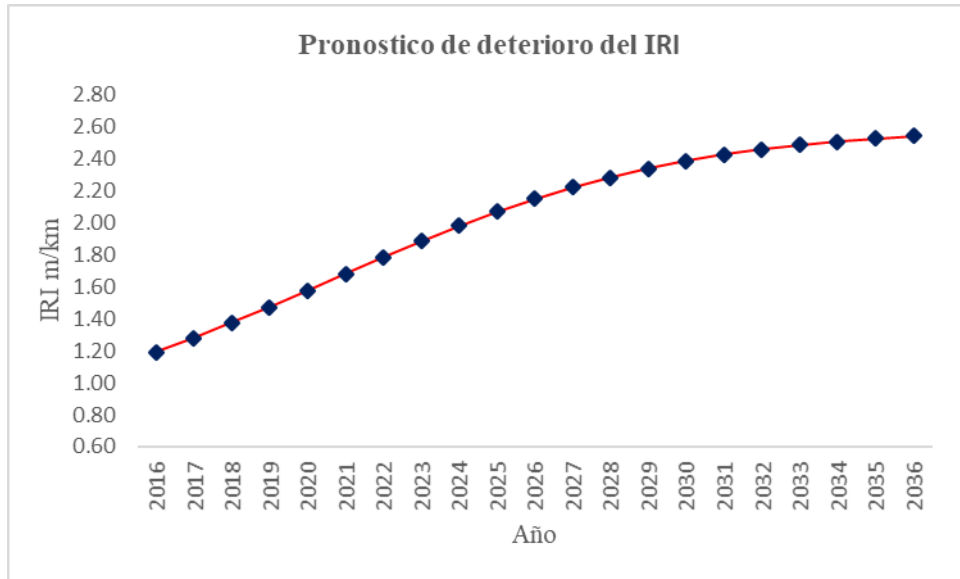


Figura 29: Curva de deterioro del IRI
Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Resultados del modelo empírico

El grafico obtenido de los valores de IRI medidos en campo, durante los años 2010, 2012, 2015 y 2016, a manera de ejemplo para los sectores Km 51+000 al Km 56+000, Km 57+000 al Km 61+000, Km 62+000 al Km 66+000 y 67+000 al Km 75+000, considerando los tiempos reducidos para la aplicación del desarrollo del modelo de deterioro empírico, antes y después de la conversión de datos para que encajen en una curva polinómica se muestra en las figuras siguientes:

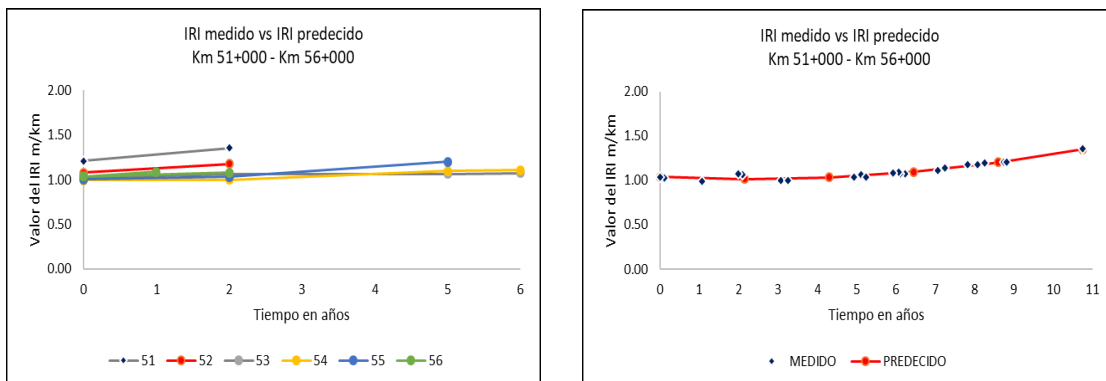


Figura 30: IRI medido vs IRI predecido Km 51+000 al Km 56+000
Fuente: Elaboración propia

