



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Aplicación de Cadenas de Markov al modelado de deterioros de pavimentos en México

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

**Presenta:**

Zaydith Daniel Márquez Mendoza

**Dirigido por:**

Dr. Paul Garnica Anguas

**SINODALES**

Dr. Paul Garnica Anguas  
Presidente

Dr. José Jesús Alonso Mota  
Secretario

M. en C. José Ricardo Solorio Murillo  
Vocal

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Suplente

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez  
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Noviembre de 2013  
México

## RESUMEN

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

(Palabras clave: **cadenas de Markov, deterioro del pavimento, IRI, Monte Carlo**)

## SUMMARY

To assess the cost of pavement maintenance for roads it is necessary to apply pavement deterioration models that reflect the rate at which this degradation occurs in response to numerous agents. There are various methods for predicting pavement deterioration, which can be categorized into four types: subjective, purely mechanistic, regression and empirical-mechanistic. In turn, these can be categorized into deterministic and probabilistic. This paper addresses a methodology based on homogeneous Markov chains, which is a stochastic process that depends only on the current state of the process and not on previous states. The deterioration modeling study focuses only on the IRI progression as an indicator of pavement deterioration. Datasets have been prepared consisting of IRI from two roads located in southeast Mexico; these values were averaged for 100 m-long segments and grouped into ranges to estimate the change in pavement smoothness from year to year. The results of the models developed denote a typical behavior of pavement deterioration in the sections studied. The deterioration prediction model based on Markov chains using IRI has several advantages including the fact that few data are required for implementation, resulting in lower costs when compared to other alternatives.

(Keywords: Markov chains, pavement deterioration, IRI, Monte Carlo)

## DEDICATORIAS

A mis padres, por su amor, sus enseñanzas, formación de valores y forjar en mi un espíritu de superación.

A mi esposa e hijas por su apoyo, amor y comprensión en todos aquellos momentos difíciles durante el desarrollo de mis estudios.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todos y cada uno de mis s nodos por sus valiosos comentarios y sugerencias para el desarrollo de la presente tesis.

A mis maestros por sus valiosas enseñanzas, compartir sus conocimientos, experiencias, tiempo y dedicación.

A Cal y Mayor y Asociados por apoyarme, permitir y dar las facilidades para realizar los estudios de posgrado.

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>Página</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	- 1 -
1.1 Justificación.....	- 2 -
1.2 Descripción del problema .....	- 3 -
1.3 Objetivo .....	- 5 -
1.3.1 Objetivos específicos .....	- 5 -
1.4 Hipótesis .....	- 5 -
<b>2. DETERIORO DEL PAVIMENTO</b> .....	- 6 -
2.1 Generalidades .....	- 6 -
2.2 Causas del deterioro de pavimentos.....	- 7 -
2.3 Proceso del deterioro de pavimentos .....	- 8 -
2.4 Indicadores de deterioro .....	- 9 -
2.4.1 Capacidad funcional .....	- 9 -
2.4.2 Deterioros superficiales .....	- 9 -
2.4.1 Capacidad estructural .....	- 11 -
2.5 Índice Internacional de Regularidad .....	- 12 -
2.6 Sistemas de gestión de pavimentos .....	- 15 -
2.7 Modelos de deterioro .....	- 18 -
<b>3. CADENAS DE MARKOV</b> .....	- 21 -
3.1 Proceso de Markov.....	- 21 -
3.2 Matriz de probabilidad de transición .....	- 24 -
3.3 Vectores de estado de condición inicial .....	- 26 -
3.4 Cadenas homogéneas .....	- 27 -
3.5 Cadenas no homogéneas .....	- 29 -
3.6 Aplicaciones a la gestión de activos carreteros .....	- 30 -
<b>4. APLICACIÓN DE CADENAS DE MARKOV A LA PREDICCIÓN DE DETERIORO A NIVEL DE RED</b> .....	- 32 -
4.1 Descripción de los tramos de prueba.....	- 32 -
4.2 Procesamiento de datos .....	- 33 -
4.3 Obtención de matrices de transición .....	- 35 -
4.4 Descripción de resultados .....	- 39 -
4.5 Curvas de deterioro con cadenas de Markov .....	- 45 -

4.6 Limitaciones del proceso con cadenas de Markov homogéneas.....	- 50 -
<b>5. ALGORITMO PARA OBTENER CURVAS DE DETERIORO .....</b>	<b>- 51 -</b>
5.1 Simulación Montecarlo.....	- 51 -
5.2 Descripción del algoritmo de Peirce.....	- 52 -
5.3 Aplicación del algoritmo de Peirce .....	- 55 -
5.4 Resultados obtenidos .....	- 56 -
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>- 65 -</b>
<b>7. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....</b>	<b>- 65 -</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>- 69 -</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

página

1 Escala para evaluar el índice de servicio actual (ISA).....	- 12 -
2 Modelo de cuarto de carro (publicación técnica 108, IMT).....	- 13 -
3 Escala estimativa de regularidad de un camino para superficies de concreto asfáltico (ASTM E1926-08).....	- 14 -
4 Ejemplo de cadena de Markov, Gráfica y matriz de transición (reporte 08-71 de la NCHRP).....	- 22 -
5 Clasificación de procesos de Markov aplicados a la modelación del desempeño de pavimentos (Li, 1997).....	- 28 -
6 Deterioro del pavimento para tres diferentes condiciones ambientales (Li, 1997).....	- 29 -
7 Formulación de un diagrama de caja.....	- 35 -
8 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 1 de la carretera A.....	- 42 -
9 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 2 de la carretera A.....	- 42 -
10 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 1 de la carretera B.....	- 43 -
11 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 2 de la carretera B.....	- 43 -
12 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 3 de la carretera B.....	- 44 -
13 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 4 de la carretera B.....	- 44 -
14 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 5 de la carretera B.....	- 45 -
15 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 1 de la carretera A.....	- 46 -
16 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 2 de la carretera A.....	- 46 -
17 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 1 de la carretera B.....	- 47 -
18 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 2 de la carretera B.....	- 47 -
19 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 3 de la carretera B.....	- 48 -
20 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 4 de la carretera B.....	- 48 -
21 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 5 de la carretera B.....	- 49 -
22 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera A, Tramo 1.....	- 57 -
23 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera A, Tramo 2.....	- 57 -
24 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 1.....	- 58 -
25 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 2.....	- 58 -
26 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 3.....	- 59 -
27 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 4.....	- 59 -
28 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 5.....	- 60 -
29 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera A, Tramo 1.....	- 61 -
30 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera A, Tramo 2.....	- 61 -
31 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 1.....	- 62 -
32 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B Tramo 2.....	- 62 -
33 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 3.....	- 63 -



34 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 4 .....	- 63 -
35 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 5 .....	- 64 -

## ÍNDICE DE TABLAS

**página**

1 Ejemplo de matriz de probabilidad de transición (Reporte 713, NCHRP).....	- 25 -
2 Tramos de estudio, carretera A.....	- 33 -
3 Tramos de estudio, carretera B.....	- 33 -
4 Clasificación de estados de condición del pavimento con base en IRI.....	- 34 -
5 Representación matricial de segmentos de 100m en el ciclo de un año, carretera A, Tramo 1(a), Tramo 2 (b).....	- 36 -
6 Representación matricial de segmentos de 100 m en el ciclo de un año, carretera B, Tramo 1(a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c), Tramo 4 (d), Tramo 5 (e).....	- 36 -
7 Matrices de probabilidad de transición de la carretera A, Tramo 1(a), Tramo 2 (b).....	- 38 -
8 Matrices de probabilidad de transición de la carretera B, Tramo 1(a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c), Tramo 4 (d), Tramo 5 (e).....	- 38 -
9 Pronóstico de condición futura del pavimento con base en IRI, carretera A.....	- 40 -
10 Pronóstico de condición futura del pavimento con base en IRI, carretera B.....	- 41 -
11 Ejemplo de matriz de probabilidad de transición acumulada.....	- 52 -
12 Ejemplo de estados de condición con rangos de IRI y marcas de clase.....	- 52 -
13 Algoritmo para modelación de la curva de deterioro con simulación Monte Carlo.....	- 53 -
14 Matrices de probabilidades de transición acumuladas de la carretera A, Tramo 1(a), Tramo 2 (b).....	- 55 -
15 Matrices de probabilidades de transición acumuladas de la carretera B, Tramo 1(a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c), Tramo 4 (d), Tramo 5 (e).....	- 56 -

## 1. INTRODUCCIÓN

La conservación de la infraestructura carretera representa beneficios en general para la sociedad. Las mayores inversiones de conservación se dan en el rubro de pavimentos.

Existen diversas herramientas para el Modelado de deterioros del pavimento, el presente trabajo aborda el uso de las Cadenas de Markov para la predicción del deterioro con base en la progresión del Índice Internacional de Regularidad, (IRI por sus siglas en inglés) en lo sucesivo se denotará por “IRI”.

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

En la presente investigación se utilizan cadenas de Markov homogéneas apoyándose de la simulación Monte Carlo para obtener curvas representativas de deterioro del pavimento.

En el capítulo 2 se aborda el tema de deterioros del pavimento, en el cual se describen los distintos tipos de deterioros, las causas de los mismos, indicadores de deterioro, los sistemas de gestión de pavimentos y la clasificación de modelos de deterioro existentes.

En el capítulo 3 se tratan las generalidades de las cadenas de Markov, los procesos de Markov, las características y reglas para el establecimiento de las matrices de probabilidad de transición, vectores de estado inicial, y clasificación de las cadenas de Markov.

En el capítulo 4 se presenta la aplicación de cadenas de Markov homogéneas para la predicción del deterioro del pavimento con base en IRI, de dos carreteras ubicadas en el Sureste Mexicano.

En el capítulo 5 se describen los aspectos generales de la modelación Monte Carlo, así como el algoritmo utilizado para obtener curvas de deterioro.

En el capítulo 6 se describen las conclusiones y recomendaciones acerca de la aplicación de cadenas de Markov para modelar el deterioro de los pavimentos en carreteras de México.

El capítulo 7 contiene un glosario de los términos usados para el presente trabajo.

Finalmente en el capítulo 8 se presenta la bibliografía consultada para el desarrollo del presente trabajo.

### **1.1. Justificación**

Dada la escasa o nula información histórica con la cual se cuenta en México se torna necesario implementar herramientas que apoyen la estimación del deterioro del pavimento en carreteras mexicanas contando con pocos datos, para lo cual se propone la implementación de un proceso estadístico basado en cadenas de Markov. Este proceso se ha implementado en otros países como Canadá, Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Australia, Escocia, entre otros, y se han obtenido resultados satisfactorios.

Los modelos de Markov pueden ser usados para el modelado del desempeño del pavimento. Las ventajas de los Modelos de Markov son que se pueden implementar con dos años de datos, mientras que los modelos de regresión requieren datos de varios años. Los modelos de Markov están basados en el cambio de condición de un pavimento sobre el periodo de un año (McLeod y Uchwat, 2011).

## 1.2. Descripción del problema

En México se tiene una extensa red carretera, contándose aproximadamente con 366 mil kilómetros de carreteras de las cuales 48,660 kilómetros corresponden a carreteras federales y autopistas, 77,964 km a caminos alimentadores o estatales y 239,717 km a caminos rurales y brechas (no pavimentados) (SCT, 2010).

La inversión dedicada a la conservación de carreteras es limitada, por lo tanto es necesario optimizar los recursos disponibles.

Las mayores inversiones en conservación de infraestructura carretera son las referidas a trabajos de rehabilitación del pavimento. En México existen pocas herramientas disponibles para pronosticar el comportamiento futuro del pavimento y con base en ello estimar los programas de conservación del pavimento.

Comúnmente para estimar los programas de conservación del pavimento se utilizan herramientas de diseño y revisión del pavimento y con base en la información obtenida y la experiencia se programan trabajos de conservación a largo plazo. Por ejemplo para el caso de pavimentos flexibles, en México se cuenta con el método de diseño del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual es un método teórico-experimental que se fundamenta en las investigaciones realizadas sobre tramos de prueba, evaluación de carreteras y pista circular durante el período de 1962-1973 (Corro y Prado, 1974). El método comprende los modelos mecanicistas establecidos en los informes 325 (Corro y Prado, 1974) y 444 (Corro *et al.*, 1981) para análisis por deformación y por fatiga

Otra herramienta considerada en México para el diseño de pavimentos y análisis de vida residual es la guía de diseño de la Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte, AASHTO por sus siglas en inglés (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993).

En 2004 la Cooperativa Nacional del programa de investigación de carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés) lanzó una nueva “Guía de diseño empírico-mecanicista de estructuras de pavimentos nuevos y rehabilitados”, sin embargo, no se ha utilizado en

México dada la falta de información histórica para alimentar al programa y las dificultades para la adaptación de dicha guía a las condiciones que imperan en México.

Actualmente existen herramientas para modelar el comportamiento del pavimento y obtener con base en esto un programa de conservación de pavimentos, tal es el caso del HDM-4, la cual es una herramienta para gestión de pavimentos. Esta herramienta fue desarrollada por un grupo de organizaciones académicas, de gobierno y privadas coordinadas por la Universidad de Birmingham (Reino Unido), bajo los auspicios de la Asociación Mundial de Carreteras y retomando desarrollos previos del Banco Mundial. Esta herramienta requiere de la utilización de datos históricos del comportamiento del pavimento para calibrarla e implementarla adecuadamente, la desventaja de este sistema es la gran cantidad de información con la cual se debe alimentar, ya que se requieren datos históricos de varios años.

Los modelos empírico-mecanicistas requieren la inclusión de información histórica del comportamiento del pavimento, tales como IRI (Índice de regularidad Internacional), profundidad de roderas, deflexiones, características del pavimento, caracterización de materiales, tránsito y clima. Además la mayor parte de las agencias no cuentan con datos suficientes para poder alimentar a los sistemas de gestión de pavimentos.

Para el caso del HDM-4 en México no se han realizado calibraciones al modelo que permitan precisar con mayor grado de certidumbre el comportamiento futuro del pavimento.

Hoy en día muchas de las entidades encargadas de la conservación de infraestructura carretera realizan su programación de conservación con base en su experiencia y recursos disponibles, es necesario contar con herramientas que permitan una toma de decisiones con mayor certidumbre respecto a la relación costo beneficio de las inversiones.

### **1.3. Objetivo**

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

#### **1.3.1. Objetivos específicos**

1. Proponer una forma para caracterizar el estado de las carreteras con escalas adecuadas en rangos de IRI para aplicar al proceso de modelado mediante cadenas de Markov.
2. Definir matrices de transición adecuadas para el entorno en México.
3. Recabar información histórica referente a datos de medición de IRI de tramos representativos de la red federal de carreteras

### **1.4. Hipótesis**

Si se preparan series de datos sobre el deterioro de pavimentos en México de manera que cumplan con las premisas del modelo de cadenas de Markov, entonces, al aplicar este modelo, se pueden obtener pronósticos de deterioro con un grado de aproximación similar al que se ha logrado en otros países.

## **2. DETERIORO DEL PAVIMENTO**

### **2.1. Generalidades**

En general, el grado de deterioro de un pavimento es función del tipo de defecto observado, de su severidad y de su densidad (o área afectada de pavimento).

La estructura de un pavimento se ve sometida a diversos factores que modifican su condición.

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

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

La modelación de pronóstico de deterioro del pavimento es un elemento esencial para un sistema de gestión de pavimentos eficiente (Daeseok *et al.*, 2012).

Los modelos de deterioros son el corazón de un sistema de gestión de pavimentos (Le Than, Nguyen Dinh y Kiyoshi, 2008).

El estudio y desarrollo de modelos de desempeño del pavimento han recibido gran ímpetu de las agencias que empiezan con el desarrollo o actualización de sus sistemas de gestión de pavimentos (Salem *et al.*, 2003).



## 2.2. Causas del deterioro de pavimentos

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

- Diseño
- Tránsito
- Clima
- Edad
- Control de calidad
- Mantenimiento

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

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

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

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

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

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

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

Identificar y analizar los factores que afectan el ciclo de vida del desempeño de estructuras de pavimento son esenciales para desarrollar modelos de desempeño. Hudson *et al* (1997) agrupan los factores que afectan el deterioro de la infraestructura en 5 categorías: i) carga/uso ii) medio ambiente iii) material iv) calidad de construcción v) efectos de interacción.

### **2.3. Proceso de deterioro del pavimento**

El deterioro del pavimento a través del tiempo es un proceso continuo originado por diversos factores como el tránsito, clima, propiedades de los materiales que constituyen la estructura del pavimento, las acciones de mantenimiento llevadas a cabo, entre otros.

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

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

Bajo circunstancias o eventos específicos como precipitaciones atípicas, incremento del tránsito en los vehículos pesados, el deterioro del pavimento tiende a incrementarse en forma acelerada en períodos que se podrían clasificar como puntuales si tomamos la referencia de un año como unidad de tiempo.

## **2.4. Indicadores de deterioro**

Tanto para pavimentos asfálticos como para hidráulicos podemos agrupar a los indicadores en 3 grupos.

- Capacidad funcional
- Deterioros superficiales
- Capacidad estructural

### **2.4.1. Capacidad funcional**

Para el caso de pavimentos asfálticos los indicadores relacionados con la capacidad funcional del pavimento podemos citar la regularidad, fricción y textura.

La regularidad del pavimento es la medida más usada para representar el desempeño del mismo, tanto por su costo como por reflejar directamente el confort del usuario (Hunt y Bunker, 2003).

La superficie de rodamiento debe proporcionar un adecuado nivel de fricción en la interfaz neumático - pavimento para proveer seguridad de operación a los vehículos (López y Garnica, 2001).

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

### **2.4.2. Deterioros superficiales**

El deterioro superficial del pavimento está directamente relacionado con la pérdida del nivel de servicio del pavimento (Haas *et al.*, 1994).

La medida del deterioro del pavimento debe incluir un detalle razonable, e identificar el tipo, severidad y extensión del mismo (Haas *et al.*, 1994), este proceso comúnmente es nombrado como levantamiento de deterioros.

En el grupo de deterioros superficiales en pavimentos asfálticos se relacionan los agrietamientos, desprendimientos, baches y roderas.

#### **a. Agrietamientos**

De acuerdo con el manual de identificación de deterioros del programa de largo plazo del desempeño de pavimentos (LTTP, por sus siglas en inglés) emitido por la Agencia Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA, por sus siglas en inglés), los agrietamientos pueden ser agrupados en agrietamientos por fatiga, en bloques, de borde, longitudinal, de reflexión y agrietamientos transversales.

- a.1 **Agrietamientos por fatiga.** Se dan por la repetición de las cargas vehiculares, las grietas pueden ser seriadas o interconectadas en estado temprano de desarrollo. Se desarrollan en formas de piezas angulares, usualmente menores de 0.3 m en su lado más largo, característicamente con patrón piel de cocodrilo en estados superiores.
- a.2 **Agrietamientos en bloque.** Un patrón de agrietamientos que dividen al pavimento en piezas aproximadamente rectangulares. El rango de tamaño de los bloques es de 0.1 m<sup>2</sup> a 10 m<sup>2</sup>.
- a.3 **Agrietamiento de borde.** Aplicable solo a pavimentos con hombros sin pavimentar. Agrietamientos en forma de media luna, o grietas pobres continuas las cuales intersectan el borde del pavimento y están localizadas dentro de 0.6 m del borde del pavimento, adyacente al hombro.
- a.4 **Agrietamiento longitudinal.** Grietas predominantemente paralelas al centro de línea del pavimento. La diferencia de medir dentro y fuera de la rodada es significativa.
- a.5 **Reflexión de grietas en juntas.** Son grietas en pavimentos de carpetas de concreto asfáltico, que ocurren sobre las juntas de pavimento de concreto hidráulico.
- a.6 **Agrietamiento transversal.** Grietas predominantemente perpendiculares al centro de línea del pavimento.

### **b. Desprendimientos**

Desgaste de la superficie del pavimento causada por el desprendimiento de partículas de agregados y pérdida de ligante asfáltico. Los rangos de desprendimiento van de pérdidas de finos a pérdida de granos gruesos y en última instancia a una superficie muy rugosa con oquedades y pérdida obvia de agregados.

### **c. Baches**

Son cavidades en la superficie del pavimento que asemejan la forma de un tazón de tamaño variado. La magnitud mínima en planta es de 150 mm.

### **d. Roderas**

Depresiones longitudinales que se forman en la superficie de la huella de la rodada de un vehículo. Puede tener asociado desplazamiento transversal.

## **2.4.3. Capacidad estructural**

Entre los indicadores de deterioro relacionados con la capacidad estructural se encuentran las deflexiones y espesores de las capas.

La capacidad estructural es un concepto de ingeniería que indica la capacidad del pavimento para soportar adecuadamente las cargas de tránsito diseñadas.

La evaluación de la capacidad estructural del pavimento puede proveer una valiosa información relativa al comportamiento esperado del pavimento (Haas *et al.*, 1994).

Se pueden realizar mediciones destructivas y no destructivas de la capacidad estructural del pavimento. Las pruebas no destructivas se realizan comúnmente mediante deflectómetros de impacto, los cuales son equipos que transmiten una carga específica al pavimento y miden la deflexión generada en la estructura del mismo.

La deflexión de la superficie del pavimento es usada para evaluar tanto la estructura de un pavimento flexible como rígido. Es un importante método de evaluación del

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

## 2.5. Índice Internacional de Regularidad

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)

Como antecedentes de la medición de la condición superficial de la superficie de rodadura de un pavimento se tiene la metodología desarrollada en los años sesentas por la Asociación Americana de Oficiales de Caminos Estatales (AASHO, por sus siglas en inglés). Dicha metodología consiste en evaluar el parámetro denominado índice de servicio actual (ISA).

El ISA consiste en evaluar el grado de confort de un camino y la seguridad que el usuario percibe al circular por un camino a velocidades de operación. La medición la realiza un grupo de evaluadores. Cada evaluador califica el ISA del camino con una escala de 0 a 5, correspondiendo el límite inferior a una superficie intransitable y el superior a una superficie en perfectas condiciones (Figura 1).

