



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

ESCUELA DE POSGRADO

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

**Modelos de comportamientos de pavimentos utilizando mediciones del
índice de rugosidad internacional para predecir el deterioro funcional**

TESIS

Para optar el grado académico de Maestro en Ingeniería Vial con mención
en Carreteras, Puentes y Túneles

AUTOR

Bachiller Vega Suaña, Arthur Anthony

(ORCID: 0000.0003.2592.662X)

ASESOR

Doctor Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel

(ORCID: 0000.0002.4568.9759)

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos de autor

Vega Suaña, Arthur Anthony

Tipo de documento de identidad del AUTOR: DNI

Número de documento de identidad del AUTOR: 44373726

Datos de asesor

Doctor Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel

Tipo de documento de identidad del ASESOR: DNI

Número de documento de identidad del ASESOR: 31615059

Datos del jurado

JURADO 1: Doctor Chavarry Vallejos, Carlos Magno, DNI N°07410234,
ORCID 0000-0003-0512-8954

JURADO 2: Doctor Valencia Gutiérrez, Andrés Avelino, DNI N°07065758,
ORCID 0000-0002-8873-189x

JURADO 3: Doctor Altamirano Herrera, Aníbal, DNI N°10426902, ORCID
0000-0003-2940-0078

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 732527

Código del Programa: 2.01.05

Doctor Carlos Magno Chavarry Vallejos

Presidente

Doctor Andrés Avelino Valencia Gutiérrez

Miembro

Doctor Anibal Altamirano Herrera

Miembro

Doctor Joaquín Samuel Tamara Rodríguez

Asesor

Representante de la EPG

Dedicatoria

A Mariel y Antonela, mis amadas hijas, que son mi inspiración y mi fortaleza de cada día.

A Vélez y María Elena, mis padres, que siempre me apoyan, me guían. Su ejemplo, amor y dedicación incondicional, son mi motivación y fuerza.

A Diana, mi esposa, me motiva y me apoya en cada paso, siempre dando lo mejor para nuestra familia.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por cuidarme y guiarme en cada momento, a mi familia por su por su apoyo y amor incondicional.

Al Dr. Joaquín Samuel Tamara Rodríguez, asesor de tesis, por su paciencia, consejos y orientación en cada etapa del desarrollo de mi tesis.

.

Índice

Dedicatoria	2
Agradecimiento	3
Índice de contenido	4
Índice de Tablas	6
Lista de Figuras	7
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1 Descripción del problema	13
1.2 Formulación del problema	16
1.2.1 Problema general	16
1.2.2 Problemas específicos	16
1.3 Importancia y justificación del estudio	17
1.4 Delimitación del estudio	19
1.5 Objetivos de la investigación	20
1.5.1 Objetivo general	20
1.5.2 Objetivos específicos	20
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	21
2.1 Marco histórico	21
2.1.1 Índice de Regularidad Internacional (IRI)	21
2.1.2 Modelos de deterioro de pavimentos	23
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	25
2.2.1 Investigaciones internacionales	25
2.2.2 Investigaciones nacionales	28
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	29
2.3.1 Deterioro del pavimento	29
2.3.2 Causas del deterioro del pavimento	32
2.3.3 Indicadores de deterioro	33
2.3.4 Sistema de gestión de pavimentos	35
2.3.5 Modelos de deterioro de pavimentos	37

2.3.6 Metodología para el análisis de modelos de deterioro	44
2.3.7 Correlación.....	51
2.4 Definición de términos básicos	52
2.5 Fundamentos teóricos que sustentan a las hipótesis	53
2.6 Hipótesis.....	55
2.6.1 Hipótesis general	55
2.6.2 Hipótesis específicas	55
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	57
3.1 Tipo, método y diseño de la investigación.....	57
3.2 Población y muestra	58
3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	58
3.4 Descripción de procedimientos de análisis	60
3.4.1 Procesamiento de datos para el modelo estocástico probabilístico.....	72
3.4.2 Procesamiento de datos para el desarrollo del modelo empírico	86
3.4.3 Procesamiento de datos deterioro funcional de pavimento flexible.....	92
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	98
4.1 Resultados	98
4.1.1 Resultados del modelo estocástico probabilístico	98
4.1.2 Resultados del modelo empírico	100
4.1.3 Resultados deterioro funcional del pavimento flexible.....	105
4.2 Análisis de Resultados.....	109
4.3 Prueba de Hipótesis.....	110
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
5.1 Conclusiones.....	113
5.2 Recomendaciones	114
REFERENCIAS	115
ANEXOS	118

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de modelos de deterioro	25
Tabla 2 Clasificación de deterioro de los pavimentos asfálticos	34
Tabla 3 Correlación lineal entre dos variables	52
Tabla 4 Operacionalización de variable Independiente	56
Tabla 5 Operacionalización de variable dependiente	56
Tabla 6 Mediciones de rugosidad desde el año 2016 al 2020 (IRI	60
Tabla 7 Nivel de servicio de rugosidad (IRI).....	61
Tabla 8 Valores promedio del IRI por kilómetro desde el año 2016 al 2021	62
Tabla 9 Sectores homogéneos determinados en función de las mediciones de IRI	72
Tabla 10 Estado de condición del IRI del pavimento	74
Tabla 12 Resumen de distribución de segmentos y estado de condición años 2017 al 2018.....	76
Tabla 13 Estado de condición al año 2018	77
Tabla 14 Cambios de estado de condición del año 2017 al año 2018.....	77
Tabla 15 Cambio de estado al año 2021	85
Tabla 16 Tiempos relativos por secciones del Km 1319+000 al Km 1356+000	89
Tabla 17 Vectores de condición de estado.....	93
Tabla 18 Curva de deterioro funcional del pavimento hasta el año 2035	93
Tabla 19 Curva de deterioro funcional del pavimento hasta el año 2035	96
Tabla 20 Resumen Matriz de predicción años 2020 y 2021	99
Tabla 21 Matriz de IRI medido y predecido año 2021	100
Tabla 22 Valores de IRI predecido modelo estocástico probabilístico al año 2035.....	105
Tabla 23 Valores de IRI predecido con el modelo empírico año 2035	107

Lista de Figuras

Figura 1 Evaluación de tránsito vehicular del 2008 al 2020	14
Figura 2 Plano de ubicación Tramo 5: Puno - Juliaca	15
Figura 3 Modelo de cuarta de carro	22
Figura 4 Escala de valores del IRI empleada por el Banco Mundial	23
Figura 5 Ciclo de vida del pavimento con sus respectivas fases	31
Figura 6 Diagrama de ciclo de vida fatal y deseable de un pavimento	31
Figura 7 Esquema de deterioro de pavimentos de 1ra y 2da fase.....	32
Figura 8 Componentes esenciales del sistema de gestion de pavimentos	35
Figura 9 Modelos agredado.....	40
Figura 10 Modelo incremental.....	41
Figura 11 Distribución de probabilidad acumulada del PCI	42
Figura 12 Ejemplo de curva de supervivencia	43
Figura 13 Ejemplo de matriz de transición para un ciclo. Método Markoviano	44
Figura 14 Inicio y progresión de los deterioros.....	46
Figura 15 Curvas de (a) progresión creciente, (b) progresión decreciente (c)Sigmoidal	47
Figura 16 Extrapolación lineal.....	48
Figura 17 Distribución de probabilidades.....	49
Figura 18 Mapa conceptual que sustenta la hipótesis.....	54
Figura 19 Diferencias acumuladas para cálculo de sectores homogéneos	70
Figura 20 Medición de IRI Km 1319+000 al Km 1356+000.....	71
Figura 21 Diferencias acumuladas Km 1319+000 al Km 1356+000.....	71
Figura 22 Comportamiento asumido de un pavimento.....	87
Figura 23 IRI Predecido Km 1319+000 al 1322+000	94
Figura 24 IRI Predecido Km 1334+000 al 1342+000	95
Figura 25 IRI Predecido Km 1319+000 al 1322+000	95
Figura 26 IRI Predecido Km 1343+000 al 1347+000	96
Figura 27 IRI Predecido Km 1348+000 al 1356+000	96
Figura 28 Correlación del IRI medido vs IRI pronosticado	100
Figura 29 IRI medido vs IRI predecido Km 1319+000 al Km 1320+000.....	101
Figura 30 IRI medido vs IRI predecido Km 1325+000 al Km 1328+000.....	101
Figura 31 IRI medido vs IRI predecido Km 1333+000 al Km 1337+000.....	101
Figura 32 Curva de deterioro Km 1319+000 al Km 1322+000.....	102

Figura 33 Curva de deterioro Km 1323+000 al Km 1333+000.....	102
Figura 34 Curva de deterioro Km 1334+000 al Km 1342+000.....	103
Figura 35 Curva de deterioro Km 1343+000 al Km 1347+000.....	103
Figura 36 Curva de deterioro Km 1348+000 al Km 1356+000.....	104
Figura 37 Curvas de deterioro Km 1348+000 al Km 1356+000	104
Figura 38 Correlación IRI medido versus IRI pronosticado	105
Figura 39 Curva de deterioro del IRI método Estocástico Probabilístico	107
Figura 40 Curva de deterioro del IRI método Empírico	108
Figura 41 Curvas de deterioro Estocástico Probabilístico Vs Empírico	108

RESUMEN

La presente investigación es de enfoque cuantitativo y surge ante el problema causado por los deterioros del pavimento, como fisuras, huecos, hundimientos y ahuellamientos, por este motivo, se tuvo como objetivo elaborar modelos de comportamiento de pavimento flexible utilizando los valores medidos en campo del índice de rugosidad internacional (IRI) de los años 2016 al 2020, para determinar su correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento de la carretera Puno – Juliaca, que forma parte de la red vial longitudinal de la sierra, del corredor vial Interoceánica Sur, Perú – Brasil tramos 5, sector 14. Para elaborar el modelo de comportamiento estocástico probabilístico se procesó los datos de IRI, donde se determinó la matriz de condición inicial y la matriz de condición del pavimento y para el modelo de comportamiento empírico se realizó la conversión de los datos de IRI en curvas sigmoidales y se realizó una optimización no lineal usando la función Solver del MS Excel. Finalmente, los resultados de ambos modelos fueron comparados con las mediciones de campo del año 2021, donde se obtuvo que, el modelo de comportamiento estocástico probabilístico tiene una correlación de 0.8449 considerado como positivo fuerte y la correlación obtenida con el modelo empírico es de 0.9764 considerado también como positivo fuerte, de los resultados obtenidos se concluye que los modelos de deterioro desarrollados presentan buena correlación que permiten predecir el deterioro funcional del pavimento asfáltico de la carretera Puno – Juliaca.

Palabras claves: **Modelos de comportamiento, Índice de Rugosidad Internacional (IRI), modelos determinísticos, modelos probabilísticos, correlación.**

ABSTRACT

The present investigation is of a quantitative approach and arises from the problem caused by the deterioration of the pavement, such as cracks, holes, subsidence and rutting, for this reason, the objective was to elaborate the behavior of the flexible pavement using the values measured in the field of international roughness index (IRI) from 2016 to 2020, to determine its consequences to predict the functional deterioration of the pavement of the Puno - Juliaca highway, which is part of the longitudinal road network of the sierra, of the Interoceanic South road corridor, Peru – Brazil sections 5, sector 14. To elaborate the probabilistic stochastic behavior model, the IRI data was processed, where the initial condition matrix and the pavement condition matrix are delimited and for the empirical behavior model the conversion was carried out. of the IRI data in sigmoidal curves and a non-linear optimization was performed using the Solver function of the MS excel r Finally, the results of both models were compared with the field measurements of the year 2021, where it was obtained that the probabilistic stochastic behavior model has a connection of 0.8449 considered as strong positive and the connection obtained with the empirical model is 0.9764 Considered as a strong positive, from the results obtained it is concluded that the developed deterioration models also present good consequences that can predict the functional deterioration of the asphalt pavement of the Puno - Juliaca highway.

Keywords: Behavior models, International Roughness Index (IRI), deterministic models, probabilistic models, correlation.

INTRODUCCIÓN

Las carreteras son de vital importancia para el desarrollo económico, social, político y cultural de nuestro país, debido que sirven como corredores logísticos para comunicar sus regiones, departamentos, municipios y demás poblaciones. Por lo que es importante mantener la calidad de la infraestructura vial en términos funcionales y estructurales, ya que una buena condición del pavimento asegura que los vehículos se desplacen de forma eficiente, confortable y segura. Como se conoce, los pavimentos se deterioran gradualmente al pasar el tiempo por factores tales como, el aumento del flujo vehicular, mayores cargas de las calculadas en el diseño, climáticos, gradientes térmicos, edad del pavimento y la calidad de los materiales utilizados en la construcción, estos factores son causantes de fallas de tipo funcional y estructural como las fisuras, grietas, piel de cocodrilo, desprendimientos, ondulaciones, ahuellamientos, hundimientos y baches.

En consecuencia, resulta importante que las autoridades nacionales, regionales y municipales, puedan garantizar por un periodo de tiempo las adecuadas condiciones de seguridad, confort y capacidad estructural para la correcta circulación del tránsito vehicular, de esta manera se puede minimizar los costos de reconstrucción, costos sociales y ecológicos en los cuales se incurren.

Por consecuencia la presente investigación tiene como objetivo conocer cómo el deterioro funcional del pavimento flexible a través del tiempo, desarrollando modelos de comportamiento del pavimento los cuales son el método estocástico probabilístico y empírico, utilizando mediciones de IRI de los años 2016,2017,2018,2019,2019 y 2020. los cuales permitirán pronosticar los valores de IRI con la finalidad de gestionar el sistema de pavimentos, ya que, al conocer las condiciones del pavimento en cualquier periodo de tiempo, permitirá implementar estrategias de mantenimiento, priorizar los tramos de carretera a intervenir y de esta manera optimizar los recursos para cada una de las intervenciones.

La presente investigación desarrolla modelos de deterioro de pavimento realizando la medición del IRI a través del tiempo y no como la manera tradicional donde se analiza el IRI por Kilómetro. El IRI vs tiempo permite determinar valores futuros del comportamiento funcional del pavimento con los cuales se contribuirá a mejorar la gestión de pavimentos con lo cual nos permitirá tener adecuados niveles de servicio de la

vía, los cuales se encuentran estrechamente relacionados con el confort y seguridad de los usuarios, ya que esto representa tener menos costos de operación vehicular, menores tiempos de desplazamiento y lo más importante se reduce el índice de accidentabilidad. el desarrollo de la investigación beneficiara a los pobladores de la región sur del país (Puno – Juliaca).

La presentación de capítulos de la investigación se presenta de la siguiente forma:

El capítulo 1 consta del 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 se desarrolla el marco teórico, que comprende los antecedentes, investigaciones nacionales e internacionales que forman parte de la base teórica de la investigación. Se detalla la estructura teoría del deterioro de pavimento, principales causas de deterioro, límites permisibles, sistema de gestión de pavimentos, y se muestra los distintos modelos para el cálculo de deterioro. En la parte final del capítulo se describe la hipótesis general y específicas.

El capítulo 3, desarrolla el marco metodológico, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de información y el procedimiento para el análisis de datos. Se presentan el cálculo de sectores homogéneos de la carretera, resúmenes de las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020, y finalmente se presenta el procedimiento de análisis para cada modelo de deterioro.

En el capítulo 4, se muestran los resultados obtenidos de los modelos de comportamiento de pavimentos flexibles, así como el deterioro funcional y se realiza el análisis o discusión de resultados obtenidos, permitiendo validar o descartar las hipótesis planteadas.

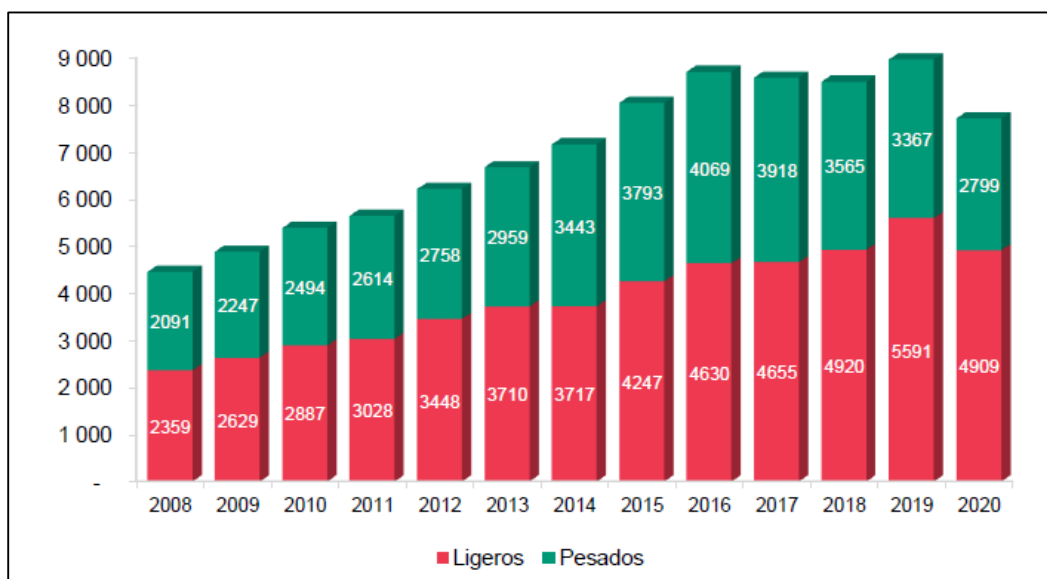
En el capítulo 5, se desarrollan conclusiones y recomendaciones del estudio.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

El estado peruano con el fin de preservar la infraestructura vial y con el apoyo del ministerio de transporte y comunicaciones (MTC), suscribió el contrato de concesión tipo Build Operate and Transfer (BOT), desde el 24 de octubre del 2007 del tramo 5 del “plan de acción de integración de infraestructura Regional Sudamericana – IIRSA”, por un periodo de 25 años, la concesión tiene una extensión de 854.7 km de carretera y une las ciudades de Matarani, Arequipa, Juliaca, Puno, Azángaro, Moquegua y Ilo.

El tramo de estudio cuenta con una carpeta de rodadura basado en pavimento flexible el cual se va deteriorando gradualmente por factores climáticos, edad del pavimento la caracterización del tránsito vehicular y las cargas reales actuantes. Justamente el incremento del tránsito vehicular ocasiona el deterioro prematuro del pavimento en los informes de desempeño de la concesión presentados por OSITRAN se puede verificar que el año 2008 se registró un tránsito aproximadamente 4.5 millones de unidades vehiculares entre vehículos ligeros y pesados y para el año 2020 se tiene un incremento de 7.7 millones, la evolución del tránsito vehicular se muestra en la Figura 1, este incremento de vehículos genera mayor número de ejes equivalentes que deterioran gradualmente el pavimento y esto se añade las condiciones climáticas que son determinantes en el periodo de lluvias durante los meses de diciembre y Abril.

Figura 1*Evaluación de tránsito vehicular del 2008 al 2020*

Nota: Tomado de la página de gerencia de regulación y estudios económicos de OSITRAN.

Esta investigación se centra en el tramo de la red vial longitudinal de la sierra, en la carretera Interoceánica Sur, Peru – Brasil, tramo 5 sector 14 - Puno – Juliaca Ruta PE-3 a 3700 msnm, como se muestra en la figura 2. Esta vía nacional actualmente se encuentra concesionada y se realizan actividades de mantenimiento rutinario, pese a estas actividades el tramo de carretera presenta fallas funcionales en el pavimento, como deformaciones, ondulaciones, hundimientos, ahuellamientos, baches, fisuras, grietas y desprendimientos, los cuales se incrementan gradualmente al pasar el tiempo y repercute en los aspectos económicos y sociales, puesto que se tiene mayores costos de operación, mayores tiempos de movilización, incomodidad del usuario e inseguridad al trasladarse por la vía.

Figura 2

Plano de ubicación Tramo 5: Puno - Juliaca



En el tramo de estudio, la empresa concesionaria realiza anualmente evaluaciones funcionales, utilizando el método del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), el cual es un parámetro referencial que mide la superficie del pavimento flexible, y compara la magnitud y frecuencia de las irregularidades de la carpeta de rodadura del pavimento con factores como el confort, seguridad vial, tiempo de viaje y desgaste de neumáticos y partes de los vehículos que transitan. Para las carreteras concesionadas la medición frecuente del IRI es una herramienta muy importante que sirve para monitorear el comportamiento de la vía al pasar el tiempo de operación, permitiendo al administrador de la vía conocer el deterioro gradual del pavimento teniendo indicadores los cuales nos permitirán programar estudios que nos indiquen los daños del pavimento para luego programar actividades de mantenimientos oportunos. En el Perú, se cuenta con base de datos dispersa respecto a los deterioros del pavimento, lo que nos lleva al desconocimiento de las condiciones funcionales y estructurales del pavimento, que es el punto crítico para un sistema de gestión de pavimentos (Hidalgo, 2006).

Para poder predecir el desempeño de un pavimento se debe de desarrollar modelos de deterioro que simulen el comportamiento del pavimento en un tiempo determinado. Los

modelos necesitan contar con datos históricos de la condición del pavimento, y esto limita la elaboración de estos, debido que los datos no son de fácil acceso (Sotil, 2013). Dichos modelos se basan métodos probabilísticos y determinísticos, estos se clasifican de la siguiente manera:

- Modelo estocástico probabilístico se requiere datos históricos de 1 a 2 años
- Modelo empírico se requiere datos históricos de 5 a 8 años
- Modelo mecánicos - empíricos se requiere datos históricos de 15 a 20 años

Debido al deterioro gradual del pavimento flexible, nace la necesidad de la presente investigación que busca predecir el comportamiento del índice de rugosidad internacional (IRI) del pavimento flexible en un periodo de tiempo, para esto se desarrollaran modelos de deterioro de pavimentos con los métodos estocásticos – probabilísticos y empírico, haciendo uso de las mediciones de IRI realizadas por el concesionario durante los años 2016 al 2020 en la carretera Puno – Juliaca. la investigación será de gran utilidad para los encargados de la operación del tramo de carretera, ya que estos pueden destinar los recursos para iniciar los mantenimientos preventivos ya que los modelos de deterioro son herramientas que permiten priorizar las intervenciones de acuerdo con la criticidad.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál de los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empírico, elaborados con las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2016 al 2020, se correlacionan para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible la carretera Puno – Juliaca?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál será el modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y la correlación entre los valores de las mediciones y valores obtenidos para el año 2021?
- ¿Cuál será el modelo de comportamiento de pavimentos empírico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca

entre los años 2016 al 2020, y la correlación entre los valores de las mediciones y valores obtenidos con el modelo?

- ¿Cómo será el deterioro funcional del pavimento, según los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empíricos obtenidos?

1.3 Importancia y justificación del estudio

Importancia

Tiene importancia porque proporciona modelos de comportamiento de pavimentos flexibles haciendo uso de las medidas funcionales del Índice de Rugosidad Internacional (IRI), que permiten predecir el deterioro funcional del pavimento, el cual, está vinculado a la serviciabilidad, confort y seguridad vial que brinda a los usuarios de vía. Es sabido que cuando mayor el deterioro funcional del pavimento, mayores son la repercusiones sociales y económicas. Sociales porque esto se refleja en la incomodidad del usuario, incrementa el índice de accidentabilidad, inseguridad y tiempos mayores de movilización, económicos debido a mayores costos de operación de los vehículos por problemas con la velocidad de circulación, mayor desgaste de neumáticos, mayor costo de combustible y a su vez los costos de mantenimiento se incrementan.

Los modelos de comportamiento de pavimentos son expresiones matemáticas que se desarrollaron con las mediciones de IRI tomadas al tramo de carretera durante los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020 con los cuales nos permite predecir el estado funcional del pavimento a través del tiempo.

Los beneficios de conocer el comportamiento futuro del IRI desarrollados en esta investigación, permite a los concesionarios de la vía, tomar decisiones oportunas de intervención y de esta manera mejorar su gestión de pavimentos y de esta manera beneficiar a los pobladores que hacen uso de la carreta Puno – Juliaca, diariamente

Justificación teórica:

La presente investigación es relevante porque desarrolla modelos de deterioro funcional de acuerdo con el criterio serviciabilidad, permite pasar de analizar el IRI vs kilómetros de la carretera, que es una manera descriptiva, a realizar el análisis IRI a través del tiempo (IRI vs tiempo), que permite conocer la tendencia del deterioro de pavimento y de esta manera se puede tomar decisiones tempranas para un oportuno mantenimiento del pavimento.

La investigación aporta conocimiento científico porque al hacer uso de modelos de comportamiento de pavimentos, nos permite conocer la condición superficial del pavimento a lo largo de la vida útil, y de esta manera las empresas, gobiernos regionales y municipalidades pueden generar políticas de gestión de pavimentos basados en los modelos de deterioro.

Justificación social:

El poder predecir el comportamiento del pavimento con el uso de modelos de deterioro permite a los entes gubernamentales y concesionarios viales, tomar decisiones oportunas para mantener a través del tiempo un adecuado nivel de servicio, donde los principales beneficiarios son los pobladores de la región sur del país que diaria o esporádicamente transitan por la carretera Puno – Juliaca, puesto que se tiene menores tiempos de movilización, confort, seguridad y lo más importante menores tasas de accidentabilidad.

Justificación económica:

Tiene importancia ya que busca mantener la buena condición de serviciabilidad de la carretera lo que 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.

Justificación metodológica:

La investigación tiene importancia porque brinda herramientas de gestión basadas en datos matemáticos y estadísticos, a las instituciones gubernamentales y

concesionarios viales, para implementar y mejorar la gestión de pavimentos, ya que permite priorizar las intervenciones a las zonas más críticas y de esta manera evitar mayores costos de mantenimiento o rehabilitación.

Las mediciones de IRI deben realizarse de manera periódica y con equipos debidamente calibrados y siguiendo la normativa nacional e internacional, luego estos resultados deben ser evaluados para cuantificar el deterioro y encontrar la correlación con posibles factores que gatillen el deterioro prematuro del pavimento, como pueden ser la edad del pavimento, incremento significativo del flujo vehicular, aumento en las cargas de diseño y condiciones climáticas.

Justificación Práctica:

La presente investigación sirve como antecedente para el desarrollo de futuras investigaciones puesto que, permite conocer el comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo haciendo uso de un indicador funcional como es el IRI, pero es importante también desarrollar modelos de comportamiento con indicadores estructurales como la deflexión del pavimento, con lo cual permitirá predecir de manera más exacta la condición del pavimento.

1.4 Delimitación del estudio

El estudio está ubicado en la provincia de Juliaca en la Región Puno. El acceso vía terrestre es por la vía asfaltada desde Lima -Arequipa- Juliaca - Puno. El tramo de carretera inicia en el Km. 1311 + 709, el cual se ubica en el Óvalo Juliaca y finaliza en el ingreso a la ciudad de Puno en el Km 1360+537.

La carretera Puno – Juliaca se encuentra concesionada desde el año 2007 y es operada por la empresa COVISUR, el tramo de carretera forma parte del corredor vial interoceánico Sur, Perú – Brasil, permitiendo una infraestructura de integración con Brasil y Bolivia, cuyos alcances se orientan a promover el desarrollo económico y social entre estos países. Los trabajos de la concesionaria incluyen, el mantenimiento rutinario, mantenimientos periódicos, construcción de puentes y mejoramiento de la infraestructura vial, con los cuales brinda comodidad y seguridad a los usuarios de la vía y disminuyendo los tiempos de traslado y costos de transporte.

El tramo concesionado inicia en el puerto de Matarani luego de pasar por las ciudades de Arequipa, Juliaca, Puno, Moquegua y finaliza en el puerto de Ilo; es importante indicar que todo el tramo de la presente investigación se encuentra dentro del departamento de Puno y entre las provincias de Juliaca y Puno.