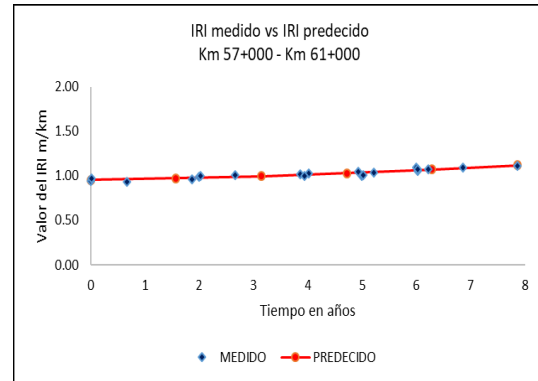
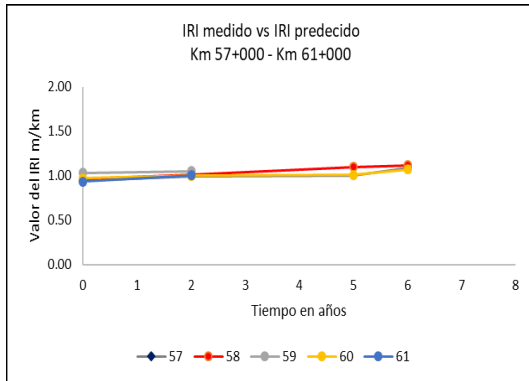


Figura 31: IRI medido vs IRI predecido Km 57+000 al Km 61+000
Fuente: Elaboración propia

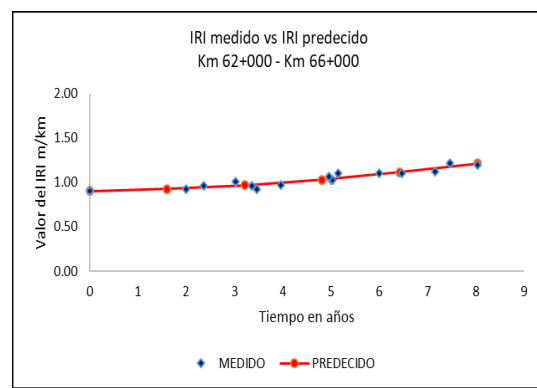
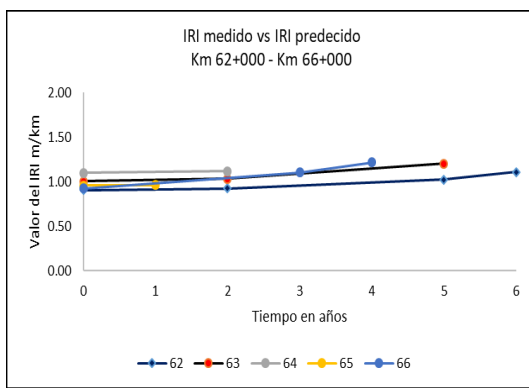


Figura 32: IRI medido vs IRI predecido Km 62+000 al Km 66+000
Fuente: Elaboración propia

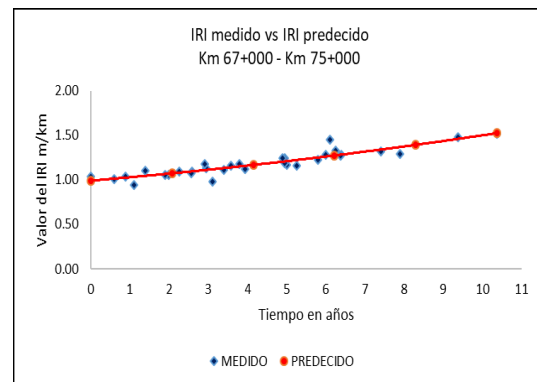
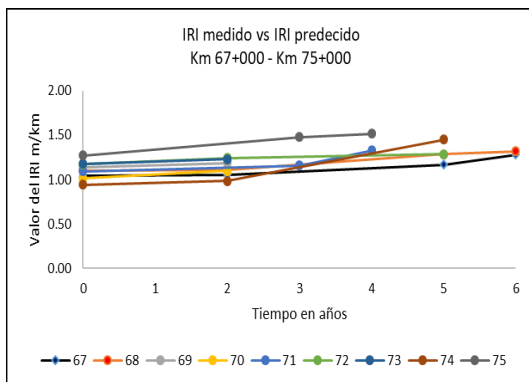