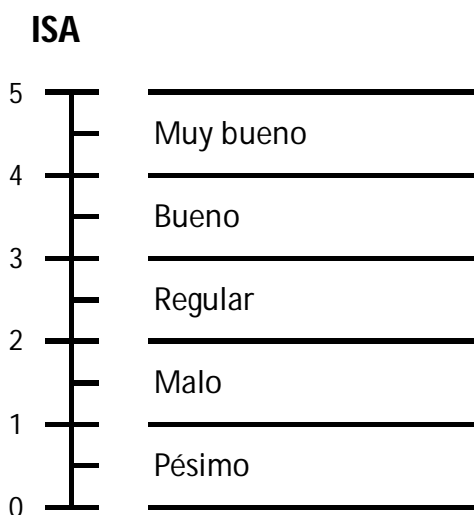


Figura 1 Escala para evaluar el índice de servicio actual (ISA)

El vehículo para la medición del ISA debe circular a una velocidad de 80 km/h y con una presión de inflado de llantas de 28 psi.

Al ser el ISA una medición subjetiva de la condición superficial del pavimento, se propusieron en los años subsecuentes una serie de equipos para medir la regularidad de la superficie del pavimento. Debido a la gran cantidad de equipos disponibles para medir la regularidad superficial, así como las diferentes escalas utilizadas en cada país, se decidió adoptar un Índice Internacional de Regularidad (IRI, por sus siglas en inglés).

El IRI fue propuesto en 1986 por el Banco Mundial como estándar estadístico de regularidad superficial de un camino. Tiene sus orígenes en el reporte 228 emitido por la cooperativa nacional del programa de investigación carretera en Estados Unidos (NCHRP, por sus siglas en inglés), en donde se describe el modelo llamado “Golden Car”.

El cálculo matemático del IRI relaciona la acumulación del desplazamiento de la masa superior con respecto a la inferior (en mm, m o in) de un modelo de cuarto de carro (Figura 2), dividido entre la distancia recorrida sobre un camino transitado por el vehículo a 80 km/h. El IRI se expresa en unidades de mm/m, m/km o in/mi.

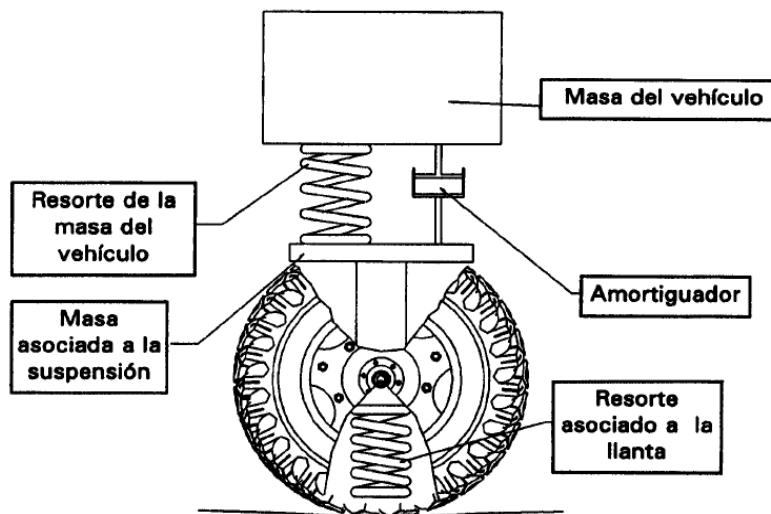


Figura 2 Modelo de cuarto de carro (publicación técnica 108, IMT).

Para un camino pavimentado la escala de IRI varía de 0 a 12 donde 0 representa a una superficie perfectamente uniforme y 12 una superficie en calidad de intransitable.

En la Figura 3 se puede apreciar, de acuerdo con la norma ASTM E1926-08, la escala estimativa de IRI para caminos con superficie de concreto asfáltico.

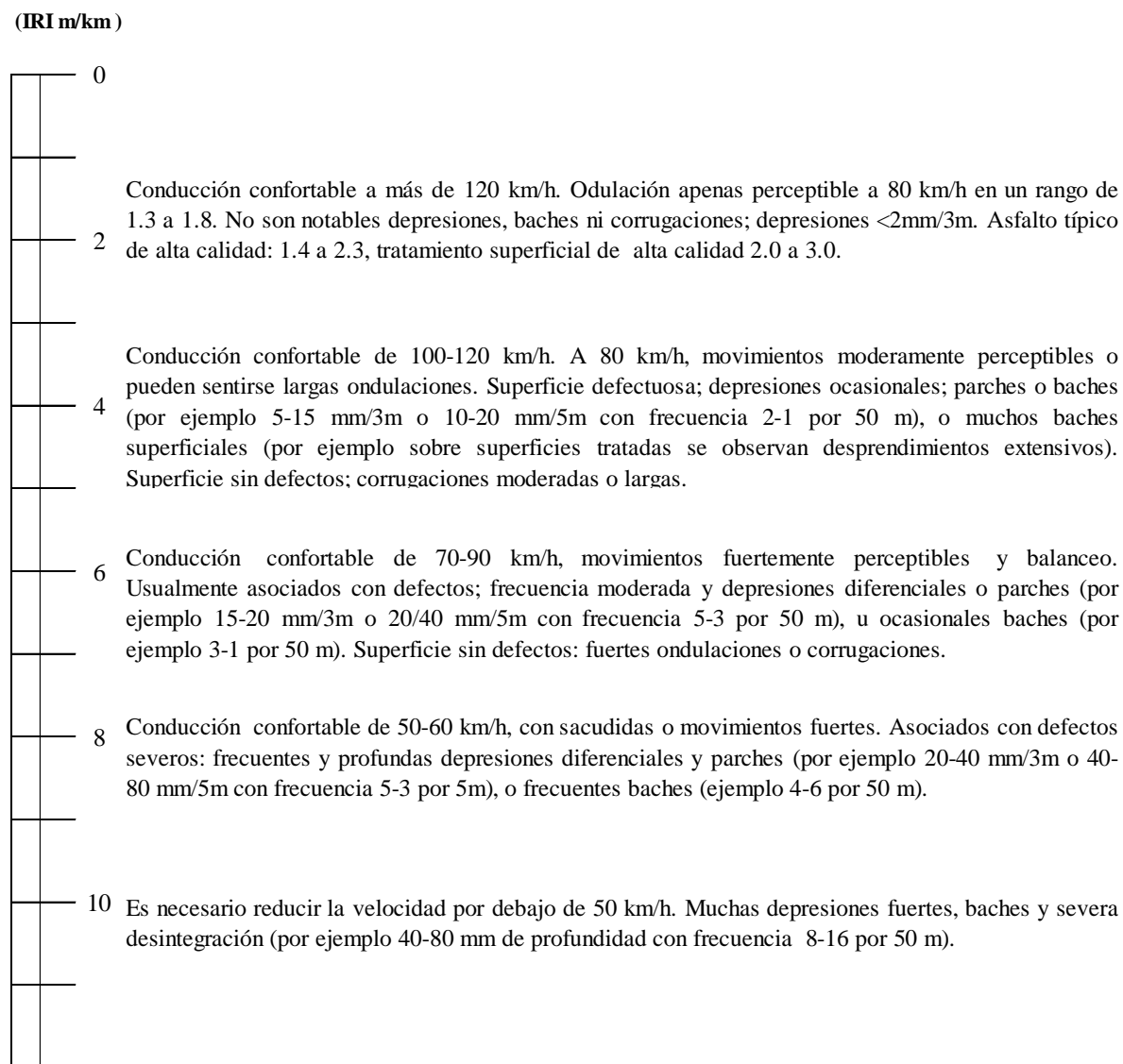


Figura 3 Escala estimativa de regularidad de un camino para superficies de concreto asfáltico (ASTM E1926-08).



## 2.6. Sistemas de gestión de pavimentos

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

Los sistemas de gestión de pavimentos (PMS, por sus siglas en inglés) son herramientas que asisten en el monitoreo del camino y toma de decisiones. Un PMS sirve como un medio por el cual el desempeño del pavimento de un camino, en ambos niveles, de red y de proyecto pueden ser monitoreados eficazmente, y los planes de mantenimiento y de rehabilitación adaptados para abordar el deterioro previsto en los caminos. El sistema de gestión de pavimentos incluye las siguientes actividades: colección de datos del inventario de todos los caminos en la red, análisis de datos para evaluar la condición del pavimento de los caminos e identificar cualquier tendencia en la condición del pavimento, y seleccionar la alternativa más económica y factible que atenderá las necesidades del pavimento, asimismo maximizar su capacidad para desempeñarse eficientemente. Sin embargo, hacer esto requiere del uso de modelos de desempeño del pavimento que sean capaces de reflejar los atributos pasados del pavimento y predecir la condición futura del pavimento (Mills *et al.*, 212).

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

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

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

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

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

1. Sistema de referencia. Se refiere a un método único y estable para la identificación y referencia espacial de los tramos que constituyen la red de carreteras, así como de la información sobre las características y el estado físico de los mismos. Entre los métodos más utilizados pueden mencionarse el sistema arco-nodo, el cadenamamiento, y las coordenadas geográficas.
2. Información requerida por el sistema. Normalmente, los sistemas de gestión utilizan datos pertenecientes a las siguientes categorías:
  - a. Inventario del pavimento, el cual comprende la clasificación funcional, longitud, número de carriles, ancho de carril y acotamientos, pendiente y curvatura de cada uno de los tramos; diseño estructural de la sección, incluyendo espesores y propiedades de los materiales de las capas constitutivas; características del drenaje e historial de reparaciones.
  - b. Estado del pavimento, expresado en términos de la irregularidad de la superficie de rodamiento; presencia y magnitud de deterioros; deflexiones y otros parámetros de la capacidad estructural del pavimento; espesores y propiedades reales de las capas constitutivas; resistencia al deslizamiento y textura y estado del drenaje.

- c. Características del tránsito: volumen, composición vehicular y cargas por tipo de vehículo.
  - d. Datos climatológicos, entre los cuales pueden mencionarse precipitación, humedad, promedios de temperatura y rangos de variación de la misma.
  - e. Costos, incluyendo, por una parte, los costos de construcción, mantenimiento, rehabilitación y modernización de los pavimentos, y por otra, los costos relacionados con el uso de la infraestructura por parte de los usuarios, es decir, costos de operación vehicular, costos asociados con el valor del tiempo de pasajeros y la demora de mercancías, y costos de accidentes.
3. Manejador de bases de datos. Dependiendo del tamaño de la red por analizar, el volumen de información requerido por los sistemas de gestión de pavimentos puede llegar a tener una magnitud considerable, por lo que en la mayoría de los casos, implica el uso de un manejador de bases de datos y de procedimientos computarizados para el almacenamiento, consulta y análisis de la información. Como consecuencia de la vinculación de las carreteras con el entorno y el desarrollo de tecnologías, como los sistemas de posicionamiento global y los sistemas de información geográfica, en los últimos años se ha observado una tendencia mundial hacia el uso de bases de datos georreferenciadas como respaldo para el desarrollo de sistemas de gestión de pavimentos.
4. Herramientas de análisis. Se refieren a un conjunto de modelos matemáticos que se utilizan como apoyo para las siguientes tareas:
- a. Predicción del deterioro del pavimento a lo largo de su vida útil, y estimación de los efectos de las acciones de conservación.
  - b. Evaluación económica de proyectos de conservación y mejoramiento para tramos específicos, así como de políticas aplicables a toda la red o a partes de ella. Para este propósito se utilizan métodos como el análisis del ciclo de vida o el de costo-beneficio.
  - c. Definición de prioridades con respecto a los requerimientos de conservación y mejoramiento de la red, a través del análisis de proyectos candidatos, y la

programación de los trabajos. Usualmente, los algoritmos para definir prioridades utilizan criterios como el estado del pavimento, tasa de deterioro del mismo, y volumen de tránsito, entre otros.

- d. Optimización de los programas de conservación con objeto de maximizar los niveles de desempeño del pavimento o la rentabilidad de las inversiones correspondientes. En la mayoría de los casos, los modelos de optimización utilizan técnicas de programación matemática.
- e. Evaluación del impacto de distintas estrategias de conservación y niveles de disponibilidad de recursos en el desempeño de la red.

De acuerdo con la Norma ASTM E 1166 – 00, la puesta en operación de un sistema de gestión de pavimentos requiere un estudio previo en el que se evalúe su compatibilidad con otros procesos institucionales existentes; su utilidad real en la planeación y programación de los trabajos de conservación y desarrollo de la red; y su aceptación por parte de los responsables de la gestión de los pavimentos al interior de la organización operadora.

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

## **2.7. Modelos de deterioro**

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

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

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

- **Probabilísticos**  
Donde la condición se predice como una función de probabilidad en un rango de posibles condiciones.
  
- **Deterministas**  
Donde la condición se predice con un valor preciso sobre la base de funciones matemáticas de observaciones de medición del deterioro. Esta clase incluye

- mecanicista
- regresión
- empírico-mecanicista

La aplicación de modelos probabilísticos para el desempeño de pavimentos fue introducida por Darter y Hudson (1973).

Algunos ejemplos de modelos probabilísticos son el uso de Cadenas de Markov, o modelos de curvas de supervivencia como los de Cox o Weibull.

Los modelos de deterioro basados en Cadenas de Markov, se han aplicado para predecir el deterioro del pavimento desde principios de los 70's (Silva *et al.*, 2000).

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

### **3. CADENAS DE MARKOV**

Las Cadenas de Markov deben su nombre al Profesor Andrei A. Markov (1856-1922) quien publicó por primera vez sus resultados en 1906. Nació el 14 de junio de 1856 en Riazán, Rusia y murió el 20 de julio de 1922 en San Petersburgo, Rusia. Markov se matriculó en la Universidad de San Petersburgo, donde obtuvo una maestría y un doctorado. Fue profesor en San Petersburgo y también miembro de la Academia Rusa de Ciencias. Se retiró en 1905, pero continuó su enseñanza en la universidad hasta su muerte. Markov es particularmente recordado por su estudio de las cadenas de Markov. Sus trabajos de investigación sobre las cadenas de Markov pusieron en marcha el estudio de los procesos estocásticos con una gran cantidad de aplicaciones (Wai-Ki y Michael K., 2006)

Se dice que una cadena de Markov es una sucesión de ensayos similares u observaciones en la cual cada ensayo tiene el mismo número finito de resultados posibles y en donde la probabilidad de cada resultado para un ensayo dado solo depende del resultado del ensayo inmediato precedente y no de cualquier resultado previo.

#### **3.1. Proceso de Markov.**

Las cadenas de Markov son procesos “sin memoria” (Ford *et al.*, 2011), es decir, la probabilidad presente se basa únicamente en el estado presente y no en el estado pasado. Estas cadenas son comúnmente visualizadas en términos de una “gráfica” mostrando todos los nodos (estados de condición) y posibles caminos (transiciones). Los cálculos basados en la gráfica son llevados a cabo usando una multiplicación de matrices (Ford *et al.*, 2011) (Figura 4).

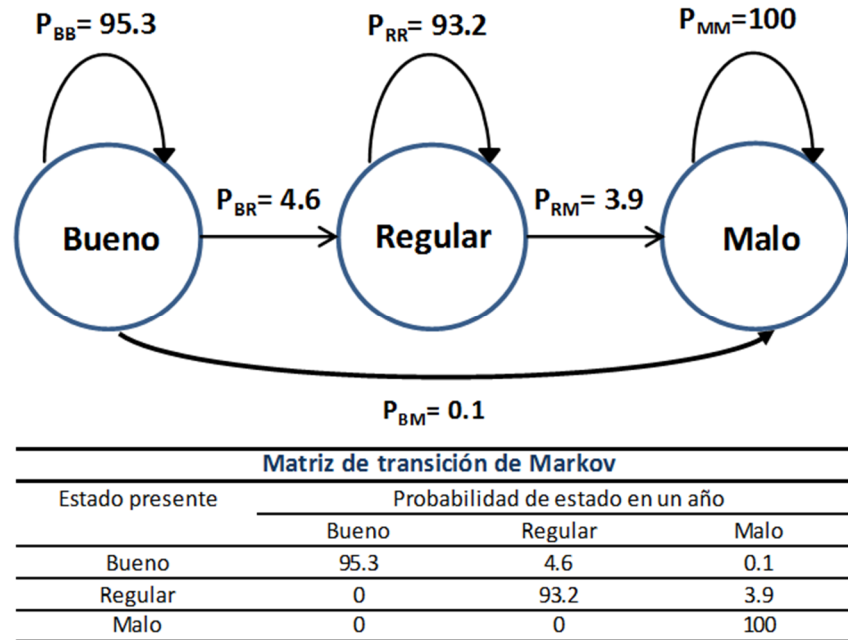


Figura 4 Ejemplo de cadena de Markov, Gráfica y matriz de transición (reporte 08-71 de la NCHRP).

De acuerdo con Ortiz-García, Costello y Snaith (2006), el modelo de predicción de Markov es un proceso estocástico que se rige por tres restricciones:

- La primera restricción es que el proceso es discreto en el tiempo;
- La segunda es que el proceso debe tener un contable o finito espacio de estado, y
- Finalmente, el proceso debe satisfacer la propiedad de Markov

Se dice que la propiedad de Markov se cumple si el estado futuro de un proceso depende de su estado actual, y no de los anteriores.

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



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

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

- Permiten la generalización del proceso de deterioro dentro del diseño de transición entre los estados de condición, lo cual es adecuado para representar el comportamiento del pavimento.
- Se pueden usar en ausencia de datos históricos, es decir la probabilidad de observación de un estado futuro depende solamente de la probabilidad del estado de condición observado en el presente. Así con un mínimo de dos inspecciones visuales, el progreso del deterioro se puede predecir.

El estado inicial de cualquier proceso puede ser descrito mediante un vector de estado inicial  $y_0 = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ , para el caso de los deterioros de pavimentos cada  $x$  representa un rango de condición de un defecto particular, es decir el estado actual de la red, para la presente, representará rangos de valores de IRI.

La suma de cada elemento en el vector inicial deber ser igual a uno, asimismo no deben existir valores negativos (Ortiz-García *et al.*, 2006).

La ventaja de los modelos de Markov es que facilitan el manejo de la incertidumbre y capturan la naturaleza probabilística en el proceso de deterioro del pavimento (Li N. , 1997).

### 3.2. Matriz de probabilidad de Transición

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

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

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ p_{n1} & p & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

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

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

1. Matriz cuadrada. Todas las matrices de probabilidad de transición son cuadradas, con un número de columnas y un número de renglones iguales al número de posibles estados de condición.
2. Superior-triangular derecha. Solo la diagonal principal y el triángulo superior derecho de la matriz deben tener valores mayores de cero. Esto es otra forma de decir que no se puede pasar de algún estado de condición a uno mejor en un modelo de deterioro.

3. No negativos. Ningún elemento en la matriz puede ser negativo.
4. Diagonal positiva. Los elementos en la diagonal no deben ser ceros. En otras palabras, siempre debe existir la posibilidad de que un tramo permanezca en el mismo estado de condición de una inspección a la siguiente.
5. Normalizado. Todos los renglones de la matriz deben sumar separadamente 100%. Es decir, la matriz de probabilidad de transición debe considerar todas las posibles transiciones.
6. Debido a la combinación de estas reglas, el elemento en la esquina inferior derecha debe ser 100%, representando el deterioro del activo a la peor condición.

Tabla 1 Ejemplo de matriz de probabilidad de transición (Reporte 713, NCHRP)

		Probabilidad de cada estado de condición en el año posterior (%)				
		1	2	3	4	5
Estados de condición actuales	1	95.3	4.6	0.1	0	0
	2	0	93.2	3.9	1.9	1.0
	3	0	0	89.4	7.3	3.3
	4	0	0	0	82.8	17.2
	5	0	0	0	0	100

Existen varios métodos para determinar los elementos  $P_{ij}$  que conforman la matriz de probabilidad de transiciones.

Se tienen dos métodos tradicionales para determinar los elementos  $P_{ij}$  de la matriz de transición de probabilidades (Ortiz-García *et al*, 2006). El método estándar que consiste en observar, a partir de datos históricos, la manera en que la red carretera se deteriora a través del tiempo y utilizar esto para determinar cada  $P_{ij}$  usando la ecuación siguiente:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $N_{ij}$  representa el número de tramos de carreteras de la red que se mudó del estado de condición  $i$  a  $j$  durante un ciclo de trabajo, y  $N_i$  representa el número total de tramos de carretera que se inició el año en el estado de  $i$ .

El otro método tradicional para establecer cada elemento  $p_{ij}$  es a través de cuestionarios realizados a un conjunto de expertos en forma individual.

### 3.3. Vectores de estado de condición inicial.

Para modelar la condición de estado del deterioro en el tiempo es necesario partir de un vector de estado inicial. El vector de estado inicial de una red carretera se puede definir como el porcentaje de red que se encuentra en cada estado actualmente, por ejemplo  $y_0 = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , donde  $y_0$  representa el vector de estado inicial.

Como regla general los valores del vector de estado inicial deben ser positivos y sus elementos deben sumar el 100% para representar toda la red.

Con la multiplicación de la matriz de transición de probabilidades con el estado inicial, se obtiene una evaluación general del estado del pavimento a través del tiempo (Lethanh y Bryan, 2012)

Si el vector de estado inicial es  $y_0 = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ , entonces la probabilidad de distribución de estados del proceso en un tiempo  $t=1$ , en forma matricial, estaría dada por:

$$y_1 = y_0 P^1 \dots \dots \dots (2)$$

Para cadenas de Markov homogéneas, para cualquier tiempo  $t$  la probabilidad de distribución de estados del proceso, está dada por:

$$y_t = y_0 P^t \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

$y_t =$  distribución de la condición en el tiempo  $t$ ;

$y_0 =$  distribución de la condición en el tiempo 0, que es el vector inicial

$P^t =$  Matriz de probabilidad de transición elevada a la potencia de  $t$ , el tiempo transcurrido en años.

### 3.4. Cadenas homogéneas

De acuerdo con las características funcionales del deterioro del pavimento, las aplicaciones de cadenas de Markov en el modelado del deterioro del pavimento pueden ser divididas principalmente en dos tipos: homogéneas y no homogéneas (Li N. , 1997).

Se dice que una cadena de Markov es homogénea si la probabilidad de pasar del estado  $i$  al estado  $j$  es independiente del tiempo, es decir:

$$P(X_n = j | X_{n-1} = i) = P(X_1 = j | X_0 = i), \text{ para todo } n \text{ y para cualquier } i, j.$$

Si alguna pareja de valores no cumple con esta propiedad, se dice que la cadena es no homogénea.