En cuanto a la delimitación temporal, el tema de investigación se circunscribirá al periodo del 2016 al 2020, conforme a información recopilada de las mediciones de IRI realizadas por OSITRAN y el concesionario COVISUR. La evaluación estará centrada en el subtramo Puno (Km 1360+537) - Juliaca (Km 1311+709) de la primera calzada existente con una longitud de carretera de 36.81 km de la carretera concesionada del Tramo 5: Puno – Juliaca.

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo general

Elaborar modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empírico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2016 al 2020, y determinar su correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible de la carretera Puno – Juliaca.

1.5.2 Objetivos específicos

- Elaborar el modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y determinar la correlación entre los valores medidos y los valores obtenidos para el año 2021.
- Elaborar el modelo de comportamiento de pavimentos empírico utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y determinar la correlación los valores medidos y los valores obtenidos para el año 2021.
- Predecir el deterioro funcional del pavimento, según los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico – probabilístico y empíricos elaborados.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco histórico

2.1.1 Índice de Regularidad Internacional (IRI)

El banco mundial en el año de 1986 propuso al índice internacional de rugosidad IRI (International Roughness Index), como un patrón que se basa en datos estadísticos de la rugosidad y sirve como parámetro referencial para evaluar la calidad de la carpeta de rodadura de una carretera. Las mediciones de IRI tienen como origen al programa norteamericano denominado Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP) el cual se basa en el uso del “Golden Car - detallado en el reporte 228 del NCHRP”. (Arriaga, Garnica y Rico, 1998, p. 9).

Sánchez y Santiago (2008), indican la dificultad que resultaba de unificar los criterios de medición debido a que en los diferentes países se estaba usando diferentes sistemas de media. Esto motivó a que el Banco Mundial con la participación de los países Bélgica, Francia, Inglaterra y Estados Unidos y Brasil en al año 1982 y luego de innumerables mediciones controladas a diferentes condiciones de pavimento se estableció un índice único que posteriormente en el año de 1986 fue aceptado bajo las siglas de IRI. (p. 6)

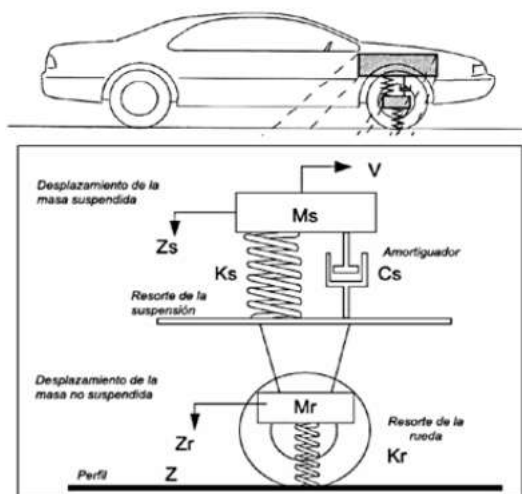
Paterson (1986), indica que, “El IRI resume como la expresión matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie del pavimento en una huella, representando las vibraciones provocadas por la rugosidad del pavimento en un vehículo de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (que es la 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) como se muestra en la figura 3, para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h”. (Badilla, Elizondo y Barrantes, 2008, p.11)

Chavarría (2019), menciona que se inició con las mediciones de IRI el año 1992 utilizando el Perfilómetro Merlín. Posteriormente en el año 1995, el “Proyecto Especial de la Infraestructura de Transportes (PERT)”, determinó los primeros parámetros de IRI, ya para el año 2000 las especificaciones técnicas generales para carreteras (EG-2000), definió valores de IRI para cada tipo de superficie de rodadura

En la actualidad en el país, se cuenta con varios tramos de carretera concesionados donde emplean distintos valores máximos y mínimos de IRI y exigencias metodológicas. (P.8)

Figura 3

Modelo de cuarta de carro

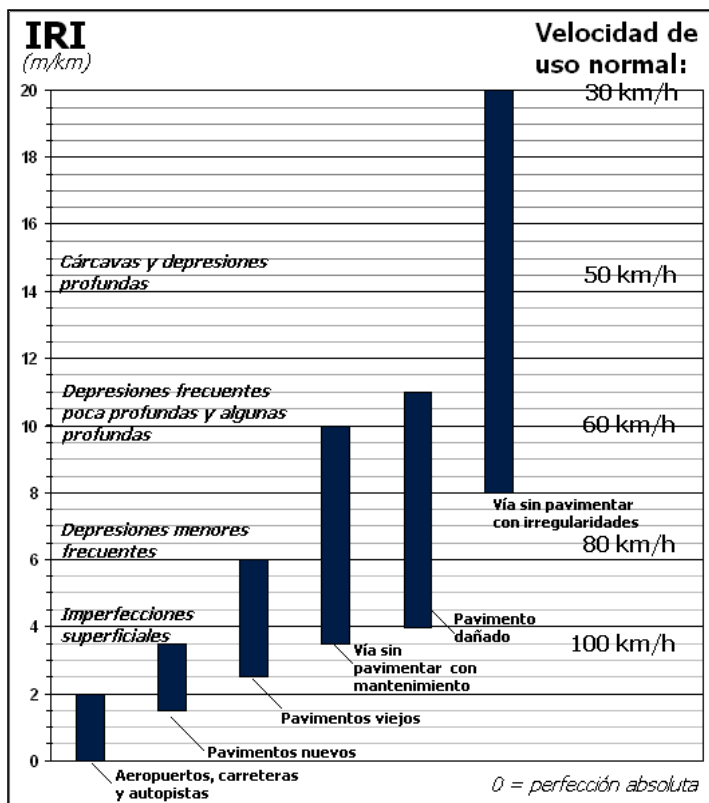


Nota : Publicación Técnica 67 IMT.

En la siguiente figura, se puede observar las diferentes características de los pavimentos dependiendo del valor del IRI, según los experimentos que realizó el Banco Mundial en diferentes países. (Arriaga, Garnica y Rico, 1998, p. 11).

Figura 4

Escala de valores del IRI empleada por el Banco Mundial



Nota: Adaptado de University of Michigan Transportation Research Institute 2002

2.1.2 Modelos de deterioro de pavimentos

En los últimos años, los diseños de pavimentos se desarrollan de dos formas prescriptiva y determinista, de forma prescriptiva porque al momento de realizar el diseño se definen límites en los parámetros como son la deflexión, con la finalidad de controlar el deterioro del pavimento, pero no se diseña para cuantificar el deterioro del pavimento a lo largo de su vida útil. De forma determinista porque el diseño tiene que cumplir con el modelo empleado y los parámetros de diseño sin considerar la variabilidad estadística y factores de fiabilidad (Nicolsi, 2015).

Los gestores de la infraestructura vial cuestionan que los diseños se realicen para una duración de 20 años, debido que los datos históricos muestran que el pavimento presenta buenas condiciones de 8 a 12 años, después de esto es posible garantizar que se llegue a 20 o 25 años si se realiza actividades de mantenimiento, por lo que es necesario considerar que las etapas de construcción y el mantenimiento de carreteras

son actividades directamente relacionadas. Por ende, es necesario implementar metodologías de gestión de pavimentos.

Desde los años setenta, se desarrollaron investigaciones sobre sistemas de gestión de pavimentos, donde se realizaron varios estudios como el Project 123, del Texas Highway Department, o el Project 1-10 de la National Cooperative Highway Research Program(NCHRP), (Odoki & Kerali, 2006).

Con las investigaciones desarrolladas se incrementa el conocimiento de la gestión de pavimentos Pavement Management System (PMS), línea de estudio que abarca las actividades de planificación, diseño y construcción, así como las actividades relacionadas al mantenimiento del pavimento en una red vial (AASHTO, 1993).

Para una adecuada gestión de pavimentos se requiere de una potente herramienta computacional que permita introducir las diferentes variables que actúan en el deterioro progresivo del pavimento al largo su vida útil. Lo cual es posible realizar mediante Modelos de Deterioro, que son herramientas que por lo general son expresiones matemáticas, que permiten conocer la tendencia de deterioro del pavimento al pasar el tiempo y conocer de esta manera el deterioro a corto y largo plazo del mantenimiento del pavimento, con lo cual permite tomar decisiones en momentos oportunos para realizar el mantenimiento del pavimento y calcular las estimaciones de los costos (FICEM, 1996), (Turrado, 2016, pág. 15-18).

Los modelos de deterioro se clasifican de acuerdo con la metodología de cálculo (Has *et al.*, 1994), clasificándose entre modelos deterministas y no deterministas; otra manera de clasificarlos es por la naturaleza de los datos empleados, resultando

modelos empíricos, mecanicistas y empírico mecanicista, según se muestra en la tabla 1: (Turrado, 2016, pág. 23)

Tabla 1

Clasificación de modelos de deterioro

		Tipos de modelos de deterioro									
		Deterministas					No deterministas				
		Regresiones no lineales					Probabilísticos			Fuzzy logic	
		Regresión lineal	Regresión parabólica	Regresión exponencial	Regresión hiperbólica	Regresión curva sigmoideal	Curvas de supervivencia	Regresión con metodo bayesiano	Proceso de transición		Regresión Fuzy
							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					

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

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Investigaciones internacionales

Acosta (2016), en su investigación sobre modelos probabilísticos para predecir el deterioro del pavimento en la red vial de Colombia, de acuerdo con la evaluación del Instituto Nacional de Vías, desarrollo modelos probabilísticos de matrices de transición de probabilidad de Markov, para determinadas condiciones de temperatura y clima en las vías del territorio colombiano, asimismo, desarrollo MTP a los distintos niveles macro deterioro de las vías, con un estudio de los tipos de daños que se presentan en la estructura del pavimento. el modelo fue desarrollado mediante la generación de un modelo de regresión lineal simple, donde se realizaron dos tipos de análisis, el primero se realizó generando modelos de regresión lineal simples de forma $y = m \cdot x + b$ donde m es la pendiente y b el intercepto con el eje de las ordenadas. El segundo análisis realizado corresponde a la generación de modelos en los cuales fue forzado el valor del intercepto, el parámetro b, igual a cero, esto es, modelos de la forma $y = m \cdot x$. De la investigación se concluye que los dos modelos desarrollados

presentan un valor alto de coeficiente de determinación R^2 , debido a esto los modelos presentan buenas cualidades de predicción ya que estas fueron comparadas con mediciones tomadas en terreno el administrador de la vía.

En los resultados de su investigación sobre la mejora en la gestión de pavimentos urbanos en Valencia, España, Andrade (2018), sostiene que, a fin de planificar de manera correcta el mantenimiento del pavimento, es fundamental conocer el comportamiento del deterioro, es decir, predecir la evolución de las carreteras, para estudiar esto, actualmente existen diversas metodologías cada vez más usadas, tales como las curvas empíricas de regresión, o los métodos probabilísticos o determinísticos como redes neuronales o cadenas de Markov, entre otros, que deben calibrarse para realizar dichas predicciones considerando las características particulares de cada carretera.

Andrade (2018), también indica que el modelo de regresión hace un análisis de tendencia del comportamiento a través del tiempo, utilizando data histórica recolectada durante la vida útil de la vía, utilizando las cadenas de Markov realizó el análisis probabilísticos con el que pudo predecir el deterioro de la carretera, con resultados que pueden ser cuantitativos y cualitativos a partir de información sobre el estado actual, datos de distribución de información histórica y entrevistas a expertos.

Márquez (2013), aplico la teoría de Márkov para predecir el deterioro de pavimentos en México, y menciona que, existen diversos métodos para predecir el comportamiento del deterioro de las carreteras, y que pueden ser de los siguientes tipos: subjetivo, mecanicista, regresión y empírico-mecanicista; estos, también pueden ser diferenciados como probabilísticos o deterministas. La modelación realizada se basa en el incremento del valor de IRI como el principal indicador de deterioro del pavimento, utilizando los datos de IRI de dos tramos de carretera de Mexico, se obtuvo promedios para segmentos de cien metros de longitud, agrupándolos, lo cual, permitió estimar el comportamiento de la regularidad del pavimento cada año, los resultados que encontró, muestran un comportamiento de degradación del pavimento. Además, menciona que las cadenas de Markov pueden ser homogéneas, que consideran variables como el tráfico, el clima, etc., y no homogéneas, que suponen incremento del tráfico, variaciones climáticas, etc. Y

considera que el uso de IRI es muy ventajoso por usar pocos datos y de esa forma aminoras en costos de aplicación.

En su investigación Cataluña (2010), se centra en el uso funcional de IRI, que mide la comodidad del conductor al circular por una carretera, pero también menciona que es un parámetro que, al depender de muchas variables, que pueden ser de difícil medición, dificultando exactamente la evolución en el tiempo de IRI. Algunas variables que influyen pueden ser: los ejes pesados, el clima, tipo y estructura de la vía, porcentaje y profundidad de la superficie, degradaciones, tiempo de servicio o vida útil de la carretera, mantenimiento que se ha realizado.

Hong et al. (2007) en su investigación de modelos estocásticos de pavimentos precisa que, no se puede predecir con exactitud el comportamiento del pavimento debido a factores como calidad de los materiales empleados, diseño geométrico, tráfico, y condiciones ambientales. Por lo tanto, la predicción del comportamiento del pavimento debe desarrollarse de manera probabilística. Se desarrollo cadenas de Markov continua no homogénea, calculando matrices de probabilidad de transición utilizando dos parámetros, uno que controla la intensidad del tráfico y la otra el tiempo, los cuales fueron comparados con el análisis de costo de pavimento Ontario (OPAC) y en la guía AASHTO, donde se concluye que el enfoque propuesto es capaz de imitar el deterioro del pavimento sugerido por los modelos OPAC y AASHTO.

En su investigación Prozzi (2001), reitera la importancia de las predicciones precisas para realizar una gestión eficiente del pavimento de las vías, reduciendo costos mediante planificación e intervenciones oportunas y precisas. Por ello, el objetivo de su investigación se centró en elaborar una metodología para desarrollar modelos de deterioro del pavimento para gestionar la infraestructura vial, el indicador de rendimiento utilizado fue la pérdida de la calidad en la condición del pavimento, además se utilizó los parámetros del índice de rugosidad internacional (IRI) y índice de servicio actual (PSI). Los modelos desarrollados en su investigación permiten predecir la capacidad del funcionamiento de la carretera mediante las características estructurales del pavimento, variación de carga y tráfico vehicular, condiciones ambientales. El modelo permite estimar la calidad de condición en términos de rugosidad.

2.2.2 Investigaciones nacionales

Ríos (2019), desarrollo modelos de deterioro de pavimento y su comparación con las mediciones funcionales realizadas entre los años 2010 al 2016. Para lo cual desarrollo dos métodos el estocástico – probabilístico y empírico, los cuales fueron modelados con los valores de IRI, tomados en campo desde el km 51+000 al 181+000 de la carretera Inambari – Azangaro, los modelos presentaron buenas condiciones predictivas al ser comparados con las mediciones realizadas en campo el 2018 y ambos modelos presentaron un coeficiente de correlación R^2 considerados como positivo moderado y positivo fuerte respectivamente para cada modelo de deterioro.

En su trabajo Ochoa *et al.* (2017), utilizo la base de datos de la inspección visual de los pavimentos de la Red Vial 3 Cusco del año 2015, los cuales se dividieron en cuatro tramos, según sus características, para poder determinar si la aplicación de un Sistema de Gestión de Pavimento (SGP) basado en el método estocástico – probabilístico, permite optimizar el uso de recursos económicos en la conservación del tramo de carretera. De sus resultados sostiene que para que un sistema de gestión de pavimentos sea eficiente, es fundamental predecir el comportamiento del pavimento, a través de modelos de simulación del deterioro del pavimento en el tiempo, para estimar la condición final de un pavimento.

En su tesis Lima (2005), desarrollo modelos (expresiones matemáticas) que sirven para predecir el deterioro de pavimentos y estos puedan servir como guías para desarrollar modelos de predicción con las técnicas aplicadas en su investigación. Sostiene que la predicción del deterioro de los pavimentos es importante para un adecuado sistema de gestión de pavimentos, para esto, se utilizan distintos modelos de deterioro, basados en las condiciones de la vía al iniciar su servicio y al realizar el análisis. Dichos modelos facilitan pronosticar como el mantenimiento efectuado funcionará, lo cual, permite manejar una correcta conservación de la vía en el tiempo. En ese entender, es fundamental conocer claramente el comportamiento de los pavimentos, tomando en cuenta las condiciones particulares del lugar, y los recursos disponibles de las entidades que las utilicen.

Jaña (2016), en su investigación, que busco calibrar los modelos tráfico y clima, a las condiciones de la región de Piura, estableció lineamientos y los pasos a seguir para la

implementación de los modelos de tráfico y clima de acuerdo con la MEPDG. Asimismo, considero modelos de deterioro que fueron calibrados en Norte América los cuales contemplan fallas como fisuras, deformaciones y regularidad superficial. Resalta que, todas las observaciones y consideraciones se deben tener en cuenta al momento de diseñar los modelos, así como las normas de mantenimiento de pavimento, especificaciones técnicas y calidad de materiales durante la construcción, las cuales, cambian en cada país.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1 Deterioro del pavimento

“El grado de deterioro de un pavimento flexible está en 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, 2013, pág. 6).

“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).

Cuando un pavimento es recién construido y entra en etapa de operación el nivel de servicio es cercano a la perfección, pero este se va deteriorando al pasar el tiempo y esto se debe a diferentes factores como el incremento del flujo vehicular, climas adversos con marcados gradientes térmicos, calidad de los materiales con los que se construyó el pavimento, edad del pavimento, trabajos de mantenimiento ejecutados entre otros.

Como se sabe, el deterioro del pavimento es un proceso continuo, pero no se desarrolla de manera lineal. Puesto que, en los primeros años la condición del pavimento tiene una tendencia a deteriorarse de manera más rápida y conforme transcurre el tiempo, la condición del pavimento se estabiliza para mostrar una curva más o menos definida. (Márquez, 2013, pág. 8).

El comportamiento del pavimento está constituido por diferentes fases a lo largo de su vida útil las cuales se detallan a continuación:

1. Fase A de Construcción

Es el resultado de la construcción del pavimento, el cual pudo haberse realizado con todos los controles de calidad o presentar deficiencias, por lo general en esta fase la carretera se encuentra en excelente estado y el usuario siente el confort y la seguridad al transitar por la vía.

2. Fase B Deterioro Lento

Entre los 8 y 10 primeros años del ciclo de vía del pavimento, este experimenta un proceso de desgaste lento, que se refleja principalmente en la carpeta de rodadura como fallas superficiales y en menor porcentaje en el paquete estructural, en esta fase es necesario realizar trabajos de mantenimiento adecuado para que se cumpla con el diseño del pavimento.

3. Fase C - Deterioro acelerado

C1: En esta fase, la estructura básica del pavimento se conserva intacta y las fallas superficiales son menores, a simple vista el pavimento no presenta mayores daños

C2: En esta fase se puede apreciar un daño acelerado del pavimento y de otros componentes del paquete estructural.

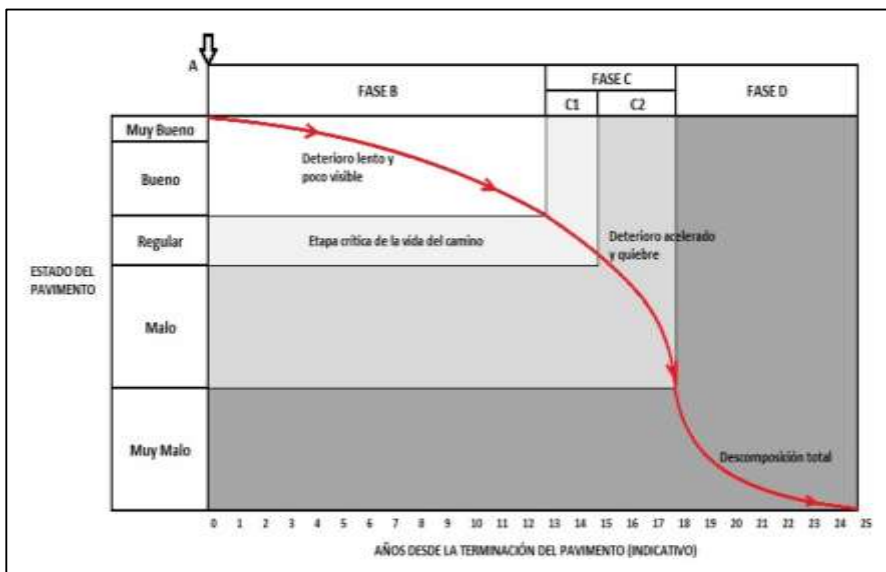
En esta fase los vehículos que transitan por la vía experimentan molestias debido a la irregularidad de la superficie, pérdida del confort y aumento de accidentabilidad.

4. Fase D – Deterioro General

En esta fase final, el usuario observa el desprendimiento gradual del pavimento, por lo que se incrementa el tiempo de circulación en la vía, se incrementa el costo de operación vehicular y el número de accidentes.

Figura 5

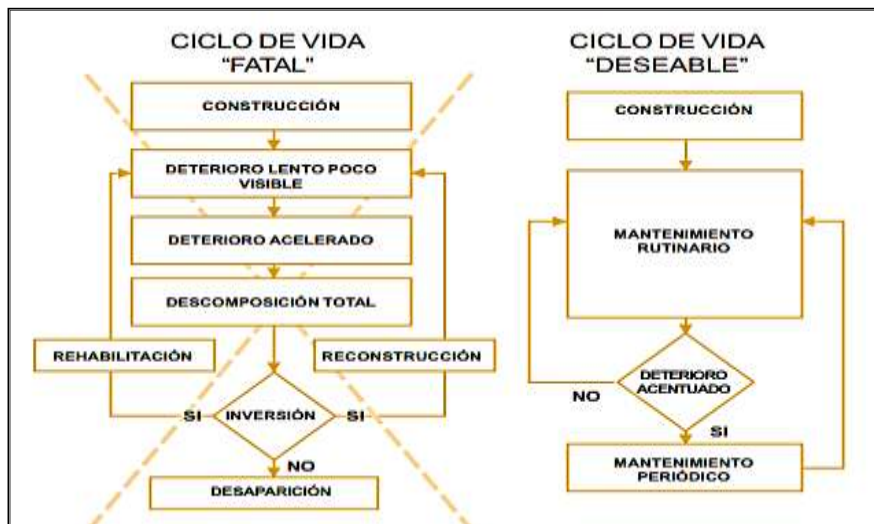
Ciclo de vida del pavimento con sus respectivas fases



Nota: Manual técnico OIT (2003).

Figura 6

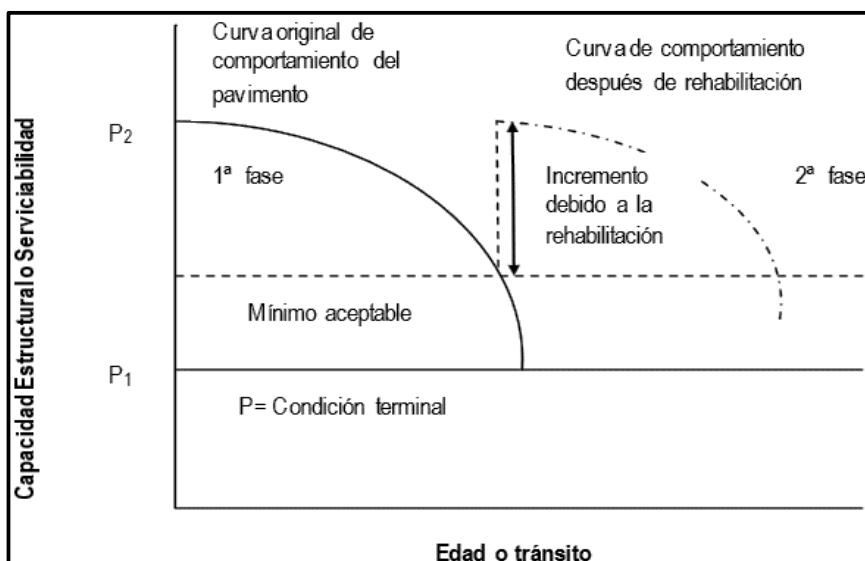
Diagrama de ciclo de vida fatal y deseable de un pavimento



Nota: Manual técnico OIT (2003).

Figura 7

Esquema de deterioro de pavimentos de 1ra y 2da fase



Nota: 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 diversos los orígenes que puedan gatillar el deterioro de los pavimentos, como pueden ser las 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

Un adecuado diseño de pavimento asegura el tiempo de vida útil para el que fue diseñado, puesto que un cálculo con parámetros que no son los correctos de acuerdo con el tipo de carretera puede reflejarse como daños prematuros a la superficie de rodadura, por lo que es importante realizar una adecuada estimación del volumen de tránsito que circulara por la vía, así como considerar los factores climáticos que afectan

el desempeño de la carpeta asfáltica, asimismo, al momento de realizar la construcción del la carretera llevar un control de calidad exhaustivo que asegure el cumplimiento de las especificaciones técnicas.

Identificar y analizar los factores el desempeño del pavimento a lo largo de la vida útil son fundamentales para desarrollar modelos de deterioro de pavimentos." Hudson *et al.* (1997), los factores que afectan al pavimento se consideran en 5 categorías: 1) cargas al tipo de vía 2) efectos ambientales 3) tipo de materiales 4) calidad en la construcción 5) otros efectos de interacción de la vía (Márquez, 2013, pág. 7-8).

2.3.3 Indicadores de deterioro

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

2.3.3.1 Capacidad funcional

Relacionado con la calidad de la superficie de rodadura y la serviciabilidad. Tiene que ver con la regularidad, resistencia a la fricción y textura. La regularidad del pavimento es la medida más usada para representar el desempeño de este, ya que se refleja como el confort que brinda al usuario. (Hunt y Bunker, 2003). Motivo por el cual es importante considerar la macro textura para una adecuada resistencia al deslizamiento el momento que los vehículos circulan a medianas o elevadas velocidades.

La carpeta de rodadura debe asegurar un correcto nivel de fricción entre el contacto del neumático del vehículo con la superficie del pavimento para proveer la seguridad a los usuarios de las vías. (López y Garnica, 2001).

2.3.3.2 Deterioros superficiales

El grupo de deterioros superficiales está relacionado con la pérdida de servicio del pavimento donde se evidencia agrietamientos, desprendimientos, baches y roderas, en la tabla 2 se muestra la clasificación de deterioro de pavimentos.

Tabla 2

Clasificación de deterioro 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

Nota: Elaborado a partir de ASTM D5340, 2013

2.3.3.3 Capacidad estructural

La capacidad estructural del pavimento es la capacidad de soportar adecuadamente las cargas de tránsito para la cual fue diseñada el pavimento, como parámetros de medición se tiene a la deflexión y espesores de capa.

La evaluación de la capacidad estructural del pavimento provee información sobre el comportamiento esperado del pavimento y se realiza mediante equipos como son el deflectómetro de impacto, el cual transmite una carga específica al pavimento y obteniendo la deflexión generada en el paquete estructural del pavimento.

Es importante realizar la evaluación de deflexión del pavimento, puesto que, los resultados que están en función al diseño estructural del pavimento, tránsito vehicular, condiciones climáticas, nos permite conocer la condición de deterioro del pavimento. (Anastasopoulos *et al.*, 2009).