Figura 33: IRI medido vs IRI predecido Km 67+000 al Km 75+000
Fuente: Elaboración propia

Los gráficos siguientes muestran los resultados obtenidos de las curvas de deterioro al desarrollar el modelo de deterioro para cada uno de los siguientes sectores analizados entre el Km 100+000 al Km 111+000; Km 112+000 al Km 125+000; Km

126+000 al Km 137+000; Km 138+000 al Km 151+000; Km 152+000 al Km 163+000 y Km 164+000 al Km 181+000; y en el que se observan las tendencias del IRI medido en campo de los años 2010, 2012, 2015 y 2016 versus las predicciones del IRI en función del tiempo.

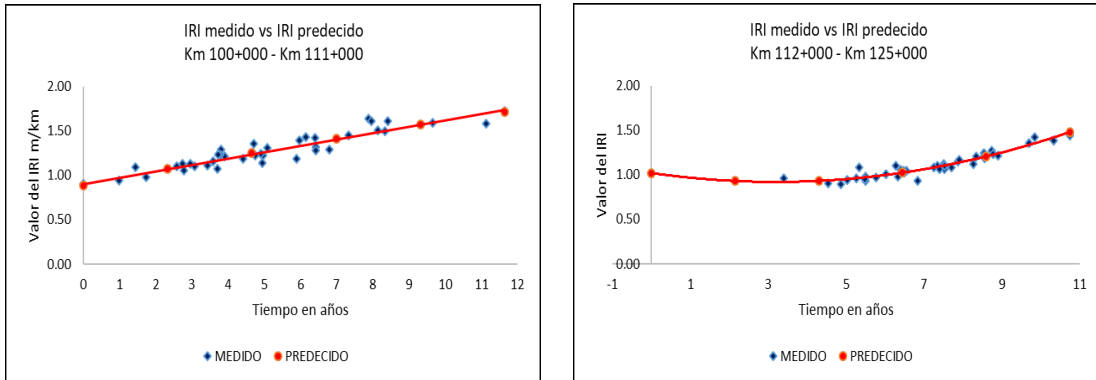


Figura 34: Curva de deterioro Km 100+000 al Km 111+000 y Km 112+000 al Km 125+000
Fuente: Elaboración propia

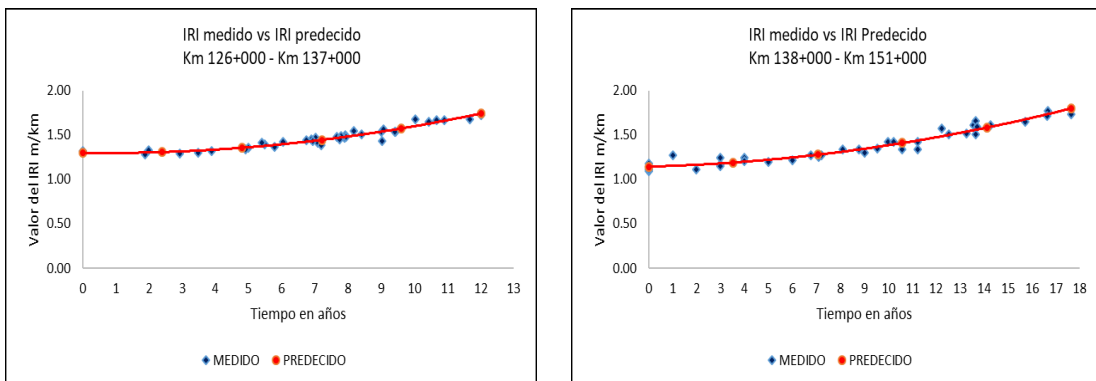


Figura 35: Curva de deterioro Km 126+000 al Km 137+000 y Km 138+000 al Km 151+000
Fuente: Elaboración propia