Las cadenas de Markov homogéneas son también conocidas como estacionarias, ya que la matriz de probabilidad de transición no varía con el tiempo. Asimismo se dice que una cadena de Markov es no homogénea o no estacionaria, si la matriz de probabilidad de transición varía a través del tiempo.

Cuando se aplica una cadena de Markov homogénea para modelar el deterioro del pavimento, se asume que las variables que afectan su desempeño, tales como tránsito y clima, son constantes a través del tiempo, lo cual no es correcto en muchas situaciones.

En la Figura 5 se muestra una clasificación de cadenas de Markov aplicada en pavimentos y las metodologías utilizadas para establecer las matrices de probabilidad de transición.

De acuerdo con Li (1997) si un proceso de Markov homogéneo es aplicado al modelo de deterioro del pavimento, el establecimiento de la matriz de transición Markoviana puede ser realizado tradicionalmente por medio de dos formas: opinión individual subjetiva de ingenieros y análisis estadístico de observaciones.

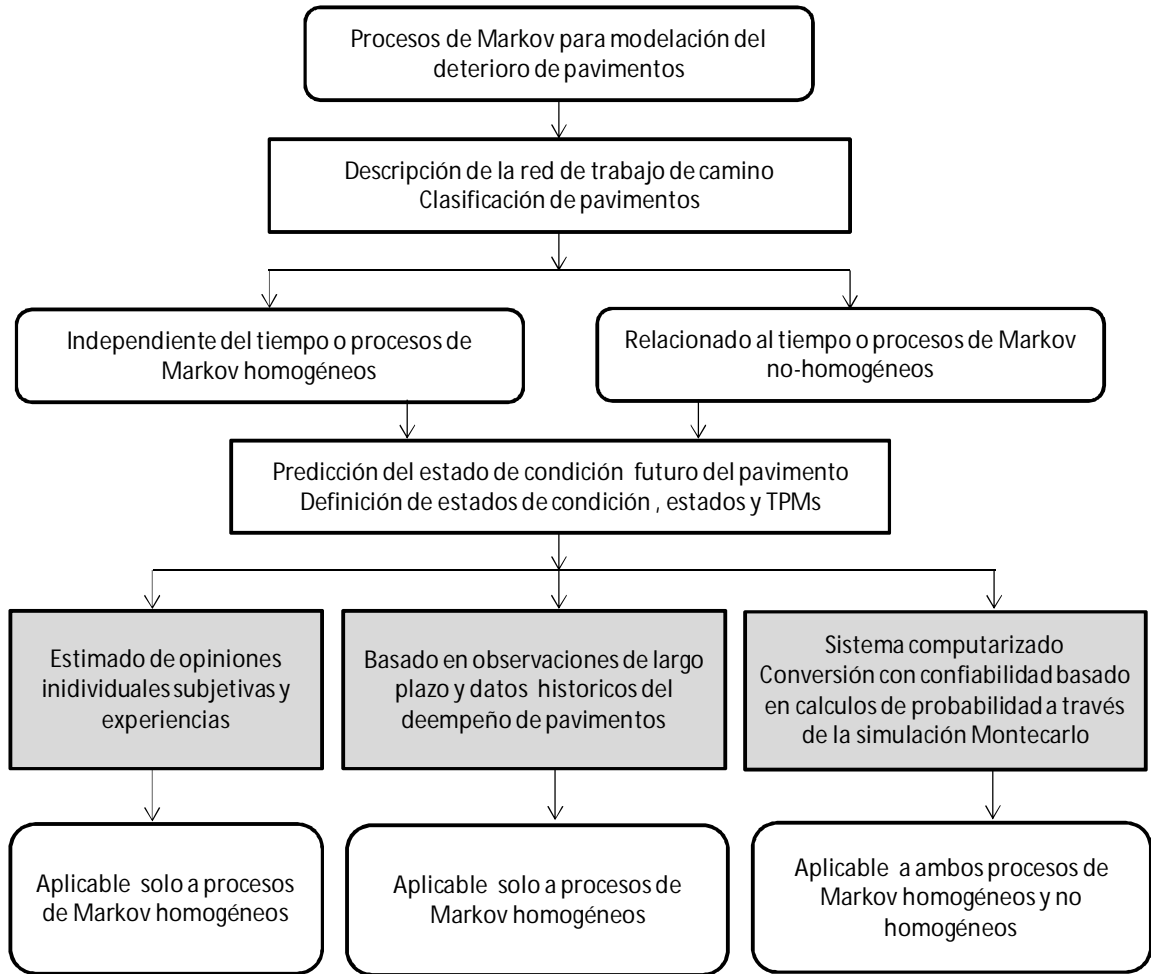


Figura 5 Clasificación de procesos de Markov aplicados a la modelación del desempeño de pavimentos (Li, 1997).

### 3.5. Cadenas no homogéneas

Se aplican modelaciones con cadenas de Markov no homogéneas, ya que la tasa de deterioro de un pavimento varía con el volumen de tránsito y condiciones ambientales. En la Figura 6, se presenta un esquema del estado de condición del pavimento (PCS, por sus siglas en inglés) bajo tres distintos escenarios de condiciones de clima.

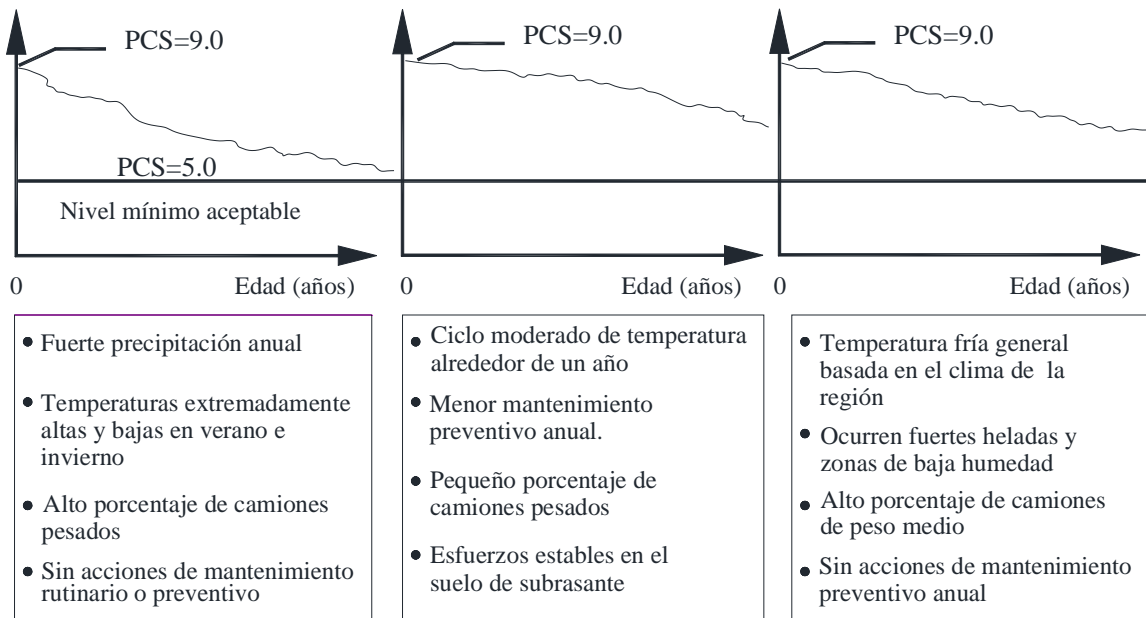


Figura 6 Deterioro del pavimento para tres diferentes condiciones ambientales (Li, 1997)

### 3.6. Aplicaciones a la gestión de activos carreteros

Los modelos de Markov se han usado para estimar la expectativa de vida de distintos elementos que conforman la infraestructura vial, principalmente a puentes y pavimentos (Ford *et al.*, 2011).

En los reportes 08-71 y 713 de la Cooperativa Nacional del Programa de Investigación Carretera en Estados Unidos (NCHRP, por sus siglas en inglés) se trata la metodología de esperanza de vida de activos carreteros, tales como puentes, marcas en el pavimento, señales de tránsito, pavimentos y obras de drenaje.

El criterio de fin de vida de un determinado elemento, dependerá de los requerimientos de cada agencia de transporte o dependiendo del grado de deterioro que un determinado elemento presenta, es decir, el criterio de fin de vida debería basarse en el estado del deterioro que representa el menor costo en su reparación.

Las cadenas de Markov se han utilizado con buenos resultados en Estados Unidos, Canadá y varios países de Europa y Asia, como se resume a continuación.

Karan (1979) investigó funciones del deterioro del pavimento, utilizando cadenas de Markov homogéneas para la red de carreteras de Ontario.

Butt *et al.* (1987), desarrollaron un modelo de predicción del desempeño futuro del pavimento basado en el índice de condición del pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) y la edad del pavimento, usando cadenas de Markov homogéneas y no homogéneas

Satirasetthavee y Herabat (2007) proponen el uso de modelos de deterioro en función del IRI basados en cadenas de Markov debido a la falta de información histórica necesaria para alimentar el sistema de administración de pavimentos utilizado en Tailandia, que se basa en el Modelo de diseño y estándares de mantenimiento de carreteras (HDM-III, por sus siglas en inglés).



Waqar *et al.* (2011) utilizaron las cadenas de Markov para estudiar la efectividad de diferentes tratamientos de mantenimiento preventivo en el desempeño del pavimento a largo plazo.

En países desarrollados como Japón, Suiza y Estados Unidos de América, se utilizan índices compuestos del pavimento para evaluar su condición. Por ejemplo, el Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos o el índice de gestión de criterio (MCI, por sus siglas en inglés) usado en Japón, los cuales son usados normalmente usando una función determinista entre varios indicadores como agrietamiento, profundidad de rodera y regularidad (Lethanh y Bryan, 2012).

#### **4. APLICACIÓN DE CADENAS HOMOGÉNEAS A LA PREDICCIÓN DEL DETERIORO A NIVEL DE RED.**

Se presenta la modelación del deterioro de pavimento con base en el IRI, aplicando los principios de Cadenas de Markov homogéneas para dos carreteras localizadas en el Sureste Mexicano.

##### **4.1. Descripción de los tramos de prueba**

La aplicación de cadenas de Markov homogéneas se realizó sobre dos carreteras localizadas en el Sureste Mexicano, a las que se les denominará como A y B.

La carretera A tiene una longitud de 40 kilómetros cuya clasificación es tipo A4 de acuerdo con el manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, con una sección transversal que aloja dos carriles por cada sentido de circulación. El pavimento está compuesto por una carpeta de concreto asfáltico sobre una base granular. El Tránsito Diario Promedio Anual TDPA para 2009 (año en que se tienen los últimos datos de IRI), fue de 4,843 vehículos. La precipitación media mensual varía de 182 a 231 mm.

La carretera B cuenta con una longitud de 38.9 kilómetros, por sus características geométricas se clasifica como A4 ya que tiene una sección transversal con dos carriles de circulación por sentido. El pavimento está compuesto por una carpeta asfáltica sobre una base granular. El TDPA para el año 2009 varía a lo largo de tres secciones: de 18,916 en los primeros 22 kilómetros; 12,821 en los siguientes 2 km y 3,270 en los últimos 15 kilómetros. La precipitación media mensual varía de 83 a 51.6 mm.

De acuerdo con lo anterior, ambas carreteras se segmentaron en tramos homogéneos con base en las diferencias entre el Tránsito Promedio Diario Anual TDPA, clase del pavimento, tipo del pavimento y clima. Los tramos resultantes para el estudio se muestran, para la carretera A en la Tabla 2 y para la carretera B en la Tabla 3.

Tabla 2 Tramos de estudio, carretera A

<b>Tramo</b>	<b>Del km__</b>	<b>Al km__</b>
1	0+000	28+810
2	28+810	40+000

Tabla 3 Tramos de estudio, carretera B

<b>Tramo</b>	<b>Del km__</b>	<b>Al km__</b>
1	127+500	149+050
2	149+050	151+200
3	151+200	159+500
4	159+500	165+500
5	165+500	166+000

#### **4.2. Procesamiento de datos**

Se obtuvieron datos de medición de IRI para las dos carreteras mencionadas para los años 2008 y 2009.

El IRI fue medido en forma continua en los carriles de baja velocidad de ambos cuerpos reportando el valor medido con intervalos de 20 metros. En cada carril se obtuvo la medida para ambas rodadas, izquierda y derecha.

Los valores de ambas rodadas se promediaron para tener un único valor cada 20 metros. Posteriormente se obtuvieron los valores promedios de IRI para segmentos de 100 metros de longitud.

Para procesar la información de IRI se definieron rangos de valores como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4 Clasificación de estados de condición del pavimento con base en IRI.

RANGOS DE IRI (m/km)	ESTADOS
DE 0.0 A 1.0	1
DE 1.0 A 2.0	2
DE 2.0 A 3.0	3
DE 3.0 A 4.0	4
DE 4.0 A 5.0	5

Mediante funciones de Excel, se clasificaron los tramos de 100 m de longitud que se encontraban en un cierto estado en 2008 y en 2009. Definido el estado en cada año, se determinaron, mediante el mismo tipo de funciones, cuántos segmentos cambiaron de estado de 2008 a 2009, es decir se contabilizaron los segmentos que cambiaron su condición de IRI, en rango, al pasar de un año al otro. Como era de esperarse, algunos segmentos mantuvieron su estado al pasar de un año al otro, sin embargo, algunos otros segmentos presentaron inconsistencia en su valor medido de IRI, ya que el valor registrado en 2009 fue menor al de 2008, lo cual contraviene el principio del deterioro, es decir un pavimento no puede mejorar su condición si no se realizan acciones de mejora en el mismo. Para estos segmentos se consideró que no cambiaron de estado de condición.

Para el análisis se eliminaron valores atípicos de IRI, aquellos que presentan cierta dispersión respecto a la gama de valores medidos, para ello se utilizó la prueba de Tukey mejor conocida por los diagramas de caja y bigotes.

La prueba de Tukey consiste en agrupar en una caja los valores que se encuentran dentro del rango intercuartílico, es decir el rango entre el primer y tercer cuartil (Q1 y Q3), conteniendo a la mediana (Q2). En los extremos inferior y superior de la caja se trazan líneas denominadas bigotes, las cuales se prolongan hacia ambos extremos 1.5 veces el rango intercuartílico (RIC), con lo cual se definen los límites superior (Ls) e inferior (Li). Los valores que se encuentran fuera de los extremos de los bigotes o fuera de los límites se denominan atípicos (Figura 7).

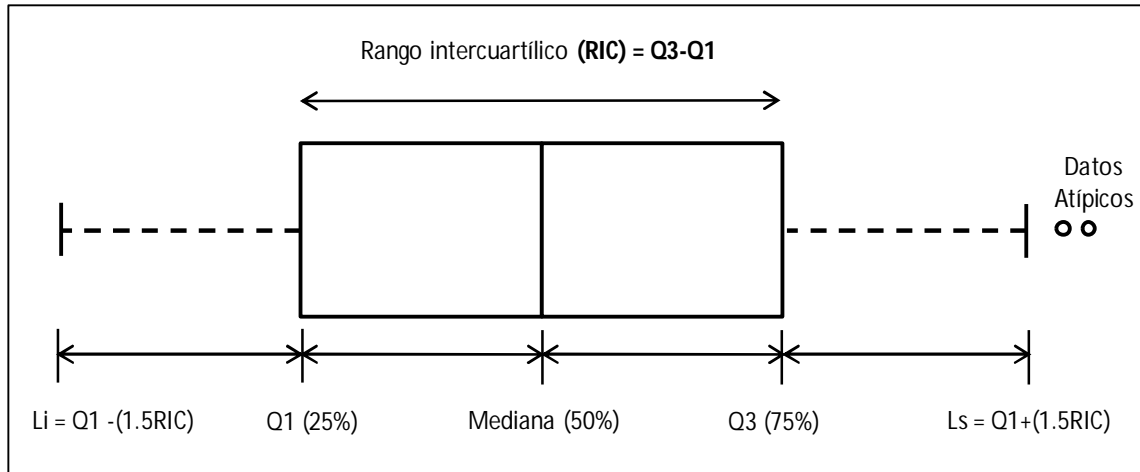


Figura 7 Formulación de un diagrama de caja

### 4.3. Obtención de matrices de transición.

Con los datos procesados para segmentos de 100 metros, para cada tramo de carretera, se obtuvieron el número de segmentos que cambiaron de estado o permanecieron en el mismo estado en el transcurso de un año como se indica en el capítulo 4.2. En las Tablas 5 y 6 se presenta en forma matricial la distribución de segmentos con sus estados de condición al pasar de 2008 a 2009 para cada tramo.

Tabla 5 Representación matricial de segmentos de 100m en el ciclo de un año, carretera A, Tramo 1(a), Tramo 2 (b)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	0	0	0	0
	2	0	43	109	77	15
	3	0	0	171	80	25
	4	0	0	0	39	4
	5	0	0	0	0	8

(a)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	1	1	0	0
	2	0	15	46	30	2
	3	0	0	31	31	20
	4	0	0	0	25	8
	5	0	0	0	0	11

(b)

Tabla 6 Representación matricial de segmentos de 100 m en el ciclo de un año, carretera B, Tramo 1(a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c), Tramo 4 (d), Tramo 5 (e).

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	14	2	0	0
	2	0	135	91	23	33
	3	0	0	63	32	1
	4	0	0	0	14	3
	5	0	0	0	0	5

(a)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	0	0	0	0
	2	0	10	6	2	2
	3	0	0	8	8	2
	4	0	0	0	4	0
	5	0	0	0	0	1.000

(b)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	0	0	0	0
	2	0	64	23	1	0
	3	0	0	18	5	2
	4	0	0	0	23	3
	5	0	0	0	0	18

(c)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	0	0	0	0
	2	0	13	28	4	0
	3	0	0	15	5	8
	4	0	0	0	14	10
	5	0	0	0	0	14

(d)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	1	2	0
	3	0	0	0	2	1
	4	0	0	0	4	1
	5	0	0	0	0	3

(e)

Los valores de 1 a 5 corresponden a cada uno de los estados designados en la Tabla 4, los cuales representan rangos de variación de IRI. Por ejemplo para el tramo 2 de la carretera A, 1 segmento cambió del estado 1 al 2 en el transcurso de un año, 1 segmento cambió del estado 1 al 3, 15 segmentos permanecieron en el mismo estado 2 durante el transcurso de un año y así sucesivamente.

Los elementos de las matrices de probabilidad de transición fueron establecidos usando el método estándar utilizando la expresión 1:

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $N_{ij}$  representa el número de segmentos de 100 metros de cada carretera que se mudó del estado de condición  $i$  a  $j$  durante un ciclo de trabajo, y  $N_i$  representa el número total de segmentos de la carretera que se inició el año en el estado de  $i$ .

Mediante la aplicación de la ecuación 1 y la distribución de segmentos en cada estado al iniciar el año para cada carretera, se obtuvieron las matrices de probabilidad de transición mostradas en las Tablas 7 y 8

Tabla 7 Matrices de probabilidad de transición de la carretera A, Tramo 1(a), Tramo 2 (b).

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.176	0.447	0.316	0.061
	3	0.000	0.000	0.620	0.290	0.091
	4	0.000	0.000	0.000	0.907	0.093
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(a)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.500	0.500	0.000	0.000
	2	0.000	0.161	0.495	0.323	0.022
	3	0.000	0.000	0.378	0.378	0.244
	4	0.000	0.000	0.000	0.758	0.242
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(b)

Tabla 8 Matrices de probabilidad de transición de la carretera B, Tramo 1(a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c), Tramo 4 (d), Tramo 5 (e).

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.875	0.125	0.000	0.000
	2	0.000	0.479	0.323	0.082	0.117
	3	0.000	0.000	0.656	0.333	0.010
	4	0.000	0.000	0.000	0.824	0.176
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(a)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.500	0.300	0.100	0.100
	3	0.000	0.000	0.444	0.444	0.111
	4	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(b)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.727	0.261	0.011	0.000
	3	0.000	0.000	0.720	0.200	0.080
	4	0.000	0.000	0.000	0.885	0.115
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(c)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.289	0.622	0.089	0.000
	3	0.000	0.000	0.536	0.179	0.286
	4	0.000	0.000	0.000	0.583	0.417
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(d)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.000	0.333	0.667	0.000
	3	0.000	0.000	0.000	0.667	0.333
	4	0.000	0.000	0.000	0.800	0.200
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(e)



Resulta importante destacar que en las anteriores matrices de probabilidad de transición, no se tuvieron probabilidades de encontrarse en el estado 1 y permanecer en ese mismo estado en el transcurso de un año.

Los vectores de estado inicial  $y_0$  para cada una de los tramos de las carreteras de estudio son los siguientes:

- Carretera A,
  - Tramo 1:  $y_0 = (0.000, 0.164, 0.442, 0.316, 0.079)$
  - Tramo 2:  $y_0 = (0.000, 0.108, 0.350, 0.386, 0.157)$
- Carretera B,
  - Tramo 1:  $y_0 = (0.005, 0.369, 0.379, 0.157, 0.090)$
  - Tramo 2:  $y_0 = (0.000, 0.273, 0.295, 0.341, 0.091)$
  - Tramo 3:  $y_0 = (0.000, 0.416, 0.398, 0.102, 0.084)$
  - Tramo 4:  $y_0 = (0.000, 0.117, 0.358, 0.283, 0.242)$
  - Tramo 5:  $y_0 = (0.000, 0.000, 0.125, 0.438, 0.437)$

#### **4.4. Descripción de resultados.**

Tras aplicar la modelación del deterioro mediante cadenas de Markov homogéneas se obtuvieron los resultados mostrados en las Tablas 9 y 10.

En las Figuras 8 a 14 se muestran las gráficas de distribución de IRI a lo largo del período de análisis. Se puede apreciar en la Figura 11 como a partir del año 9 aproximadamente el estado de IRI tiende a un valor constante, lo cual se debe a la forma de la matriz de transición, es decir, los valores de la matriz hacen que el valor de IRI permanezca constante.

Tabla 9 Pronóstico de condición futura del pavimento con base en IRI, carretera A.