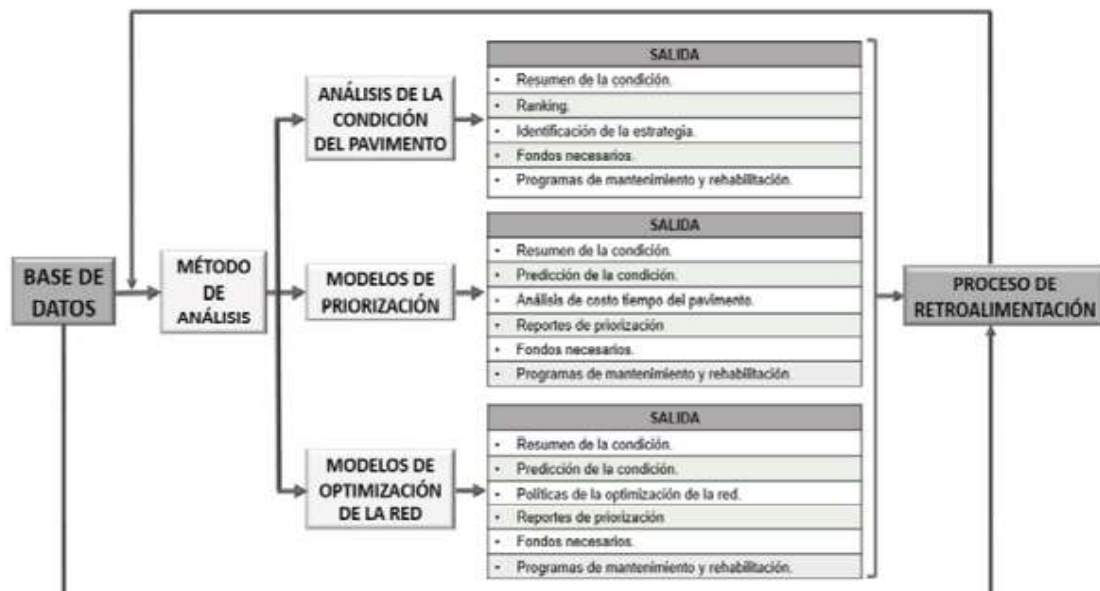
2.3.4 Sistema de gestión de pavimentos

Desarrollar un sistema de gestión de pavimentos (SGP) es importante porque, provee de herramientas y métodos que sirven para la toma de decisiones a los entes gubernamentales y concesionarios viales, para que estos puedan encontrar la estrategias adecuadas para mantener los pavimento de su red vial en buenas condiciones de serviciabilidad en un periodo de tiempo.

Un sistema de gestión de pavimentos (SGP), sirve para monitorear redes viales, y desarrollar planes de mantenimiento y de rehabilitación de acuerdo con las predicciones de deterioro. Un SGP, debe considerar las siguientes actividades como son, colección de datos históricos, analizar los datos para determinar la condición del pavimento, y seleccionar la alternativa más económica y factible de acuerdo con la necesidad del pavimento, Para realizar este control es necesario hacer uso de modelos de comportamiento de pavimentos, con los cuales se pueda predecir estado futuro del pavimento. (Mills *et al.*, 2012).

Figura 8

Componentes esenciales del sistema de gestion de pavimentos



Nota: Acosta (2016), Modelos probabilísticos para predecir el deterioro de la red vial

Un sistema de gestión de pavimentos es un conjunto de actividades que se desarrollan con el objetivo de mantener el nivel de serviciabilidad, seguridad, confort y capacidad estructural adecuadas para el tránsito vehicular, soportando factores externos como el incremento del tránsito vehicular, climas y entorno donde se ubica la vía, par que de esta manera se minimicen los costos sociales, económicos y ambientales. (Solminihac, 2001).

Haas, Hudson y Zaniewski (1994), indican que existen requerimientos esenciales para el sistema de gestión de pavimento como, capacidad que los datos sean fácilmente actualizados y se disponga de información, evaluación de mejores estrategias para realizar el mantenimiento, capacidad de los involucrados en la toma de decisiones, capacidad para el uso de la información para realizar retroalimentaciones de las decisiones ejecutadas.

la Norma ASTM E1166-00 recomienda desarrollar un sistema de gestión de pavimentos realizando la integración de los siguientes componentes (ASTM, 2010):

1. Sistema de referencia. Referenciación espacial de todo el tramo de carretera que será gestionada.
2. Datos de entrada. La norma ASTM E1777 los agrupa en las siguientes categorías:
 - a. Data Histórica, donde se puede revisar las mediciones y eventos importantes durante la operación de la vía.
 - b. Costos, conocer la cuantificación económica que se realizaron en las diferentes intervenciones realizadas a la vía.
 - c. Políticos, decisiones que involucraron al sistema de gestión de pavimentos.
 - d. Diseño geométrico de la vía.
 - e. Estudio de tráfico de la vía. Incremento del tráfico y cargas por vehículos.
 - f. Datos climatológicos de la via, como pueden ser precipitaciones, cambios de gradientes térmicos, época de lluvias, humedad etc.

3. Gestor de base de datos. Dependiendo del tamaño de la red vial se debe de considerar una gestión de base de datos para el adecuado almacenamiento, análisis de la información y posteriores consultas.

4. Herramientas para realizar análisis de datos (modelos de deterioro). Desarrollo de herramientas de gestión como modelos matemáticos que puedan ser utilizados para:

a. Predecir del deterioro del pavimento en un determinado periodo de tiempo.

b. Realizar evaluaciones económicas, estrategias y programar actividades de conservación y rehabilitación.

c. Mejorar los programas de mantenimiento con el objetivo de mantener los niveles de servicio el pavimento por un mayor periodo de tiempo y de esta manera mejorar la rentabilidad de las inversiones realizadas.

d. Definir tramos de carretera que son prioritarios de acuerdo con el nivel de deterioro de la red vial.

e. Evaluar los impactos del programa de mantenimiento y verificar la disponibilidad de los recursos para realizar actividades en la red vial.

2.3.5 Modelos de deterioro de pavimentos

2.3.5.1 Modelos deterministas

Los modelos de deterioro empírico y empírico-mecanicista, son adecuados para realizar análisis de la red vial. el modelo pronostica la condición futura del pavimento haciendo uso de indicadores de desempeño con los cuales se cuenta con datos históricos de información del pavimento en estudio, este método puede no ser aplicables fuera de las condiciones específicas en las cuales se basan, sin embargo, es posible calibrar el modelo con factores de corrección.

Lo modelos deterministas se puede emplear haciendo uso de curvas de regresión, tales como: lineal, parabólica, exponencial, hiperbólica y sigmoideal. Los que con más frecuencia son usados son las ecuaciones de regresión lineal, las cuales

ofrecen grandes resultados en la mayoría de los casos. Se debe de considerar que, en las regresiones estadísticas, el concepto de linealidad son los parámetros calculados, independientemente de la clase de función que se relacionan a las variables independientes de referencia. Consecuentemente, 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:

$$\hat{f}(Y) = Y = \alpha + \beta \cdot f(x)$$

\hat{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 descrita es no lineal en función de X , pero lineal en función de los dos parámetros desconocidos α, β . Este es el sentido del término lineal en el contexto de regresión estadística. Por lo que, el resultado puede ser curvas no lineales (polinómicas o exponenciales), Consecuentemente, “los 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, 2016, pág. 100-101).

Modelos Empíricos: Son desarrollados haciendo uso de herramientas estadísticas y requieren datos reales y registros históricos de la red vial, donde se almacene gran cantidad de información sobre la variación de condición del pavimento a lo largo de su vida útil, el desarrollo de modelos de deterioro y su capacidad predictiva, depende de la calidad de información tomada en campo y en la base de datos.

Al desarrollar modelos de deterioro empíricos, se considera que la variable independiente es un indicador de funcional del pavimento, como puede ser. el PSI, (IRI), el índice de confort de rodado (RCI), o el PCI), Estas variables dependientes están

estrechamente relacionadas a una o más variables explicativas, las cuales representan la resistencia estructural del pavimento, carga vehicular y medio ambiente.

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 basadas en las leyes físicas, o al menos, ellos intentan simular el proceso físico real del deterioro.

Modelos Mecanicistas: Son aquellos modelos que se basan en las diferentes características de los materiales que conforman el paquete estructural del pavimento, que se basan en las teorías de la resistencia de materiales, propiedades mecánicas de las diferentes capas del pavimento bajo condiciones de carga. El modelo presenta desventajas puesto que solo representa el comportamiento que tendrá el paquete estructural del pavimento ante situaciones limitadas.

Modelos Empíricos – Mecanicistas:

Combina los modelos anteriormente descritos, donde se realiza la modelación mecánica con la observación de los pavimentos construidos.

Este modelo caracteriza los materiales mediante pruebas de laboratorio y los modelos de respuesta de pavimentos empleando modelos lineales elásticos o elementos finitos, para realizar el cálculo de respuesta del pavimento (deflexiones tensiones y deformaciones unitarias). La respuesta es causada por las cargas de tránsito, clima o una combinación de ambas, este cálculo representa el modelo mecanicista.

Las deformaciones y tensiones calculados son empleados como parámetros de entrada como una variable independiente de modelos empíricos de regresión para poder predecir el comportamiento futuro del pavimento, esto constituye el modelo empírico. Por lo tanto, el modelo que se desarrolla usando las técnicas de regresión con la respuesta del pavimento como una variable independiente se denomina modelo empírico – mecanicista.

Los modelos empíricos-mecanicistas tienen la capacidad de extrapolar valores predichos fuera del rango de datos y condiciones que fueron desarrollados,

originando predicciones determinísticas del comportamiento 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, 2005, pág. 20 al 23)

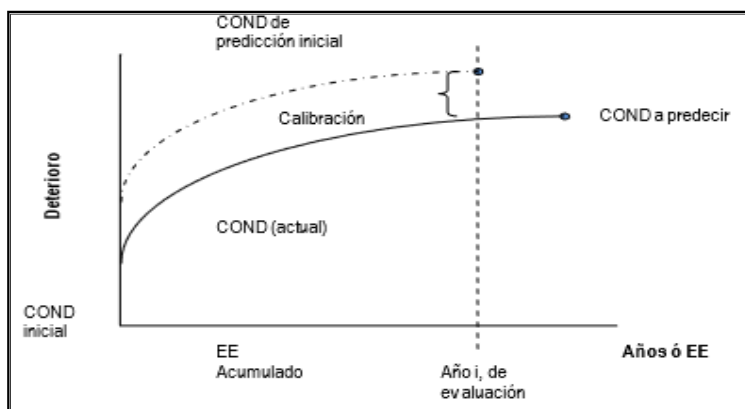
Según la forma de predicción existen dos tipos de modelos (independientemente a si estos son empíricos o empíricos-mecanicistas) y son modelos agregados (acumulados) y modelos incrementales. (Solminihaç, 2005).

- Modelos de deterioro agregados:

Para pronosticar el deterioro del pavimento en el futuro, se debe conocer la histórica del comportamiento del pavimento, datos como, incremento del flujo vehicular, tránsito medio diario anual en la puesta en marcha del pavimento, nivel de servicio inicial (fisuras, agrietamientos, IRI), etc.

Figura 9

Modelos agregado



Nota: Vidal, 1998

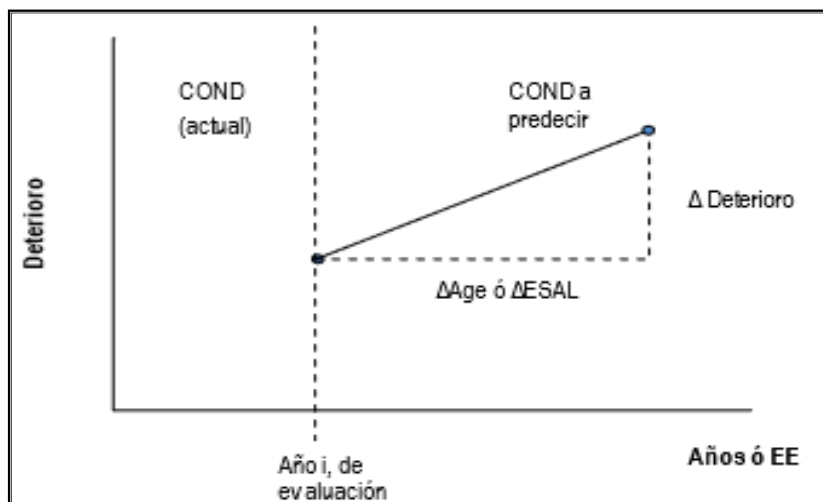
- Modelos de deterioro incrementales:

Para desarrollar este modelo no se requiere conocer la historia del pavimento para pronosticar el comportamiento futuro, los modelos se desarrollan en base a ecuaciones matemáticas y operaciones lógicas, por lo que es necesario conocer la condición actual del pavimento con mediciones realizadas en terreno, además de las características estructurales, cantidad de tránsito que circula por el pavimento

al momento al año de la evaluación y condiciones climáticas (Tenorio, 2005, pág. 29).

Figura 10

Modelo incremental



Nota: Vidal, 1998

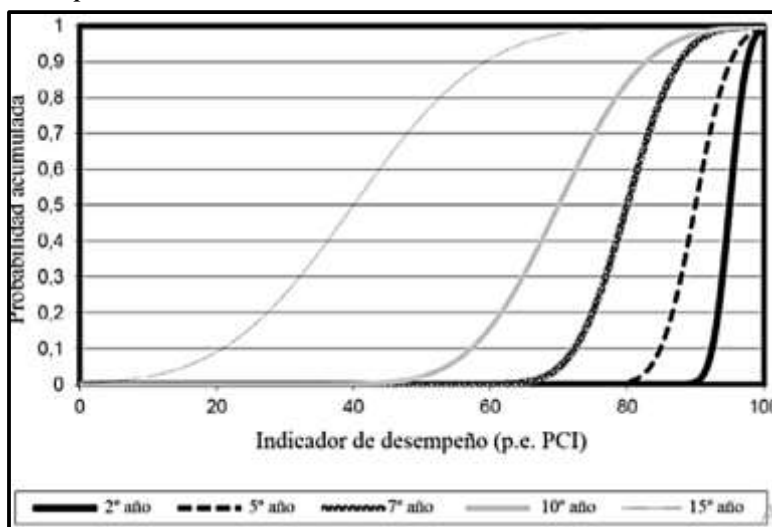
2.3.5.2 Modelos probabilísticos

Este modelo es utilizado para desarrollar sistemas de gestión de pavimentos, los cuales se dividen en; curvas de supervivencia, cadenas de Markov y regresión bayesiana, estos modelos permiten conocer el estado futuro del pavimento.

Curvas de supervivencia: Usa indicadores de desempeño como el IRI, PCI, etc, los cuales son tratados como variables aleatorias, asociadas, a una probabilidad relativa que pueda verificarse en determinadas condiciones. La variable aleatoria “Indicador de desempeño” será analizada en cada etapa de la vida útil del pavimento, determinada con una 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.

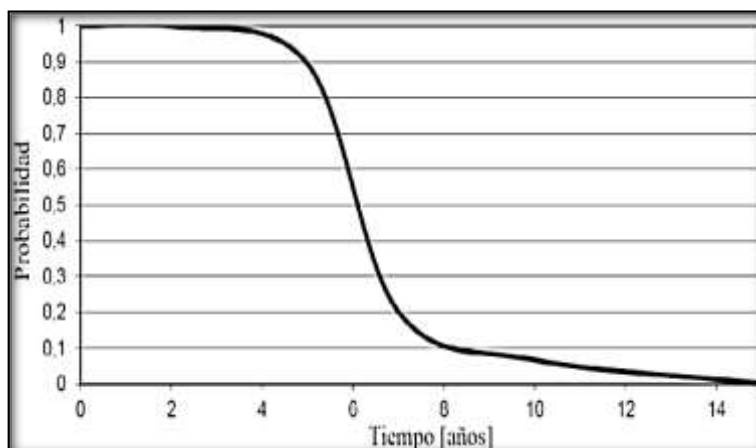
Figura 11

Distribución de probabilidad acumulada del PCI



Nota: Nicolosi, U. Tor Vergata

Como se muestra la distribución varía en función al tiempo, por lo que se representa que en cada periodo de tiempo le corresponda la probabilidad de que dicho indicador sea mayor o igual a un valor prefijado. Es a lo que se denomina “curva de supervivencia”. Por ejemplo, la curva de supervivencia de la figura 11 se puede interpretar de la siguiente manera: 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 12).

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

Modelos de deterioros Markovianos y semi-Markovianos. Estos modelos han sido desarrollados a partir de la definición de una serie de estados de deterioro que la estructura del pavimento puede asumir a lo largo de su vida útil. Los estados de deterioro son individualizados asociándoles intervalos de valores de uno o más indicadores preseleccionados. Esta metodología se basa en la determinación de la probabilidad de que durante un ciclo que podría considerarse un año se verifique uno de los siguientes eventos:

- a. Que el pavimento pueda permanecer en el mismo estado de deterioro.
- b. Cambio del nivel de deterioro inicial a uno superior.

Considerando lo descrito anteriormente es posible establecer una matriz de transición en la cual cada elemento p_{ij} representa el estado del pavimento, encontrándose en un estado inicial (i), pasado un determinado periodo de tiempo pase, al estado final (j). La probabilidad es estimada a partir de las mediciones históricas realizadas, donde se muestra la evolución del deterioro y a través de métodos de programación lineal, la cual consiste en la suma de las diferencias entre los valores previstos y los medidos.

Figura 13

Ejemplo de matriz de transición para un ciclo. Método Markoviano

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

Nota: Nicolosi, U. Tor Vaergata

En la figura 13 se muestra los estados posibles en un ciclo determinado (k), haciendo uso del vector de estado P_k , por ejemplo, si al inicio el tramo 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 para el 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 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:

$$P_1 = P_0 * T; P_2 = P_1 * T = P_0 * T^2; [...] P_k = P_{k-1} * T = P_0 * T^k$$

A través de procesos Markovianos, es posible predecir el comportamiento futuro del pavimento, partiendo únicamente de su condición inicial. Otros factores que pueden afectar el comportamiento del pavimento, como las condiciones ambientales, volumen de tráfico, etc, se deben de considerar en una matriz de transición para cada combinación de factores que intervienen en el deterioro.

2.3.6 Metodología para el análisis de modelos de deterioro

Los modelos de deterioro permiten ser utilizados para predecir el comportamiento del pavimento en el futuro, y de esta manera planificar la clase de intervención a realizar como mantenimiento y rehabilitación, y el momento en el que se debe realizar.

Tsunokawa *et al.* (2006) baso su investigación en la búsqueda de optimizar el tipo de intervención a los diferentes tipos de pavimentos de acuerdo su de deterioro medido con el índice de rugosidad internacional (IRI).

Prozzi y Hong (2008) en su investigación plantearon modelos de predicción de estado para cada tipo de pavimento, y para su adaptación para cada caso en particular, es necesario contar con las variables de entrada que requieren los modelos.

Para realizar la predicción del comportamiento futuro del pavimento existen distintos enfoques, (Has *et al.*, 1994) describe los diferentes métodos y los categoriza en 4 tipos:

- **Subjetivo:** los modelos de deterioro de basan en la experiencia ya se a formal o estructurada.
- **Puramente mecanicista:** se basa en parámetros del estado del pavimento como cálculo de esfuerzos, deflexiones y la fatiga.
- **Regresión:** La variable dependiente que viene a ser el deterioro del pavimento es relacionado con una o más variables independientes (propiedades de capas del pavimento, volumen y composición del tránsito, factores ambientales).
- **Empírico mecanicista:** Donde la ecuación que se requiere debe estar definida, por los principios mecanicistas, donde para relacionar una variable dependiente con las mediciones de deterioro, como son la regularidad, de tal forma que se utiliza el análisis de regresión para determinar los coeficientes reales y los parámetros dentro de esa forma predefinida.

Los métodos descritos anteriormente se agrupan en dos clases (Robinson *et al.*, 1998).

- **Probabilísticos:** El estado de pavimento futuro se basa en la función de probabilidad definido en un rango de posibles estados.
- **Deterministas:** La condición del pavimento predecido se da con un valor preciso basado en ecuaciones matemáticas de la medición del deterioro. Incluye modelos mecanicistas, modelos de regresión y modelos empírico mecanicista.

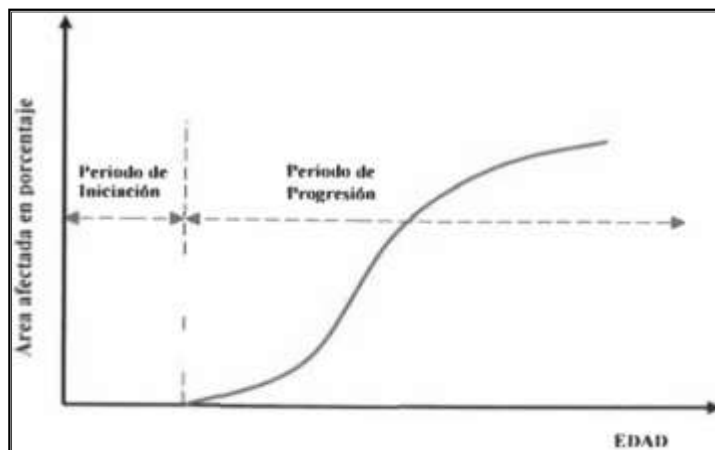
Los modelos de deterioro probabilísticos fueron desarrollados para explicar de manera directa la naturaleza estocástica del deterioro del pavimento, donde muchos factores no pueden ser colectados por falta o disponibilidad de datos. (Mishalani y Madanat, 2002).

2.3.6.1 Forma funcional del modelo

Está representado por la estructura funcional de las ecuaciones, las cuales se grafican de acuerdo con las variables involucradas respecto al paso del tiempo.

Figura 14

Inicio y progresión de los deterioros



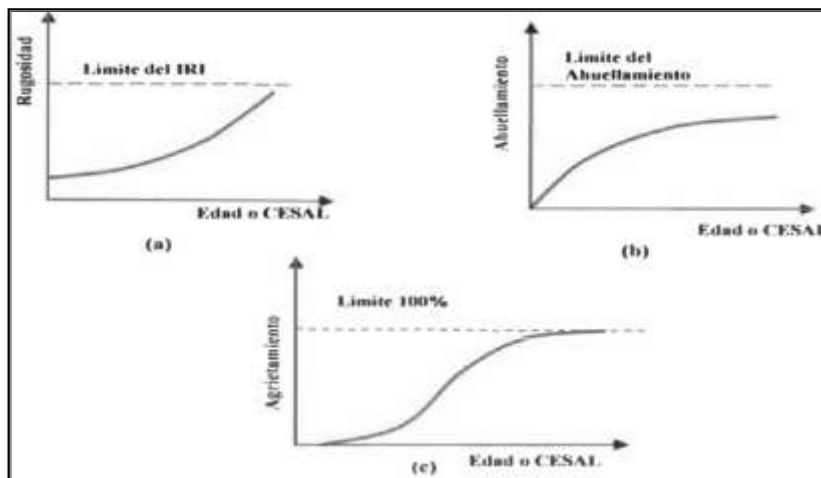
Nota: Argueta M., Castro H.

Los diversos modelos de deterioro presentan una de las tres formas crecimiento:

- **Progresión creciente:** Parte desde que se inicia el deterioro y su incremento de magnitud respecto al tiempo y se representa con una curva de tipo exponencial
- **Progresión decreciente:** se presenta deterioro elevado al principio y luego disminuye, se representa con una curva logarítmica.
- **Progresión sigmoide:** La primera fase el deterioro es progresivo y creciente, en la segunda fase la progresión del deterioro decrece, se representa con una curva tipo S.

Figura 15

Curvas de (a) progresión creciente, (b) progresión decreciente (c) Sigmoidal



Nota: Argueta M., Castro H

2.3.6.2 Técnicas para desarrollar modelos

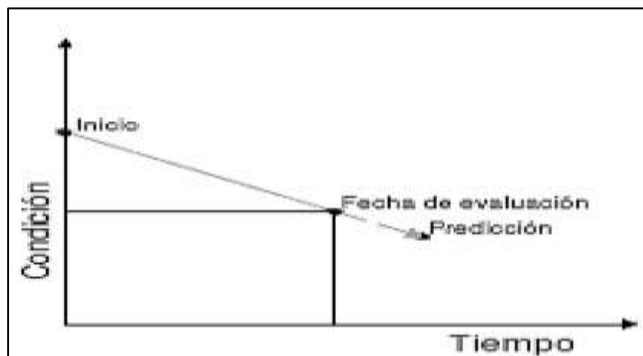
Para el desarrollo de modelos de deterioro existen diversas técnicas, de las cuales las que más se utilizan son: extrapolación lineal, regresión (empírico), distribución de probabilidad, mecanicista-empírico y markoviano. Los modelos para nivel de proyecto necesitan mayor precisión que para nivel de red. A continuación, se describen brevemente las principales técnicas para desarrollar modelos.

a. Extrapolación lineal

El método se basa en la extrapolación lineal de los dos últimos puntos del estado del pavimento, donde sus características son:

- Solo se aplica a secciones individuales de pavimentos y no puede ser usado en otras secciones.
- Se requiere como mínimo realizar una medición del estado del pavimento además del realizado al final de la construcción del pavimento (puesta en marcha).
- Para el desarrollo del método se asume que las cargas de tránsito, las intervenciones de mantenimiento y tasas de deterioro se mantendrán en el futuro, por lo tanto, el método no es preciso para periodos largos de tiempo. Para aplicar estos modelos en nuestro país es importante considerar este punto debido a la variabilidad principalmente de las cargas tránsito y actividades de mantenimiento.
- No es aplicable para predecir deterioros de pavimentos recién construidos o donde se hayan ejecutado actividades recientes de rehabilitación.

- Para el análisis se requiere, factores de suelo de fundación, clima, estructura del paquete estructural del pavimento y tránsito.

Figura 16*Extrapolación lineal*

Nota: Argueta M., Castro H.

b. Regresión

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

El siguiente modelo representa la regresión lineal entre dos variables:

$$Y_i = a + b x_i + \text{error}$$

Regresión lineal múltiple, para este modelo se asume que la variable dependiente es una función lineal de las variables independientes y se muestra a continuación:

$$Y = a + b_1.x_1 + b_2.x_2 + \dots + \text{error}$$

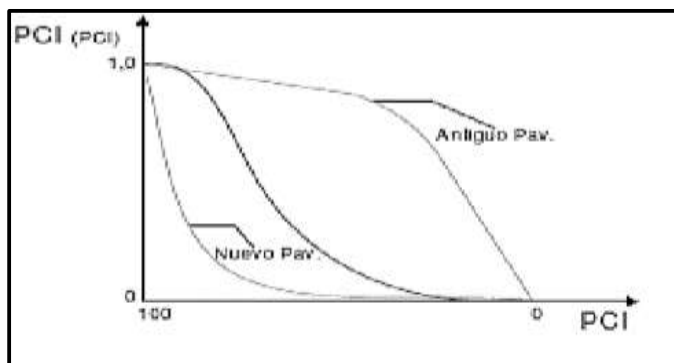
Regresión no lineal, se puede utilizar cuando la relación entre la variable dependiente y la independiente es no lineal. Una relación no lineal puede ser analizada como un modelo lineal transformando la variable dependiente.

c. Distribución de probabilidad

El estado de un pavimento, medido con sus parámetros funcionales como pueden ser PCI, IRI, etc. puede ser desarrollado como una variable aleatoria con una probabilidad relacionada a sus valores. Una distribución de probabilidades describe la probabilidad asociada con todos los valores de la variable aleatoria. En la figura 17 se muestra la función de distribución acumulada en función de la variable aleatoria de PCI.

Figura 17

Distribución de probabilidades



Nota: Shahin., 1994).