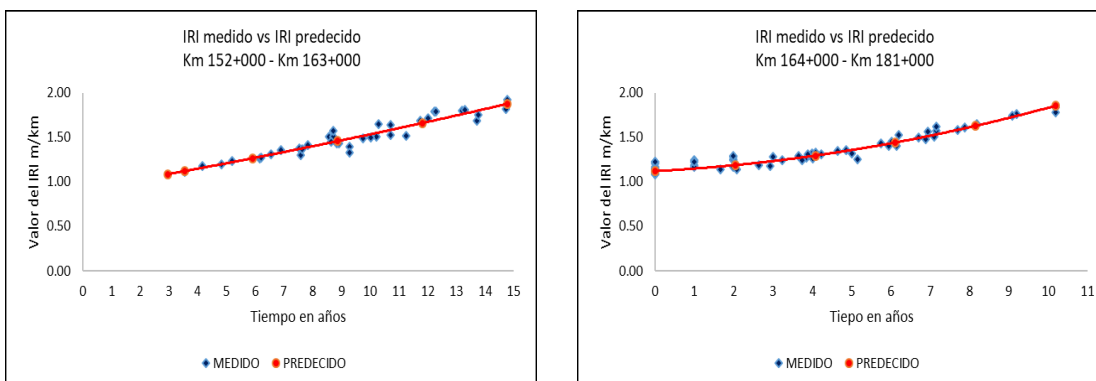


Figura 36: Curva de deterioro Km 152+000 al Km 163+000 y Km 164+000 al Km 181+000
Fuente: Elaboración propia

El gráfico obtenido de los valores de IRI pronosticado en función a las mediciones de campo de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, para toda la longitud evaluada y considerando los tiempos reducidos luego del desarrollo del modelo de deterioro empírico para que las curvas individuales encajen en el modelo, se realiza la conversión usando la función Solver del MS Excel. El resultado se muestra a continuación:

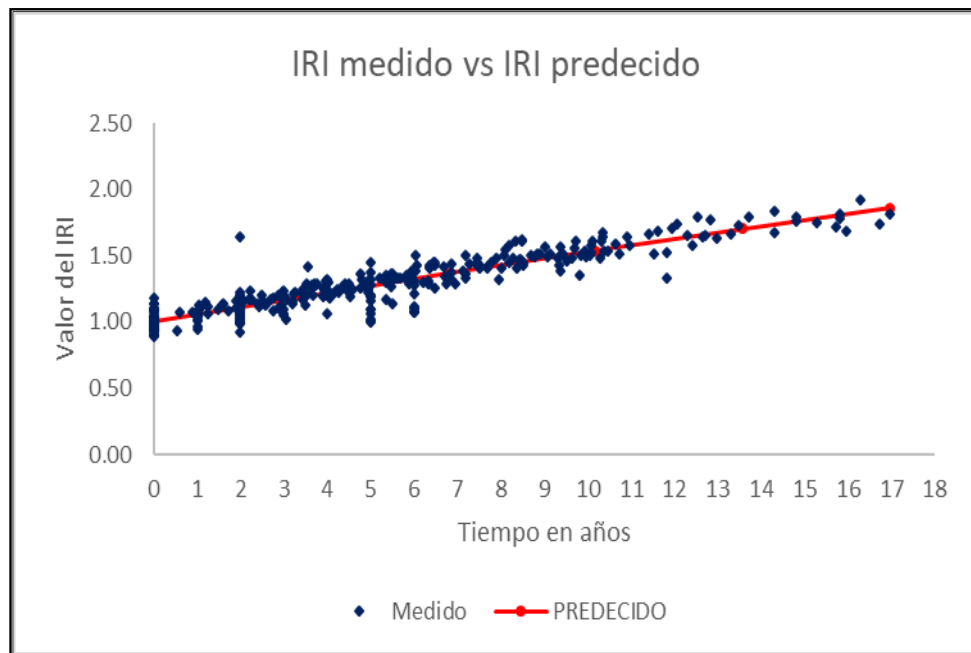


Figura 37: IRI medido versus IRI pronosticado
Fuente: Elaboración propia

Para efectos de validar los valores del IRI pronosticados para el año 2018 por el modelo de deterioro empírico desarrollados en función a las mediciones de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, se compara los valores pronosticados para el año 2018 con las mediciones realizados ese mismo año y la correlación obtenida se muestra en el gráfico siguiente:

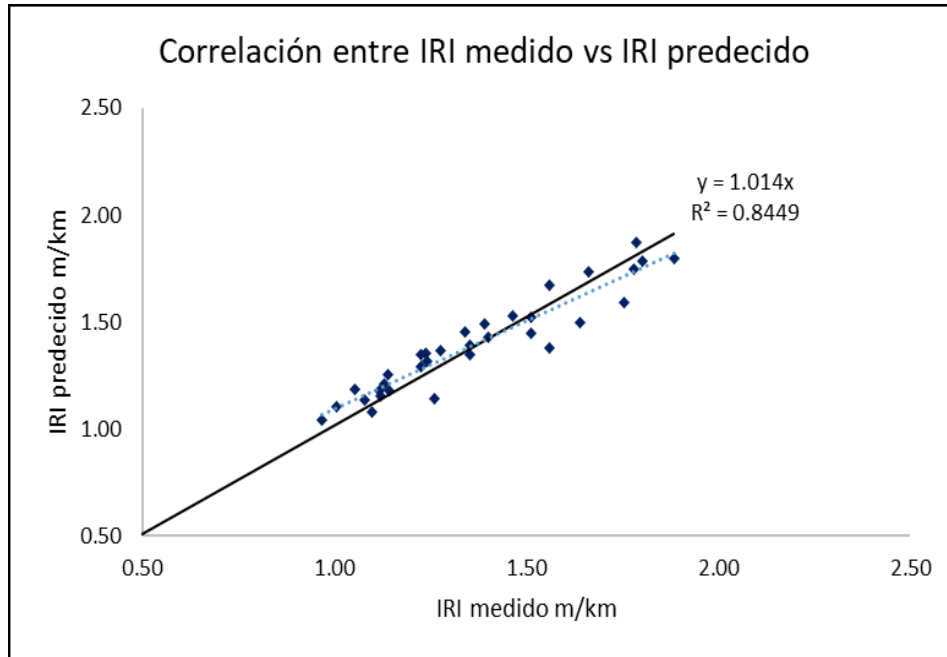


Figura 38: Correlación IRI medido versus IRI pronosticado
Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis de resultados o discusión de resultados

El gráfico representado en la figura 27 muestra la tendencia de evolución del IRI desde el año 2010 hasta el año 2016 y en el que se observa en general un crecimiento gradual en el deterioro del IRI, advirtiendo un decrecimiento específico en los valores para el sector ubicado entre el Km 75+000 al Km 100+000 respecto a las mediciones del año 2016, que se condice con las intervenciones de la colocación de un micropavimento realizado en el año 2015 en el mencionado sector.

Con relación al modelo estocástico probabilístico, se observa que los valores iniciales del estado de condición del IRI son buenos, por lo que se tuvo que ser más riguroso en la banda de rangos del estado de condición con la finalidad de desarrollar el modelo estocástico probabilístico y contrastar la primera hipótesis específica.