AÑO	Estados de condición/IRI (m/km),Tramo 1 Carretera A					Estados de condición/IRI (m/km),Tramo 2 Carretera A				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5
0	0.00%	16.4%	44.2%	31.6%	7.9%	0.00%	10.8%	35.0%	38.6%	15.7%
1	0.00%	2.9%	34.7%	46.6%	15.8%	0.00%	1.7%	18.5%	45.9%	33.8%
2	0.00%	0.5%	22.8%	53.3%	23.5%	0.00%	0.3%	7.9%	42.4%	49.5%
3	0.00%	0.1%	14.3%	55.1%	30.5%	0.00%	0.0%	3.1%	35.2%	61.7%
4	0.00%	0.0%	8.9%	54.1%	36.9%	0.00%	0.0%	1.2%	27.8%	71.0%
5	0.00%	0.0%	5.5%	51.7%	42.8%	0.00%	0.0%	0.5%	21.5%	78.0%
6	0.00%	0.0%	3.4%	48.5%	48.1%	0.00%	0.0%	0.2%	16.5%	83.3%
7	0.00%	0.0%	2.1%	45.0%	52.9%	0.00%	0.0%	0.1%	12.6%	87.4%
8	0.00%	0.0%	1.3%	41.4%	57.3%	0.00%	0.0%	0.0%	9.5%	90.4%
9	0.00%	0.0%	0.8%	37.9%	61.3%	0.00%	0.0%	0.0%	7.2%	92.8%
10	0.00%	0.0%	0.5%	34.6%	64.9%	0.00%	0.0%	0.0%	5.5%	94.5%
11	0.00%	0.0%	0.3%	31.6%	68.1%	0.00%	0.0%	0.0%	4.2%	95.8%
12	0.00%	0.0%	0.2%	28.7%	71.1%	0.00%	0.0%	0.0%	3.1%	96.9%
13	0.00%	0.0%	0.1%	26.1%	73.8%	0.00%	0.0%	0.0%	2.4%	97.6%
14	0.00%	0.0%	0.1%	23.7%	76.2%	0.00%	0.0%	0.0%	1.8%	98.2%
15	0.00%	0.0%	0.0%	21.5%	78.4%	0.00%	0.0%	0.0%	1.4%	98.6%
16	0.00%	0.0%	0.0%	19.5%	80.4%	0.00%	0.0%	0.0%	1.0%	99.0%
17	0.00%	0.0%	0.0%	17.7%	82.3%	0.00%	0.0%	0.0%	0.8%	99.2%
18	0.00%	0.0%	0.0%	16.1%	83.9%	0.00%	0.0%	0.0%	0.6%	99.4%
19	0.00%	0.0%	0.0%	14.6%	85.4%	0.00%	0.0%	0.0%	0.5%	99.5%
20	0.00%	0.0%	0.0%	13.2%	86.8%	0.00%	0.0%	0.0%	0.3%	99.7%

Tabla 10 Pronóstico de condición futura del pavimento con base en IRI, carretera B

AÑO	Estados de condición/IRI (m/km), Tramo 1					Estados de condición/IRI (m/km), Tramo 2				Estados de condición/IRI (m/km), Tramo 3				Estados de condición/IRI (m/km), Tramo 4				Estados de condición/IRI (m/km), Tramo 5			
	1	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5	2	3	4	5
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	1-2	2-3	3-4	4-5	1-2	2-3	3-4	4-5	1-2	2-3	3-4	4-5	1-2	2-3	3-4	4-5
0	0.48%	36.9%	37.9%	15.7%	9.0%	27.3%	29.5%	34.1%	9.1%	41.6%	39.8%	10.2%	8.4%	11.7%	35.8%	28.3%	24.2%	0.0%	12.5%	43.8%	43.8%
1	0.00%	18.1%	36.8%	28.6%	16.5%	13.6%	21.3%	49.9%	15.1%	30.2%	39.5%	17.5%	12.8%	3.4%	26.5%	24.0%	46.2%	0.0%	0.0%	43.3%	56.7%
2	0.00%	8.7%	30.0%	37.3%	24.1%	6.8%	13.6%	60.8%	18.8%	22.0%	36.3%	23.7%	18.0%	1.0%	16.3%	19.0%	63.8%	0.0%	0.0%	34.7%	65.3%
3	0.00%	4.1%	22.5%	41.4%	32.0%	3.4%	8.1%	67.5%	21.0%	16.0%	31.9%	28.5%	23.6%	0.3%	9.3%	14.1%	76.3%	0.0%	0.0%	27.7%	72.3%
4	0.00%	2.0%	16.1%	41.9%	40.0%	1.7%	4.6%	71.4%	22.3%	11.6%	27.2%	31.8%	29.5%	0.1%	5.2%	9.9%	84.8%	0.0%	0.0%	22.2%	77.8%
5	0.00%	0.9%	11.2%	40.1%	47.8%	0.9%	2.6%	73.6%	22.9%	8.5%	22.6%	33.7%	35.3%	0.0%	2.8%	6.7%	90.5%	0.0%	0.0%	17.7%	82.3%
6	0.00%	0.5%	7.7%	36.8%	55.1%	0.4%	1.4%	74.9%	23.3%	6.2%	18.5%	34.4%	41.0%	0.0%	1.5%	4.4%	94.1%	0.0%	0.0%	14.2%	85.8%
7	0.00%	0.2%	5.2%	32.9%	61.7%	0.2%	0.7%	75.5%	23.5%	4.5%	14.9%	34.2%	46.4%	0.0%	0.8%	2.8%	96.3%	0.0%	0.0%	11.4%	88.6%
8	0.00%	0.1%	3.5%	28.8%	67.6%	0.1%	0.4%	75.9%	23.6%	3.3%	11.9%	33.3%	51.6%	0.0%	0.4%	1.8%	97.7%	0.0%	0.0%	9.1%	90.9%
9	0.00%	0.0%	2.3%	24.9%	72.7%	0.1%	0.2%	76.1%	23.7%	2.4%	9.4%	31.9%	56.4%	0.0%	0.2%	1.1%	98.6%	0.0%	0.0%	7.3%	92.7%
10	0.00%	0.0%	1.5%	21.3%	77.2%	0.0%	0.1%	76.2%	23.7%	1.7%	7.4%	30.1%	60.8%	0.0%	0.1%	0.7%	99.2%	0.0%	0.0%	5.8%	94.2%
11	0.00%	0.0%	1.0%	18.0%	80.9%	0.0%	0.1%	76.2%	23.7%	1.3%	5.8%	28.1%	64.9%	0.0%	0.1%	0.4%	99.5%	0.0%	0.0%	4.7%	95.3%
12	0.00%	0.0%	0.7%	15.2%	84.1%	0.0%	0.0%	76.2%	23.7%	0.9%	4.5%	26.0%	68.6%	0.0%	0.0%	0.3%	99.7%	0.0%	0.0%	3.7%	96.3%
13	0.00%	0.0%	0.4%	12.7%	86.8%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.7%	3.5%	23.9%	71.9%	0.0%	0.0%	0.2%	99.8%	0.0%	0.0%	3.0%	97.0%
14	0.00%	0.0%	0.3%	10.6%	89.1%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.5%	2.7%	21.9%	75.0%	0.0%	0.0%	0.1%	99.9%	0.0%	0.0%	2.4%	97.6%
15	0.00%	0.0%	0.2%	8.9%	91.0%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.4%	2.0%	19.9%	77.7%	0.0%	0.0%	0.1%	99.9%	0.0%	0.0%	1.9%	98.1%
16	0.00%	0.0%	0.1%	7.4%	92.5%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.3%	1.6%	18.0%	80.2%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	1.5%	98.5%
17	0.00%	0.0%	0.1%	6.1%	93.8%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.2%	1.2%	16.3%	82.4%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	1.2%	98.8%
18	0.00%	0.0%	0.1%	5.0%	94.9%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.1%	0.9%	14.6%	84.3%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	1.0%	99.0%
19	0.00%	0.0%	0.0%	4.2%	95.8%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.1%	0.7%	13.1%	86.1%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.8%	99.2%
20	0.00%	0.0%	0.0%	3.5%	96.5%	0.0%	0.0%	76.3%	23.7%	0.1%	0.5%	11.7%	87.7%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.6%	99.4%

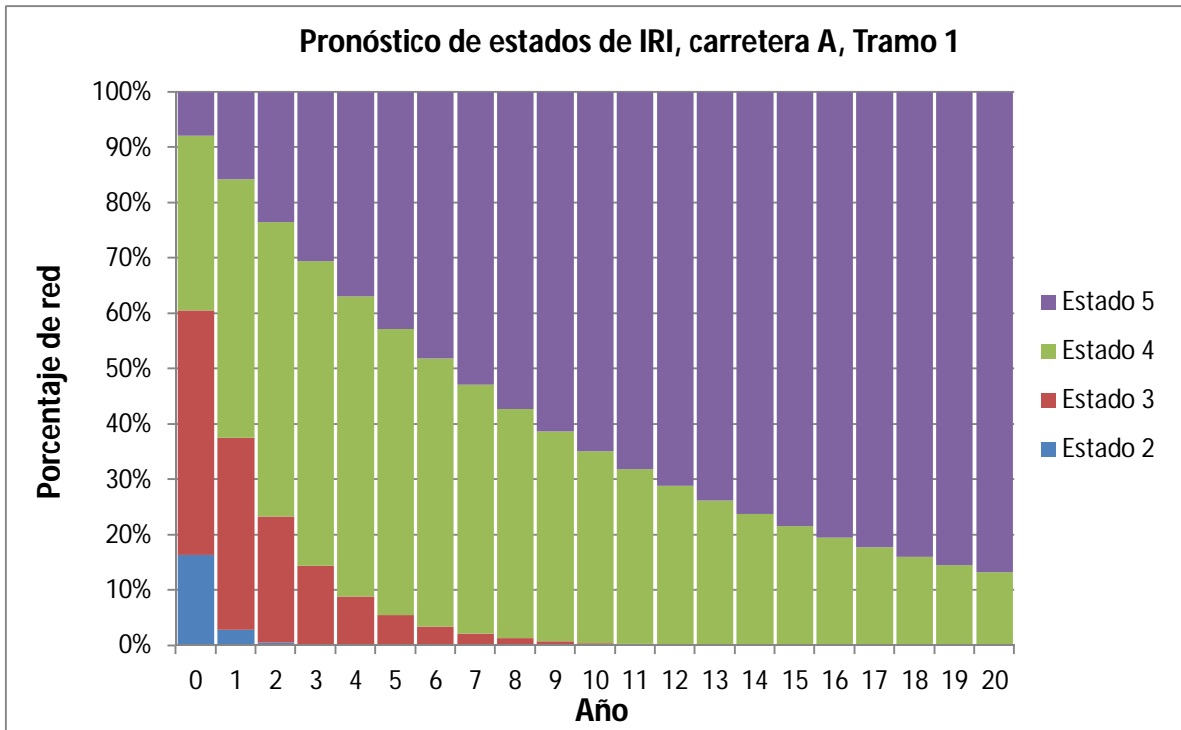


Figura 8 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 1 de la carretera A.

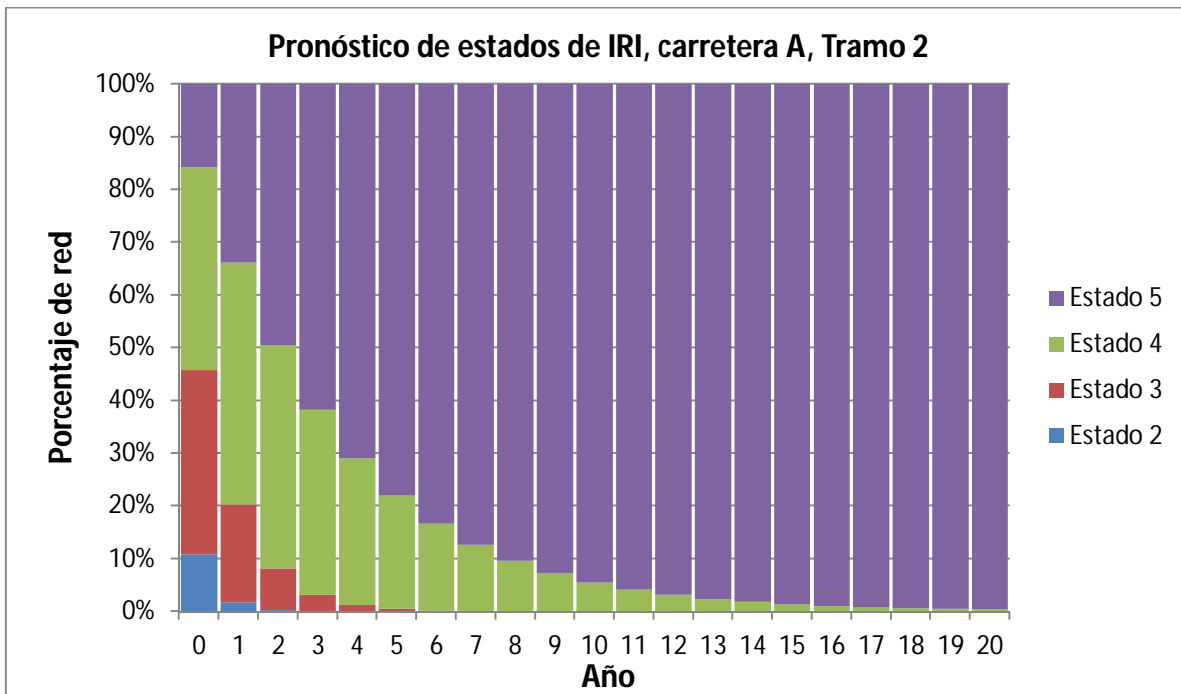


Figura 9 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 2 de la carretera A.

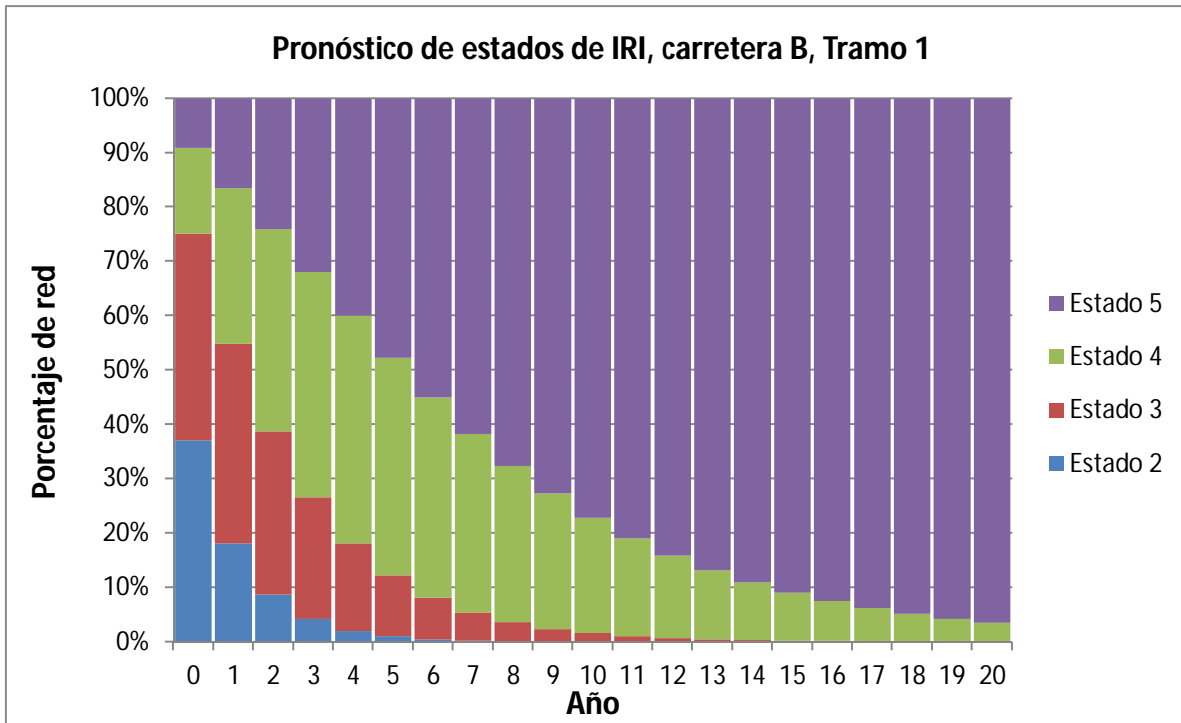


Figura 10 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 1 de la carretera B

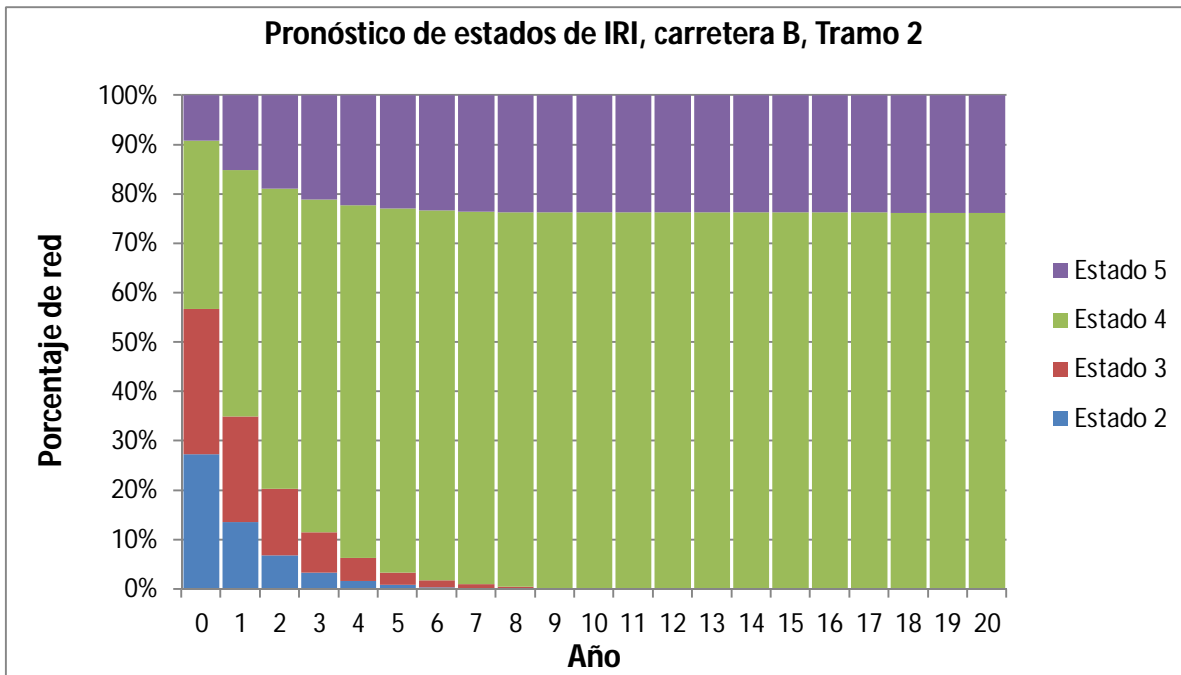


Figura 11 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 2 de la carretera B

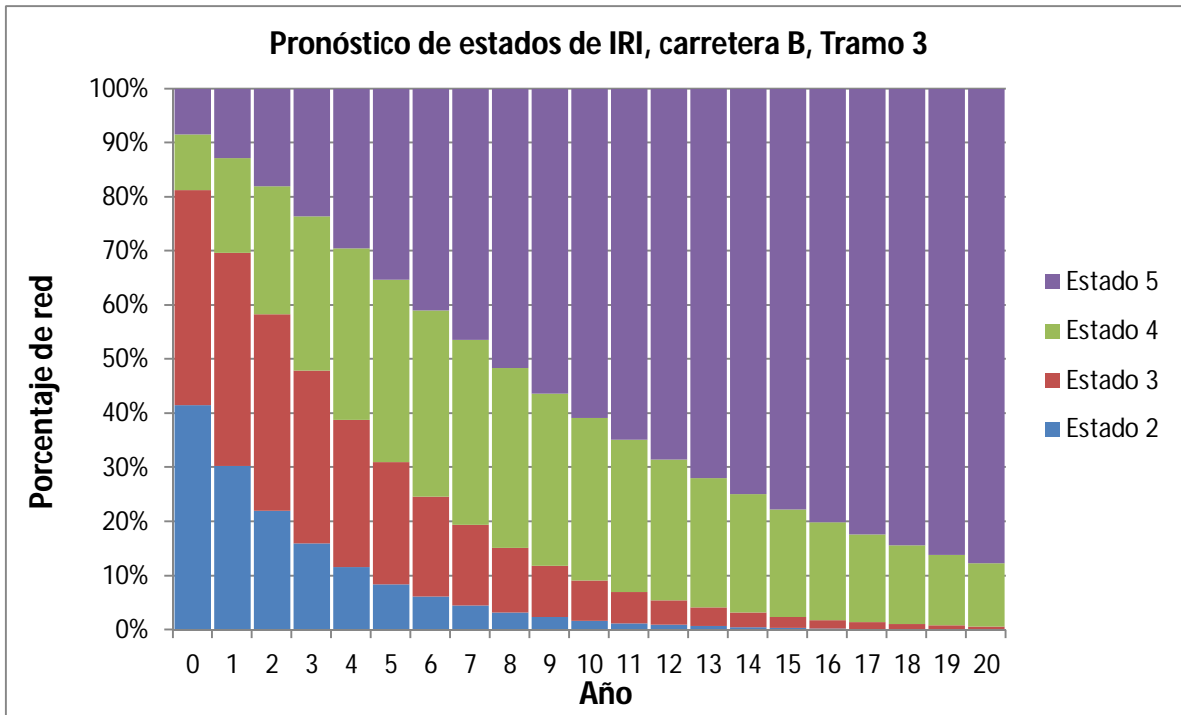


Figura 12 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 3 de la carretera B