En la figura 17, el eje vertical es la probabilidad de que el PCI sea igual o menor que un determinado valor de PCI. La figura representa además distribuciones acumuladas en diferentes puntos del ciclo de vida del pavimento y podría representar la probabilidad en el tiempo de valor futuro de PCI, lo que se denomina una curva de supervivencia.

d. Modelos empíricos

Son modelos estadísticos que se basan en información observada y subjetiva; mediante análisis estadísticos del deterioro de segmentos o tramos de pavimento específicos que se busca estudiar, por lo tanto, estos modelos no pueden ser aplicables en otras condiciones distintas a las que se realizaron durante la evaluación. 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 con 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 usan el comportamiento de los materiales y modelos de respuesta del pavimento, con los cuales se cree representan el comportamiento real del paquete estructural del pavimento, pero para desarrollar estos modelos se requiere de una gran cantidad de datos. Para desarrollar este modelo es importante conocer sobre las siguientes teorías:

- 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 este 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 (1995), señala que una correlación está definida por el grado de analogía que existe entre dos variables de estudio. Para lo cual se debe de encontrar un valor que nos indique el nivel de intensidad de la relación existente entre las variables. Una manera de conocer esta medida es realizando el cálculo de la varianza residual.

Cuanto mayores sean la diferencia entre los valores obtenidos versus los valores teóricos de la variable dependiente, menor será la intensidad de relación entre las variables.

Existirá una dependencia funcional, cuando todos los valores obtenidos caigan sobre la gráfica de la función ajustada. Es cuando se indica que la varianza residual es nula.

2.3.7.1 Coeficiente de correlación general de Pearson

Estuardo (2012), para medir el grado de relación que existe entre una variable independiente y dependiente, lo más utilizado es la 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.

Antonio (1995), examina los distintos valores del coeficiente de correlación de Pearson:

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 3

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

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

2.4 Definición de términos básicos

Modelo de comportamiento:

Expresiones matemáticas que permiten predecir el crecimiento del estado del pavimento en el tiempo y en base al conocimiento de sus condiciones al momento de la puesta en servicio y en cualquier etapa de la vida útil.

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).

Correlación:

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

Modelos Determinísticos:

Prozzi (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 mecanicistas, calibrados usando técnicas de regresión.

Modelos Probabilísticos:

Prozzi (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.

Probabilidad:

Estuardo (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.

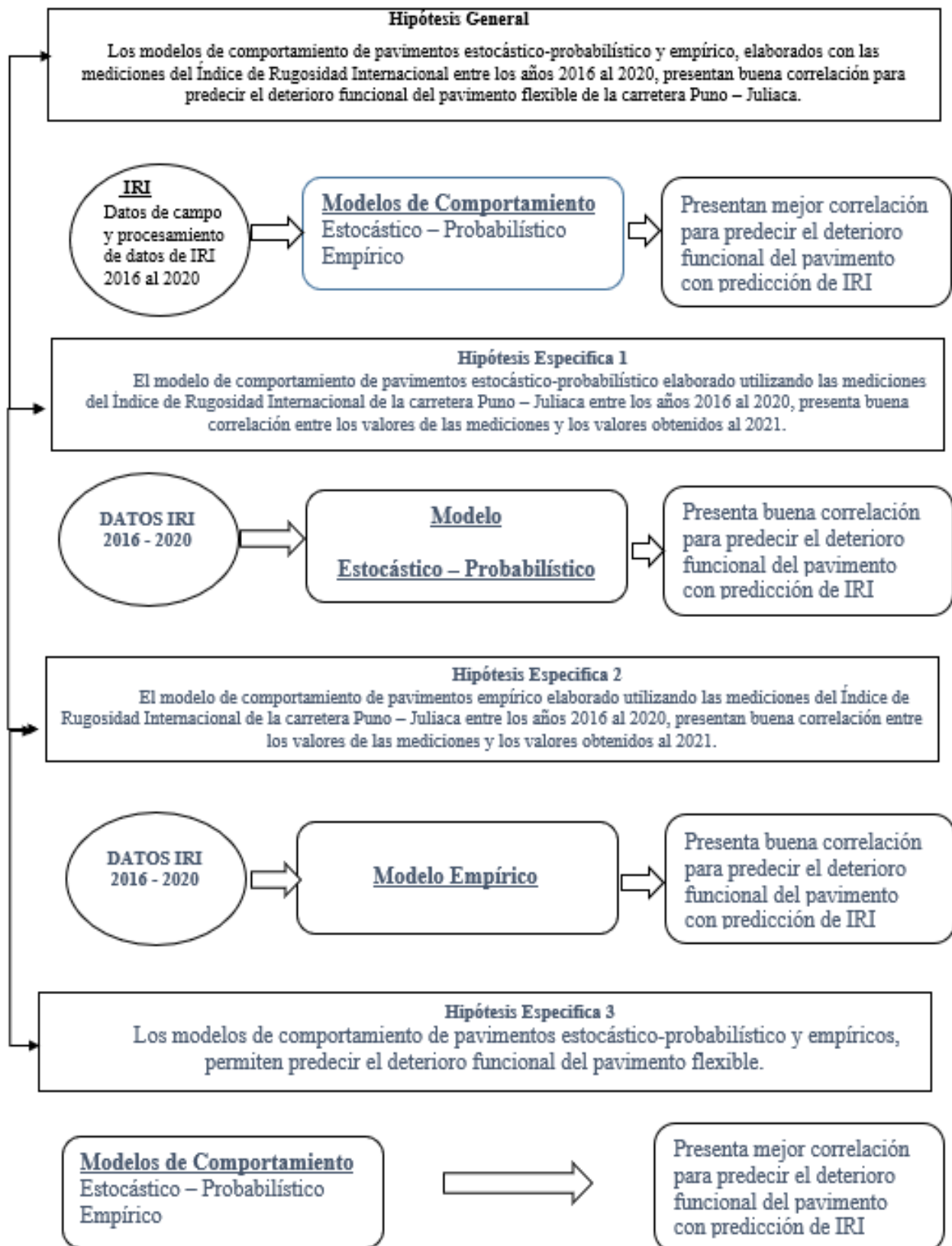
Error estándar de la estimación (S_e)

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 que sustenta la hipótesis



Con el seguimiento adecuado a la toma de datos, control y monitoreo al momento de aplicar la metodología se comprueba la hipótesis y se garantiza la eficacia y eficiencia de la presente investigación de desarrollo de modelos de comportamiento de pavimentos haciendo uso de las mediciones de IRI de los años 2016 al 2020, con los cuales se predice el deterioro funcional del pavimento en la carretera Puno - Juliaca.

2.6 Hipótesis

2.6.1 Hipótesis general

Los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empírico, elaborados con las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2016 al 2020, presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible de la carretera Puno – Juliaca.

2.6.2 Hipótesis específicas

- El modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico elaborado utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presenta buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.
- El modelo de comportamiento de pavimentos empírico elaborado utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presentan buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.
- Los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empíricos, permiten predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

Variables

Variable Independiente:

Modelos de Deterioro

- Modelo de deterioro estocástico-probabilístico (e-p)
- Modelo de deterioro empírico (e)

Variables dependientes

- Correlación
- Deterioro funcional del pavimento

Tabla 4*Operacionalización de variable Independiente*

Variable	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<=R ² <0.80) malo: (0.0<R ² <0.50) Perfecto: (0.80<=R ² <1.00)	Excel
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 definida por el perfil longitudinal del pavimento flexible	Deformaciones en el perfil topográfico Ondulaciones Hundimientos Ahuellamientos	Rugosidad del Pavimento (IRI) Serviciabilidad Confort Seguridad	Ecuaciones matemáticas

Tabla 5*Operacionalización de variable dependiente*

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Modelos de Comportamiento	Modelo de Comportamiento Estocástico Probabilístico: Modelo matemático desarrollado en función a mediciones realizadas en campo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para pronosticar el deterioro funcional del pavimento	Modelo matemático para predecir la condición futura del IRI (m/km) en el tiempo (años), La condición futura se establece mediante un valor preciso, que se calcula relacionando de diversas maneras un indicador de deterioro con un conjunto de variables explicativas. En esta clase se agrupan los modelos puramente mecanicistas, de regresión y empírico mecanicistas antes descritos	No determinista	Mecanicista Empírico Mecanicista Probabilístico Lógica Fuzzy Markoviano Semi markoviano	Excel Regresión lineal de Método Markoviano Método semi markoviano
	Modelo de deterioro Empírico: Modelo matemático desarrollado en función a mediciones realizadas en campo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) para pronosticar el deterioro funcional del pavimento	Modelo matemático para predecir la condición futura del IRI (m/km) en el tiempo (años), El estado futuro del pavimento se estima como una función de probabilidad para el conjunto de posibles estados que podrían presentarse.	Determinista	Empírico Mecanicista Empírico Mecanicista	Excel Regresión lineal Regresión parabólica Regresión sigmoidal Regresión exponencial

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo, método y diseño de la investigación

Tipo de investigación:

La presente investigación por su orientación es aplicada debido a la comparación de la teoría con la realidad, mediante el desarrollo de modelos de deterioros estocástico probabilístico y empírico los cuales se basan en las mediciones de los años 2016 al 2020. Los valores de predicción de deterioros funcionales obtenidos para el año 2021, se comparan con los valores del IRI medidos en la carretera el año 2021 con la finalidad de determinar su correlación y una vez obtenida la correlación se podrá conocer el deterioro funcional del pavimento flexible de la carretera Puno – Juliaca.

Alcance de la investigación:

El alcance de la investigación es descriptivo y correlacional, es descriptivo puesto que se propone desarrollar modelos estocásticos-probabilísticos y empírico, en base a mediciones realizadas del IRI en el periodo del 2016 al 2020.

Dentro de las características utiliza la estadística sobre la base de datos de las mediciones del IRI ejecutadas por el concesionario del tramo de carretera, durante el periodo 2016 al 2020 en un subtramo de la carretera concesionada. 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 2021 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.

El principal beneficio que brindan los estudios correlacionales es dar a conocer cómo se comporta una variable, al conocer el comportamiento de otras variables que se encuentran emparentadas. Por lo tanto, se intenta pronosticar el valor más aproximado que tendrá un

grupo de individuos o casos en una variable, a partir del valor que poseen en las variables relacionadas. (Hernández *et al.*, 2008, pág. 94).

Diseño de la investigación

La investigación es de diseño experimental, ya que se busca determinar el posible impacto en una variable como consecuencia de modificar otra variable. Como primer requisito se debe de manipular de manera intencional una variable o más variables independientes. La variable independiente se considera como la supuesta causa en una relación entre variables y al efecto que es provocado por dicha causa se le llama variable dependiente ((Hernández *et al.*, 2008, pág. 130).

Se evalúa y analiza la información del IRI obtenidos de las mediciones de campo durante los años 2016 y 2020. 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.

3.2 Población y muestra

Población

El universo para la presente investigación está determinado por la carretera interoceánico que se inicia en el sur Perú país y culmina en Brasil, Tramo de estudio es el numero 5: Puno – Juliaca, que tiene una longitud de 807.06 kilómetros.

Muestra

La justificación del caso de estudio es una muestra no paramétrica debido a la importancia que tiene este tramo de carretera para el desarrollo de las ciudades de Puno y Juliaca, por este motivo la investigación evalúa el subtramo Puno (Km 1360+537) - Juliaca (Km 1311+709) con una longitud de carretera de 36.81 km de la carretera concesionada.

3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

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

Técnicas empleadas:

- Mediciones de campo de IRI
- Revisión base de datos de mediciones de IRI
- Análisis de informes presentados.
- Observación de mediciones en campo.
- Modelos matemáticos

Instrumentos:

- Perfilómetro Laser RSP-MARK IV (Road Surface Profiler)
- Base de datos o sistemas de información
- Registro del contenido del documento
- Registro de observación de campo
- Uso de Excel para modelar ecuaciones sigmoidales, lineales y parabólicas.

Para la confiabilidad del instrumento de medición, se utilizaron equipos que cuentan con sus certificados de calibración, a su vez antes de iniciar con la medición en la vía concesionada, se realiza la calibración In -Situ de acuerdo con las especificaciones técnicas del equipo, este procedimiento cuenta con la presencia del supervisor de Ositran y representante del concesionario.

Los equipos usados para la recolección de datos y la metodología para el procesamiento de resultados se soportan en normas técnicas como la ASTM 950 para la medición del perfil longitudinal mediante perfilómetros inerciales, o manuales de ensayos los cuales validan los resultados.

Se revisó la información técnica del proyecto de ingeniería de detalle, diseño de pavimentos, calidad de materiales utilizados, además de las evaluaciones funcionales (mediciones del IRI) realizados por el concesionario COVISUR en el periodo 2016 al 2021, asimismo, se revisó 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, inventarios de los elementos de la infraestructura vial, monitoreo, intervenciones realizadas en el pavimento y otros datos relevantes.

La observación en campo se realizó en el mes de julio y octubre del 2021, que permitieron verificar las características técnicas de la vía, condiciones medioambientales, registrar mediante vistas fotográficas el estado actual de la vía 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 los datos del IRI de los años 2016 al 2021 realizados por el concesionario o por la institución reguladora, luego se procedió a realizar el análisis documental sobre modelos de deterioro del pavimento y se revisó el contrato de concesión.

Se precisa que la información referida a la base de datos de mediciones del IRI es altamente confiable, puesto que de acuerdo con el contrato de concesión las mediciones de IRI son realizadas por el concesionario una vez al año y son supervisadas por el ente regulador del país OSITRAN.

3.4 Descripción de procedimientos de análisis

La información utilizada en la investigación proviene de las mediciones realizadas a la carretera Puno – Juliaca, Tramo 5, que forma parte del proyecto corredor vial interoceánico Sur, Perú – Brasil, la información recopilada data desde el 2016 hasta el año 2021 realizados por el concesionario los cuales se muestran en la tabla 6, cabe señalar que la empresa del estado OSITRAN, también realiza de manera anual las mediciones de IRI con consultoras especializadas con la cual se hace una comparación de las mediciones obtenidas por el concesionario.

Tabla 6

Mediciones de rugosidad desde el año 2016 al 2020 (IRI)

Consultor	Año de medición
Consorcio Vial del Sur	2016
Consorcio Vial del Sur	2017
Consorcio Vial del Sur	2018
Consorcio Vial del Sur	2019
Consorcio Vial del Sur	2020

El desarrollo de la medición se ha ejecutado cumpliendo el procedimiento descrito en el Contrato de Concesión y es en base a la metodología descrita en dicho documento, para realizar la medición del índice de rugosidad se utilizó el equipo llamado Perfilómetro Láser, con dicho equipo se realizó las mediciones del tramo de carretera de acuerdo con lo establecido en el World Bank Technical Paper N° 46 (1986) y también haciendo uso de la norma ASTM E950.

Las mediciones se efectuaron de manera continua cada 100 m, a lo largo de la vía y en cada huella del carril tanto izquierdo como derecho, luego se procede a calcular el Índice de Rugosidad Internacional IRI, característico para cada segmento de 100 metros. Posteriormente se realiza el cálculo de la media deslizante para intervalos de un kilómetro. La medición de rugosidad en cada año se efectuó de manera continua con un perfilómetro laser a una velocidad que varía desde los 20km/h a 60 km/h.

La medición de IRI se realizó de forma continua en el carril ascendente y carril descendente, obteniéndose la medida tanto para la huella 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 Contrato de Concesión; donde se indica que, para realizar la evaluación de la medición del nivel de servicio, se utilizara la denominada rugosidad media deslizante máxima con intervalos de 01 km, la rugosidad se medirá en intervalos que no superen los 100 metros y para cada intervalo se debe de calcular el valor medio de las rugosidades de los intervalos dentro de un 1km el cual es el valor resultante. Dicho resultado se le nombrara rugosidad media deslizante.

Este procedimiento se repite para cada intervalo que conforman la vía en estudio y de esta manera se obtiene la rugosidad media deslizante para todo el tramo.

Para la concesión del sector 14 tramo Puno Juliaca, el contrato de concesión exige que el parámetro de Rugosidad no sobre pase los valores indicados en la tabla 7.

Tabla 7

Nivel de servicio de rugosidad (IRI)

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

En la tabla 8 se presenta los datos procesados y ordenados en sentido ascendente y promediados por cada kilómetro entre las progresivas donde se inicia en el km 1319 que se encuentra en la ciudad de Juliaca y culmina en el km 1356 en la ciudad de Puno, haciendo un total de 37 km evaluados durante los años del 2016 al 2021.

Tabla 8

Valores promedio del IRI por kilómetro desde el año 2016 al 2021

Km Inicial	Km Final	Valor de IRI medido m/km					
		2016	2017	2018	2019	2020	2021
1319+200	1319+300	4.29	3.43	3.81	4.66	6.96	5.85
1319+300	1319+400	1.50	2.18	2.28	2.37	1.95	7.15
1319+400	1319+500	5.34	2.35	2.35	2.00	2.41	2.72
1319+500	1319+600	6.84	2.11	2.03	1.84	2.38	4.54
1319+600	1319+700	1.55	1.56	1.54	1.73	2.08	5.67
1319+700	1319+800	1.68	1.52	1.73	1.72	1.61	1.96
1319+800	1319+900	1.52	1.57	1.68	1.55	1.72	1.79
1319+900	1320+000	1.43	1.53	1.65	1.70	1.59	1.86
1320+000	1320+100	2.05	1.85	2.39	2.12	2.07	2.08
1320+100	1320+200	1.58	1.97	2.02	1.92	1.44	1.83
1320+200	1320+300	2.66	2.29	2.39	2.25	2.33	2.30
1320+300	1320+400	1.63	1.46	1.46	1.40	1.33	1.89
1320+400	1320+500	1.77	1.61	1.95	1.78	1.87	2.02
1320+500	1320+600	1.68	1.70	1.51	1.48	1.68	1.79
1320+600	1320+700	1.61	1.13	1.40	1.30	1.50	1.65
1320+700	1320+800	1.63	1.79	1.84	1.74	1.90	1.99
1320+800	1320+900	1.75	1.46	1.56	1.50	1.55	1.68
1320+900	1321+000	1.56	1.53	1.94	1.76	1.56	1.73
1321+000	1321+100	1.81	1.77	1.74	1.69	1.58	1.73
1321+100	1321+200	1.79	1.73	1.79	1.69	1.86	1.92
1321+200	1321+300	1.87	1.64	1.71	1.59	2.27	1.84
1321+300	1321+400	1.62	1.40	1.77	1.79	1.68	1.82
1321+400	1321+500	1.51	1.77	1.82	1.82	1.90	1.72
1321+500	1321+600	1.99	1.84	2.03	2.03	1.91	2.42
1321+600	1321+700	1.91	1.75	1.90	2.17	2.47	2.56
1321+700	1321+800	2.02	2.14	2.29	2.28	2.26	2.65
1321+800	1321+900	1.64	1.51	1.53	1.59	1.59	1.95
1321+900	1322+000	1.94	1.90	2.34	2.11	2.57	2.23
1322+000	1322+100	1.88	1.79	1.95	1.79	1.87	2.01
1322+100	1322+200	2.35	2.15	2.36	2.25	2.11	2.60
1322+200	1322+300	2.15	1.98	2.03	1.98	2.00	2.23
1322+300	1322+400	1.86	1.60	2.15	1.99	1.98	2.00
1322+400	1322+500	2.05	2.31	2.34	1.97	2.69	2.49
1322+500	1322+600	2.62	1.79	2.09	2.23	2.83	2.32
1322+600	1322+700	1.64	1.73	1.96	2.04	2.01	2.55

1322+700	1322+800	1.73	1.63	1.86	2.00	2.22	2.32
1322+800	1322+900	1.59	1.86	2.04	1.95	2.04	2.50
1322+900	1323+000	1.95	1.59	1.92	2.02	1.98	1.85
1323+000	1323+100	1.90	2.13	2.18	2.15	2.29	2.58
1323+100	1323+200	2.09	1.88	1.95	1.85	2.49	2.61
1323+200	1323+300	1.55	1.74	1.99	1.95	2.31	2.41
1323+300	1323+400	1.95	2.86	2.79	2.22	2.32	2.48
1323+400	1323+500	2.44	3.09	2.63	2.54	2.43	3.00
1323+500	1323+600	7.96	2.71	2.79	2.49	2.48	4.60
1323+600	1323+700	2.20	2.31	2.20	2.47	2.14	2.52
1323+700	1323+800	7.71	2.82	2.28	2.21	2.07	3.63
1323+800	1323+900	2.15	1.73	2.02	2.14	2.21	5.67
1323+900	1324+000	1.67	2.00	2.29	2.29	2.20	2.46
1324+000	1324+100	2.03	3.09	2.86	2.88	2.66	2.86
1324+100	1324+200	5.69	3.34	2.60	2.48	2.31	3.29
1324+200	1324+300	3.68	2.93	2.85	2.98	2.68	4.70
1324+300	1324+400	2.29	1.76	1.71	1.80	1.70	2.62
1324+400	1324+500	1.63	1.43	1.66	1.69	1.52	1.96
1324+500	1324+600	1.68	1.87	2.08	2.01	1.85	2.22
1324+600	1324+700	1.69	1.42	1.84	1.74	1.79	1.96
1324+700	1324+800	1.67	1.75	1.64	1.63	1.91	1.90
1324+800	1324+900	1.67	1.82	1.95	2.53	1.73	1.86
1324+900	1325+000	2.16	1.99	2.10	1.70	2.10	2.24
1325+000	1325+100	1.90	1.58	1.79	1.61	1.72	1.98
1325+100	1325+200	1.86	1.59	1.76	1.68	2.02	2.03
1325+200	1325+300	1.67	1.48	1.75	1.78	1.86	1.84
1325+300	1325+400	1.54	1.63	1.73	1.61	1.95	1.80
1325+400	1325+500	1.84	1.64	1.65	1.57	1.92	1.88
1325+500	1325+600	1.67	1.74	1.82	1.86	1.73	1.91
1325+600	1325+700	1.79	1.74	1.84	1.61	1.71	1.70
1325+700	1325+800	1.81	1.44	1.52	1.58	1.54	1.90
1325+800	1325+900	1.57	1.78	1.89	1.44	2.14	1.85
1325+900	1326+000	1.80	1.41	1.45	1.46	1.57	1.86
1326+000	1326+100	1.60	1.51	1.65	1.63	1.69	1.57
1326+100	1326+200	1.62	1.67	1.80	1.85	2.04	1.86
1326+200	1326+300	1.72	1.94	1.93	1.89	2.30	1.79
1326+300	1326+400	2.11	1.77	2.25	2.15	2.33	2.16
1326+400	1326+500	1.99	2.06	2.18	2.00	2.19	2.10
1326+500	1326+600	1.92	1.98	2.11	1.88	1.86	1.95
1326+600	1326+700	2.06	2.03	1.77	1.60	2.02	2.21
1326+700	1326+800	1.88	1.66	1.68	1.76	1.61	1.82
1326+800	1326+900	1.47	2.01	1.72	1.51	1.65	1.47
1326+900	1327+000	2.10	1.76	1.93	2.06	1.86	2.07
1327+000	1327+100	1.61	1.61	1.61	1.65	1.55	1.61
1327+100	1327+200	1.65	1.77	1.92	2.46	1.64	1.90
1327+200	1327+300	1.68	1.70	1.80	1.80	2.47	1.78
1327+300	1327+400	2.04	1.99	2.10	2.52	1.99	2.34
1327+400	1327+500	1.82	1.86	1.78	1.89	1.68	1.93

1327+500	1327+600	2.19	1.78	2.07	2.19	2.22	2.52
1327+600	1327+700	1.69	1.71	1.69	2.10	2.42	4.77
1327+700	1327+800	1.96	1.91	2.07	2.10	2.16	2.39
1327+800	1327+900	1.88	1.73	1.78	1.73	2.38	1.90
1327+900	1328+000	1.91	1.79	1.73	1.81	1.80	1.97
1328+000	1328+100	1.69	1.72	1.80	1.75	1.72	1.75
1328+100	1328+200	1.75	1.81	1.78	1.77	1.98	1.73
1328+200	1328+300	1.83	1.83	1.90	1.69	1.82	1.91
1328+300	1328+400	2.13	2.29	2.33	2.21	2.08	2.09
1328+400	1328+500	2.21	2.03	2.16	2.02	2.51	2.01
1328+500	1328+600	2.27	1.89	2.13	1.92	1.73	2.48
1328+600	1328+700	1.90	1.63	1.80	1.74	1.76	1.96
1328+700	1328+800	2.06	2.06	2.14	2.15	1.99	2.00
1328+800	1328+900	2.04	1.96	2.22	1.84	2.07	2.28
1328+900	1329+000	2.46	2.09	2.02	2.13	2.01	2.19
1329+000	1329+100	1.73	2.03	2.09	2.09	1.70	1.92
1329+100	1329+200	2.00	1.86	1.96	1.80	1.65	1.95
1329+200	1329+300	2.19	1.87	2.21	2.04	1.81	2.26
1329+300	1329+400	2.16	1.74	1.86	1.89	1.71	2.34
1329+400	1329+500	1.77	1.66	1.73	1.80	1.59	2.00
1329+500	1329+600	1.61	1.74	1.69	1.95	1.67	1.94
1329+600	1329+700	1.57	1.97	2.02	2.00	1.54	1.60
1329+700	1329+800	2.06	2.05	2.37	2.15	2.08	2.13
1329+800	1329+900	2.20	1.85	2.18	1.93	1.57	2.32
1329+900	1330+000	1.71	1.43	1.61	1.46	1.61	2.03
1330+000	1330+100	1.50	1.44	1.41	1.51	1.39	1.83
1330+100	1330+200	1.27	1.52	1.70	1.52	1.49	1.55
1330+200	1330+300	1.83	1.91	1.90	1.87	1.63	1.90
1330+300	1330+400	2.11	2.26	2.34	2.21	2.24	2.79
1330+400	1330+500	1.75	1.80	2.03	1.70	1.69	1.83
1330+500	1330+600	1.43	1.43	1.55	1.67	1.53	1.99
1330+600	1330+700	1.65	1.64	1.66	1.58	1.54	1.84
1330+700	1330+800	1.37	1.08	1.42	1.25	1.42	1.76
1330+800	1330+900	1.66	1.43	1.39	1.25	2.09	1.83
1330+900	1331+000	1.19	1.14	1.13	1.15	1.54	1.36
1331+000	1331+100	1.16	1.21	1.42	1.37	1.55	1.30
1331+100	1331+200	1.09	1.18	1.21	1.24	1.88	1.23
1331+200	1331+300	1.43	1.45	1.43	1.40	1.89	1.51
1331+300	1331+400	1.24	1.09	1.33	1.15	1.56	1.39
1331+400	1331+500	1.13	1.15	1.12	1.12	1.87	1.28
1331+500	1331+600	1.57	1.36	1.55	1.45	2.40	1.82
1331+600	1331+700	1.41	1.40	1.72	1.76	1.76	1.45
1331+700	1331+800	1.60	1.65	1.87	1.48	1.55	1.47
1331+800	1331+900	1.86	1.53	1.55	1.61	1.52	1.87
1331+900	1332+000	1.68	1.71	2.00	1.95	1.56	1.63
1332+000	1332+100	1.65	1.76	1.85	1.66	2.39	1.69
1332+100	1332+200	2.08	1.99	2.01	2.04	1.76	2.14
1332+200	1332+300	1.42	1.42	1.54	1.45	1.25	1.44