La correlación obtenida con el modelo estocástico - probabilístico representado en la figura 28 presenta buen resultado y permite validar los pronósticos de deterioro obtenidos para un periodo de análisis de 20 años. La curva de deterioro del valor esperado

del IRI indicada en la figura 29, muestra que el deterioro ocurre de manera acelerada en los primeros 10 años y se estabiliza gradualmente para llegar al último valor de 2.54 m/km, por lo que se considera que la cadena de Markov homogénea pierde su capacidad predictiva conforme se va alcanzando el valor máximo.

Respecto al desarrollo del modelo empírico, en la figura 37 se muestra el gráfico obtenido de los valores del IRI pronosticado en el sub tramo evaluado del Km 51+000 al Km 182+000, en función a las mediciones de campo de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, observando comportamientos similares entre las mediciones de campo y los valores pronosticados del IRI para un periodo estimado de 17 años manteniéndose dentro de los umbrales de condición de estado bueno.

El modelo de deterioro empírico muestra que los valores del IRI pronosticados para 17 años mantienen buena condición de estado, confirmando que los pavimentos con una menor regularidad superficial inicial, tienen niveles más bajos de regularidad para los siguientes 10 años a la construcción, tal como lo sustenta la investigación de Michael S. Janoff del JMJ Research.

Los gráficos del 30 al 36 muestran la tendencia del IRI pronosticado en función de las mediciones del año 2010 al 2016, determinando la curva de deterioro para cada uno de los sectores homogéneos evaluados, observando que presentan curvas de comportamientos muy similares y buena condición de estado.

Los valores del IRI pronosticados para el año 2018 por los modelos de deterioro estocástico probabilístico y empírico, desarrollados en función a las mediciones de los años 2010, 2012, 2015 y 2016, son comparados con los valores de las mediciones de campo realizado en el año 2018, conforme se aprecia en la figura 28 y figura 38, mostrando buena correspondencia $y = 1.0154IRI_{med} - 0.3077$ con una correlación de 0.6731 para el modelo estocástico probabilístico y para el modelo empírico $y = 1.04IRI_{med}$ con una correlación de 0.8449, ambos considerados como positivo moderado y positivo fuerte. Dichos resultados respaldan y validan la hipótesis general y las hipótesis específicas.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

1. El desarrollo de modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, en función al Índice de Rugosidad Internacional (IRI) medidos en los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro, presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

2. La correlación entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro estocástico-probabilístico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016, es de $R^2 = 0.6731$ y se encuentra en el rango de $0.50 < R^2 < 0.80$ considerado como positivo moderado, por lo tanto, se valida y acepta la primera hipótesis específica.

3. La correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016, es de $R^2 = 0.8449$ y se encuentra en el rango de $0.80 \leq R^2 < 1.00$ considerado como positivo fuerte, por lo tanto, se valida y acepta la segunda hipótesis específica.

4. La predicción del deterioro funcional del pavimento y los resultados obtenidos en la curva de deterioro funcional, permiten conocer la condición de estado funcional del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el que estará la carretera en un tiempo dado, con lo cual se puede mejorar la gestión del mantenimiento vial ya que permiten desarrollar varias alternativas de intervención de mantenimiento del pavimento flexible.

5.2 Recomendaciones

1. Actualizar y monitorear periódicamente el Índice de Regularidad Internacional (IRI), considerando nuevas mediciones con las mismas progresivas de inicio y termino, con la finalidad de minimizar la variabilidad en las mediciones, ubicarlas fácilmente para verificar la información del deterioro actual, identificar cambios y pronosticar su deterioro con mayor precisión.

2. Rigurosidad en el tratamiento previo que se da a los datos disponibles de campo, el cual comprende principalmente procesos de filtrado y tratamiento de valores atípicos en los valores medidos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

3. A los diferentes gestores o entidades comprometidas con la infraestructura vial del país, recopilar información técnica o desarrollarlas con la finalidad de estructurar la creación de series históricas y elaborar la base de datos para el desarrollo de los modelos de deterioro con data funcional y estructural para fortalecer los modelos de predicción del deterioro de pavimentos y mejorar el sistema de gestión vial.