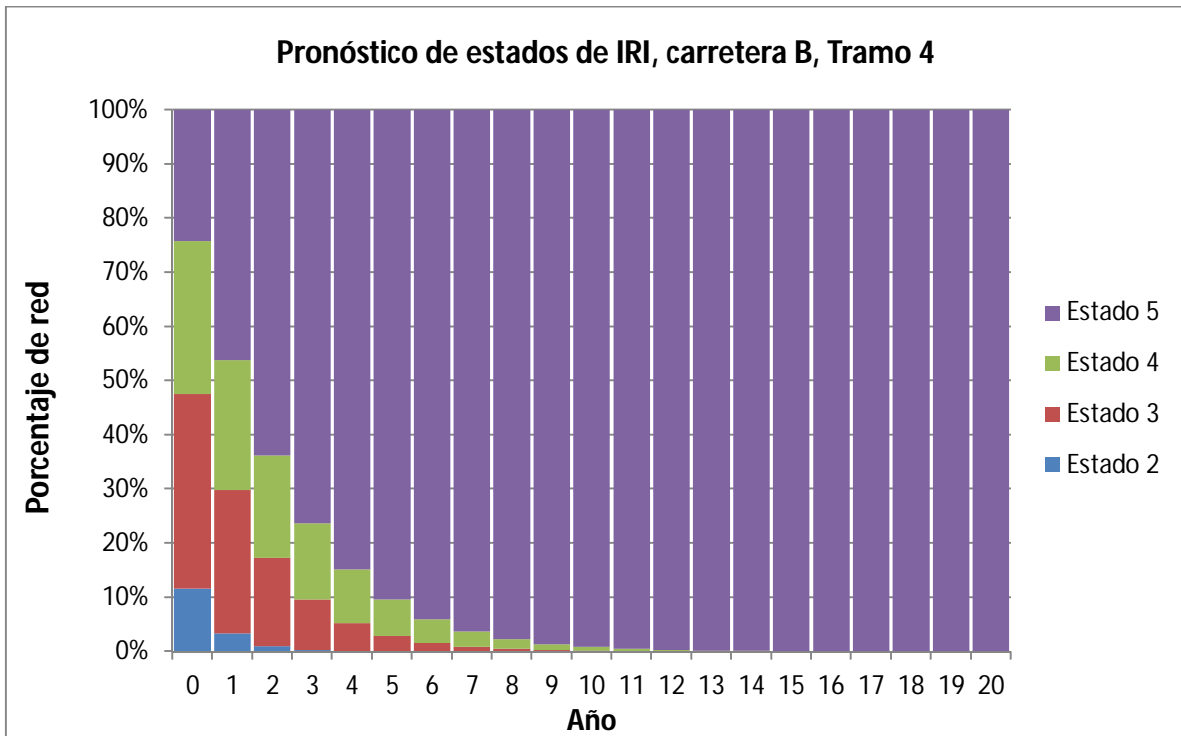


Figura 13 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 4 de la carretera B

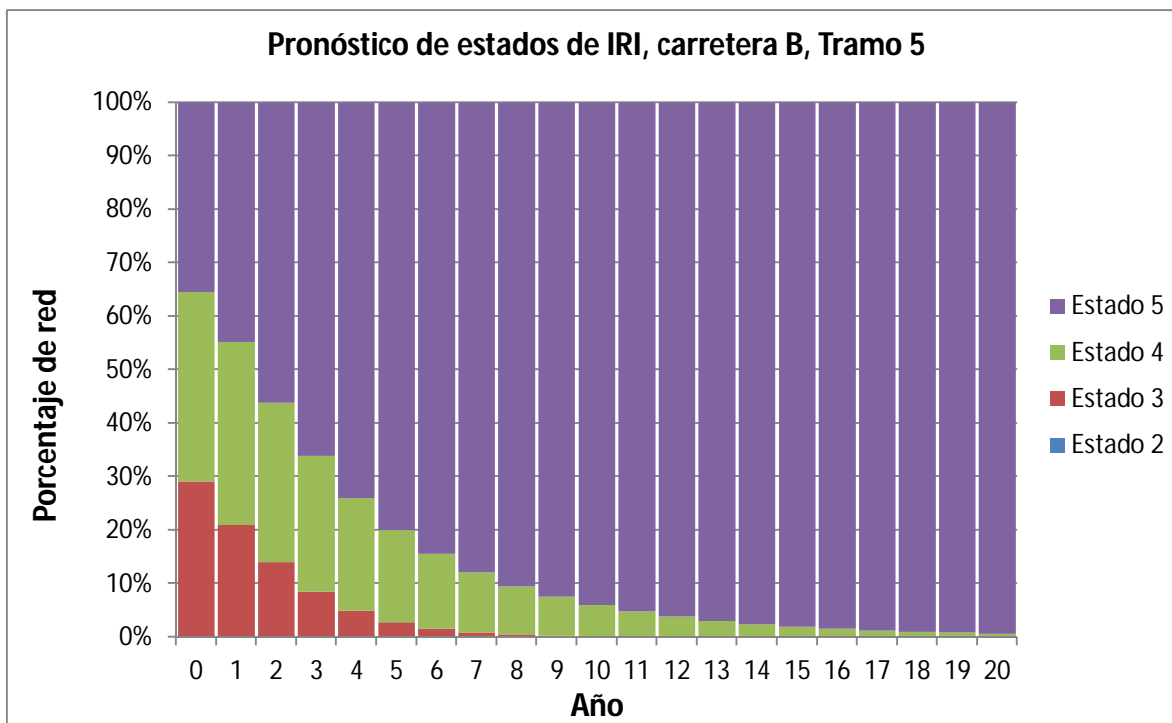


Figura 14 Pronósticos de estados de IRI para el tramo 5 de la carretera B

#### 4.5. Curvas de deterioro con cadenas de Markov.

Con los porcentajes de red en cada rango, obtenidos tras aplicar la metodología de cadenas de Markov, se obtuvieron las curvas de deterioro de cada carretera, El valor de cada año resulta de la suma del producto de cada marca de clase con su respectivo porcentaje en cada una de ellas. Por ejemplo para el primer tramo de la carretera B, los porcentajes en cada rango para el año 2 son:

0.0%, 8.7%, 30.0%, 37.3%, y 24.1% y sus marcas de clase 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 y 4.5 respectivamente, el promedio de IRI resultante para el primer tramo de la carretera B en el año 2 es de: 3.27 m/km.

En las Figuras 15 a 21 se muestran las curvas de deterioro obtenidas para los tramos 2 y 5 tramos de las carreteras A y B respectivamente.

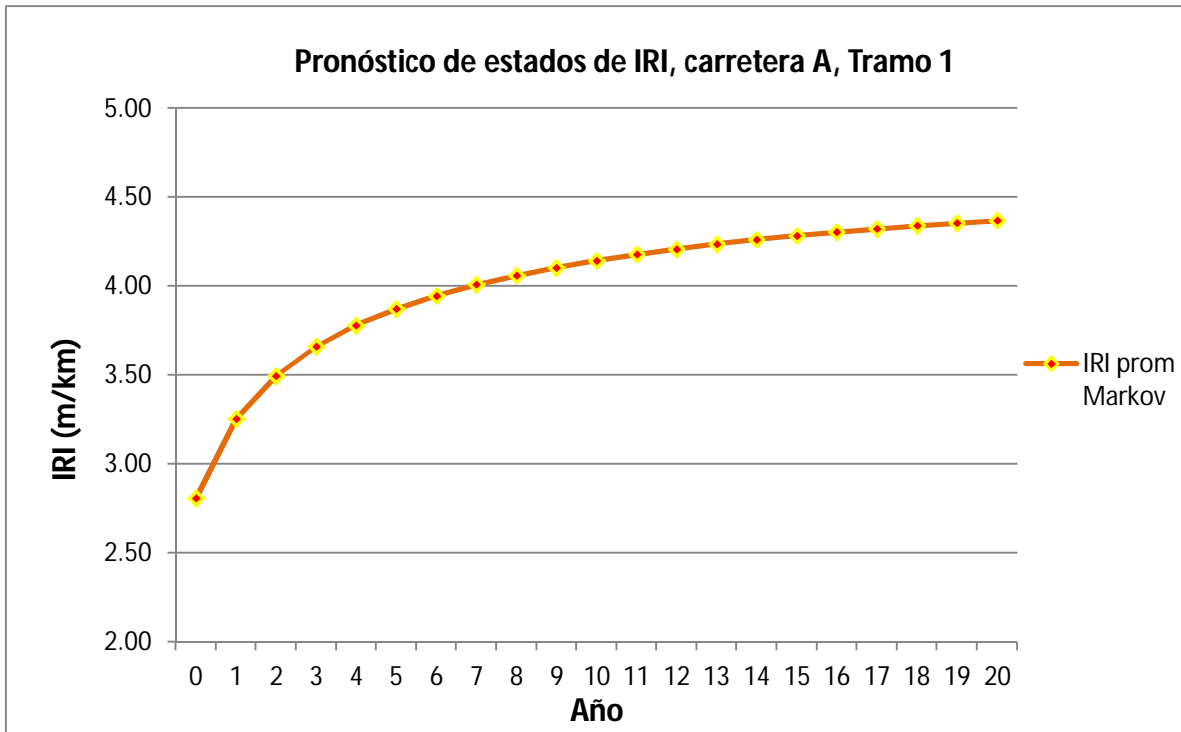


Figura 15 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 1 de la carretera A

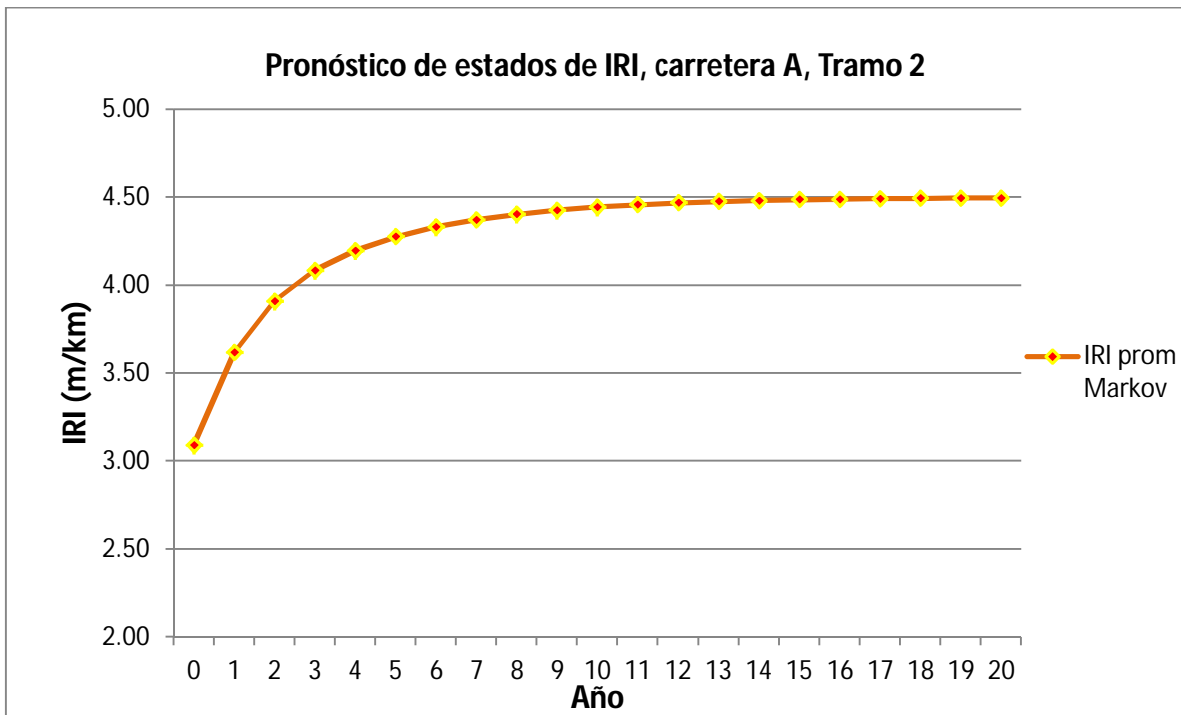


Figura 16 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 2 de la carretera A



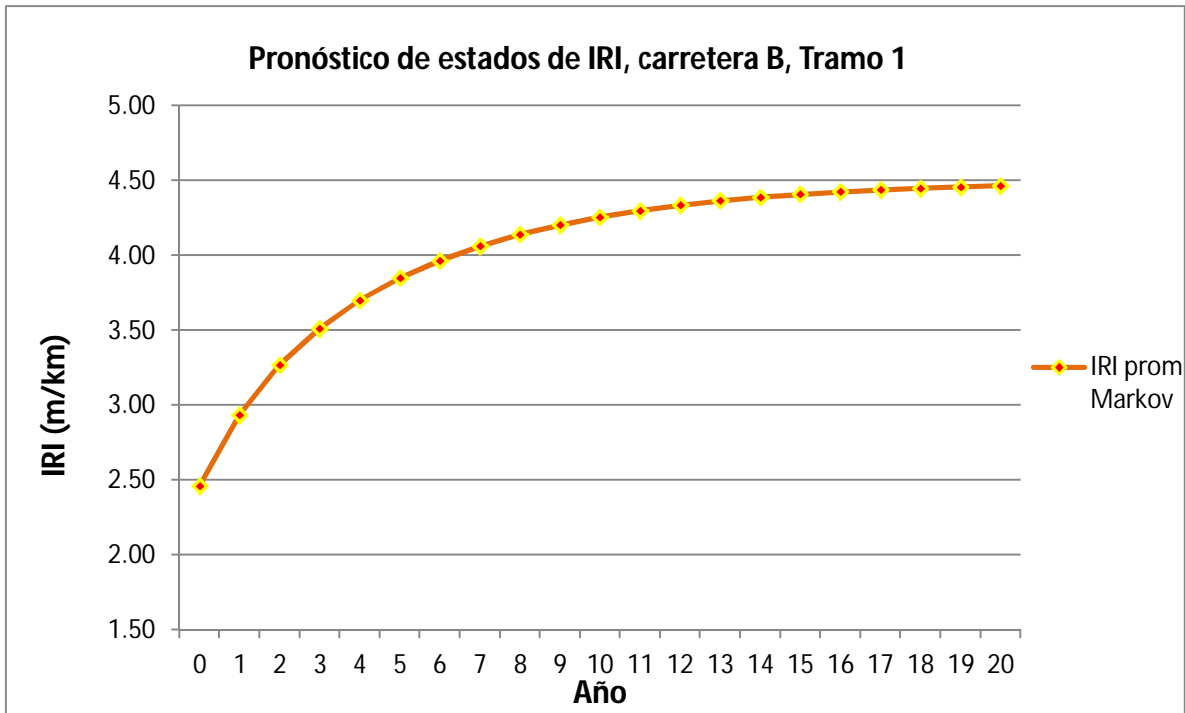


Figura 17 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 1 de la carretera B

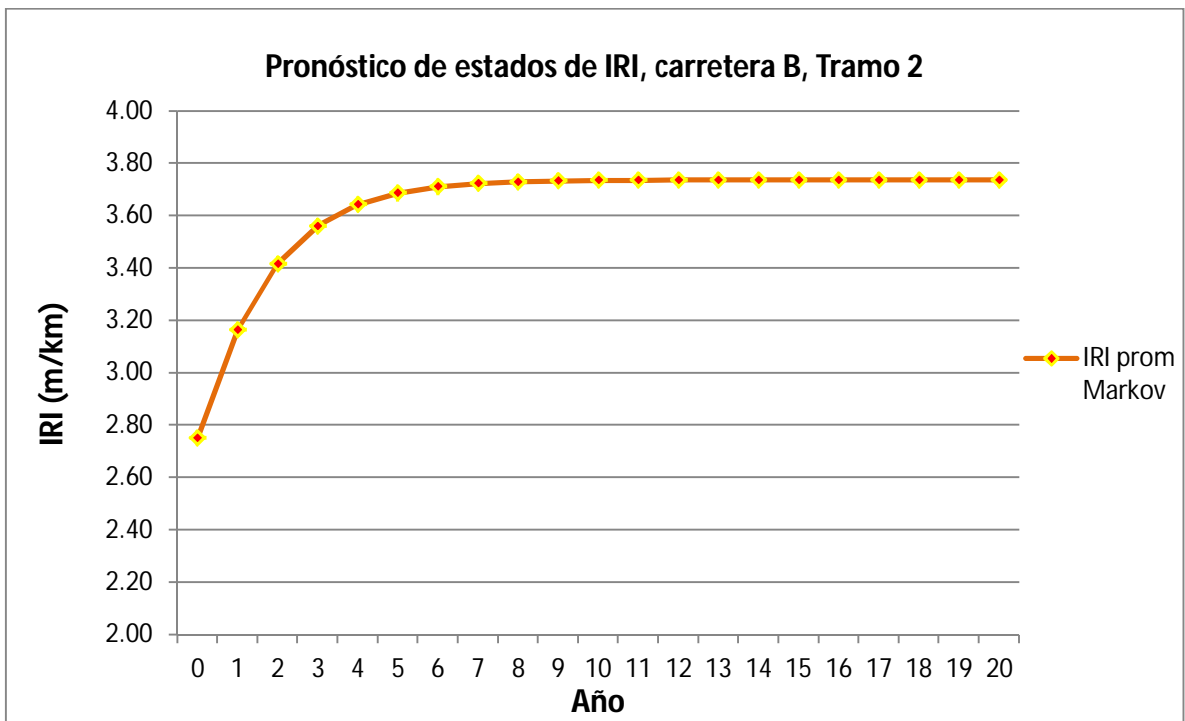


Figura 18 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 2 de la carretera B

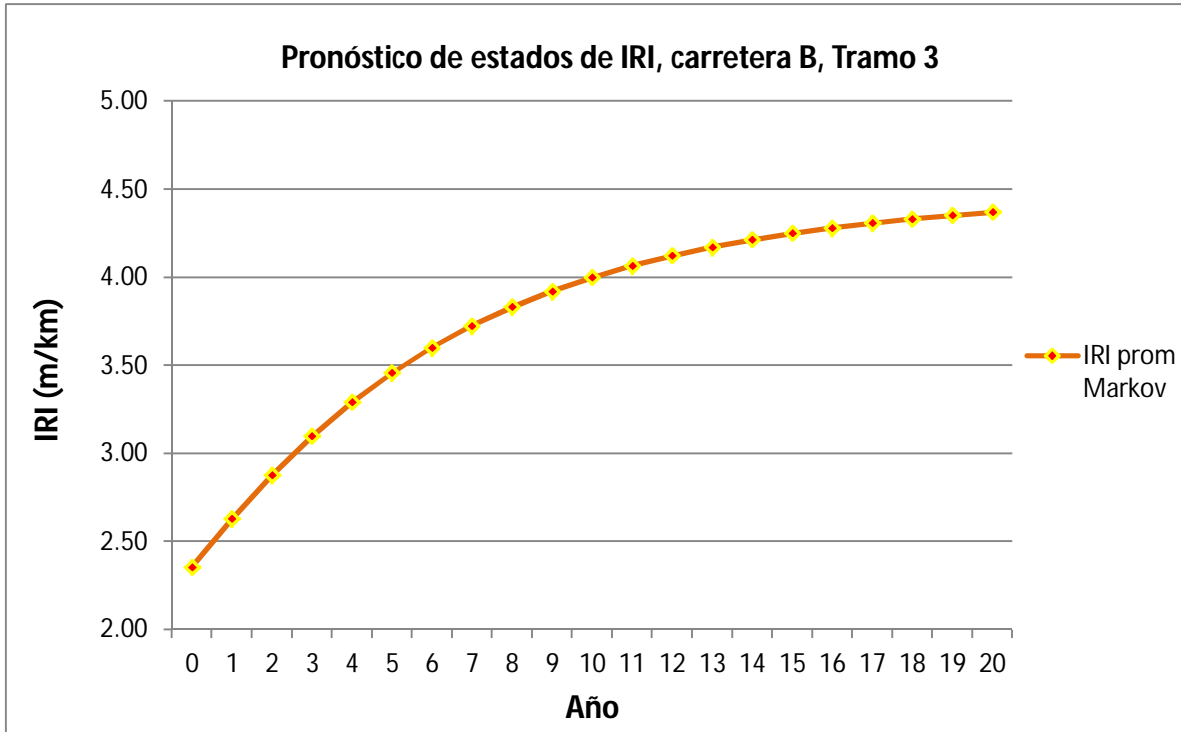


Figura 19 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo3 de la carretera B

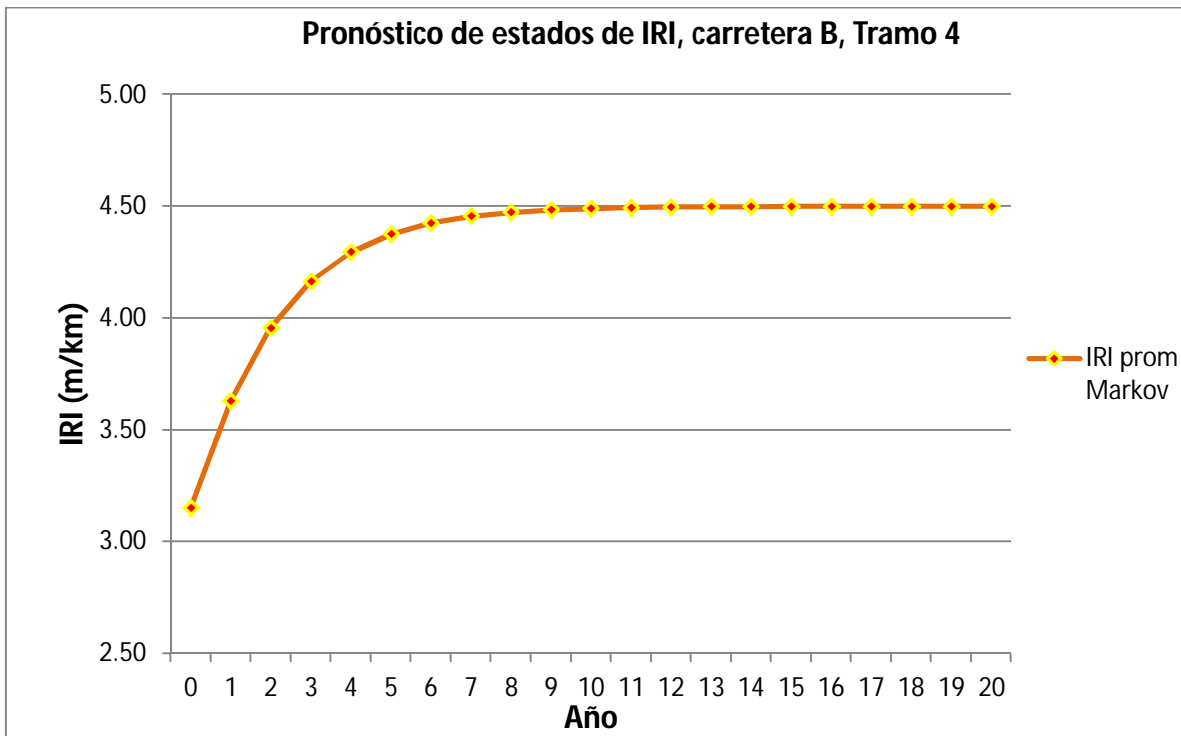


Figura 20 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 4 de la carretera B