1332+300	1332+400	1.52	1.61	1.46	1.41	1.49	1.54
1332+400	1332+500	1.37	1.20	1.55	1.57	1.30	1.51
1332+500	1332+600	1.22	1.31	1.52	1.28	1.15	1.40
1332+600	1332+700	1.50	1.43	1.44	1.51	1.28	1.64
1332+700	1332+800	1.47	1.48	1.68	1.42	1.46	1.59
1332+800	1332+900	1.58	1.54	1.49	1.82	1.69	1.68
1332+900	1333+000	1.35	1.23	1.34	1.31	1.77	1.31
1333+000	1333+100	1.25	1.28	1.42	2.05	1.72	1.86
1333+100	1333+200	1.31	1.33	1.32	1.42	1.73	1.50
1333+200	1333+300	1.44	1.47	1.72	2.15	2.20	2.08
1333+300	1333+400	1.44	1.58	1.35	1.91	2.01	1.74
1333+400	1333+500	1.64	1.34	1.71	2.06	2.23	1.98
1333+500	1333+600	1.26	1.40	1.40	1.88	2.50	4.94
1333+600	1333+700	1.79	1.35	1.68	1.59	1.92	2.18
1333+700	1333+800	1.22	1.15	1.14	1.22	1.75	1.43
1333+800	1333+900	1.05	1.10	1.13	1.10	1.53	1.11
1333+900	1334+000	1.24	1.07	1.58	1.88	1.62	1.39
1334+000	1334+100	1.05	1.51	1.49	1.51	1.59	1.33
1334+100	1334+200	1.55	1.41	1.53	1.65	1.51	1.87
1334+200	1334+300	1.43	1.42	1.70	1.78	1.15	1.62
1334+300	1334+400	1.93	2.03	2.09	1.93	1.35	2.11
1334+400	1334+500	2.22	2.12	2.25	2.43	1.75	2.63
1334+500	1334+600	2.26	2.21	2.39	2.06	1.92	2.33
1334+600	1334+700	2.10	1.79	1.97	1.81	2.32	2.18
1334+700	1334+800	1.84	1.90	1.82	1.81	1.31	1.92
1334+800	1334+900	2.02	1.75	1.91	4.11	1.37	1.98
1334+900	1335+000	5.16	2.11	1.99	2.15	1.79	2.31
1335+000	1335+100	2.02	2.09	1.86	1.93	1.65	4.64
1335+100	1335+200	2.02	1.75	1.84	1.92	1.65	2.06
1335+200	1335+300	1.76	1.64	1.71	1.70	1.66	1.93
1335+300	1335+400	1.55	1.52	1.49	1.56	1.47	1.92
1335+400	1335+500	1.52	1.62	1.65	1.77	1.69	1.84
1335+500	1335+600	1.54	1.55	1.66	1.80	1.49	1.76
1335+600	1335+700	1.70	1.76	1.74	1.81	1.40	2.10
1335+700	1335+800	1.74	1.61	1.61	2.18	1.33	2.07
1335+800	1335+900	1.52	1.53	1.77	1.93	1.94	1.84
1335+900	1336+000	1.73	1.70	1.77	2.08	2.23	5.95
1336+000	1336+100	1.81	1.69	1.71	1.73	1.54	2.19
1336+100	1336+200	1.60	1.64	1.64	1.63	1.75	2.02
1336+200	1336+300	1.49	1.48	1.41	1.67	1.82	1.75
1336+300	1336+400	1.40	1.48	1.53	1.77	1.87	1.70
1336+400	1336+500	1.48	1.64	1.50	1.86	1.47	1.65
1336+500	1336+600	1.62	1.54	1.65	1.75	1.42	4.37
1336+600	1336+700	1.63	1.69	1.61	2.05	2.28	3.29
1336+700	1336+800	1.56	1.59	1.68	1.87	2.35	2.03
1336+800	1336+900	1.55	1.84	1.93	1.65	2.29	1.91
1336+900	1337+000	2.23	1.98	1.88	1.68	2.07	2.53
1337+000	1337+100	1.53	1.53	1.98	1.78	2.22	1.83

1337+100	1337+200	1.35	1.28	1.52	1.66	1.73	1.77
1337+200	1337+300	2.02	1.81	2.32	2.16	1.65	1.85
1337+300	1337+400	2.19	2.13	1.75	1.53	1.43	2.37
1337+400	1337+500	2.56	2.28	2.35	2.15	2.20	3.02
1337+500	1337+600	1.50	1.60	2.01	2.12	1.85	1.81
1337+600	1337+700	1.59	1.46	1.81	1.44	1.47	1.54
1337+700	1337+800	1.63	1.49	1.32	1.38	1.64	1.75
1337+800	1337+900	1.60	1.60	1.59	1.61	2.28	1.58
1337+900	1338+000	1.85	1.79	1.86	1.99	1.97	2.03
1338+000	1338+100	1.75	1.99	2.10	1.99	1.87	3.69
1338+100	1338+200	2.15	2.17	2.16	2.28	1.84	3.98
1338+200	1338+300	2.15	2.10	3.04	2.67	2.09	2.48
1338+300	1338+400	3.15	2.48	2.47	2.50	1.94	2.27
1338+400	1338+500	1.59	3.12	2.76	2.13	2.11	3.87
1338+500	1338+600	1.65	2.32	2.10	1.77	2.22	4.26
1338+600	1338+700	1.03	1.41	1.30	2.02	3.43	2.35
1338+700	1338+800	1.14	1.21	1.36	1.04	1.49	1.52
1338+800	1338+900	1.44	1.16	1.27	1.77	1.33	1.39
1338+900	1339+000	1.53	1.49	1.53	1.76	1.93	2.30
1339+000	1339+100	1.42	1.42	1.54	1.99	1.83	2.01
1339+100	1339+200	1.53	1.60	1.83	2.61	2.24	2.33
1339+200	1339+300	1.74	1.60	1.56	1.74	2.08	1.90
1339+300	1339+400	1.56	1.39	1.46	1.77	2.39	2.34
1339+400	1339+500	1.03	1.32	1.54	1.87	1.89	5.64
1339+500	1339+600	1.09	1.12	1.25	1.19	1.56	1.28
1339+600	1339+700	1.31	1.43	1.46	1.48	1.88	1.58
1339+700	1339+800	1.48	1.57	1.75	1.65	1.77	1.70
1339+800	1339+900	1.34	1.19	1.40	1.19	1.38	1.63
1339+900	1340+000	1.38	1.19	1.21	1.12	1.59	1.34
1340+000	1340+100	1.04	1.05	1.16	1.19	1.52	1.50
1340+100	1340+200	1.09	1.18	1.17	1.17	1.96	1.27
1340+200	1340+300	1.14	1.12	1.15	1.08	2.07	1.12
1340+300	1340+400	1.22	0.99	1.06	0.94	1.70	1.26
1340+400	1340+500	1.05	1.09	1.07	1.70	1.70	1.24
1340+500	1340+600	0.97	1.03	1.01	1.81	1.61	1.06
1340+600	1340+700	1.05	1.06	1.10	1.56	2.45	4.29
1340+700	1340+800	1.16	1.12	1.23	1.78	2.05	2.29
1340+800	1340+900	1.23	1.00	1.07	1.05	1.75	1.08
1340+900	1341+000	1.15	1.31	1.67	1.52	1.80	1.28
1341+000	1341+100	1.78	1.67	1.70	1.57	1.76	1.34
1341+100	1341+200	1.90	1.89	1.85	1.91	1.98	2.06
1341+200	1341+300	1.81	1.75	1.86	1.78	1.67	1.93
1341+300	1341+400	1.80	1.81	1.83	1.87	1.45	1.76
1341+400	1341+500	2.08	1.91	1.98	1.97	1.66	2.04
1341+500	1341+600	1.96	1.88	2.00	1.91	1.53	2.16
1341+600	1341+700	1.89	1.94	2.05	1.91	1.76	2.04
1341+700	1341+800	2.03	1.77	1.90	1.83	2.03	2.04
1341+800	1341+900	1.94	1.70	1.95	1.65	2.95	2.78

1341+900	1342+000	2.67	2.03	2.13	2.12	2.06	5.33
1342+000	1342+100	2.17	1.98	2.15	2.03	2.17	2.37
1342+100	1342+200	1.64	1.49	1.81	1.75	1.54	1.79
1342+200	1342+300	1.71	1.76	1.74	1.72	1.93	1.76
1342+300	1342+400	2.02	1.88	1.84	1.77	1.58	2.10
1342+400	1342+500	1.65	1.31	1.43	1.35	1.58	1.78
1342+500	1342+600	1.23	1.21	1.34	1.28	1.50	1.41
1342+600	1342+700	1.25	1.27	1.48	1.32	1.71	1.41
1342+700	1342+800	1.30	1.43	1.61	1.55	1.83	1.94
1342+800	1342+900	1.33	1.31	1.52	1.87	1.86	2.40
1342+900	1343+000	1.29	1.34	1.52	1.68	1.81	1.77
1343+000	1343+100	1.26	1.19	1.28	1.40	1.46	1.53
1343+100	1343+200	1.03	1.19	1.24	1.59	1.46	1.45
1343+200	1343+300	1.40	1.30	1.57	1.53	1.66	1.68
1343+300	1343+400	1.26	1.53	1.43	1.54	1.48	1.98
1343+400	1343+500	1.33	1.26	1.28	1.46	1.60	1.73
1343+500	1343+600	1.06	1.80	2.03	1.56	1.48	1.58
1343+600	1343+700	1.50	2.03	1.99	1.97	1.54	1.89
1343+700	1343+800	5.57	2.40	2.29	2.09	2.00	5.40
1343+800	1343+900	2.94	2.71	2.80	2.46	2.76	3.26
1343+900	1344+000	2.52	2.98	3.17	1.88	2.55	3.37
1344+000	1344+100	3.04	2.49	2.58	2.21	1.81	3.35
1344+100	1344+200	5.49	2.39	2.27	2.40	1.94	6.02
1344+200	1344+300	1.99	2.26	2.26	2.00	1.46	2.36
1344+300	1344+400	5.08	2.15	1.58	1.59	1.98	2.65
1344+400	1344+500	5.56	1.84	1.97	1.80	1.95	5.89
1344+500	1344+600	1.58	1.39	1.50	1.58	1.78	1.98
1344+600	1344+700	1.41	1.66	1.60	1.64	1.80	1.81
1344+700	1344+800	1.65	1.70	1.52	1.49	1.81	1.76
1344+800	1344+900	1.72	1.50	1.61	1.60	1.89	2.05
1344+900	1345+000	1.59	1.49	1.65	1.69	1.99	1.77
1345+000	1345+100	1.64	1.84	2.06	1.90	2.41	2.09
1345+100	1345+200	1.87	1.80	2.11	2.35	1.95	2.34
1345+200	1345+300	1.47	1.57	1.91	2.23	1.88	2.69
1345+300	1345+400	1.66	1.56	1.67	2.27	1.90	2.46
1345+400	1345+500	1.66	1.56	1.75	1.44	2.23	1.97
1345+500	1345+600	1.54	1.34	1.41	1.68	1.93	1.84
1345+600	1345+700	1.37	1.46	1.49	1.43	1.45	1.69
1345+700	1345+800	1.47	1.38	1.25	1.33	1.34	1.53
1345+800	1345+900	1.29	1.07	1.32	1.32	1.46	1.63
1345+900	1346+000	2.08	1.21	1.33	1.38	1.83	1.60
1346+000	1346+100	1.22	1.20	1.25	1.31	1.92	1.33
1346+100	1346+200	1.36	1.17	1.31	1.31	1.96	1.46
1346+200	1346+300	1.32	1.43	1.45	1.47	1.31	1.55
1346+300	1346+400	1.42	1.46	1.48	1.50	1.53	1.36
1346+400	1346+500	1.39	1.34	1.38	1.30	1.45	1.40
1346+500	1346+600	1.63	1.44	1.62	1.59	1.93	2.00
1346+600	1346+700	1.63	1.68	1.98	1.81	1.81	1.76

1346+700	1346+800	1.58	1.70	1.81	1.77	2.12	1.64
1346+800	1346+900	1.75	1.55	1.69	1.62	1.96	2.02
1346+900	1347+000	2.03	1.82	1.93	1.87	2.52	2.78
1347+000	1347+100	1.61	2.10	2.37	2.62	2.38	3.02
1347+100	1347+200	1.62	1.70	1.93	1.76	2.23	2.40
1347+200	1347+300	1.18	1.47	1.86	2.36	1.20	2.81
1347+300	1347+400	1.28	1.24	1.24	1.51	1.73	2.04
1347+400	1347+500	1.34	1.36	1.55	1.54	1.81	2.24
1347+500	1347+600	1.25	1.31	1.55	2.02	2.34	3.11
1347+600	1347+700	1.17	1.36	1.54	2.00	2.40	2.62
1347+700	1347+800	1.32	1.27	1.60	1.48	2.29	2.59
1347+800	1347+900	1.32	1.39	1.89	1.86	2.34	2.21
1347+900	1348+000	1.62	1.72	2.27	2.43	2.73	2.51
1348+000	1348+100	1.76	1.55	1.58	1.84	1.97	2.96
1348+100	1348+200	2.23	2.11	2.10	2.33	2.30	3.46
1348+200	1348+300	1.36	1.80	1.86	1.61	1.68	1.87
1348+300	1348+400	1.35	1.45	1.33	1.42	1.62	2.04
1348+400	1348+500	1.27	1.24	1.39	1.95	1.58	1.83
1348+500	1348+600	1.61	1.58	1.57	1.77	1.72	2.22
1348+600	1348+700	1.67	1.42	1.42	2.00	2.23	2.09
1348+700	1348+800	1.62	2.07	2.32	2.22	1.79	2.47
1348+800	1348+900	1.96	1.64	1.80	1.89	1.87	2.00
1348+900	1349+000	1.91	2.14	2.20	2.13	1.98	2.65
1349+000	1349+100	1.88	1.71	2.04	2.16	1.99	3.01
1349+100	1349+200	1.77	1.79	1.55	1.62	1.53	2.21
1349+200	1349+300	1.61	1.42	1.63	1.69	1.55	2.14
1349+300	1349+400	1.69	1.74	1.79	1.71	1.73	1.87
1349+400	1349+500	1.65	1.47	1.88	1.75	1.81	2.04
1349+500	1349+600	1.83	1.83	1.79	1.77	2.04	2.34
1349+600	1349+700	1.96	1.66	1.69	1.77	2.01	2.23
1349+700	1349+800	1.32	1.60	1.70	1.90	1.83	1.84
1349+800	1349+900	1.58	1.63	1.84	1.92	2.04	1.67
1349+900	1350+000	1.87	1.73	2.10	2.22	2.18	2.66
1350+000	1350+100	1.89	1.90	2.05	2.12	1.84	2.49
1350+100	1350+200	1.84	1.84	1.93	1.86	1.64	2.12
1350+200	1350+300	1.86	2.03	2.10	2.08	1.80	2.22
1350+300	1350+400	1.79	1.73	1.90	1.79	2.78	2.02
1350+400	1350+500	1.89	1.94	1.81	1.82	1.85	2.12
1350+500	1350+600	1.74	1.62	1.83	2.01	1.98	2.01
1350+600	1350+700	1.66	1.52	1.69	1.71	1.99	1.96
1350+700	1350+800	1.51	1.52	1.63	1.52	1.65	2.08
1350+800	1350+900	1.55	1.45	1.76	1.63	1.79	2.26
1350+900	1351+000	1.76	2.18	2.09	2.16	2.02	1.95
1351+000	1351+100	2.01	1.88	2.05	1.90	2.57	1.99
1351+100	1351+200	1.65	1.59	1.70	1.70	1.60	2.18
1351+200	1351+300	1.66	1.68	1.73	1.92	1.84	1.72
1351+300	1351+400	1.67	1.75	1.99	1.72	1.91	2.29
1351+400	1351+500	1.73	1.43	1.62	1.52	1.88	2.75

1351+500	1351+600	1.49	1.57	1.59	1.59	1.70	1.66
1351+600	1351+700	1.47	1.49	1.71	1.80	2.01	1.55
1351+700	1351+800	1.80	1.91	1.81	1.88	2.33	2.30
1351+800	1351+900	1.92	2.01	2.25	2.19	3.17	2.48
1351+900	1352+000	2.19	2.21	2.44	2.87	2.30	2.56
1352+000	1352+100	2.34	2.14	2.18	2.16	1.88	2.16
1352+100	1352+200	1.87	1.95	2.07	2.01	2.25	2.26
1352+200	1352+300	1.78	1.89	1.97	1.98	1.97	2.44
1352+300	1352+400	2.02	2.17	2.15	2.14	2.08	2.20
1352+400	1352+500	2.28	3.09	3.07	3.20	3.50	3.41
1352+500	1352+600	2.69	2.10	2.32	2.14	1.93	2.73
1352+600	1352+700	1.88	2.49	2.08	2.50	2.15	2.28
1352+700	1352+800	2.50	2.05	2.49	2.22	2.28	1.98
1352+800	1352+900	2.32	2.56	2.63	2.52	2.37	3.17
1352+900	1353+000	2.11	1.83	2.12	1.64	1.94	2.60
1353+000	1353+100	1.47	1.49	1.46	1.57	1.93	2.09
1353+100	1353+200	1.78	2.27	2.16	2.34	2.30	2.35
1353+200	1353+300	2.45	2.23	2.40	2.23	1.82	2.06
1353+300	1353+400	1.83	1.90	2.06	1.92	2.06	2.62
1353+400	1353+500	1.56	1.54	1.69	1.80	2.02	2.50
1353+500	1353+600	1.81	1.99	2.32	2.41	2.05	2.19
1353+600	1353+700	1.44	1.65	1.64	1.70	2.22	2.23
1353+700	1353+800	1.86	2.00	2.04	2.29	2.28	2.84
1353+800	1353+900	1.65	1.75	2.08	1.63	1.86	2.03
1353+900	1354+000	1.88	2.21	2.42	2.32	1.75	2.15
1354+000	1354+100	2.05	1.74	1.99	1.73	1.79	1.82
1354+100	1354+200	1.57	1.58	1.68	1.61	1.78	2.29
1354+200	1354+300	1.30	1.37	1.42	1.35	1.51	1.67
1354+300	1354+400	1.24	1.31	1.23	1.40	1.43	1.55
1354+400	1354+500	1.56	1.39	1.49	1.43	1.53	1.45
1354+500	1354+600	1.46	1.62	1.90	1.67	1.50	1.82
1354+600	1354+700	1.36	1.90	2.05	2.05	2.38	2.28
1354+700	1354+800	1.79	1.70	1.52	1.82	1.62	1.92
1354+800	1354+900	1.83	1.97	1.90	2.33	2.41	2.49
1354+900	1355+000	1.88	1.69	1.58	1.66	1.73	1.85
1355+000	1355+100	1.45	1.50	1.55	1.52	2.19	1.70
1355+100	1355+200	1.69	1.62	1.64	1.63	1.63	1.94
1355+200	1355+300	1.51	1.69	1.74	1.72	2.00	1.83
1355+300	1355+400	1.41	1.69	1.56	1.76	1.65	1.78
1355+400	1355+500	1.45	1.42	1.43	1.39	1.65	1.50
1355+500	1355+600	1.76	1.96	1.89	2.16	1.81	1.82
1355+600	1355+700	1.93	1.74	1.95	1.86	1.85	1.76
1355+700	1355+800	1.86	2.11	2.06	2.26	2.14	2.59
1355+800	1355+900	1.85	1.72	2.08	1.82	2.36	2.08
1355+900	1356+000	2.48	2.08	3.11	3.09	2.30	2.32

De la tabla 8 se aprecia que los valores promedios de ambos sentidos muestran que los valores de la rugosidad presentan buen nivel de serviciabilidad y una tendencia creciente con el paso de los años. Para el análisis 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 que fue aplicada para realizar la división del tramo de carretera es la que se encuentra descrita en el apéndice J de la Guía de Diseño de AASHTO 93, denominado método de las diferencias acumuladas.

Figura 19

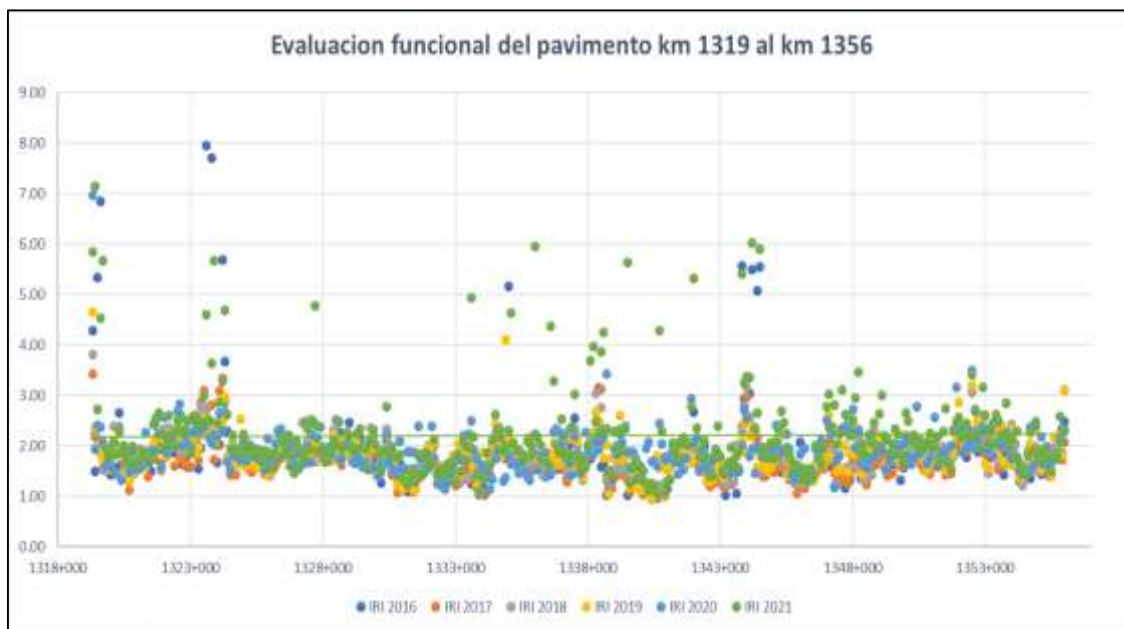
Diferencias acumuladas para cálculo de sectores homogéneos

Distancia	Valor Parámetro (P _i)	Número de intervalo (n)	Intervalo de distancia (D _{x_i})	Distancia acumulada (ΣD _{x_i})	Promedio de Parámetro en el intervalo (Π _i)	Area del intervalo (A _i)	Area acumulada (ΣA _i)	Zx= (ΣA _i) - F*(ΣD _{x_i})
10	P ₁	1	D _{x₁}	D _{x₁}	Π ₁ =P ₁	A ₁ =Π ₁ D _{x₁}	A ₁	A ₁ - F* D _{x₁}
20	P ₂	2	D _{x₂}	D _{x₁} +D _{x₂}	Π ₂ =(P ₁ +P ₂)/2	A ₂ =Π ₂ D _{x₂}	A ₁ +A ₂	$\frac{(A_1+A_2) - F*(D_{x_1}+D_{x_2})}{2}$
30	P ₃	3	D _{x₃}	D _{x₁} +D _{x₂} +D _{x₃}	Π ₃ =(P ₂ +P ₃)/2	A ₃ =Π ₃ D _{x₃}	A ₁ +A ₂ +A ₃	$\frac{(A_1+A_2+A_3) - F*(D_{x_1}+D_{x_2}+D_{x_3})}{3}$
.....								
Lp	P _n	N _t	D _{x_{nt}}	D _{x₁} +...+D _{x_n}	Π _{nt} =(P _{n-1} +P _n)/2	A _{nt} =Π _{nt} D _{x_{nt}}	A ₁ +...+A _{nt}	$\frac{(A_1+...+A_{nt}) - F*(D_{x_1}+...+D_{x_n})}{N_t}$
							At= A ₁ +...+A _{nt}	
							F=At / Lp	
							F=At / Lp	

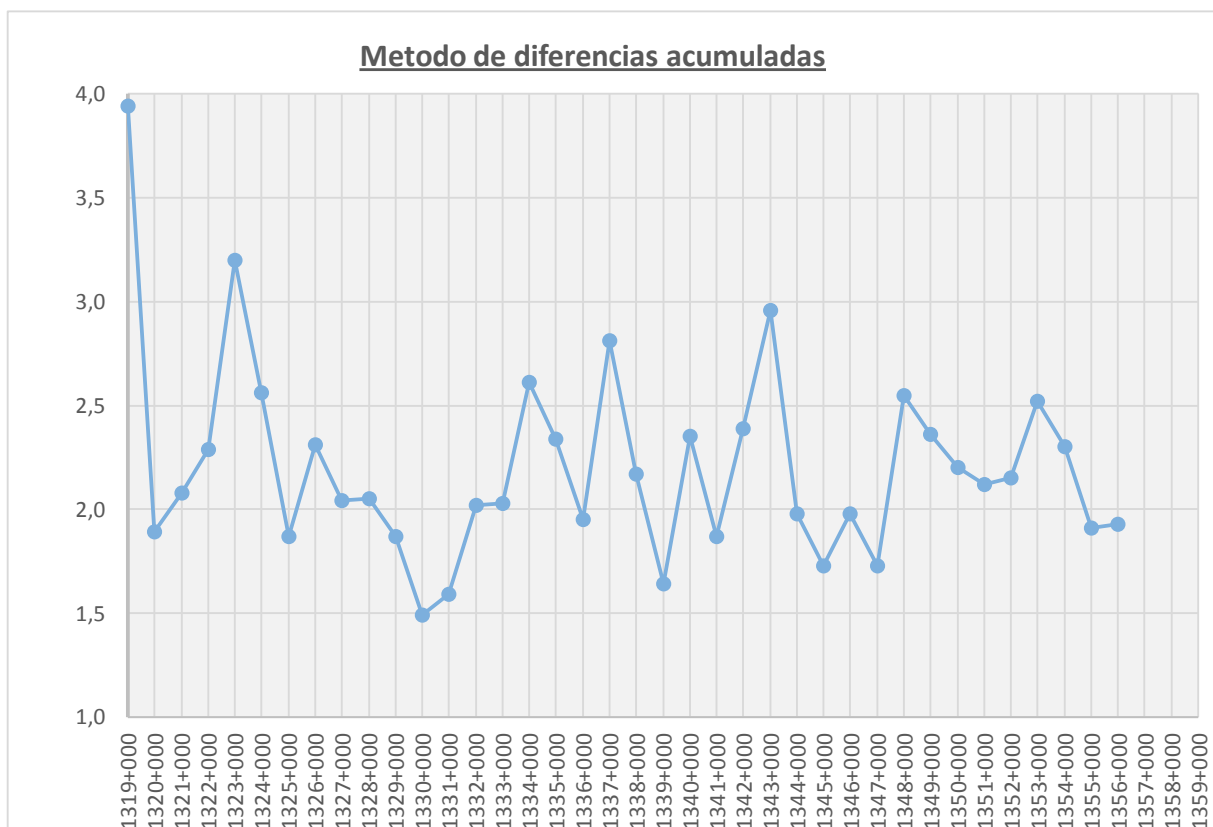
Nota: Apéndice J de la Guía AASTHO-93

Figura 20

Medición de IRI Km 1319+000 al Km 1356+000

**Figura 21**

Diferencias acumuladas Km 1319+000 al Km 1356+000



De acuerdo con la metodología de sectores homogéneos obtenidos en función al IRI medio, se encontraron 5 sectores los cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 9

Sectores homogéneos determinados en función de las mediciones de IRI

Sector N°	Km inicial	Km final	Distancia (Km)
1	1319+000	1322+000	4.00
2	1323+000	1333+000	10.00
3	1334+000	1342+000	8.00
4	1343+000	1347+000	4.00
5	1348+000	1356+000	9.00

3.4.1 Procesamiento de datos modelo estocástico probabilístico

El modelo estocástico probabilístico, tiene un concepto matemático que sirve para determinar una sucesión de variables aleatorias que evolucionan en función de otras variables, en este caso de estudio viene a ser el tiempo, puesto que cada una de las variables aleatorias del proceso tienen su propia función de distribución de probabilidad que pueden estar correlacionadas o no. El modelo estocástico se basa en la hipótesis de Markov con las siguientes propiedades,

- Es discreto en el tiempo, debido que el pavimento sufre deterioro continuo al pasar el tiempo y las mediciones del estado del pavimento se realizan en puntos específicos de tiempo, que son generalmente anuales.
- El método estocástico probabilístico debe tener un número contable de posibles resultados, por este motivo, 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 modelo estocástico debe cumplir con la Propiedad de Markov, lo cual significa que la condición futura de un pavimento depende de condición actual y no de la condición pasada.