4. Continuar con las investigaciones que permitan incrementar el conocimiento de los modelos de deterioro del pavimento, con otros indicadores además del IRI, como porcentajes de agrietamientos, fricción, ahuellamientos, PCI, entre otros, considerando que los cambios en la condición de estado del pavimento son permanentes

y dinámicos, debido a la agresividad de diversos agentes a los que se encuentra sometido el pavimento flexible.

5. Determinar los costos asociados a diversas estrategias de mantenimiento a partir de los modelos de deterioro, considerando intervenciones con un sistema de gestión, intervenciones con fondos mínimos disponibles e intervenciones sin sistema de gestión y comparar sus efectos en el deterioro del pavimento y consecuentemente en la seguridad y operación de la vía.

Referencias bibliográficas

- AASHTO (1,993) American Associations of State Highway and Transportation Officials,
Guide for Design of Pavement Structures
- Argueta M., Castro H. (2009), Metodología para la calibración de los modelos de deterioro de pavimentos generados por el programa HDM4
- Adelino F., Picado S & Antunes A., 2010. A Segment-linked Optimization Model for Deterministic Pavement Management Systems
- Butt, A., Shahin M., Carpenter, S., & Carnahan, J (1994), Aplicación de Markov Process to Pavement Management Systems at Network Level. Third International Conference on Managing Pavements, (págs. 159-172)
- Bennett C.R., De-Solminihac H., Chamorro A. *Data collection technologies for road management*, Transport Note No. 30: 1-8, The World Bank, Washington, DC, 2006.
- Bull A. Un nuevo paradigma para la conservación vial: de hacer lo que se puede a hacer lo que es exigible, División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, Santiago, Chile, Primer congreso de fondos de conservación vial de Centroamérica, 2003.
- G. Thenoux, F. Halles Metodología simplificada de priorización de conservación de pavimentos a nivel de red
- G. George, K P 1989, Rajagopal, AS., Lim L K., Models For predicting
Thenoux, F. Halles Metodología simplificada de priorización de conservación de pavimentos a nivel de red
- Hernández S., Fernández C., Baptista L., Metodología de la Investigación 6ta edición.
- HDM – 4 Volumen uno – Descripción general del HDM-4 versión 2.0.

- H.P. Hong & S.S. Wang 2007. Stochastic Modeling of Pavement Performance
- Jay N. Meegoda., Shengyan Gao 2014. Roughness Progression Model for Asphalt Pavements Using Long-Term Pavement Performance Data
- Kiyoshi Kobayashi Myungsik Do, Daeseok Han 2010. Estimation of Markovian transition probabilities for pavement deterioration forecasting
- Leiva V. Metodología para el desarrollo modelos de deterioro para caminos vecinales de lastre y suelo, Lanamme, 2004.
- Picado M., Desarrollo de curvas de deterioro para pavimento flexible y factor de incertidumbre. Revista Infraestructura Vial/LanammeUCR/ISSN: 1409-4045- ISSN / Volumen 18/Numero 31/Julio, 2016/p.p 30-38.
- Prozzi, J., 2001 Modeling Pavement Performance by Combining Field and Experimental Data.
- Revista Ingeniería de Construcción, 17 (1) (2011), pp. 35-43
- Rodríguez M., Theboux Z., Gonzales V., 2013 Evaluación probabilística del agrietamiento de pavimentos en carreteras de Chile.
- Solminhac T., Hidalgo S., Salgado T., Valdés F. Calibración de modelos de comportamiento HDM de pavimentos asfálticos a las condiciones de Chile, Chile, estudio de seguimiento de pavimentos asfálticos, Ministerio de Obras Públicas, 2003.
- Solminihac H. Gestión de infraestructura vial, Santiago de Chile, Ediciones Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001, 508 p.
- Solorio R., Hernández R., & Gómez J. (2004). Publicación Técnica N° 253. Análisis de Sensibilidad de los modelos de deterioro del HDM-4 para pavimentos asfálticos. México: Instituto Mexicano del Transporte.