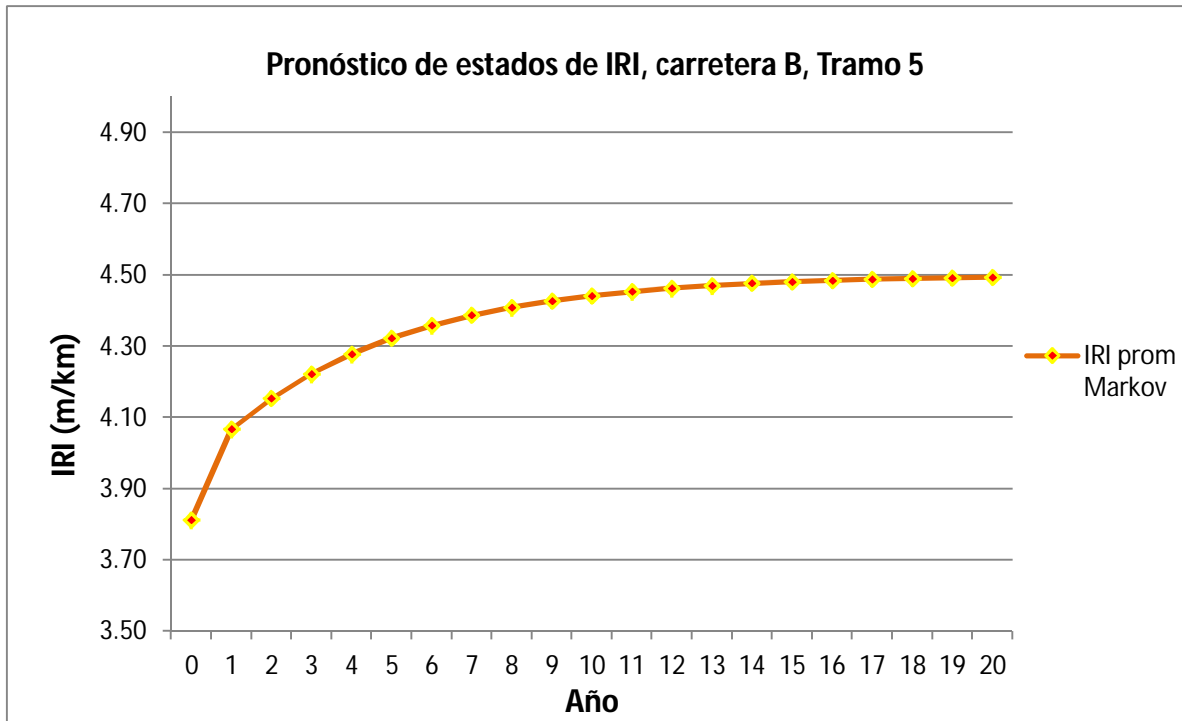


Figura 21 Curva de deterioro con base en IRI para el tramo 5 de la carretera B

Dado que las cadenas de Markov son procesos sin memoria, el pronóstico del deterioro en cualquier año en el futuro estará directamente relacionado con el vector de estado inicial del activo y de la matriz de probabilidades de transición, la cual se construye con base en los datos disponibles.

En los ejemplos descritos se aprecia como las bandas de condición decaen rápidamente por efecto del vector de estado inicial y la matriz de probabilidad de transición.

Cada agencia o entidad encargada de la conservación de la infraestructura diseña sus políticas de conservación del pavimento, las cuales se basan comúnmente en los indicadores de deterioro del mismo.

El criterio de fin de vida o de intervención del pavimento estará en función de los indicadores de deterioro diseñados.

Mediante la aplicación de esta metodología se obtienen porcentajes de la red que estarán en una cierta condición en un tiempo dado, con lo cual se pueden programar presupuestos a nivel de red, sin conocer los segmentos específicos que deberán ser intervenidos.

#### **4.6. Limitaciones del proceso con cadenas de Markov homogéneas.**

Como se describió en capítulos anteriores, las cadenas de Markov homogéneas, o estacionarias, utilizan una matriz de probabilidad de transición, lo cual supone que no existen variaciones de los factores que inciden en el deterioro de los pavimentos tales como tránsito, clima, materiales, etc., principalmente a largo plazo.

El uso de cadenas de Markov homogéneas limitan su aplicación para períodos cortos de tiempo o para pavimentos que no presentan gran variabilidad.

Como se ha comentado por varios autores, los procesos de Markov pueden ser implementados con un mínimo de 2 años de inspección, sin embargo, el pronóstico futuro de la condición del pavimento se regirá por el vector de estado de condición inicial y la matriz de probabilidad de transición construida con las dos inspecciones.

## **5. ALGORITMO DE PEIRCE PARA OBTENER CURVAS DE DETERIORO**

Para predecir el deterioro en función de IRI, Peirce (2003) utilizó la matriz de probabilidades de transición acumulada, con la cual obtuvo por medio de la modelación Monte Carlo los valores del deterioro del pavimento a lo largo del período de análisis.

Para el presente trabajo se aborda el procedimiento de Peirce con algunas variantes, el cual se describe más adelante.

### **5.1. Simulación Montecarlo.**

El método de Monte Carlo es un procedimiento numérico que permite aproximar la solución de expresiones matemáticas complejas.

Fue Nicholas Metrópolis quien sugirió el nombre de Monte Carlo como referencia del Casino de Monte Carlo por ser Mónaco la capital del juego de azar, ya que un ejemplo de un dispositivo generador simple de números aleatorios es precisamente la ruleta.

El desarrollo de la simulación data de la década de los cuarentas cuando Stanislaw Ulam y Jhon Von Neuman lo aplican en el proyecto Manhattan en los Álamos para simulaciones estocásticas en el proceso de construcción de bombas atómicas.

Es a partir de la década de los setenta cuando el desarrollo computacional permite proveer mayor precisión en el uso del método o simulación Monte Carlo. El método de Monte Carlo proporciona soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas matemáticos permitiendo la realización de experimentos con muestreos de números pseudoaleatorios generados en una computadora.

La simulación Monte Carlo resulta fundamental en aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o estadístico de una variable está presente. En la actualidad es aplicado a muchos procesos con problemas complejos en diversas áreas como informática, empresarial, economía, social, industrial.

## 5.2. Descripción del algoritmo de Peirce.

Para la aplicación del algoritmo se parte de la matriz de probabilidades de transición acumulada. El establecimiento de la matriz se realiza de acuerdo con lo descrito en el capítulo 4.

Al establecer una matriz de probabilidad de transición acumulada el último estado de la matriz o última columna será 1, representado el 100% en cada uno de los renglones. Supóngase, como ejemplo, la siguiente matriz de probabilidad de transición acumulada (Tabla 11).

Tabla 11 Ejemplo de matriz de probabilidad de transición acumulada

A DE		2009						
		1	2	3	4	5	6	7
2008	1	0.206	0.683	0.889	0.905	0.952	0.968	1.000
	2	0	0.486	0.789	0.881	0.927	0.963	1.000
	3	0	0	0.642	0.906	0.943	1.000	1.000
	4	0	0	0	0.682	0.864	0.955	1.000
	5	0	0	0	0	0.810	0.938	1.000
	6	0	0	0	0	0	0.667	1.000
	7	0	0	0	0	0	0	1.000

Los números 1 a 7 representan a cada uno de los estados de condición que se han predefinido para predecir el deterioro del pavimento. Supóngase que a cada uno de los estados mostrados en la Tabla 11 les corresponde los rangos y marcas de clase designados en la Tabla 12.

Tabla 12 Ejemplo de estados de condición con rangos de IRI y marcas de clase.

ESTADOS	RANGO DE IRI (m/km)	MARCA DE CLASE
1	DE 0.0 A 1.0	0.5
2	DE 1.0 A 2.0	1.5
3	DE 2.0 A 3.0	2.5
4	DE 3.0 A 4.0	3.5
5	DE 4.0 A 5.0	4.5
6	DE 5.0 A 6.0	5.5
7	DE 6.0 A 7.0	6.5

Nótese que debajo de la diagonal principal de la matriz de probabilidad de transición acumulada los valores son ceros, representado que no existe la probabilidad de mejora de condición del pavimento cuando no se realizan acciones de conservación.

El algoritmo de Peirce, para obtener curvas de deterioro por medio de la simulación Monte Carlo, fue desarrollado en 1039 líneas. En el presente trabajo se optimizaron las funciones para dejar la estructura mostrada en la Tabla 13.

Tabla 13 Algoritmo para modelación de la curva de deterioro con simulación Monte Carlo.

---

```
Option Explicit
Public Sub Montecarlo()
    Dim intento As Integer, año As Integer, i As Integer, j As Integer
    Dim aleatorio As Single
    Randomize
    For intento = 1 To 1500 '1500 intentos...
        i = 13
        For año = 1 To 20 '...por 20 años
            aleatorio = Rnd()
            j = i - 11
            While aleatorio >= Cells(i, j)
                j = j + 1
            Wend
            Cells(intento + 27, año + 2) = Cells(1, j)
            i = j + 11
        Next año
    Next intento
End Sub
```

---

El algoritmo desarrollado permite generar números aleatorios entre 0 y 1 a modo de representar un porcentaje. Estos números aleatorios generados se comparan con cada uno de los valores de la matriz de probabilidad de transición acumulada empezando con el primer renglón y de izquierda a derecha. A medida que cada número aleatorio se aproxima a un valor de la matriz de probabilidad de transición acumulada, sin sobrepasarlo, se asigna un estado de condición, con el cual se iniciará el siguiente análisis.

Para detallar el procedimiento a continuación se describe un ejemplo con un análisis para los primeros 4 años.

Supóngase que el primer número aleatorio generado por el algoritmo fue 0.65, este número se compara con la matriz acumulada de izquierda a derecha empezando por el primer renglón. El primer número de la matriz es 0.206, como 0.65 es mayor a 0.206, entonces se compara con el siguiente valor el cual es 0.683, dado que 0.65 es menor que 0.683 se asigna una condición de estado 2 por aproximarse al valor de probabilidad de la segunda columna sin sobrepasarlo, lo cual significa que para el primer año el estado de condición es el 2 y se asigna un valor de IRI de 1.5m/km, de acuerdo con lo establecido en la Tabla 12 y la matriz de 7X7 descrita anteriormente.

Como en el caso anterior el estado de condición fue de 2, ahora empezamos en el segundo renglón. Se genera nuevamente un número aleatorio, supóngase que fue 0.23, este se compara empezando por el primer valor encontrado, el cual es 0.486, dado que 0.23 es menor a 0.486 se asigna un estado de condición de 2 nuevamente por aproximarse al valor de esa columna sin sobrepasarlo, lo que significa que para el año 2 el estado de condición continúa siendo el 2 con IRI igual a 1.5 mm/km.

Continuando en el segundo renglón dado que no hubo un cambio de condición, se genera un nuevo número aleatorio. Supóngase que el nuevo aleatorio generado fue 0.52, este se compara con los valores del segundo renglón de izquierda a derecha, dado que 0.52 es mayor al primer valor de la matriz es decir 0.486, se compara con el siguiente valor que es 0.789, dado que 0.52 es menor a 0.789 se asigna al tercer año un valor estado de condición correspondiente a 3 al cual le corresponde un valor de IRI igual a 2.5 mm/km.

Como en el proceso anterior hubo un cambio de condición, se empieza el nuevo análisis empezando por el renglón 3. Supóngase que el cuarto número aleatorio generado fue 0.73, este valor se compara con los valores del tercer renglón empezando con 0.642, dado que 0.73 es mayor que 0.642, entonces se compara con el siguiente valor de la siguiente columna el cual es 0.906, como 0.73 es menor a 0.906, entonces se asigna un estado de condición de 4 para el cuarto año con un IRI de 3.5 m/km. Hasta este punto se ha realizado una modelación del deterioro del pavimento para 4 años.



El proceso anterior se realiza 20 veces, es decir para 20 años de pronóstico. Una vez transcurridos los 20 intentos, se realiza este mismo procedimiento 1500 veces representado 1500 modelos de deterioro del pavimento.

Finalmente con los 1500 valores obtenidos tras aplicar la simulación Monte Carlo, se calculan los valores promedio de cada uno de los 20 años, con los cuales se obtienen y grafican las curvas de deterioro del pavimento con base en el IRI.

### 5.3. Aplicación del algoritmo de Peirce.

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para aplicación del algoritmo de Peirce, se obtuvieron las matrices de transición acumuladas para cada uno de los tramos de las carreteras A y B (Tablas 14 y 15).

Tabla 14 Matrices de probabilidades de transición acumuladas de la carretera A, Tramo 1(a), Tramo 2 (b).

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.176	0.623	0.939	1.000
	3	0.000	0.000	0.620	0.909	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.907	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(a)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.500	1.000	1.000	1.000
	2	0.000	0.161	0.656	0.978	1.000
	3	0.000	0.000	0.378	0.756	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.758	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(b)

Tabla 15 Matrices de probabilidades de transición acumuladas de la carretera B, Tramo 1(a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c), Tramo 4 (d), Tramo 5 (e).

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.875	1.000	1.000	1.000
	2	0.000	0.479	0.801	0.883	1.000
	3	0.000	0.000	0.656	0.990	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.824	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(a)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.500	0.800	0.900	1.000
	3	0.000	0.000	0.444	0.889	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(b)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.727	0.989	1.000	1.000
	3	0.000	0.000	0.720	0.920	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.885	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(c)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.289	0.911	1.000	1.000
	3	0.000	0.000	0.536	0.714	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.583	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(d)

DE \ A		2009				
		1	2	3	4	5
2008	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	2	0.000	0.000	0.333	1.000	1.000
	3	0.000	0.000	0.000	0.667	1.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.800	1.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

(e)

#### 5.4. Resultados obtenidos.

Con la aplicación del algoritmo se obtuvieron 1500 modelaciones de IRI para cada uno de los 20 años de análisis, en cada una de las carreteras de análisis. En cada año se obtuvo el promedio de los valores de IRI, los cuales se representaron en las gráficas de curvas de deterioro que se muestran en las Figuras 22 a 28.

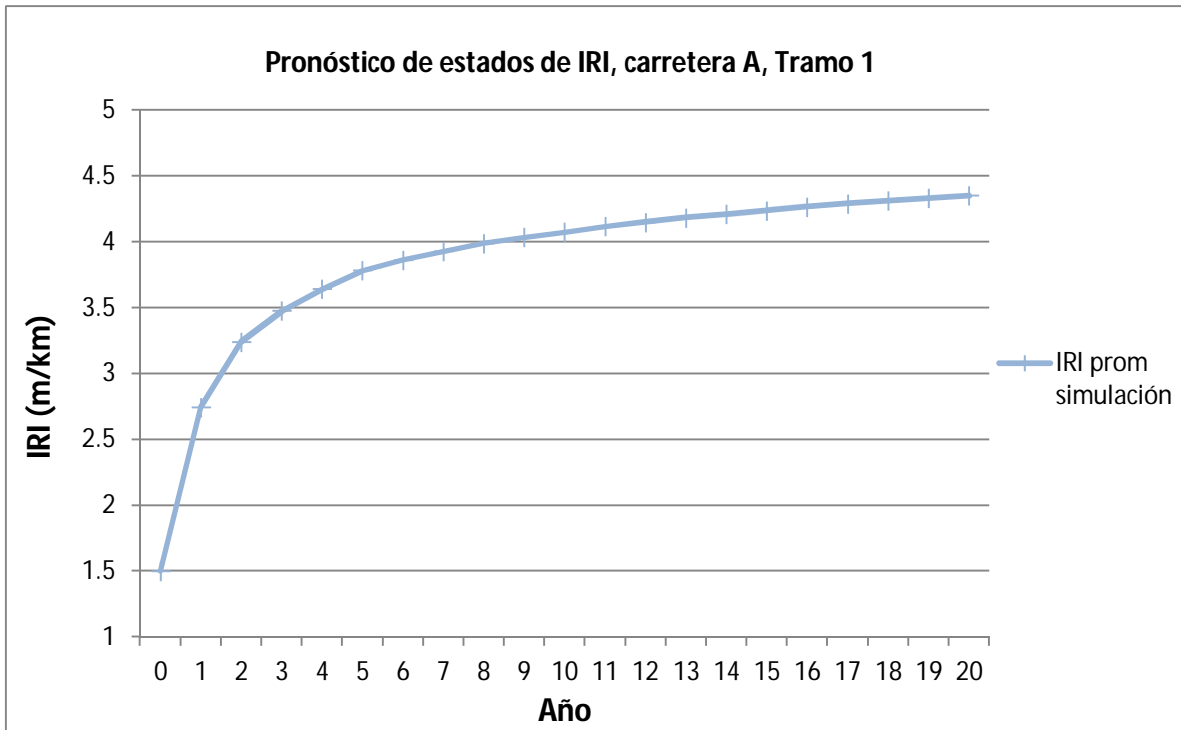


Figura 22 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera A, Tramo1.

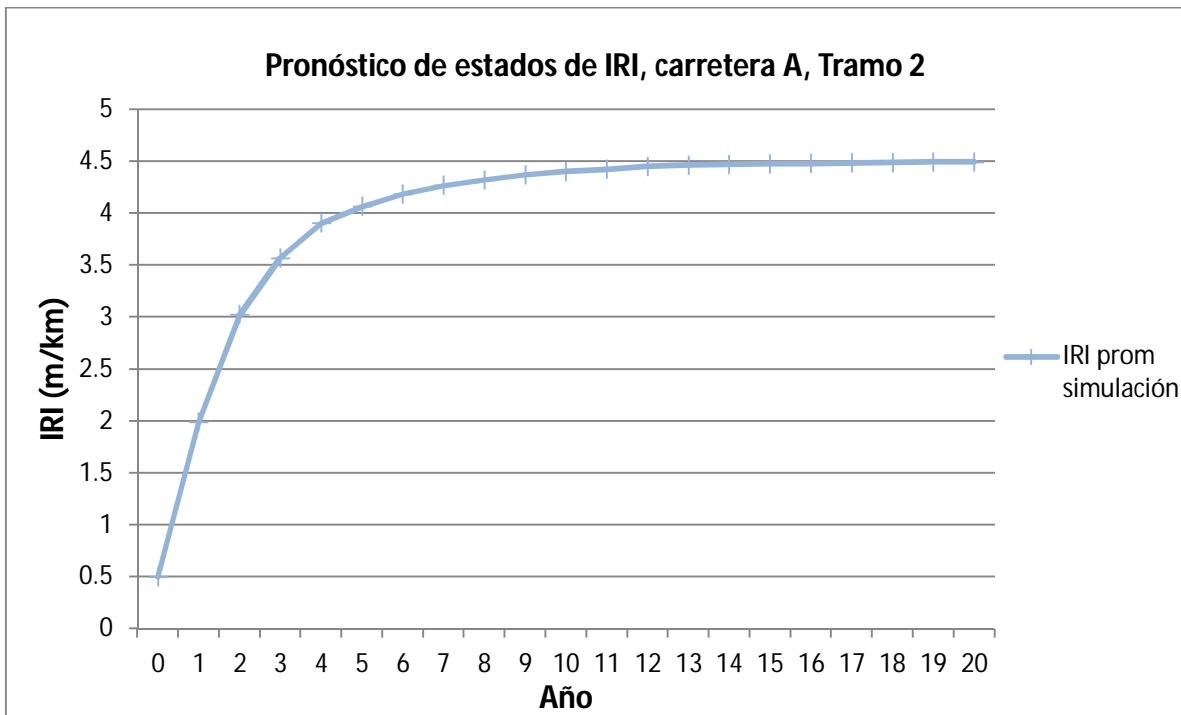


Figura 23 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera A, Tramo2.

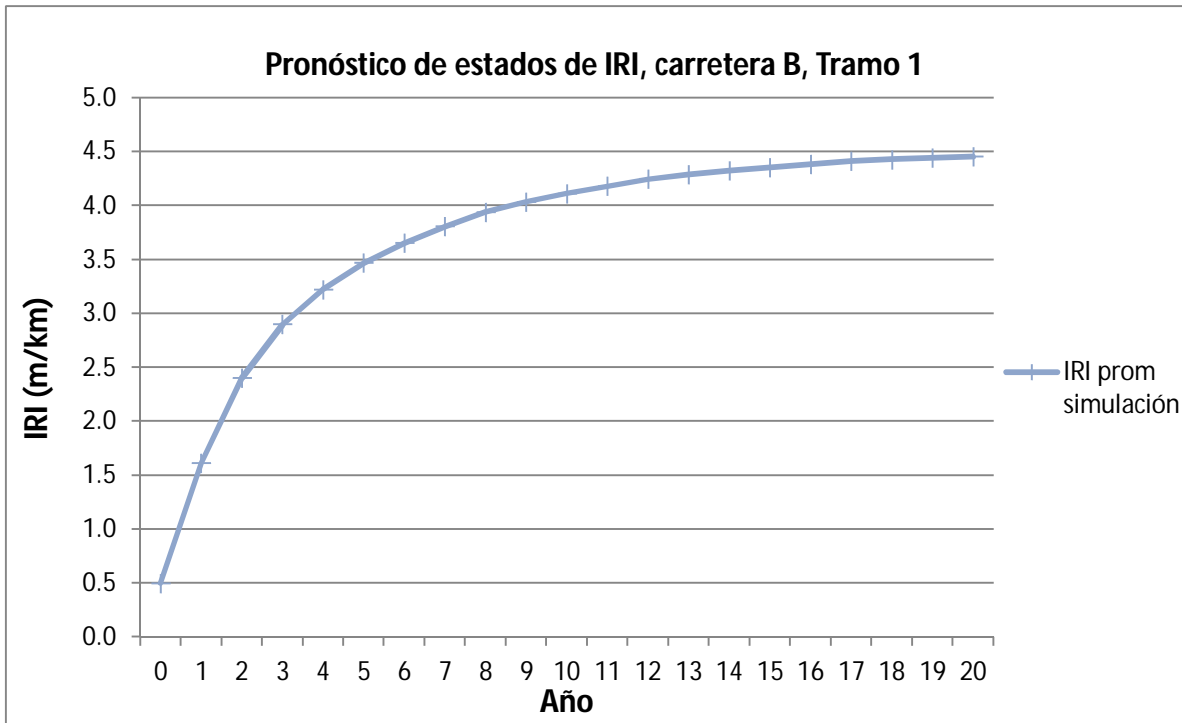


Figura 24 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo1.