Lethanh y Bryan (2012), indican que los modelos de Márkov 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.
- Una de las ventajas más importantes del modelo es que puede ser usado cuando no se cuenta con datos históricos, ya que el deterioro futuro del pavimento se puede predecir solamente con la probabilidad del estado de condición presente de la carretera.

Para el uso de la cadena de Márkov, existen dos relaciones, la primera es el vector de estado, que representa el estado actual del tramo de vía, y se define de la siguiente manera:

$$at = (at,1, at,2, \dots, at, n)$$

En la ecuación anterior, at representa la función del segmento de carretera que se encuentra en el estado inicial i durante el tiempo de servicio t .

La segunda relación es hallar la matriz de probabilidad de transición (MPT), donde se agrupa todas las probabilidades de que el estado de la carretera para del estado inicial i al estado j entre dos años consecutivos de evaluación:

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

Esta matriz debe contener toda la información necesaria para desarrollar el modelo del deterioro del pavimento a través de un determinado periodo de tiempo. Cada p_{ij} representa la probabilidad de que un segmento de carretera cambie del estado i al estado j en un determinado periodo de tiempo. Un ciclo de trabajo en el deterioro del pavimento se define como un año de tránsito y degradación ambiental (Ortiz-García *et al.*, 2006).

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, si a_0 , representa al vector de estado inicial para el periodo de análisis ($t=0$), el vector de estado para $t=1$ es:

$$a_1 = [a_{0,1}, a_{0,2}, \dots, a_{0,n}] \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} = [a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,n}]$$

La presente investigación se desarrolló en una carretera concesionada donde se realizan actividades de mantenimiento rutinario a la capa de rodadura asfáltica, el estado funcional de la carretera se encuentra de acuerdo con los parámetros de IRI los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10

Estado de condición del IRI del pavimento

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

Nota: (Hoang., 2017)

Para el desarrollo del modelo estocástico probabilístico se consideran los niveles de deterioro del pavimento establecidos en la calificación del IRI de la tabla 10. Los rangos se determinaron de acuerdo con los valores máximos y mínimos que se presentan en las mediciones de campo y se asumieron rangos de IRI más rigurosos los cuales se dividen en cinco estados con los siguientes intervalos que se muestran en la tabla 11.

Tabla 11

Rangos determinados para estado de condición de IRI

Rangos de IRI (m/km)	Estado
De 0 a 1.5	E1
De 1.5 a 2.0	E2
De 2.0 a 2.5	E3
De 2.5 a 3.5	E4
De 3.5 a 5.0	E5

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

Para realizar la matriz de probabilidad de transición, se debe tener en cuenta don condiciones la primera es que, el pavimento sin tener algún tipo de intervención no puede mejorar durante un tiempo de servicio y la segunda condición es que el pavimento puede permanecer en su estado inicial o deteriorarse y pasar al siguiente estado en un año, por lo tanto, 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 final, 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 de condición para cualquier año de operación de la vía se calcula realizando la multiplicación del vector de estado inicial por la matriz de probabilidad de transición (MPT), tal como se detalla en las ecuaciones siguientes:

$$\begin{aligned} E_{(1)} &= E_{(0)} \times P \\ E_{(2)} &= E_{(1)} \times P = E_{(0)} \times P^2 \\ &\vdots \\ E_{(t)} &= E_{(t-1)} \times P = E_{(0)} \times P^t \end{aligned}$$

De la revisión de los datos se determina que los valores de IRI del año 2016 al pasar al año 2017 gran parte presenta mejoras en la condición por lo que no son representativos, por lo que se realizó el modelamiento del método estocástico probabilístico con los siguientes años. 2017, 2018, 2019 y 2020 en el que se observa cambios de estado de condición de IRI, cuando pasa de un año a otro. Asimismo, existen segmentos los cuales mantuvieron su estado al pasar de un año a otro. Sin embargo, algunos segmentos

presentaron inconsistencias en el valor medido de IRI, puesto que, los valores tomados 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 realizaron intervenciones de mantenimiento. Para estos segmentos se considera que no cambiaron su condición de estado.

Con los datos revisados y procesados de la tabla 12 se hallaron los segmentos que cambiaron de condición o permanecieron en el mismo estado al pasar un año al otro. En la tabla 13 se presenta el estado de condición para el año 2018 respecto al año 2017 y se determina su matriz de condición.

Tabla 12

Resumen de distribución de segmentos y estado de condición años 2017 al 2018

	E1	E2	E3	E4	E5
	0.0	1.5	2.0	2.5	3.5
	1.5	2.0	2.5	3.5	5.0
¿el segmento mantiene condición?					
Si	25	42	15	7	0
No	44	147	76	7	1
Total	69	189	91	14	1
%Si	0.36	0.22	0.16	0.50	0.0
%No	0.64	0.78	0.84	0.50	1.00

Tabla 13*Estado de condición al año 2018*

		2018
E1 %	44	0.16
E2 %	147	0.53
E3 %	76	0.28
E4 %	7	0.03
E5 %	1	0.0
Total	275	

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.64	0.36	0.00	0.00	0.00
E2	0.00	0.78	0.22	0.00	0.00
E3	0.00	0.00	0.84	0.16	0.00
E4	0.00	0.00	0.00	0.5	0.5
E5	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Matriz de probabilidades de transición

Tabla 14*Cambios de estado de condición del año 2017 al año 2018*

kilómetros	IRI m/km 2017	IRI m/km 2018	E1	E2	E3	E4	E5
			0 1.5	1.5 2	2 2.5	2.5 3.5	3.5 5
1319+200	3.43	3.81					1
1319+300	2.18	2.28			1		
1319+400	2.35	2.35					
1319+500	2.11	2.03					
1319+600	1.56	1.54					
1319+700	1.52	1.73		1			
1319+800	1.57	1.68		1			
1319+900	1.53	1.65		1			
1320+000	1.85	2.39			1		
1320+100	1.97	2.02				1	
1320+200	2.29	2.39				1	
1320+300	1.46	1.46					

1320+400	1.61	1.95		1	
1320+500	1.70	1.51			
1320+600	1.13	1.40	1		
1320+700	1.79	1.84		1	
1320+800	1.46	1.56		1	
1320+900	1.53	1.94		1	
1321+000	1.77	1.74			
1321+100	1.73	1.79		1	
1321+200	1.64	1.71		1	
1321+300	1.40	1.77		1	
1321+400	1.77	1.82		1	
1321+500	1.84	2.03			1
1321+600	1.75	1.90		1	
1321+700	2.14	2.29			1
1321+800	1.51	1.53		1	
1321+900	1.90	2.34			1
1322+000	1.79	1.95		1	
1322+100	2.15	2.36			1
1322+200	1.98	2.03			1
1322+300	1.60	2.15			1
1322+400	2.31	2.34			1
1322+500	1.79	2.09			1
1322+600	1.73	1.96		1	
1322+700	1.63	1.86		1	
1322+800	1.86	2.04			1
1322+900	1.59	1.92		1	
1323+000	2.13	2.18			1
1323+100	1.88	1.95		1	
1323+200	1.74	1.99		1	
1323+300	2.86	2.79			
1323+400	3.09	2.63			
1323+500	2.71	2.79			1
1323+600	2.31	2.20			
1323+700	2.82	2.28			
1323+800	1.73	2.02			1
1323+900	2.00	2.29			1
1324+000	3.09	2.86			
1324+100	3.34	2.60			
1324+200	2.93	2.85			
1324+300	1.76	1.71			
1324+400	1.43	1.66		1	
1324+500	1.87	2.08			1
1324+600	1.42	1.84		1	
1324+700	1.75	1.64			
1324+800	1.82	1.95		1	
1324+900	1.99	2.10			1
1325+000	1.58	1.79		1	
1325+100	1.59	1.76		1	

1325+200	1.48	1.75		1
1325+300	1.63	1.73		1
1325+400	1.64	1.65		1
1325+500	1.74	1.82		1
1325+600	1.74	1.84		1
1325+700	1.44	1.52		1
1325+800	1.78	1.89		1
1325+900	1.41	1.45	1	
1326+000	1.51	1.65		1
1326+100	1.67	1.80		1
1326+200	1.94	1.93		
1326+300	1.77	2.25		1
1326+400	2.06	2.18		1
1326+500	1.98	2.11		1
1326+600	2.03	1.77		
1326+700	1.66	1.68		1
1326+800	2.01	1.72		
1326+900	1.76	1.93		1
1327+000	1.61	1.61		
1327+100	1.77	1.92		1
1327+200	1.70	1.80		1
1327+300	1.99	2.10		1
1327+400	1.86	1.78		
1327+500	1.78	2.07		1
1327+600	1.71	1.69		
1327+700	1.91	2.07		1
1327+800	1.73	1.78		1
1327+900	1.79	1.73		
1328+000	1.72	1.80		1
1328+100	1.81	1.78		
1328+200	1.83	1.90		1
1328+300	2.29	2.33		1
1328+400	2.03	2.16		1
1328+500	1.89	2.13		1
1328+600	1.63	1.80		1
1328+700	2.06	2.14		1
1328+800	1.96	2.22		1
1328+900	2.09	2.02		
1329+000	2.03	2.09		1
1329+100	1.86	1.96		1
1329+200	1.87	2.21		1
1329+300	1.74	1.86		1
1329+400	1.66	1.73		1
1329+500	1.74	1.69		
1329+600	1.97	2.02		1
1329+700	2.05	2.37		1
1329+800	1.85	2.18		1
1329+900	1.43	1.61		1

1330+000	1.44	1.41		
1330+100	1.52	1.70	1	
1330+200	1.91	1.90		
1330+300	2.26	2.34		1
1330+400	1.80	2.03		1
1330+500	1.43	1.55	1	
1330+600	1.64	1.66	1	
1330+700	1.08	1.42	1	
1330+800	1.43	1.39		
1330+900	1.14	1.13		
1331+000	1.21	1.42	1	
1331+100	1.18	1.21	1	
1331+200	1.45	1.43		
1331+300	1.09	1.33	1	
1331+400	1.15	1.12		
1331+500	1.36	1.55	1	
1331+600	1.40	1.72	1	
1331+700	1.65	1.87	1	
1331+800	1.53	1.55	1	
1331+900	1.71	2.00		1
1332+000	1.76	1.85	1	
1332+100	1.99	2.01		1
1332+200	1.42	1.54	1	
1332+300	1.61	1.46		
1332+400	1.20	1.55	1	
1332+500	1.31	1.52	1	
1332+600	1.43	1.44	1	
1332+700	1.48	1.68		1
1332+800	1.54	1.49		
1332+900	1.23	1.34	1	
1333+000	1.28	1.42	1	
1333+100	1.33	1.32		
1333+200	1.47	1.72		1
1333+300	1.58	1.35		
1333+400	1.34	1.71		1
1333+500	1.40	1.40	1	
1333+600	1.35	1.68		1
1333+700	1.15	1.14		
1333+800	1.10	1.13	1	
1333+900	1.07	1.58		1
1334+000	1.51	1.49		
1334+100	1.41	1.53		1
1334+200	1.42	1.70		1
1334+300	2.03	2.09		1
1334+400	2.12	2.25		1
1334+500	2.21	2.39		1
1334+600	1.79	1.97	1	
1334+700	1.90	1.82		

1334+800	1.75	1.91	1	
1334+900	2.11	1.99		
1335+000	2.09	1.86		
1335+100	1.75	1.84	1	
1335+200	1.64	1.71	1	
1335+300	1.52	1.49		
1335+400	1.62	1.65	1	
1335+500	1.55	1.66	1	
1335+600	1.76	1.74		
1335+700	1.61	1.61	1	
1335+800	1.53	1.77	1	
1335+900	1.70	1.77	1	
1336+000	1.69	1.71	1	
1336+100	1.64	1.64		
1336+200	1.48	1.41		
1336+300	1.48	1.53	1	
1336+400	1.64	1.50		
1336+500	1.54	1.65	1	
1336+600	1.69	1.61		
1336+700	1.59	1.68	1	
1336+800	1.84	1.93	1	
1336+900	1.98	1.88		
1337+000	1.53	1.98	1	
1337+100	1.28	1.52	1	
1337+200	1.81	2.32		1
1337+300	2.13	1.75		
1337+400	2.28	2.35		1
1337+500	1.60	2.01		1
1337+600	1.46	1.81	1	
1337+700	1.49	1.32		
1337+800	1.60	1.59		
1337+900	1.79	1.86	1	
1338+000	1.99	2.10		1
1338+100	2.17	2.16		
1338+200	2.10	3.04		1
1338+300	2.48	2.47		
1338+400	3.12	2.76		
1338+500	2.32	2.10		
1338+600	1.41	1.30		
1338+700	1.21	1.36	1	
1338+800	1.16	1.27	1	
1338+900	1.49	1.53		1
1339+000	1.42	1.54		1
1339+100	1.60	1.83		1
1339+200	1.60	1.56		
1339+300	1.39	1.46	1	
1339+400	1.32	1.54		1
1339+500	1.12	1.25	1	

1339+600	1.43	1.46	1	
1339+700	1.57	1.75		1
1339+800	1.19	1.40	1	
1339+900	1.19	1.21	1	
1340+000	1.05	1.16	1	
1340+100	1.18	1.17		
1340+200	1.12	1.15	1	
1340+300	0.99	1.06	1	
1340+400	1.09	1.07		
1340+500	1.03	1.01		
1340+600	1.06	1.10	1	
1340+700	1.12	1.23	1	
1340+800	1.00	1.07	1	
1340+900	1.31	1.67		1
1341+000	1.67	1.70		1
1341+100	1.89	1.85		
1341+200	1.75	1.86		1
1341+300	1.81	1.83		1
1341+400	1.91	1.98		1
1341+500	1.88	2.00		1
1341+600	1.94	2.05		1
1341+700	1.77	1.90		1
1341+800	1.70	1.95		1
1341+900	2.03	2.13		1
1342+000	1.98	2.15		1
1342+100	1.49	1.81		1
1342+200	1.76	1.74		
1342+300	1.88	1.84		
1342+400	1.31	1.43	1	
1342+500	1.21	1.34	1	
1342+600	1.27	1.48	1	
1342+700	1.43	1.61		1
1342+800	1.31	1.52		1
1342+900	1.34	1.52		1
1343+000	1.19	1.28	1	
1343+100	1.19	1.24	1	
1343+200	1.30	1.57		1
1343+300	1.53	1.43		
1343+400	1.26	1.28	1	
1343+500	1.80	2.03		1
1343+600	2.03	1.99		
1343+700	2.40	2.29		
1343+800	2.71	2.80		1
1343+900	2.98	3.17		1
1344+000	2.49	2.58		1
1344+100	2.39	2.27		
1344+200	2.26	2.26		
1344+300	2.15	1.58		

1344+400	1.84	1.97		1	
1344+500	1.39	1.50		1	
1344+600	1.66	1.60			
1344+700	1.70	1.52			
1344+800	1.50	1.61		1	
1344+900	1.49	1.65		1	
1345+000	1.84	2.06			1
1345+100	1.80	2.11			1
1345+200	1.57	1.91		1	
1345+300	1.56	1.67		1	
1345+400	1.56	1.75		1	
1345+500	1.34	1.41	1		
1345+600	1.46	1.49	1		
1345+700	1.38	1.25			
1345+800	1.07	1.32	1		
1345+900	1.21	1.33	1		
1346+000	1.20	1.25	1		
1346+100	1.17	1.31	1		
1346+200	1.43	1.45	1		
1346+300	1.46	1.48	1		
1346+400	1.34	1.38	1		
1346+500	1.44	1.62		1	
1346+600	1.68	1.98		1	
1346+700	1.70	1.81		1	
1346+800	1.55	1.69		1	
1346+900	1.82	1.93		1	
1347+000	2.10	2.37			1
1347+100	1.70	1.93		1	
1347+200	1.47	1.86		1	
1347+300	1.24	1.24	1		
1347+400	1.36	1.55		1	
1347+500	1.31	1.55		1	
1347+600	1.36	1.54		1	
1347+700	1.27	1.60		1	
1347+800	1.39	1.89		1	
1347+900	1.72	2.27			1
1348+000	1.55	1.58		1	
1348+100	2.11	2.10			
1348+200	1.80	1.86		1	
1348+300	1.45	1.33			
1348+400	1.24	1.39	1		
1348+500	1.58	1.57			
1348+600	1.42	1.42			
1348+700	2.07	2.32			1
1348+800	1.64	1.80		1	
1348+900	2.14	2.20			1
1349+000	1.71	2.04			1
1349+100	1.79	1.55			

1349+200	1.42	1.63	1	
1349+300	1.74	1.79	1	
1349+400	1.47	1.88	1	
1349+500	1.83	1.79		
1349+600	1.66	1.69	1	
1349+700	1.60	1.70	1	
1349+800	1.63	1.84	1	
1349+900	1.73	2.10		1
1350+000	1.90	2.05		1
1350+100	1.84	1.93	1	
1350+200	2.03	2.10		1
1350+300	1.73	1.90	1	
1350+400	1.94	1.81		
1350+500	1.62	1.83	1	
1350+600	1.52	1.69	1	
1350+700	1.52	1.63	1	
1350+800	1.45	1.76	1	
1350+900	2.18	2.09		
1351+000	1.88	2.05		1
1351+100	1.59	1.70	1	
1351+200	1.68	1.73	1	
1351+300	1.75	1.99	1	
1351+400	1.43	1.62	1	
1351+500	1.57	1.59	1	
1351+600	1.49	1.71	1	
1351+700	1.91	1.81		
1351+800	2.01	2.25		1
1351+900	2.21	2.44		1
1352+000	2.14	2.18		1
1352+100	1.95	2.07		1
1352+200	1.89	1.97	1	
1352+300	2.17	2.15		
1352+400	3.09	3.07		
1352+500	2.10	2.32		1
1352+600	2.49	2.08		
1352+700	2.05	2.49		1
1353+400	1.54	1.69	1	
1353+500	1.99	2.32		1
1353+600	1.65	1.64		
1353+700	2.00	2.04		1
1353+800	1.75	2.08		1
1353+900	2.21	2.42		1
1354+000	1.74	1.99	1	
1354+100	1.58	1.68	1	
1354+200	1.37	1.42	1	
1354+300	1.31	1.23		
1354+400	1.39	1.49	1	
1354+500	1.62	1.90		1

1354+600	1.90	2.05				1	
1354+700	1.70	1.52					
1354+800	1.97	1.90					
1354+900	1.69	1.58					
1355+000	1.50	1.55			1		
1355+100	1.62	1.64			1		
1355+200	1.69	1.74			1		
1355+300	1.69	1.56					
1355+400	1.42	1.43	1				
1355+500	1.96	1.89					
1355+600	1.74	1.95			1		
1355+700	2.11	2.06					
1355+800	1.72	2.08				1	
1355+900	2.08	3.11				1	
			44	147	76	7	1

Tabla 15*Cambio de estado al año 2021*

% MED 2021		
E1 %	3	0.01
E2 %	97	0.39
E3 %	93	0.37
E4 %	44	0.18
E5 %	13	0.05
Total	250	

2018							2019						
		E1	E2	E3	E4	E5		E1	E2	E3	E4	E5	
E1 = 0.16	X	E1	0.64	0.36	0.00	0.00	0.00	E1	0.10	0.06	0.00	0.00	0.00
E2 = 0.53		E2	0.00	0.78	0.2	0.00	0.00	E2	0.00	0.42	0.12	0.00	0.00
E3 = 0.28		E3	0.00	0.00	0.8	0.2	0.00	E3	0.00	0.00	0.23	0.04	0.00
E4 = 0.03		E4	0.00	0.00	0.00	0.5	0.5	E4	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
E5 = 0.00		E5	0.00	0.00	0.00	0.00	1	E5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
								0.10	0.47	0.35	0.06	0.02	

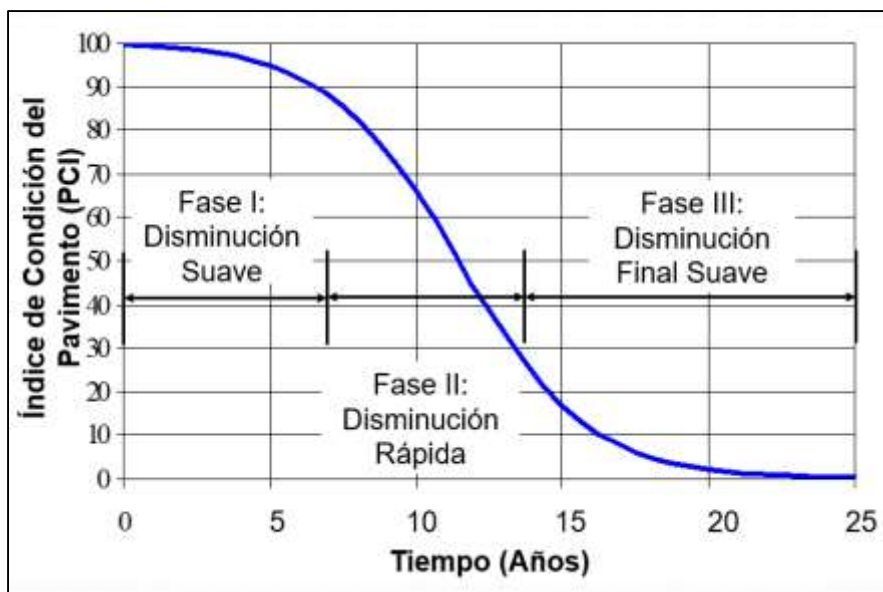
Matriz de probabilidad de transición 2019

2019							2020						
		E1	E2	E3	E4	E5		E1	E2	E3	E4	E5	
E1 = 0.10	X	E1	0.64	0.36	0.00	0.00	0.00	E1	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00
E2 = 0.47		E2	0.00	0.78	0.2	0.00	0.00	E2	0.00	0.37	0.10	0.00	0.00
E3 = 0.35		E3	0.00	0.00	0.8	0.2	0.00	E3	0.00	0.00	0.29	0.06	0.00
E4 = 0.06		E4	0.00	0.00	0.00	0.5	0.5	E4	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03
E5 = 0.02		E5	0.00	0.00	0.00	0.00	1	E5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
								0.07	0.41	0.40	0.08	0.04	

Matriz de probabilidad de transición 2020

Figura 22

Comportamiento asumido de un pavimento



Nota: Federal Highway Administration (2003)

El modelo matemático que representa el comportamiento de un pavimento de acuerdo con la Federal Highway Administration (2003) es el siguiente:

$$A = a + \frac{b}{1 + e^{[(c \cdot B) + d]}}$$

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 sigmoide

De la revisión y el análisis de las variaciones de los datos de campo de manera individual en cada sección por kilómetro, se puede observar que en la mayoría de las secciones los valores de IRI se incrementan al paso de los años y en otros 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 y las intervenciones del mantenimiento rutinario a la calzada.

En los sectores donde se presentan las mejoras de condición de IRI, se realiza la subdivisión del segmento 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 sigmoideal relacionada con una curva y ecuación de factores de conversión. La ecuación de conversión del tiempo está definida por la siguiente ecuación:

$$B = t + a(\text{IRI})$$

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 1319+700 al Km 1319+800.

El valor en el año 2016 es 1.55 y le corresponde el número 0, luego se observa que en el año 2017 el valor crece a 1.56 que le correspondería el número 1 (2016-2017), sin embargo, para el año 2018 observamos el valor de IRI disminuye a 1.54 que se considera como mejora ya que se sabe que el IRI no se “auto mejora” (que obedecería a al proceso de mantenimiento rutinario o los distintos procedimientos de medición), empezando nuevamente con 0 en este punto y por último para los años 2019 y 2020 presenta valores crecientes de 1.73 y 2.08 indicando un ligero deterioro correspondiendo el número 1 y 2 respectivamente (2019 y 2020).

Tabla 16*Tiempos relativos por secciones del Km 1319+000 al Km 1356+000*

Años	Sección	Tipo de sección	IRI medio	Años
2016	1319+400	sec1	1.50	0
2017	1319+400	sec1	2.18	1
2018	1319+400	sec1	2.28	2
2019	1319+400	sec1	2.37	3
2019	1319+500	sec1	2.00	0
2020	1319+500	sec1	2.41	1
2019	1319+600	sec1	1.84	0
2020	1319+600	sec1	2.38	1
2016	1319+700	sec1	1.55	0
2017	1319+700	sec1	1.56	1
2018	1319+700	sec2	1.54	0
2019	1319+700	sec2	1.73	1
2020	1319+700	sec2	2.08	2
2017	1319+800	sec1	1.52	0
2018	1319+800	sec1	1.73	1
2019	1319+800	sec1	1.72	2
2016	1319+900	sec1	1.52	1
2017	1319+900	sec1	1.57	2
2018	1319+900	sec1	1.68	3
2019	1319+900	sec2	1.55	0
2020	1319+900	sec2	1.72	1
2016	1320+000	sec1	1.43	0
2017	1320+000	sec1	1.53	1
2018	1320+000	sec1	1.65	2
2019	1320+000	sec1	1.70	3
2017	1320+100	sec1	1.85	0
2018	1320+100	sec1	2.39	1
2016	1320+200	sec1	1.58	0
2017	1320+200	sec1	1.97	1
2018	1320+200	sec1	2.02	2
2017	1320+300	sec1	2.29	0
2018	1320+300	sec1	2.39	1
2019	1320+300	sec2	2.25	0
2020	1320+300	sec2	2.33	1
2016	1320+500	sec1	1.77	0
2017	1320+500	sec1	1.61	1
2018	1320+500	sec1	1.95	2
2019	1320+500	sec2	1.78	0
2020	1320+500	sec2	1.87	1
2016	1320+600	sec1	1.68	0
2017	1320+600	sec1	1.70	1
2019	1320+600	sec2	1.48	0
2020	1320+600	sec2	1.68	1

2017	1320+700	sec1	1.13	0
2018	1320+700	sec1	1.40	1
2019	1320+700	sec2	1.30	0
2020	1320+700	sec2	1.50	1
2016	1320+800	sec1	1.63	0
2017	1320+800	sec1	1.79	1
2018	1320+800	sec1	1.84	2
2019	1320+800	sec2	1.74	0
2020	1320+800	sec2	1.90	1
2017	1320+900	sec1	1.46	0
2018	1320+900	sec1	1.56	1
2019	1320+900	sec2	1.50	0
2020	1320+900	sec2	1.55	1
2017	1321+000	sec1	1.53	0
2018	1321+000	sec1	1.94	1
2017	1321+200	sec1	1.73	0
2018	1321+200	sec1	1.79	1
2019	1321+200	sec2	1.69	0
2020	1321+200	sec2	1.86	1
2017	1321+300	sec1	1.64	0
2018	1321+300	sec1	1.71	1
2019	1321+300	sec2	1.59	0
2020	1321+300	sec2	2.27	1
2017	1321+400	sec1	1.40	0
2018	1321+400	sec1	1.77	1
2019	1321+400	sec1	1.79	2
2016	1321+500	sec1	1.51	0
2017	1321+500	sec1	1.77	1
2018	1321+500	sec1	1.82	2
2019	1321+500	sec1	1.82	3
2020	1321+500	sec1	1.90	4
2017	1321+600	sec1	1.84	0
2018	1321+600	sec1	2.03	1
2019	1321+600	sec1	2.03	2
2017	1321+700	sec1	1.75	0
2018	1321+700	sec1	1.90	1
2019	1321+700	sec1	2.17	2
2020	1321+700	sec1	2.47	3
2016	1321+800	sec1	2.02	0
2017	1321+800	sec1	2.14	1
2018	1321+800	sec1	2.29	2
2017	1321+900	sec1	1.51	0
2018	1321+900	sec1	1.53	1
2020	1321+900	sec1	1.59	2
2017	1322+000	sec1	1.90	0
2018	1322+000	sec1	2.34	1
2019	1322+000	sec2	2.11	0
2020	1322+000	sec2	2.57	1
2017	1322+100	sec1	1.79	0

2018	1322+100	sec1	1.95	1
2019	1322+100	sec2	1.79	0
2020	1322+100	sec2	1.87	1
2017	1322+200	sec1	2.15	0
2018	1322+200	sec1	2.36	1
2017	1322+300	sec1	1.98	0
2018	1322+300	sec1	2.03	1
2019	1322+300	sec2	1.98	0
2020	1322+300	sec2	2.00	1
2017	1322+400	sec1	1.60	0
2018	1322+400	sec1	2.15	1
2016	1322+500	sec1	2.05	0
2017	1322+500	sec1	2.31	1
2018	1322+500	sec1	2.34	2
2019	1322+500	sec2	1.97	0
2020	1322+500	sec2	2.69	1
2017	1322+600	sec1	1.79	0
2018	1322+600	sec1	2.09	1
2019	1322+600	sec1	2.23	2
2020	1322+600	sec1	2.83	3
2016	1322+700	sec1	1.64	0
2017	1322+700	sec1	1.73	1
2018	1322+700	sec1	1.96	2
2019	1322+700	sec1	2.04	3
2017	1322+800	sec1	1.63	0
2018	1322+800	sec1	1.86	1
2019	1322+800	sec1	2.00	2
2020	1322+800	sec1	2.22	3
2016	1322+900	sec1	1.59	0
2017	1322+900	sec1	1.86	1
2018	1322+900	sec1	2.04	2
2019	1322+900	sec2	1.95	0
2020	1322+900	sec2	2.04	1
2016	1323+000	sec1	1.95	0
2017	1323+000	sec1	1.59	1
2018	1323+000	sec1	1.92	2
2019	1323+000	sec1	2.02	3
2016	1323+100	sec1	1.90	0
2017	1323+100	sec1	2.13	1
2018	1323+100	sec1	2.18	2
2019	1323+100	sec2	2.15	0
2020	1323+100	sec2	2.29	1
2017	1323+200	sec1	1.88	1
2018	1323+200	sec1	1.95	2

Posteriormente la conversión de los datos de IRI 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.