- Turrado R. (2016), Análisis de los modelos de deterioro de firmes en la gestión de la conservación de redes de carreteras.
- Tenorio M-, (2005) Modelos de predicción del deterioro de pavimentos (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil) Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú.
- Videla et al (1995). Metodología de calibración de Modelos de Predicción del Deterioro en Pavimentos Asfálticos. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: 8° Congreso Ibero – Latinoamericano del Asfalto, 12-17 noviembre 1995, Tomo II trabajo T5-13, 14 pp.
- Vargas S., Estadística descriptiva e inferencial. Servicio de publicaciones de la Universidad de Castilla – La Mancha 1995
- Vera I., Thenoux G., Solminihac H.D., Echaveguren T., 2010 Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles.

Anexos

Aneo 1: Matriz de consistencia

1

Modelos de deterioro del pavimento y su correlación con las evaluaciones funcionales de los años 2010-2016, en la carretera Inambari – Azángaro

Formulación del problema	Objetivos	Justificación	Hipótesis		
			General	Dependiente	Independiente
General	General		General	Dependiente	Independiente
¿Cuál de los modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, desarrollados en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro, presenta mejor correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible?	Desarrollar modelos de deterioro estocástico–probabilístico y empírico, en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro y determinar su correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.	<p>La presente investigación es relevante porque se pasa de la visión tradicional de analizar el IRI vs kilómetros, que es una visión descriptiva, a una visión de IRI vs tiempo, que permite inferir futuros comportamientos para tomar las decisiones de mantenimiento preventivo oportunos teniendo en cuenta los respectivos ahorros que ello significa.</p> <p>La relevancia que se propone con esta investigación, es el proporcionar herramientas para mejorar la gestión del pavimento flexible, mediante la implementación de modelos de deterioro para un sistema de planificación de carácter preventivo y oportuno, evitando mayores deterioros y mayores costos de mantenimiento y/o rehabilitación, mientras más tarde se intervenga.</p> <p>Las ventajas y beneficios de su aplicación se verán reflejados en la mejora de la gestión del pavimento flexible para un adecuado servicio de la vía, relacionado con el confort y seguridad de los usuarios, ahorros significativos en los costos de operación vehicular y menores tiempos de movilización, beneficiando de esta manera principalmente a los pobladores de la región sur del país (Arequipa, Puno y Madre de Dios).</p>	El desarrollo de modelos de deterioro estocástico-probabilístico y empírico, en función a mediciones del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de los años 2010 al 2016 en la carretera Inambari – Azángaro, presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.	Correlación entre valor medido y valor pronosticado del IRI -R ² e-p, -R ² e Deterioro funcional	Tipo de modelo de deterioro (estocastico probabilísticos, empíricos) E-P E
Específicos	Específicos		Específicos	Específicos	Específicos
¿Cuál es la correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro estocástico probabilístico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016?	Determinar la correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro estocástico-probabilístico, desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016.		La correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro estocástico-probabilístico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016, se encuentra en el rango $0.50 < R^2 < 0.80$ considerado como positivo moderado .	Correlación entre valor medido y valor pronosticado del IRI -R ² e-p Deterioro funcional	Tipo de modelo de deterioro (estocastico probabilísticos) E-P
¿Cuál es la correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016?	Determinar la correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico, desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016.		La correlación entre los valores medidos del IRI y los valores de predicción del IRI al año 2018, pronosticados con el modelo de deterioro empírico desarrollado en función a mediciones de los años 2010 al 2016, se encuentra en el rango $0.80 \leq R^2 < 1.00$ considerado como positivo fuerte .	Correlación entre valor medido y pronosticado del IRI -R ² e Deterioro funcional	Tipo de modelo de deterioro (empíricos) E