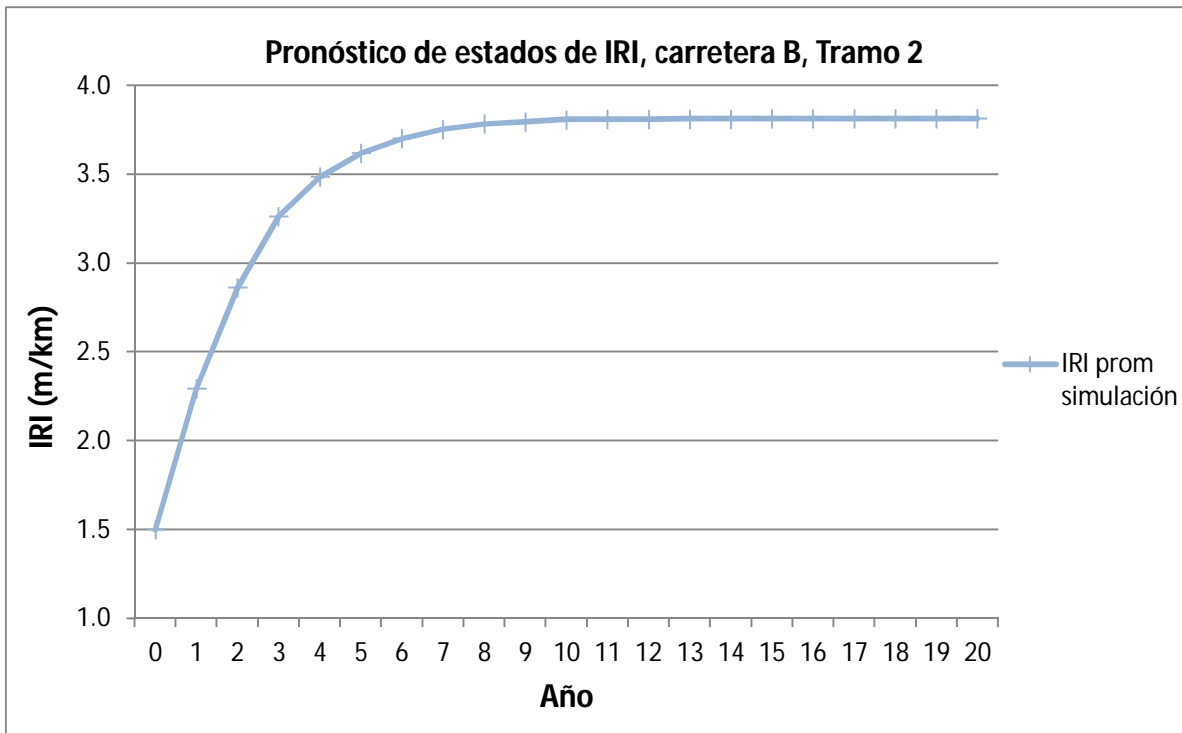


Figura 25 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo2.

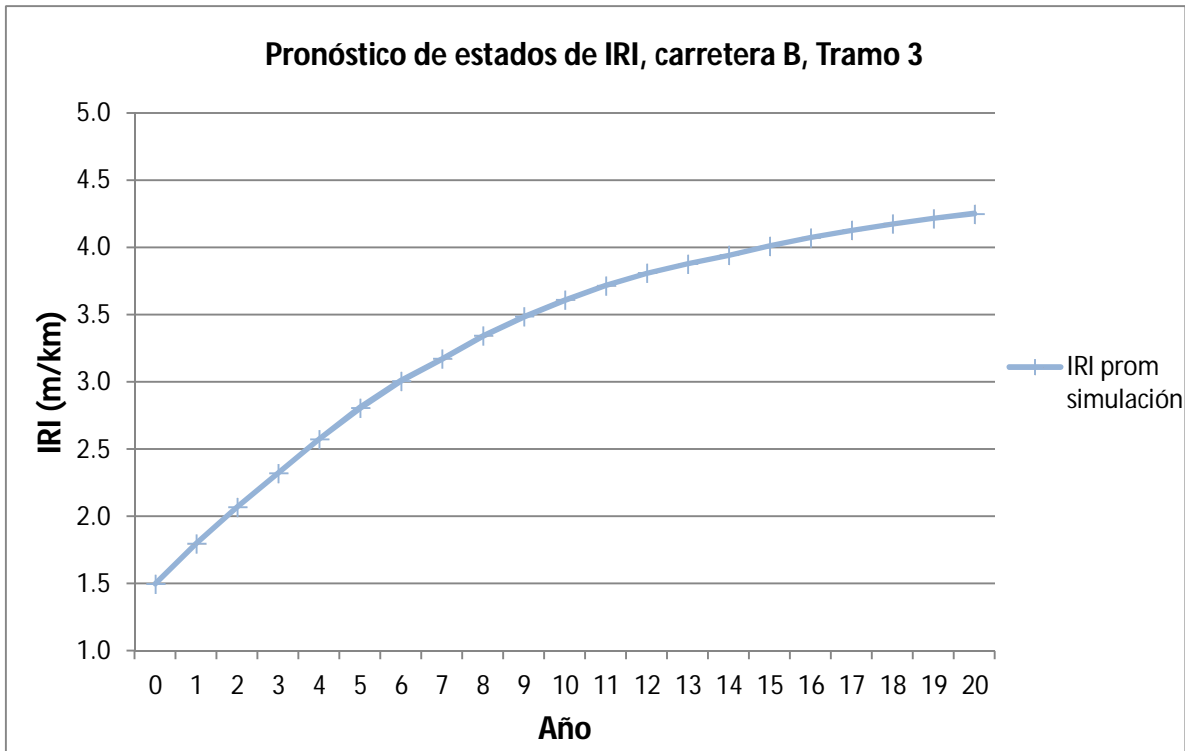


Figura 26 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo3.

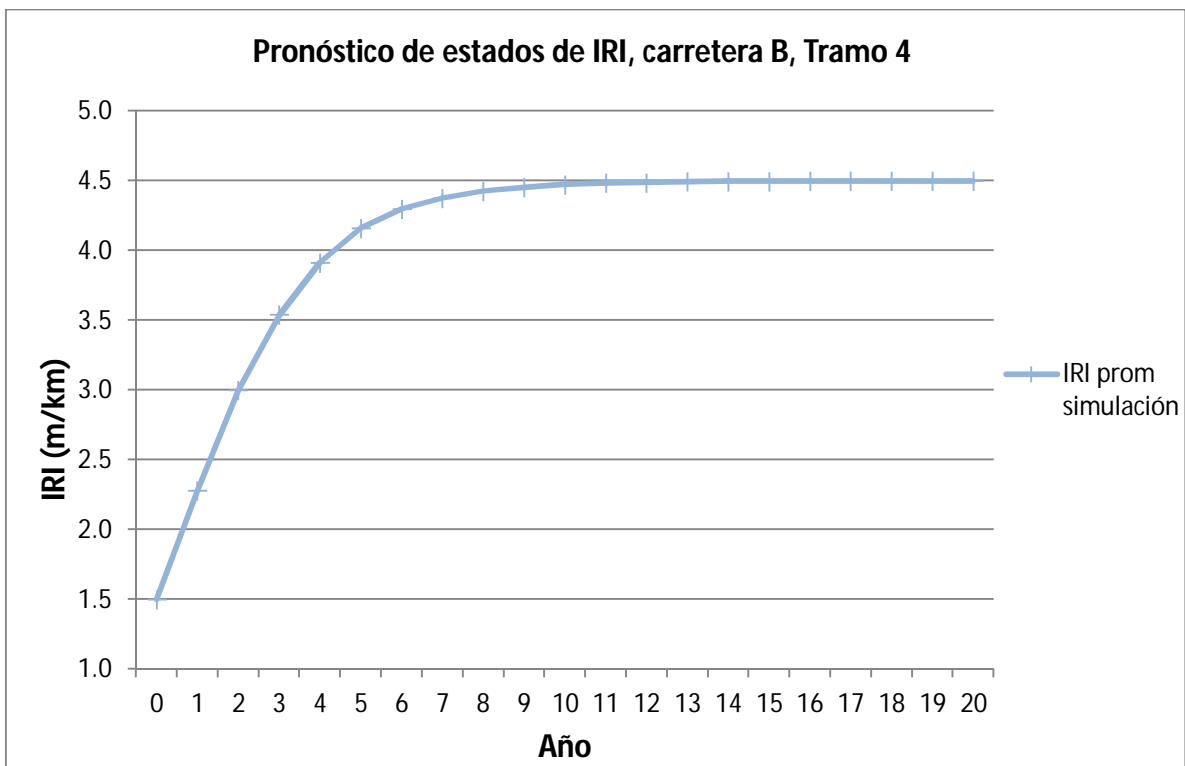


Figura 27 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 4.

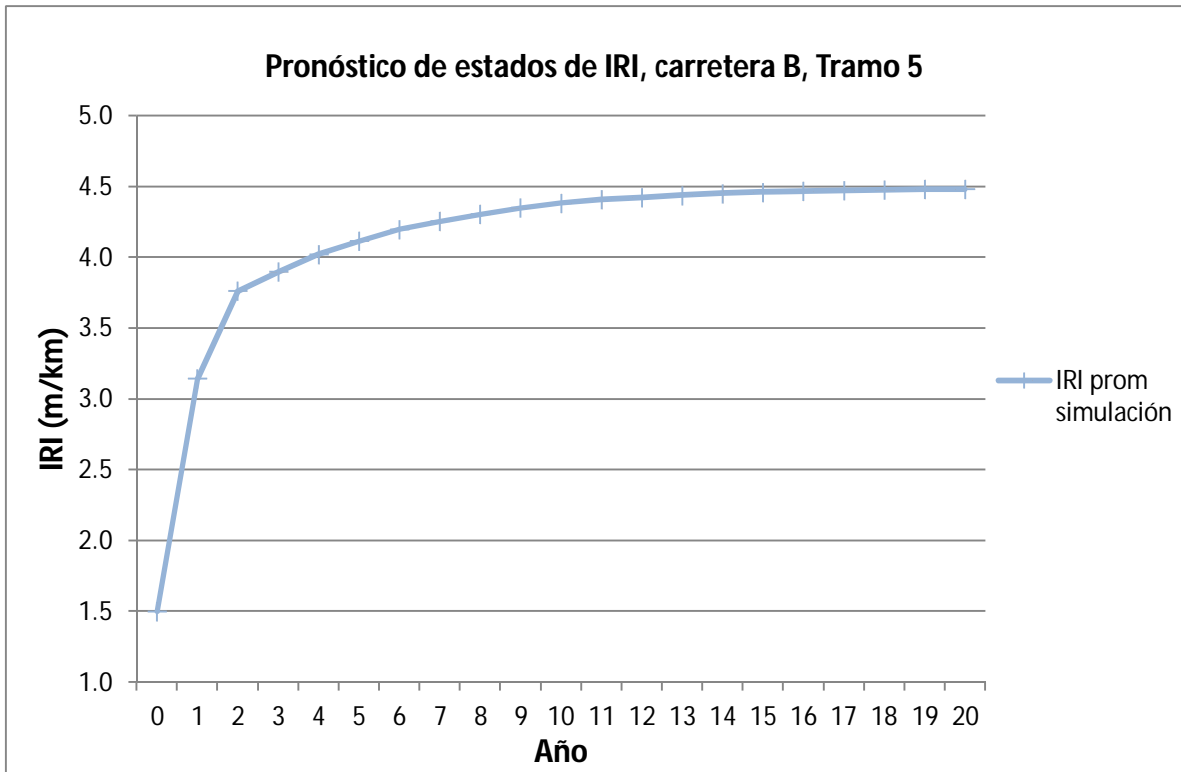


Figura 28 Curvas de deterioro obtenidas mediante simulación, carretera B, Tramo 5.

Al comparar las curvas de deterioro obtenidas tras aplicar la metodología de cadenas de Markov con las obtenidas con la simulación Montecarlo, se aprecia como en el segundo caso la curva de deterioro inicia con valores menores, lo cual se debe a la forma en como se construye la matriz de probabilidad de transición, ya que el procedimiento permite iniciar con valores cercanos al límite inferior. Después de algunos años las curvas se aproximan entres sí en forma asintótica (Figuras 29 a 35)