3.4.3 Procesamiento de datos deterioro funcional de pavimento flexible

Luego de elaborar los modelos de comportamiento de pavimento estocástico probabilístico y empírico, se debe de hallar la correlación que existe entre los valores medidos en campo y los valores obtenidos con los modelos al año 2021. Para esto se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson que es un método propio de la estadística paramétrica, el cual permite conocer la relación entre dos variables cuantitativas, el coeficiente de relación de Person oscila entre -1 y + 1.

- Un valor menor a cero indica que existe una correlación negativa, lo cual es indicador que las variables están asociadas en sentido inverso. Cuando el valor se acerca a -1, mayor es la relación invertida (cuando una de las variables es muy alta, el valor en la otra variable será muy bajo). Cuando la correlación es exactamente -1, indica una correlación negativa perfecta.
- El valor mayor a cero indica la existencia de una correlación positiva. Lo cual es indicador que las variables están asociadas en sentido directo. Cuando el valor es más cercano al +1, indica que su correlación es alta. y el valor exacto de +1 indica una relación lineal positiva perfecta.
- Una correlación de cero o el valor más cercano a cero, indica que no existe relación lineal entre las variables de estudio.

Modelo estocástico probabilístico

El modelo de deterioro estocástico probabilístico se debe de multiplicar la matriz de estado de condición a_0 retiradas veces, por la matriz de probabilidad por un periodo de 15 años hasta el año 2035 fecha en la cual se culmina el contrato de concesión, donde se hallan vectores de estado con los cuales se realiza la curva de deterioro de 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 tabla 17 :

$$IRIt = \mathbf{a}_0 \cdot \mathbf{c} \text{ donde:}$$

$IRIt$: Estimación del IRI para el ciclo de servicio t .

\mathbf{a}_0 : Vector de estado para el ciclo de servicio t .

\mathbf{c} : Vector de marcas de clase

Tabla 17

Vectores de condición de estado

t	E1	E2	E3	E4	E5
2018	0.16	0.53	0.28	0.03	0
2019	0.1	0.47	0.35	0.06	0.02
2020	0.07	0.41	0.4	0.08	0.04
2021	0.04	0.34	0.42	0.11	0.09
2022	0.03	0.28	0.43	0.12	0.14
2023	0.02	0.23	0.42	0.13	0.2
2024	0.01	0.18	0.41	0.13	0.27
2025	0.01	0.15	0.38	0.13	0.33
2026	0	0.12	0.35	0.13	0.4
2027	0	0.09	0.32	0.12	0.46
2028	0	0.07	0.29	0.11	0.52
2029	0	0.06	0.26	0.1	0.58
2030	0	0.05	0.23	0.09	0.63
2031	0	0.04	0.21	0.08	0.67
2032	0	0.03	0.18	0.07	0.72
2033	0	0.02	0.16	0.07	0.75
2034	0	0.02	0.14	0.06	0.79
2035	0	0.01	0.12	0.05	0.82

Tabla 18

Curva de deterioro funcional del pavimento hasta el año 2035

t	IRIt
2021	2.27
2022	2.44
2023	2.61
2024	2.77
2025	2.93
2026	3.07
2027	3.21
2028	3.33
2029	3.45
2030	3.55
2031	3.64
2032	3.72
2033	3.8

2034	3.86
2035	3.91

Modelo empírico

Luego de usar la función Solver del MS Excel para desarrollar el modelo empírico, donde se calcula el tiempo traslado el cual se grafica con el IRI medido en campo durante los años de 2016,2017,2018,2019 y 2020, y de esta manera hallar la fórmula matemática que nos permita predecir el IRI al año 2021 y este es comparado al calculado en campo, para luego realizarlo hasta el año 2035, este proceso se realizó a cada uno de los sectores homogéneos tal como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 23

IRI Predecido Km 1319+000 al 1322+000

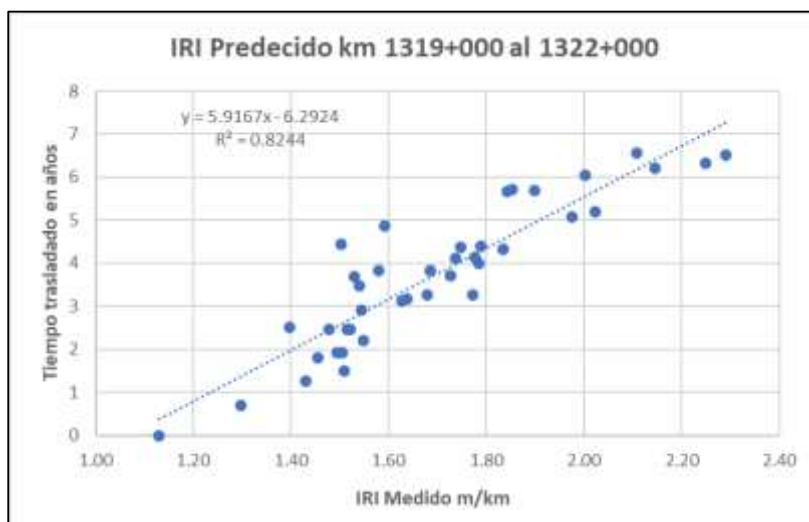


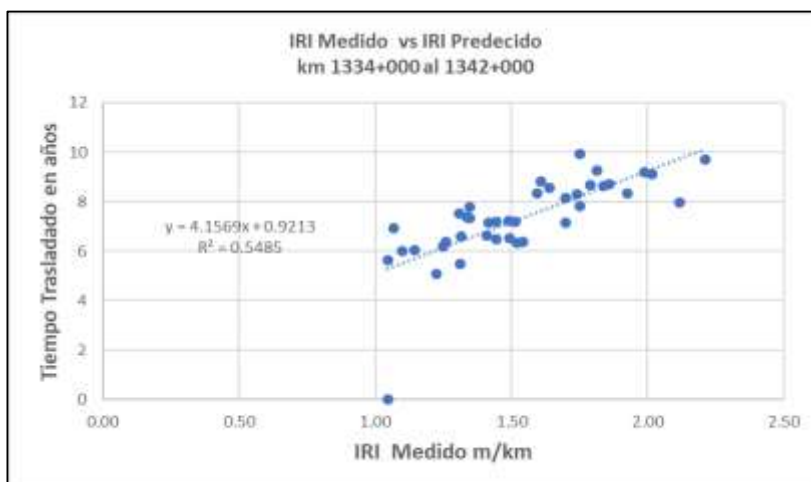
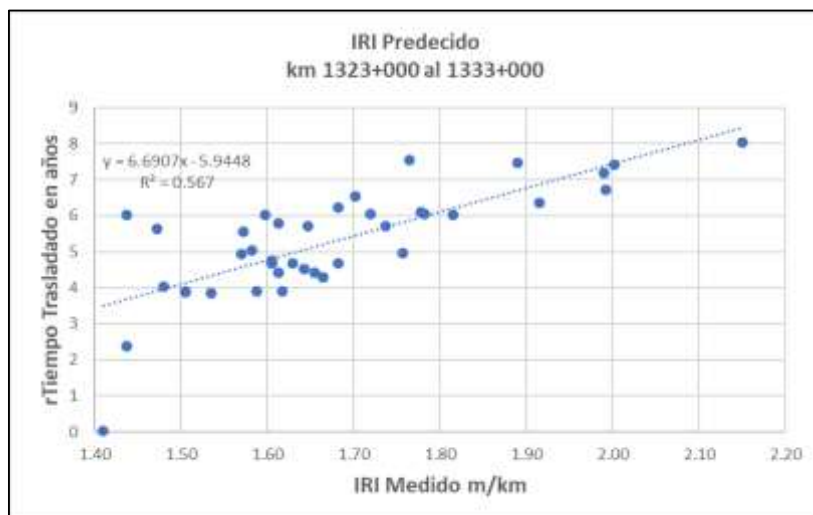
Figura 24*IRI Predecido Km 1334+000 al 1342+000***Figura 25***IRI Predecido Km 1319+000 al 1322+000*

Figura 26

IRI Predecido Km 1343+000 al 1347+000

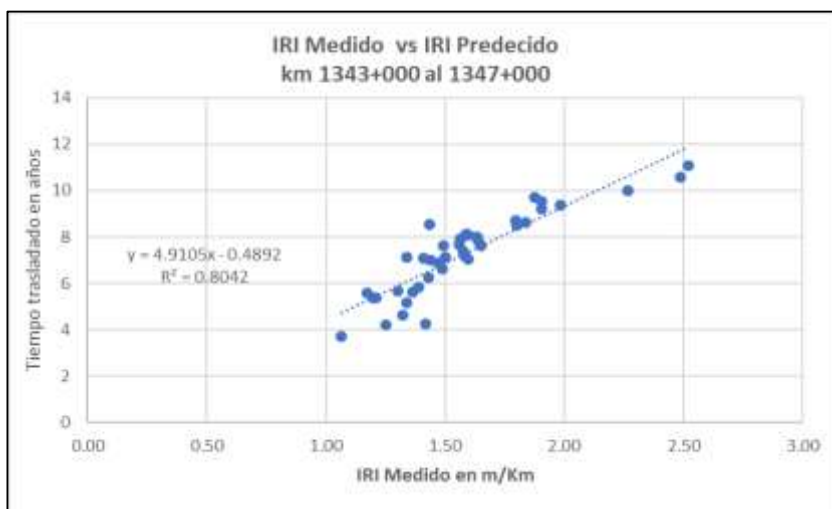
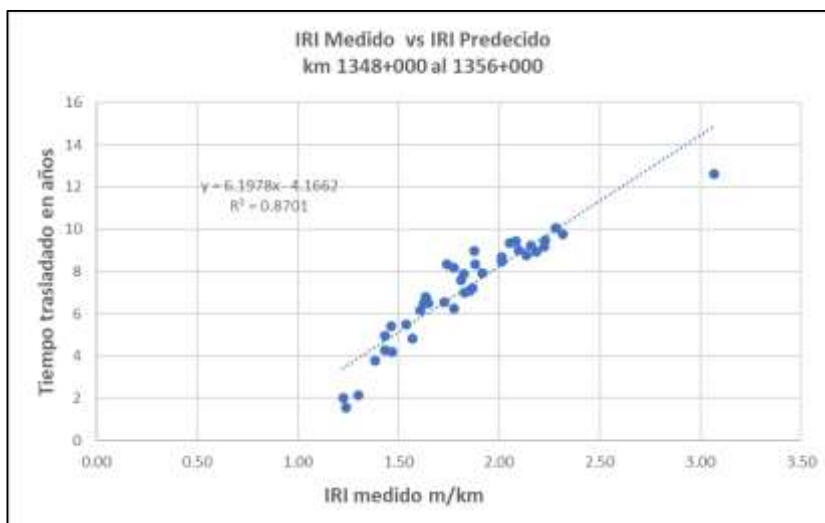


Figura 27

IRI Predecido Km 1348+000 al 1356+000



En la siguiente tabla se muestra los valores predecidos de IRI hasta el año 2035, de acuerdo con el modelo comportamiento empírico calculado.

Tabla 19

Curva de deterioro funcional del pavimento hasta el año 2035

Año	IRI Predecido m/km
2021	2.00
2022	2.25
2023	2.55
2024	2.90
2025	3.28
2026	3.66
2027	4.04
2028	4.39
2029	4.69
2030	4.95
2031	5.17
2032	5.34
2033	5.47
2034	5.58
2035	5.66

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados

4.1.1 Resultados del modelo estocástico probabilístico

Mediante la aplicación del modelo estocástico probabilístico-aplicada para los años 2017, 2018, 2019, 2020, Se pudo obtener las matrices de transición para cada periodo de tiempo.

Para aplicar el modelo de deterioro estocástico probabilístico solo es necesario los datos de dos años consecutivos para determinar las matrices de predicción, para la presente investigación se utilizó los años 2017 y 2018, donde se puede apreciar que el proceso de pasar de un estado i al j (P_{ij}), el cual depende únicamente del estado actual y no de los estados anteriores, dicha característica es comida como propiedad de Marcov. (Lam, 2008)

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.64	0.36	0	0	0
E2	0	0.78	0.22	0	0
E3	0	0	0.84	0.16	0
E4	0	0	0	0.5	0.5
E5	0	0	0	0	1

Matriz de probabilidad de transición al año 2018

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.10	0.06	0.00	0.00	0.00
E2	0.00	0.42	0.12	0.00	0.00
E3	0.00	0.00	0.23	0.04	0.00
E4	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
E5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.10	0.47	0.35	0.06	0.02

Matriz de probabilidad de transición al año 2019

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.07	0.04	0.00	0.00	0.00
E2	0.00	0.37	0.10	0.00	0.00
E3	0.00	0.00	0.29	0.06	0.00
E4	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03
E5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	0.07	0.41	0.40	0.08	0.04

Matriz de probabilidad de transición al año 2020

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
E2	0.00	0.32	0.09	0.00	0.00
E3	0.00	0.00	0.33	0.06	0.00
E4	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
E5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
	0.04	0.34	0.42	0.11	0.09

Matriz de probabilidad de transición al año 2021

Tabla 20

Resumen Matriz de predicción años 2020 y 2021

	% PRED 2020	% PRED 2021
E1 %	0.07	0.04
E2 %	0.41	0.34
E3 %	0.40	0.42
E4 %	0.08	0.11
E5 %	0.04	0.09

Una vez desarrollado el modelo estocástico probabilístico, se procedió a validar los valores del IRI pronosticados para el año 2021, para lo cual, se contrastó con las mediciones de campo realizadas por el concesionario en el año 2021 y la correlación obtenida se muestra en la tabla 21 siguiente:

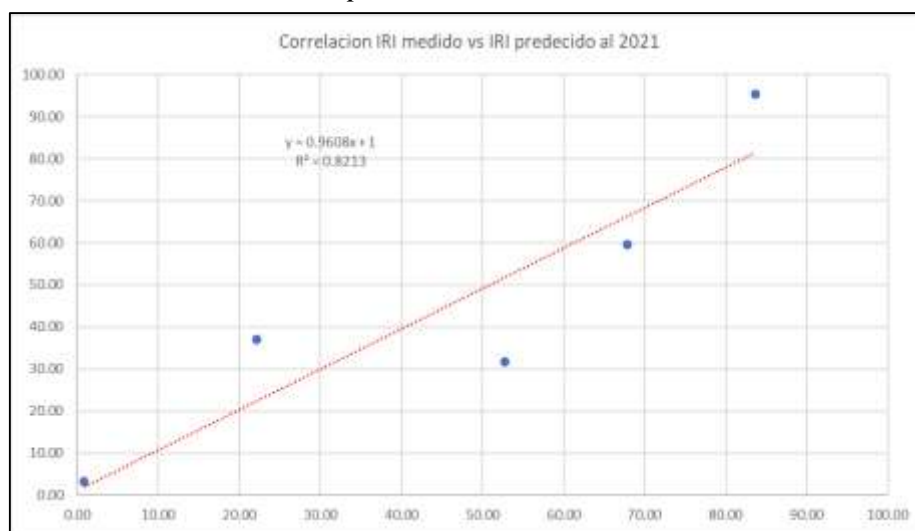
Tabla 21

Matriz de IRI medido y predecido año 2021

	% MED	% PRED
E1	3.15	0.90
E2	59.69	67.90
E3	95.40	83.70
E4	31.78	52.80
E5	37.00	22.10

Figura 28

Correlación del IRI medido vs IRI pronosticado



Como se aprecia en la tabla 18, las matrices de probabilidad de transición podrían perder la capacidad de predicción conforme avanza el tiempo de análisis, puesto que no se están considerando variables explicativas como el tránsito, clima o capacidad estructural del pavimento, sin embargo, normalmente el proceso se simplifica obteniendo matrices de predicción en intervalos de unos cinco años (Butt *et al.*, 1994).

4.1.2 Resultados del modelo empírico

Se trabajaron los valores de IRI medidos en campo, durante los años 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, los cuales se graficaron considerando los tiempos reducidos para iniciar con el desarrollo del modelo de deterioro empírico, en las curvas obtenidas se muestra el antes y después de la conversión de datos para que encajen en una curva

polinómica, este proceso se desarrolló para cada sector homogéneo, a manera de ejemplo se muestran los sectores los Km 1319+000 al Km 1320+000, Km 1325+000 al Km 1328+000, Km 1333+000 al Km 1337+000.

Figura 29

IRI medido vs IRI predecido Km 1319+000 al Km 1320+000

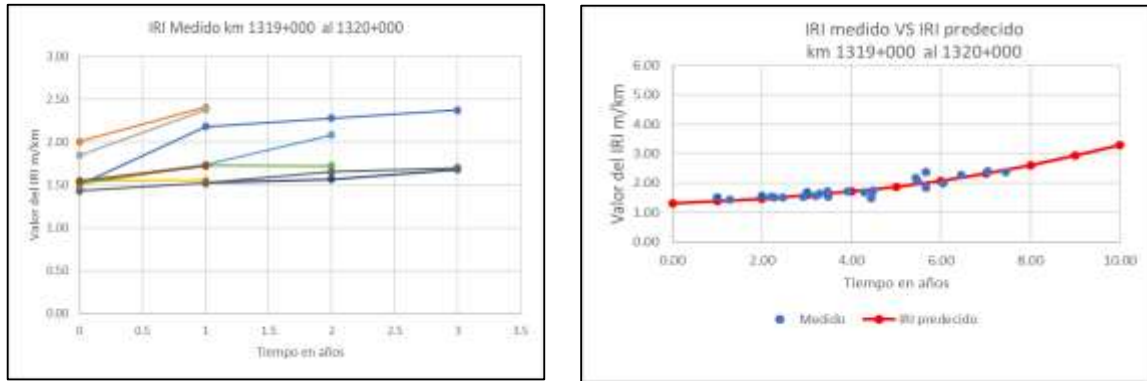


Figura 30

IRI medido vs IRI predecido Km 1325+000 al Km 1328+000

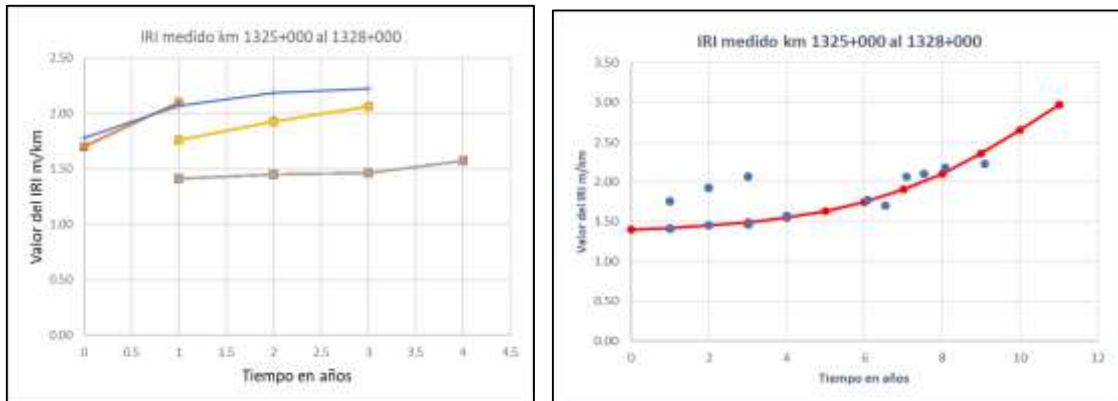
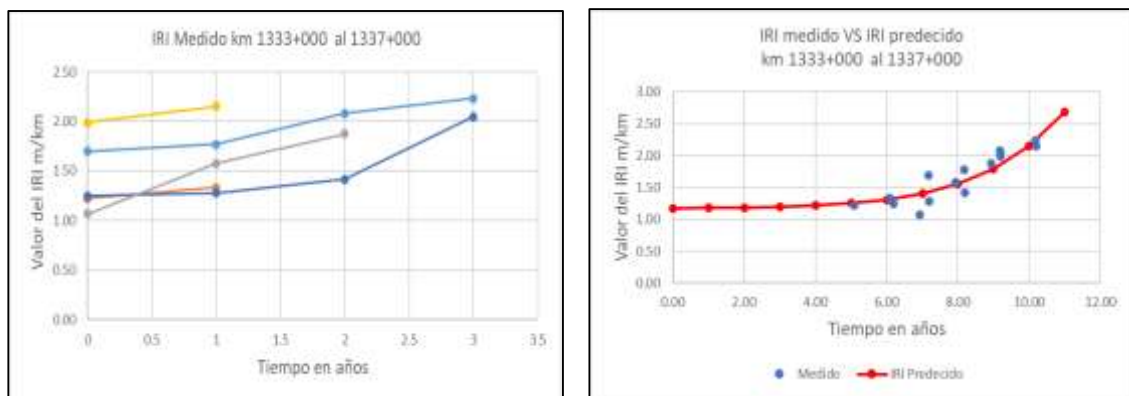


Figura 31

IRI medido vs IRI predecido Km 1333+000 al Km 1337+000



En los siguientes gráficos se observa los resultados de los valores de IRI pronosticado de acuerdo a las mediciones realizadas al tramo de carretera durante los años 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, para todos los tramos homogéneos 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 32

Curva de deterioro Km 1319+000 al Km 1322+000

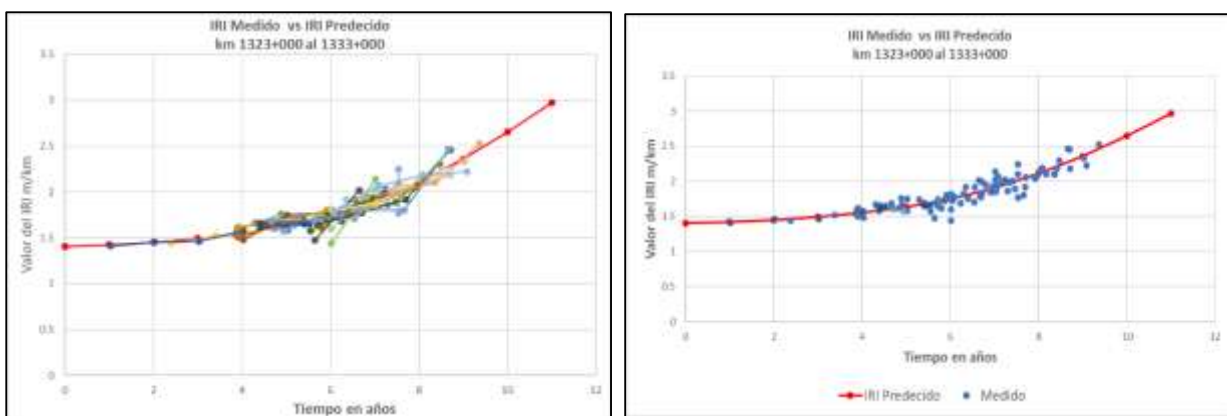


Figura 33

Curva de deterioro Km 1323+000 al Km 1333+000

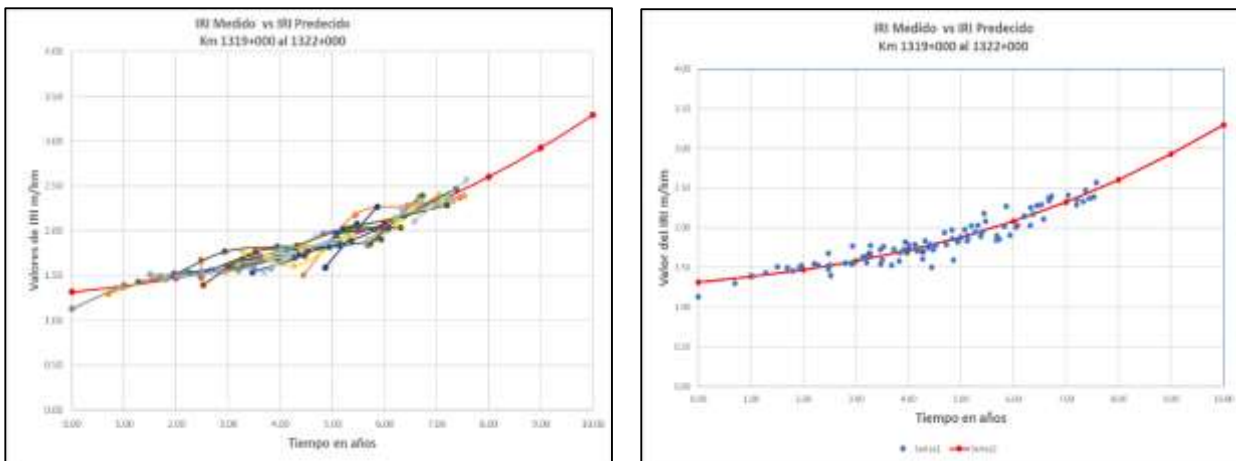


Figura 34

Curva de deterioro Km 1334+000 al Km 1342+000

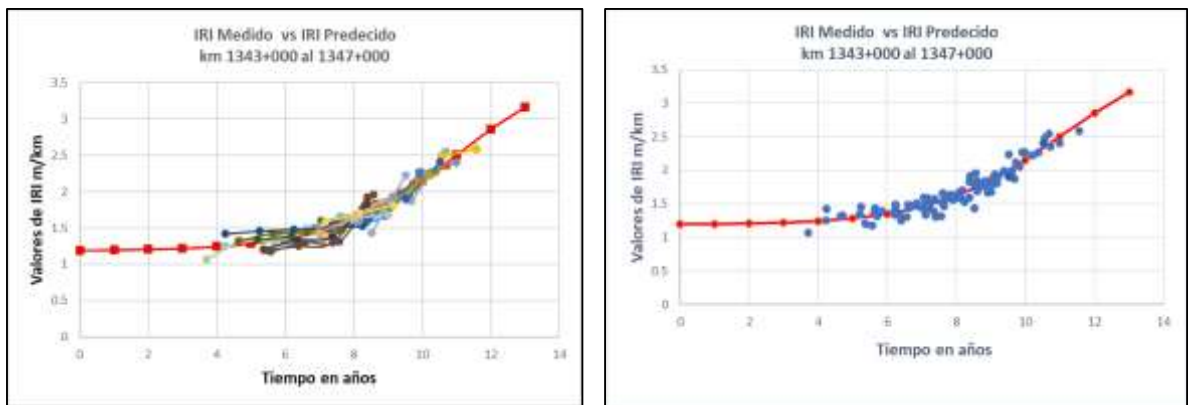


Figura 35

Curva de deterioro Km 1343+000 al Km 1347+000

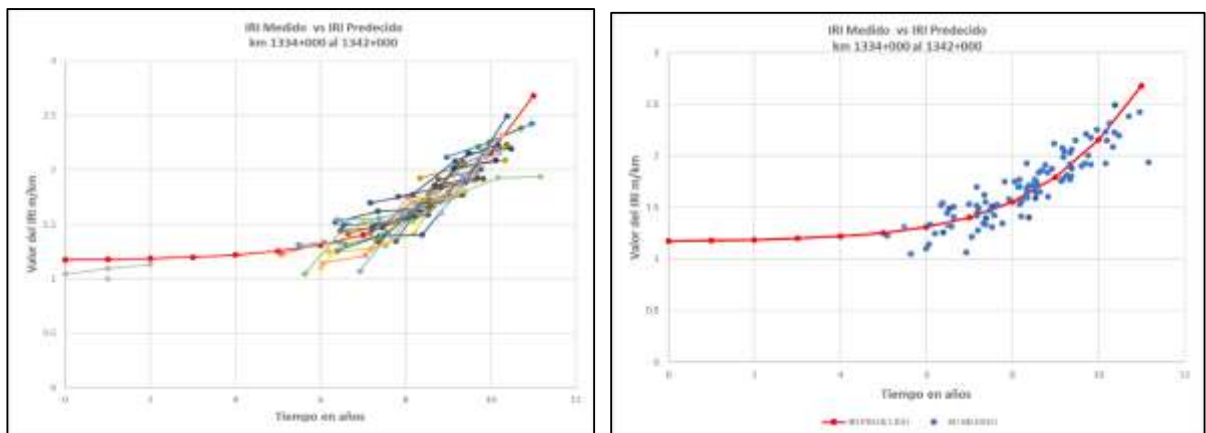
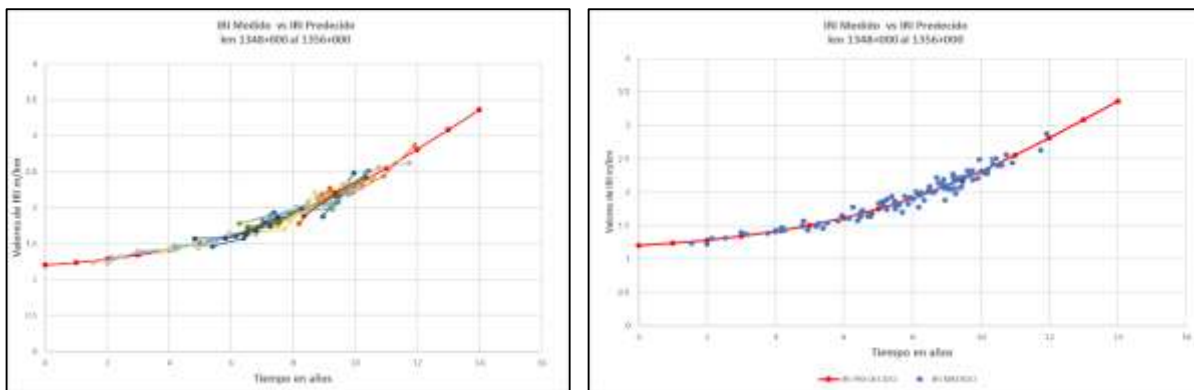


Figura 36

Curva de deterioro Km 1348+000 al Km 1356+000



En la siguiente figura se muestra las curvas de deterioro calculadas con el método empírico donde se muestra los valores de IRI predecido para cada uno de los sectores homogéneos.

Figura 37

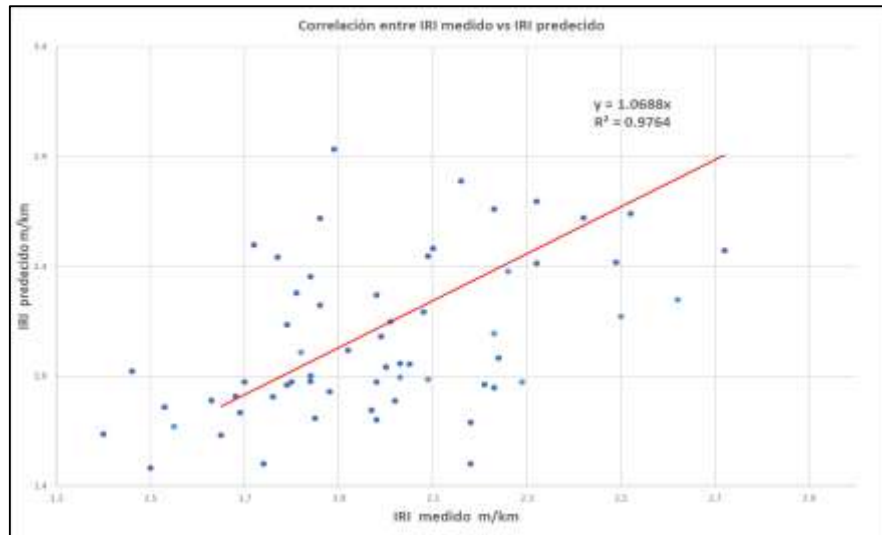
Curvas de deterioro Km 1348+000 al Km 1356+000



Para validar los valores del IRI pronosticados para el año 2021 por el modelo de deterioro empírico desarrollado, se compara los valores pronosticados para el año 2021 con las mediciones realizados en campo y la correlación obtenida se muestra en el gráfico siguiente:

Figura 38

Correlación IRI medido versus IRI pronosticado



4.1.3 Resultados deterioro funcional del pavimento flexible

Se observa que ambos modelos de deterioro (métodos estocásticos probabilístico y empírico), muestran un valor alto de coeficiente de correlación (R^2) y se puede verificar que los modelos desarrollados presentan excelentes cualidades de predicción al ser estas comparadas con las mediciones realizadas en campo por el concesionario de la vía el año 2021. Por este motivo se procedió a calcular el deterioro funcional del pavimento con los valores predcidos de IRI hasta el año 2035. Los cuales se muestran en las siguientes tablas y gráficos.

Tabla 22

Valores de IRI predcido modelo estocástico probabilístico al año 2035

	Año	IRI Predecido	
		m/km	Condición
	2021	2.27	Buena
	2022	2.44	Buena
	2023	2.61	Buena
	2024	2.77	Buena
	2025	2.93	Regular
	2026	3.07	Regular
	2027	3.21	Regular
	2028	3.33	Regular
	2029	3.45	Regular
	2030	3.55	Regular
	2031	3.64	Regular
	2032	3.72	Regular
Para el modelo	2033	3.80	Regular
probabilístico, el IRI	2034	3.86	Regular
	2035	3.91	Regular

estocástico
predecido de determina
con la multiplicación de estado de condición a_0 por la matriz de probabilidad, que se desarrolló con las mediciones de campo del 2016 al 2020, y comparadas con las mediciones de campo 2021, la cual nos permite predecir el comportamiento funcional del pavimento hasta el año 2035, como se puede apreciar en la tabla 22.

Figura 39

Curva de deterioro del IRI método Estocástico Probabilístico

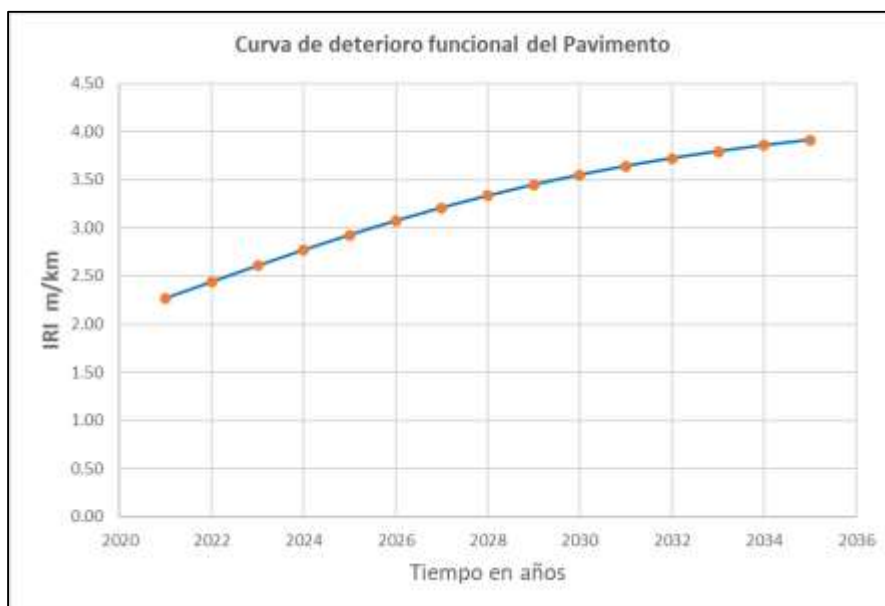


Tabla 23

Valores de IRI predecido con el modelo empírico año 2035

Año	IRI Predecido m/km	Condición
2021	2.00	Buena
2022	2.25	Buena
2023	2.55	Buena
2024	2.90	Buena
2025	3.28	Regular
2026	3.66	Regular
2027	4.04	Regular
2028	4.39	Mala
2029	4.69	Mala
2030	4.95	Mala
2031	5.17	Mala
2032	5.34	Mala
2033	5.47	Mala
2034	5.58	Mala
2035	5.66	Mala

Para el modelo empírico el IRI predecido se determina luego de hallar la fórmula matemática para cada sector homogéneo que fue optimizado con la función solver del MS Excel y los resultados se aprecian en la tabla 23.

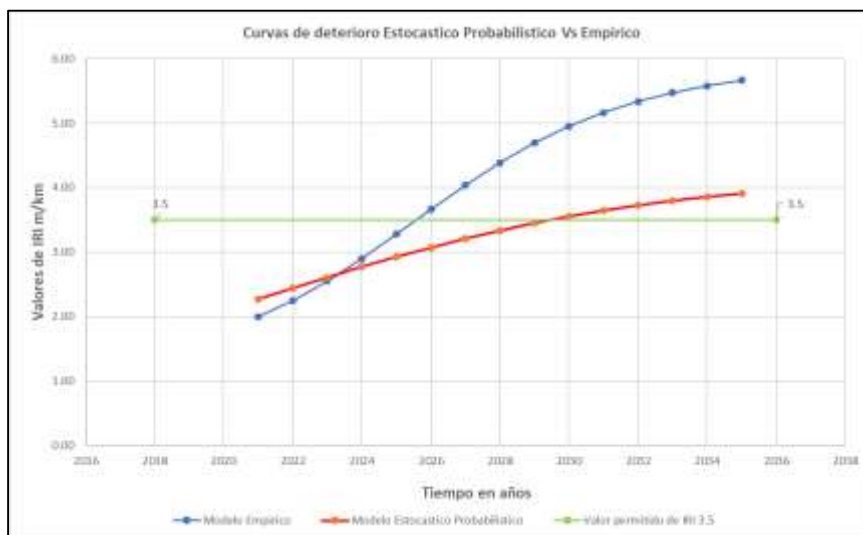
Figura 40

Curva de deterioro del IRI método Empírico



Figura 41

Curvas de deterioro Estocástico Probabilístico Vs Empírico



Para ambos métodos, una vez obtenidos los resultados, donde se representan las curvas de deterioro en función al IRI como se aprecia en la figura 41, las cuales presentan un comportamiento similar, es importante realizar la calibración del sistema que es un proceso sistemático que tiene como objetivo reducir el sesgo entre el comportamiento de un pavimento predicho por un modelo de comportamiento y el comportamiento y el comportamiento real de campo de dicho pavimento (AASHTO, 2008)

4.2 Análisis de Resultados

La correlación obtenida con el desarrollo del modelo de comportamiento de deterioro estocástico – probabilístico, representado en la figura 28, presenta una correlación positiva fuerte y permite validar los valores pronosticados de deterioro para los siguientes 15 años. Se puede apreciar que la curva de deterioro funcional del pavimento de los valores pronosticados del IRI indicados en la figura 39, muestra que el deterioro se incrementa aceleradamente los primeros años hasta el año 2030 y se estabiliza gradualmente para llegar al valor de 3.91 m/km, por este motivo se considera que la cadena de Markov homogénea al pasar el tiempo pierde su capacidad predictiva conforme se va alcanzando el valor máximo.

De la tabla 22 se aprecia que para el 2030 el valor de IRI de 3.55 m/km no cumple con el valor máximo de IRI señalado en el contrato de concesión, donde indica que el valor de IRI de la carretera Puno Juliaca no debe de sobrepasar el parámetro de 3.50 m/km.

De acuerdo con la curva de deterioro funcional del pavimento flexible se determina que hasta el año 2024, el pavimento mantiene su condición de Bueno de acuerdo con la tabla 22, pero a partir del 2025 hasta el año 2035 la condición del pavimento es calificada como regular, de acuerdo con el estado de condición de la tabla 10, (Hoang, 2017).

Respecto al desarrollo del modelo empírico, en las figuras de la 31 a la 36 se muestran los valores del IRI pronosticado por cada tramo homogéneo determinado, de los km 1319+000 al 1322+000, km 1323+000 al 1333+000, km 1334+000 al 1342+000, km 1343+000 al 1347+000 y km 1348+000 al 1356+000, km, los cuales fueron determinados con las mediciones de campo de los años 2016 al 2020, observando un comportamiento creciente similar entre las mediciones de campo y los valores pronosticados del IRI para un periodo estimado de 15 años.

En la figura 37, se observa la curva de deterioro para el tramo de carretera donde se puede verificar la variación del IRI para cada sector homogéneo determinado.

En la tabla 23 para el modelo de deterioro empírico, muestra que los valores de IRI pronosticados se mantienen en buena condición hasta el año 2024, para luego pasar desde el año 2025 al 2027 a una condición de regular, y para el año 2026 un IRI de 3.66 m/km y desde el año 2028 hasta el 2035 la condición del pavimento pasaría a un estado de

condición malo. En la figura 40 se muestra la curva de deterioro del pavimento con la tendencia creciente de los valores de IRI. Dichos resultados confirman y validan la hipótesis general y específica.

Los valores del IRI pronosticados para el año 2021 por los modelos de comportamiento estocástico probabilístico y empírico, haciendo uso de las mediciones de campo desde el 2016 al 2020, conforme se aprecia en la figura 28 y figura 38, mostrando buena correspondencia $y = 0.9608IRI_{med} + 1$ con una correlación de 0.8213 para el modelo estocástico probabilístico y para el modelo empírico $y = 1.0688RI_{med}$ con una correlación de 0.9764, ambos considerados como positivo fuerte, con estos resultados de se logra predecir los valor de IRI anualmente como se muestran en las tablas 22 y 23 , asimismo se aprecia el crecimiento del IRI a través de los años como se muestra en la figura 41.

4.3 Prueba de Hipótesis

Hipótesis Específica 1

- El modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico elaborado utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presenta buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.

Contrastación de Hipótesis Específica 1

A continuación, se realiza la contratación de la hipótesis del modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico elaborado utilizando las mediciones de IRI de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presenta buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.

Los valores del IRI pronosticados para el año 2021 por el modelo de comportamiento de pavimento estocástico probabilístico, desarrollados utilizando las mediciones de los años 2016, 2017, 2018,2019 y 2020, son comparados con los valores de las mediciones de campo realizado en el año 2021, conforme se aprecia en la figura 28 mostrando una correspondencia $y= 0.9608IRI_{med} + 1$ con una correlación de $R^2 = 0.8213$ considerado como positivo fuerte. Dicho resultado respalda y validan la hipótesis específica.

Hipótesis Específica 2

- El modelo de comportamiento de pavimentos empírico elaborado utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presentan buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.

Contrastación de Hipótesis Específica 2

A continuación, se realiza la contrastación de la hipótesis del modelo de comportamiento de pavimentos empírico elaborado utilizando las mediciones del IRI de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presentan buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.

Los valores del IRI pronosticados para el año 2021 por el modelo de comportamiento de pavimento empírico, desarrollados utilizando las mediciones de los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020, son comparados con los valores de las mediciones de campo realizado en el año 2021, conforme se aprecia en la figura 38 mostrando una correspondencia $y = 1.0688Iri$ con una correlación de $R^2 = 0.9764$ considerado como positivo fuerte. Dicho resultado respalda y validan la hipótesis específica.

Hipótesis Específica 3

Los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empíricos, permiten predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.

Contrastación de Hipótesis Específica 3

Con los valores pronosticados para el año 2021 por los modelos de deterioro estocástico probabilístico y empírico, elaborados con las mediciones de los años 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020, son comparados con los valores de las mediciones de campo realizadas en el año 2021, conforme se aprecia en la figura 28 y figura 38, mostrando buena correspondencia $y = 0.9608IRI_{med} + 1$ con una correlación de 0.8213 para el modelo estocástico probabilístico y para el modelo empírico $y = 1.0688RI_{med}$ con una correlación de 0.9764, ambos considerados como positivo fuerte.

Por lo descrito ambos modelos de comportamiento de pavimento presentan buena correlación que permiten determinar el comportamiento funcional del pavimento, así como se muestra en las tablas 22 y 23, donde se aprecia que, para el modelo estocástico probabilístico a partir del año 2025 el pavimento tendrá una condición de regular y el año 2030 no cumplirá con el parámetro máximo de IRI de acuerdo al contrato de concesión que es de 3.5m/km, para el modelo de deterioro empírico se aprecia que desde el año 2026 el IRI no cumple con el contratos de concesión con un estado de pavimento que cambia desde regular hasta llegar a condición de mala, dichos resultados validan y comprueban la hipótesis específica.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. La elaboración de los modelos de comportamiento estocástico-probabilístico y empírico, utilizando el índice de rugosidad internacional (IRI) medidos durante los años 2016 al 2020 de la carretera Puno – Juliaca, presentan buena correlación la cual permite predecir el deterioro funcional del pavimento flexible como se muestra en las figuras 28 y 29.
2. El modelo de comportamiento de pavimento Estocástico Probabilístico desarrollado utilizando las mediciones de IRI del año 2016 al 2020, presenta una correlación moderada fuerte de $R = 0.8213$ entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI del año 2021 como se muestra en la figura 28, el cual se encuentra en el rango de $0.8 < R^2 < 1$, por lo tanto, se valida y acepta la primera hipótesis específica.
3. El modelo de comportamiento de pavimento Empírico, desarrollado utilizando las mediciones de IRI del año 2016 al 2020, presenta una correlación moderada fuerte de $R = 0.9764$ entre los valores medidos y los valores de predicción del IRI del año 2021 como se muestra en la figura 38, el cual se encuentra en el rango de $0.8 < R^2 < 1$, por lo tanto, se valida y acepta la segunda hipótesis específica.
4. los modelos de comportamiento estocástico probabilístico y empírico, presentan buenas cualidades predictivas al ser comparadas con los datos tomados en campo, estos modelos permitirán conocer el deterioro funcional del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el que estará la carretera en un periodo de tiempo como se muestra en la figura 22 y 23, y permitirán al concesionario o administrador de la vía, enriquecer el sistema de gestión de pavimentos, dándole varias alternativas de intervención las cuales las condiciones de seguridad y confort. Asimismo, se priorizarán proyectos de intervención y reducirán costos de rehabilitación.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda a los gestores o entidades comprometidas con la infraestructura vial, realizar mediciones más frecuentes (dos mediciones al año), con lo cual se puede tener mayor cantidad de datos y de esta manera minimizar la variabilidad en las mediciones, que permitan conocer el deterioro gradual del pavimento.
2. A los diferentes gestores o entidades comprometidas con la infraestructura vial del país, elaborar un sistema de monitoreo continuo y permanente del estado de las vías en que permita actualizar en tiempo real los modelos de deterioro con data funcional y estructural, para predecir el deterioro de pavimentos y mejorar el sistema de gestión de pavimentos.
3. Debido a que nuestro país cuenta con diferentes condiciones climáticas y cada tramo de carretera cuenta con su propio flujo vehicular, se recomienda incluir estos factores en la elaboración de modelos de comportamiento de pavimentos, con la inclusión de estos factores permitiría predecir con mayor precisión el estado del pavimento. También se debe de considerar otros indicadores de deterioro como porcentajes de agrietamientos, fricción, deformaciones, ahuellamientos, PCI, desprendimientos entre otros, lo cual nos permitiría capturar de mejor manera los fenómenos de deterioro a los cuales están expuesto los pavimentos.
4. Determinar los costos de los diferentes métodos de intervención a partir de los modelos de deterioro, con lo cual se pueda comparar sus efectos en el deterioro del pavimento y esto también sirva para la toma de decisiones que aseguren la seguridad y confort de los usuarios de la vía.

REFERENCIAS

- 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*
- Benedict, S, Somerville, M, Vassiliki, L, Ortiz-Garcia, J, Rupiny, K, and Godfrey, H, (2011). Stochastic model for strategic assessment of road maintenance. pp.53-60.
- Butt, A., Shahin M., Carpenter, S., & Carnahan, J (1994), Application of 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.
- G. Thenoux, F. Halles *Metodología simplificada de priorización de conservación de pavimentos a nivel de red*
- Guerra–García, G., (2006). “Déficit de recursos para el Mantenimiento de la Infraestructura Vial y alternativas de solución”. Ministerio de Economía y Finanzas. Hernández S., Fernández C., Baptista L., Metodología de la Investigación 6ta edición.
- 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.
- Sotil, A., (2013). Propuesta de sistema de gestión de pavimentos para municipalidades y gobiernos locales
- 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.

Zimmerman, K., and Broten, M., (1999). Development of Performance Models for Pavement Management System. Presented at 24th International Air Transportation Conference, ASCE

ANEXOS



Anexo 1: Declaración de Autenticidad y no Plagio.

Anexo 2: Formato de Autorización para realizar la investigación

Anexo 3: Matriz de consistencia

Anexo 1: Declaración de autenticidad y no plagio

FORMATO 4.3: Declaración de autenticidad y no plagio

	Universidad Ricardo Palma	Escuela de Posgrado
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y NO PLAGIO		
DECLARACIÓN DEL GRADUANDO		
Por el presente, el graduando: <i>(Apellidos y nombres)</i>		
Vega Suaña, Arthur Anthony		
en condición de egresado del Programa de Posgrado:		
Ingeniería Vial con Mención en Carreteras, Puentes y Túneles		
deja constancia que ha elaborado la tesis intitulada:		
Modelos de comportamientos de pavimentos utilizando mediciones del Índice de Rugosidad Internacional para predecir el deterioro funcional		
<p>Declara que el presente trabajo de tesis ha sido elaborado por el mismo y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica, de investigación, profesional o similar.</p>		
<p>Deja constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no ha asumido como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de la Internet.</p>		
<p>Asimismo, ratifica que es plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asume la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento y es consciente de las connotaciones éticas y legales involucradas.</p>		
<p>En caso de incumplimiento de esta declaración, el graduando se somete a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y los dispositivos legales vigentes.</p>		
 <small>Dr. CP. ARTHUR ANTONIO VEGA SUAÑA Página 12 de 40 - 1/20</small>	10.02.2022	
Firma del graduando	Fecha	

ANEXO 2: Autorización para realizar la investigación

FORMATO 6: Formato de Autorización para realizar la investigación
CÓDIGO: FARI-06-2020-EPG-UGA

 UNIVERSIDAD RICARDO PALMA		Escuela de Posgrado	
AUTORIZACIÓN PARA REALIZAR LA INVESTIGACIÓN			
DECLARACIÓN DEL RESPONSABLE DEL ÁREA O DEPENDENCIA DONDE SE REALIZARA LA INVESTIGACIÓN			
Dejo constancia que el área o dependencia que dirijo, ha tomado conocimiento del proyecto de tesis titulado:			
Modelos de comportamientos de pavimentos utilizando mediciones del Índice de Rugosidad Internacional para predecir el deterioro funcional			
el mismo que es realizado por el Sr. / Srta. Estudiante (Apellidos y nombres):			
Vega Suaña, Arthur Anthony			
en condición de estudiante – investigador del Programa de:			
Ingeniería Vial con Mención en Carreteras, Puentes y Túneles			
Así mismo señalamos, que según nuestra normativa interna procederemos con el apoyo al desarrollo del proyecto de investigación, dando las facilidades del caso para aplicación de los instrumentos de recolección de datos.			
En razón de lo expresado doy mi consentimiento para el uso de la información y/o la aplicación de los instrumentos de recolección de datos:			
Nombre de la empresa:		Autorización para el uso del nombre de la Empresa en el Informe Final	<input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO
Concesionaria Vial del Sur - COVISUR			
Apellidos y Nombres del Jefe/Responsable del área:		Cargo del Jefe/Responsable del área:	
Pacheco Mireya		Área Técnica	
Teléfono fijo (incluyendo anexo) y/o celular:		Correo electrónico de la empresa:	
054 271509		secretaria.aqp@covisur.com.pe	
		23.02.2022	
		Fecha	

Anexo 3 Matriz de Consistencia

Modelos de comportamientos de pavimentos utilizando mediciones del Índice de Rugosidad Internacional para predecir el deterioro funcional

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
General	General	General	Variable Independiente	
¿Cuál de los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empírico, elaborados con las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2016 al 2020, se correlacionan para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible la carretera Puno – Juliaca?	Elaborar modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empírico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2016 al 2020, y determinar su correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible de la carretera Puno – Juliaca.	Los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empírico, elaborados con las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional entre los años 2016 al 2020, presentan buena correlación para predecir el deterioro funcional del pavimento flexible de la carretera Puno – Juliaca.	Modelos de comportamiento de pavimentos - Probabilístico estocástico y empírico	<u>Método de Investigación</u> Analítico <u>Enfoque</u> Cuantitativo
Específicos	Específicos	Específicos	Variable Dependiente	
1. ¿Cuál será el modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y la correlación entre los valores de las mediciones y valores obtenidos para el año 2021??	1. Elaborar el modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y determinar la correlación entre los valores medidos y los valores obtenidos para el año 2021.	1. El modelo de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico elaborado utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presenta buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.	Correlación entre los valores medido y predecidos de IRI.	<u>Tipo de Investigación</u> Aplicada <u>Nivel de Investigación</u> Descriptivo Correlacional
2. ¿Cuál será el modelo de comportamiento de pavimentos empírico, utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y la correlación entre los valores de las mediciones y valores obtenidos con el modelo?	2. Elaborar el modelo de comportamiento de pavimentos empírico utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, y determinar la correlación los valores medidos y los valores obtenidos para el año 2021	2. El modelo de comportamiento de pavimentos empírico elaborado utilizando las mediciones del Índice de Rugosidad Internacional de la carretera Puno – Juliaca entre los años 2016 al 2020, presentan buena correlación entre los valores de las mediciones y los valores obtenidos al 2021.	Correlación entre los valores medido y predecidos de IRI.	<u>Diseño de investigación</u> Experimental
3. ¿Cómo será el deterioro funcional del pavimento flexible, según los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empíricos obtenidos?	3. Predecir el deterioro funcional del pavimento flexible, según los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico – probabilístico y empíricos elaborados.	3. Los modelos de comportamiento de pavimentos estocástico-probabilístico y empíricos, permiten predecir el deterioro funcional del pavimento flexible.	Deterioro funcional del pavimento flexible	