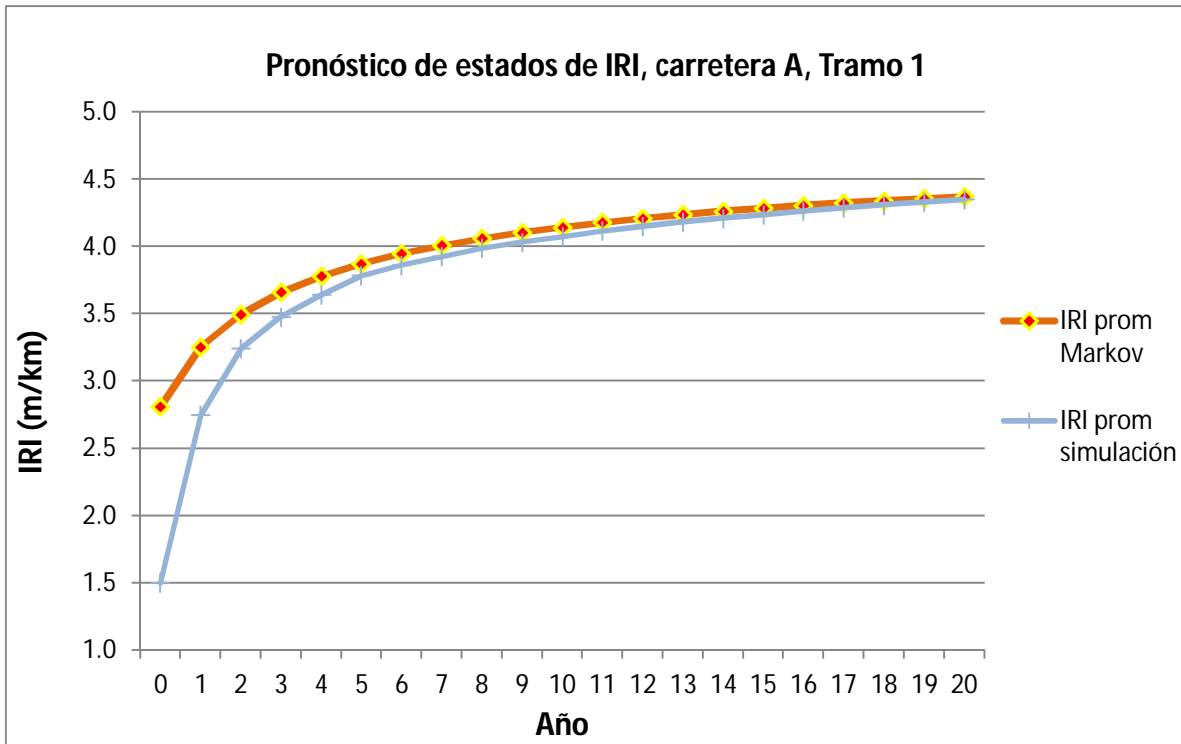


Figura 29 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera A, Tramo 1

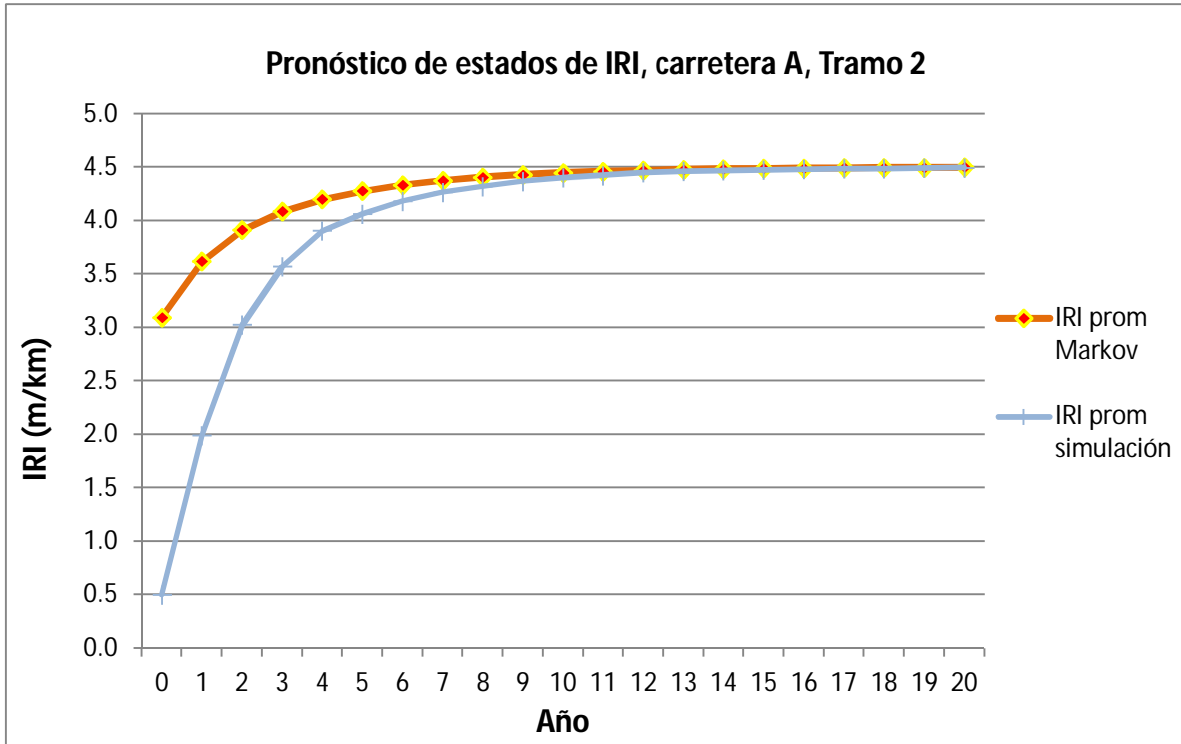


Figura 30 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera A, Tramo 2

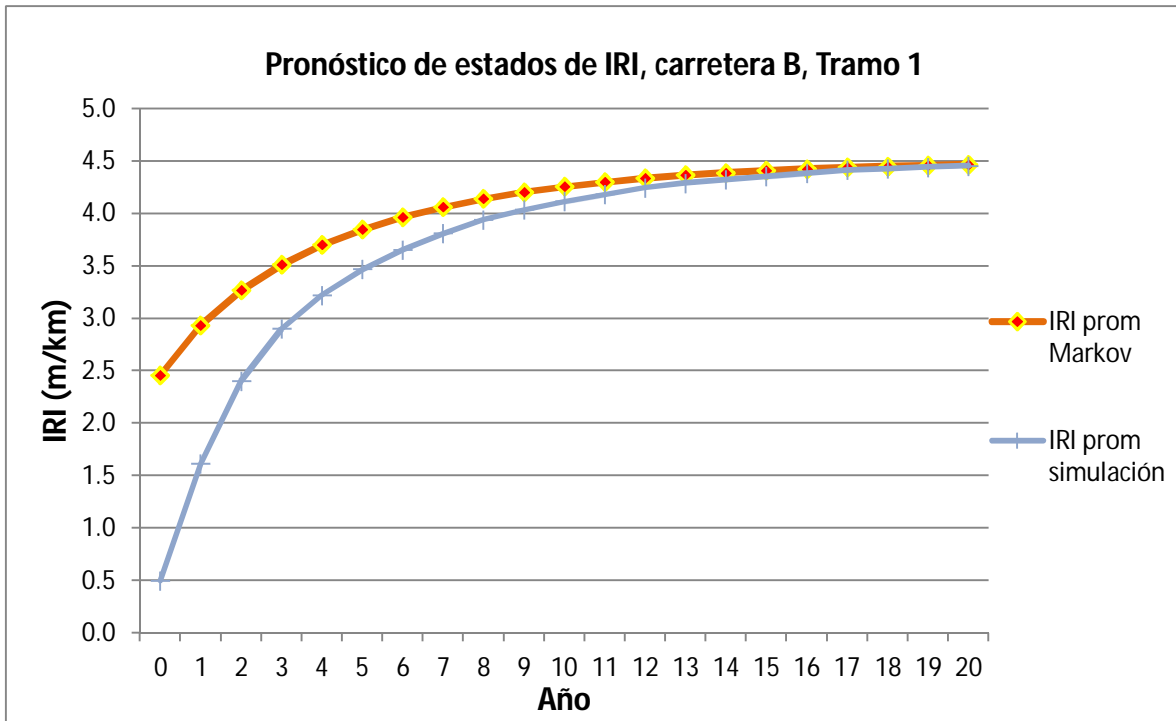


Figura 31 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 1

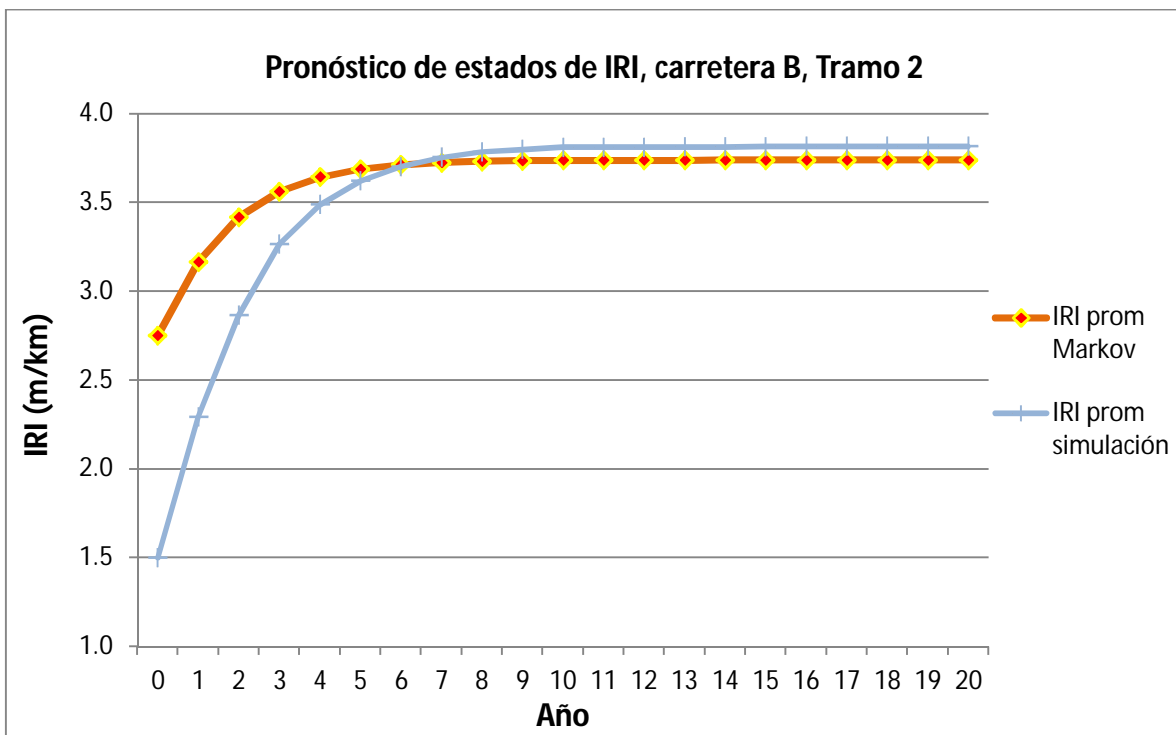


Figura 32 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B Tramo 2



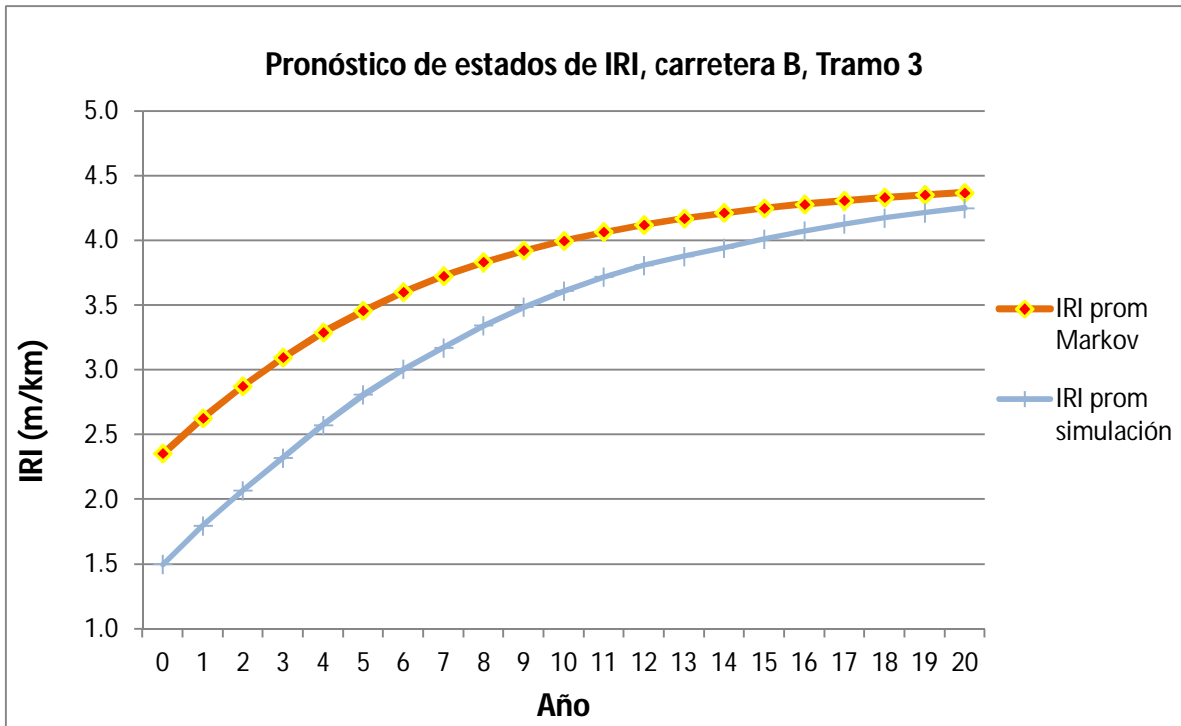


Figura 33 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 3

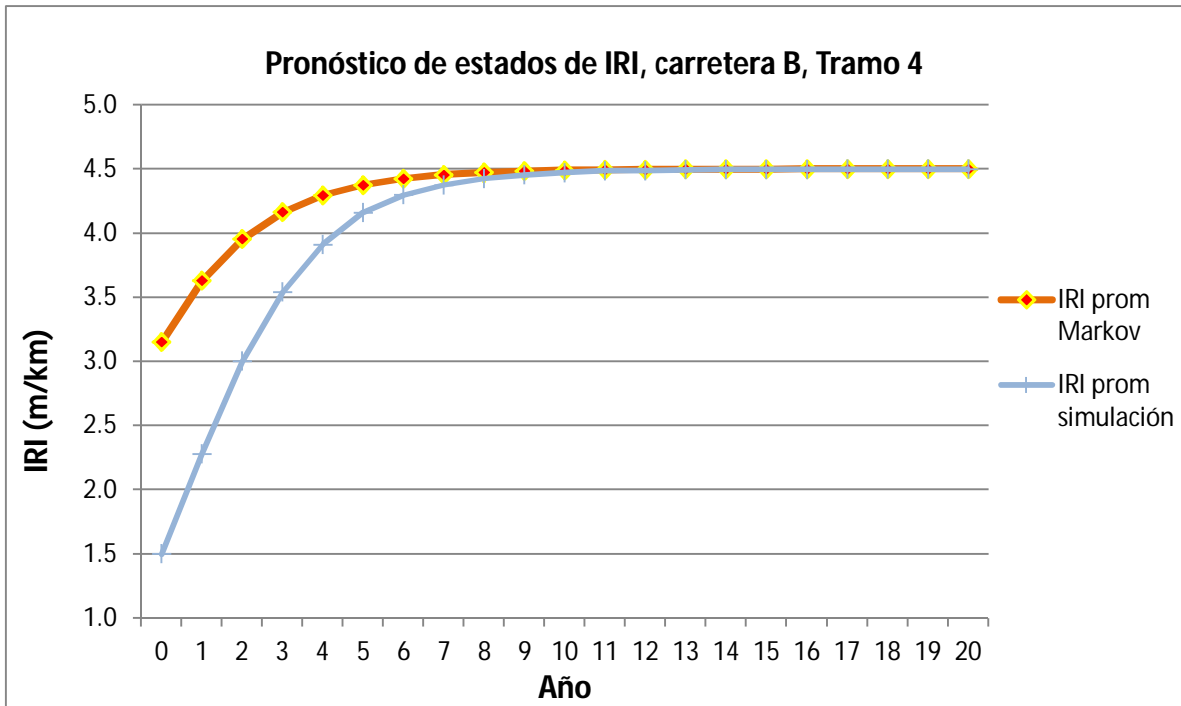


Figura 34 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 4

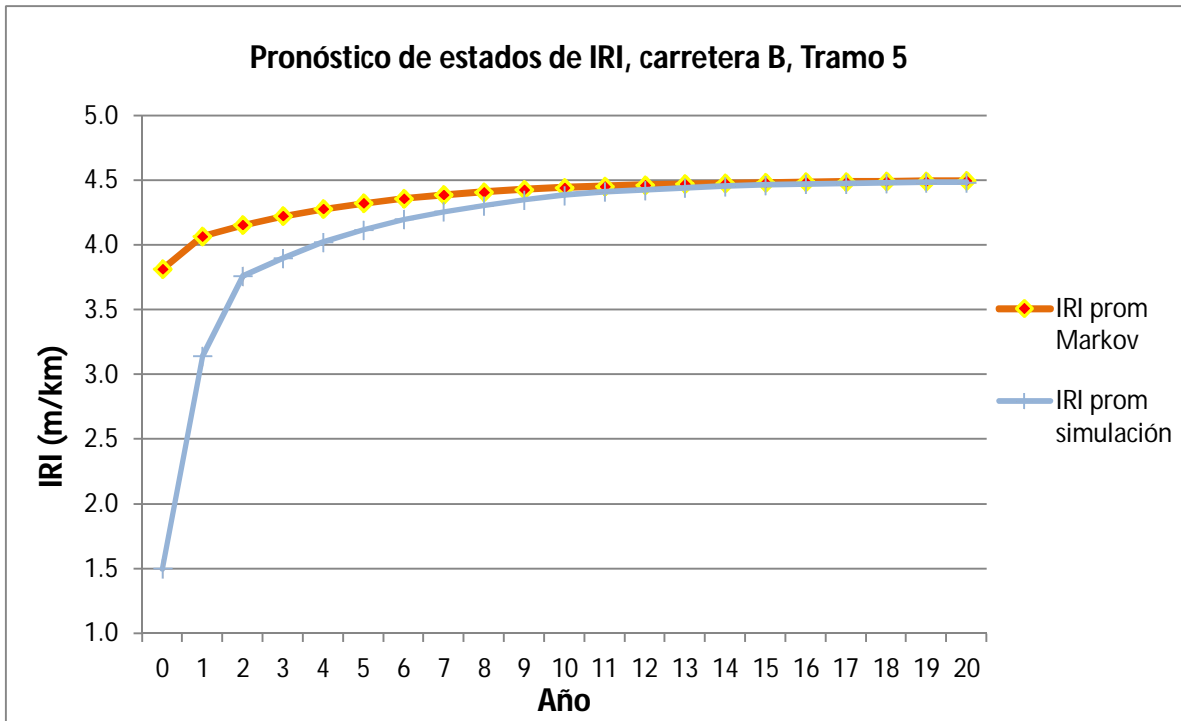


Figura 35 Comparativa de curvas de deterioro obtenidas con Markov y simulación Montecarlo, carretera B, Tramo 5

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante la aplicación de cadenas de Markov homogéneas es posible determinar los porcentajes de la red carretera que se encuentran en un estado de condición dado en un tiempo determinado, sin embargo, no es posible identificar los tramos específicos de la red que requieren de algún tipo de intervención para su conservación. Por lo cual el método es apropiado para realizar una previsión presupuestal anual, de cara mantener el activo en las condiciones deseables.

Cuando se establecen matrices de probabilidad de transición para segmentos específicos, la proyección del deterioro se limita a la gama de valores inscritos en el vector de estado inicial y su matriz de probabilidades de transición, en otras palabras si se tiene un corto rango, la probabilidad de transición entre estados de condición, al aplicar el método establecido por “n” años, variará en función de tal rango.

Las curvas de deterioro que resultan de la aplicación de cadenas de Markov tienden a decaer de manera más pronunciada cuando el vector de estado inicial del deterioro en términos de IRI es en promedio alto, y en menor proporción cuando el vector de estado del pavimento en función de IRI es en promedio bajo.

Las curvas de deterioro obtenidas al aplicar la metodología de las cadenas de Markov difieren de las obtenidas a partir de la simulación Montecarlo; en el primer caso el valor de IRI inicial se obtiene como el promedio de los estados de condición del pavimento, y en el segundo caso el valor inicial de IRI está directamente relacionado con el primer elemento de la matriz de probabilidad de transición. En ambos casos las curvas de deterioro se aproximan entre sí en forma asintótica después de algunos años en la proyección del deterioro.

Las curvas obtenidas con la simulación de Montecarlo permiten definir una curva de deterioro con una mayor gama de valores iniciales, lo cual sería útil para pavimentos relativamente nuevos o en buen estado, sin embargo, prevalece la limitante de la variación de la proyección de valores por efecto del vector de estado inicial.

En los registros de IRI trabajados se observa una tendencia de incremento del valor de IRI al pasar de un año al otro, sin embargo, en algunas zonas aisladas se presentan valores menores de IRI en el año posterior, lo que contraviene el principio del deterioro cuando no se han realizado acciones de conservación. Este efecto se debe principalmente a la forma de medición IRI ya que la circulación del equipo de medición puede tener ligeras variaciones en su recorrido modificando las lecturas realizadas. En estos casos se consideró que el valor de IRI se mantuvo en la misma condición al cambiar de año. Resulta indispensable realizar mediciones de IRI con equipos calibrados.

Si bien el proceso de cadenas de Markov se puede implementar con un mínimo de 2 años, es deseable contar con mayor información histórica sobre el desempeño del activo carretero para capturar la mayor experiencia posible.

Es posible realizar la modelación del deterioro del pavimento, además del IRI, con varios indicadores más como por ejemplo, porcentaje de agrietamientos, fricción, profundidad de roderas, etc., incluso con indicadores compuestos como el PCI (índice de condición del pavimento, por sus siglas en inglés), entre otros.

Para realizar la modelación del deterioro del pavimento con base en la progresión del IRI se recomienda establecer escalas de forma tal que permita la implementación de acciones de conservación acorde a las necesidades de la infraestructura. Asimismo se recomienda realizar mediciones sistemáticas de IRI para validar los modelos desarrollados.

La predicción del deterioro con cadenas de Markov homogéneas puede ser confiable en el corto plazo, por ejemplo un máximo de 5 años, toda vez que no existan cambios relevantes en las variables independientes.

De acuerdo con lo anterior, es decir considerando, que en muchos casos, las variables que inciden en el deterioro del pavimento no permanecen constantes en el tiempo y se limita el resultado de la modelación, es recomendable trabajar con cadenas de Markov no homogéneas.

## 7. GLOSARIO DE TÉRMINOS

**AASHO:** American Association of State Highway Officials (Asociación Americana de Carreteras Estatales Oficiales).

**AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Carreteras Estatales y Transportes Oficiales).

**ASTM:** American Society for Testing Materials (Asociación Americana de ensayo de materiales) es una Asociación Internacional de Normas.

**CADENAS DE MARKOV:** Proceso estocástico donde la condición del estado futuro está en función del estado presente y no de estados pasados.

**ESAL:** Equivalent Single Axle Load (Ejes sencillos equivalentes cargados), de 18 kips (kilo-libras) o 8.2 toneladas.

**GEORREFERENCIAR:** Posicionamiento con el que se define un objeto espacial, se puede realizar a través de coordenadas geográficas o UTM.

**HDM-3:** Highway Design and Maintenance Standards Model (Modelo de estándares de diseño y mantenimiento de carreteras).

**HDM-4:** Highway Development and Management Model (Modelo de gestión y desarrollo de carreteras en su versión 4).

**IRI:** International Roughness Index (Índice Internacional de Regularidad), es un parámetro de medida de la regularidad de la superficie del pavimento.

**ISA:** índice de Servicio actual, traducido así del PSI.

**MATRIZ DE PROBABILIDAD DE TRANSICIÓN:** Matriz cuadrada que contiene los elementos de probabilidad de estados de condición al pasar de un año a otro.

**MCI:** Índice de gestión de criterio, para evaluar un índice compuesto del pavimento utilizado en Japón.

**MONTE CARLO:** Método o Simulación de un procedimiento numérico que deriva su nombre del casino de Monte Carlo.

**NCHRP:** National Cooperative Highway Research Program (Cooperativa Nacional del Programa de Investigación Carretera)

**PCI:** Pavement Condition Index (Índice de Condición del Pavimento)

**PCS:** Pavement Condition State (Estado de Condición del Pavimento)

**PSI:** Present Service Index (índice presente de servicio), representa la pérdida de servicio de un pavimento.

**UNAM:** Universidad Nacional Autónoma de México

**UTM:** Universal Transversa Mercator, Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (1993). *American Asociation of State Highway and Transportation Officials, AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES.*

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2012). "Standard Guide for Network Level Pavement Management" (Norma ASTM E 1166 – 00). In *Annual Book of ASTM Standards 2012*. (pp. Sección 4, Construction; volumen 04.03, Road and Paving Materials – Vehicle-Pavement Systems). West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.: ASTM International, (2012).

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2012). Standard Guide for Computing International Roughness Index of Roads from Longitudinal Profile Measurements" (Norma ASTM E 1926 – 08). In *Annual Book of ASTM Standards 2012*. (pp. Sección 4, Construction; volumen 04.03, Road and Paving Materials – Vehicle-Pavement Systems). West Conshohocken, PA, Estados Unidos de América.: ASTM International, (2012).

Anastasopoulos, P., Mannering, F., & Haddock, J. (2009). *Effectiveness and Service Lives/Survival Curves of Various Pavement Rehabilitation Treatments*. Joint Transportation Research Program Technical Report. Series Civil Engineering 2009.

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).

Butt, A., Shahin, M., Feighan, K., & Carpenter, S. (1987). Pavement Performance Prediction Model Using the Markov Process. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1123, TRB, National Research Council*, 12-19.

Ching, W.-K., & Michael, K. N. (2006). *Markov Chains Models, Algorithms and Application*. United State of America: Springer Science.

Corro Caballero, S., & Prado Ollervides, G. (1974). *Diseño estructural de carreteras con pavimento flexible. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM Publicación 325*. México D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Corro Caballero, S., Magallanes, R., & Prado Ollervides, G. (1981). *Instructivo para diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM Publicación 444*. México D.F.: Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Daeseok, H., Kobayashi, K., & Myungsik, D. (2012). Section-based Multifunctional Calibration Method for Pavement Deterioration Forecasting Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 386-394.

Darter, M., & Hudson, W. (1973). *Probabilistic Design Concepts Applied to Flexible Pavement System Design. Report CFHR 1-869-123-18*. Austin, Texas: University of Texas.

Ford, K. M., Arman, M., Labi, S., Sinha, K. C., Shirole, A., Thompson, P., et al. (2011). *NCHRP 08-71 "Methodology for Estimating Life Expectancies of Highway Assets"*. School of Civil Engineering Purdue University.

Haas, R., Hudson, R., & Zaniewski, J. (1994). *Modern Pavement Management*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.

Hudson, W., Haas, R., & Uddin, W. (1997). *Infrastructure Management*. New York: Mc Graw-Hill.

Hunt, Phillip, & Bunker. (2003). Time series analysis of pavement roughness condition data for use in asset management. *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Systems Integrity and Maintenance*, (págs. 148-154). Cairns, Australia.

Karan, M., Smeatan, K., Hass, R., & Cheethan, A. (1979). *A System for Priority Programming of investments for Road Network Improvements*. Waterloo, Canada: University of Waterloo.

Le Than, N., Nguyen Dinh, T., & Kiyoshi, K. (2008). Infrastructure deterioration forecasting by local mixture hazard model and repair strategy optimization. *The International Seminar on asset Management For Developing World*, (págs. 1-16). Ho Chi Minh City, Vietnam.

Lethanh, N., & Adey, B. (2012). A Hidden Markov Model for Modeling Pavement Deterioration under Incomplete Monitoring Data. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 61 2012.



- Li, N. (1997). *Development of a Probabilistic Based, Integrated Pavement Management System*. Waterloo, Ontario, Canadá.: National Library of Canada.
- López Valdés, D. B., & Garnica Anguas, P. (2001). *Consideraciones para la aplicación del Índice de Fricción Internacional en carreteras de México*. Publicación técnica no. 170, Instituto Mexicano del Transporte, Km 12+000 carretera Querétaro-Galindo 76700, mpio. de Pedro Escobedo, Querétaro.
- MacLeod, D., & Walsh, R. (1998). Markov Modelling - A Case Study. *4th International Conference on Managing Pavements*.
- McLeod, D., & Uchwat, C. (2011). Applications of Markov Chain modelling to pavement and bituminous surface treatment performance in Northern Canada. *8th International Conference on Managing Pavement Assets*.
- Mills, L., Attoh-Okine, N., & McNeil, S. (2012). Developing pavement performance models for Delaware. *TRB 2012 Annual Meeting*.
- Mishalani, R., & Madanat, S. M. (2002). Computation of infrastructure transition probabilities using stochastic duration models. *ASCE Journal of Infrastructure System*, ASCE, 8(4), 139-148.
- Ortiz-Garcia, J., Costello, B., & Snaith, M. (2006). Derivation of transition probability matrices for pavement modelling. *Journal of Transportation Engineering*, 141-161.
- Peirce, L. (Abril de 2003). *A probabilistic approach to creating pavement deterioration models*. College of Engineering and Technology Brigham University, Department of civil and environmental engineering, Provo, Utah.
- Robinson, R., Danielson, U., & Snaith, M. (1998). *Road Maintenance Management Concept and Systems*. Grain Britain: Palgrave.
- Salem, O., El-Assaly, A., & Abourizk, S. (2003). Performance Prediction Models of Pavement Highway Network in Alberta. *TRB 2003 Annual Meeting*.
- Satirasetthavee, D., & Herabat, P. (Vol. XVII, No. 1, July 2007). Exploring Predictive Strengths of Stochastic Pavement Deterioration Models: A Case Study of Thailand's Highway Network. *Asia-Pacific Journal of Rural Development*, 39-55.

- Sayers, M., Gillespie, T., & Queiroz, C. (1986). *The International Road Roughness Experiment*. Washington D.C. USA.: The World Bank.
- Silva, F. M., Van Dam, T. J., Bulleit, W. M., & Ylitalo, R. (2000). Proposed pavement performance models for local government agencies in Michigan. *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 1699, p 82.
- Solminihač Tampier, H. (2001). *Gestión de Infraestructura Vial. 2a. ed.* Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Thompson, P. D., Ford, K. M., Arman, M. H., Labi, S., Sinha, K. C., & Shirole, A. M. (2012). *NCHRP REPORT 713 "Estimating Life Expectancies of Highway Assets"*. School of Civil Engineering, Purdue University.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. (June de 2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*. Georgetown Pike, Mc Lean, United States.
- Waqar, H., Karim, C., & Gilbert, B. (2011). Long-Term pavement performance effectiveness of flexible pavement rehabilitation treatments using Markov Chain algorithm. *8th International Conference on Managing Pavement Assets*.
- Yongqi, L. (2004). Pavement Testing and Evaluation. En *Handbook of Transportation Engineering* (págs. 15.1-15.27). New York: Mc Graw Hill.