

IAG84-03-2013
EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN DE DISEÑO AASHTO 1993
APLICADA EN PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL ALTIPLANO
BOLIVIANO
AVALIAÇÃO DA EQUAÇÃO DE DIMENSIONAMENTO AASHTO 1993
APLICADO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS NO ALTIPLANO BOLIVIANO

Christian O. Rojas Torrico
Mecanicista Ltda
Cochabamba, Bolivia
christianrojas_@hotmail.com

Orlando Rojas Torrico
Mecanicista Ltda
Cochabamba, Bolivia
lando_014@hotmail.com

Resumen

El presente trabajo resume la evaluación de la guía AASHTO 93 aplicada al diseño de pavimentos flexibles con superficie de concreto asfáltico construidos en el Altiplano boliviano, región seleccionada para estudio debido a sus peculiares condiciones (elevación mayor a 3000 m.s.n.m.). Un gran porcentaje de la extensión de la red vial de Bolivia atraviesa el altiplano con pavimentos flexibles, diseñados según la Guía AASHTO de 1993, método oficial en Bolivia. Dicha metodología, si bien ha incorporado nuevos parámetros para hacerla aplicable a condiciones distintas de su espacio de inferencia, no ha sido validada aún para la realidad nacional, presentando desviaciones en sus estimaciones que son motivo del presente estudio.

Se empleó información del Inventario Vial de la Red Fundamental de Bolivia, además de relevamientos de campo realizados por los autores, para determinar los parámetros de entrada de la ecuación de diseño AASHTO para trece carreteras de la región. Se realizó el cálculo de módulos resilientes de subrasante siguiendo la metodología AASHTO a partir de resultados de deflectometría de impacto, y se asignaron coeficientes estructurales de capa a los materiales encontrados, estimándose así los números estructurales de diseño de cada tramo. Se utilizaron mediciones de rugosidad superficial IRI, realizadas en 2008, 2010 y 2012, para estimar los valores de serviciabilidad de cada tramo. Con esta información se realizaron proyecciones inversas para determinar los índices de serviciabilidad inicial de cada tramo. A partir de la pérdida de serviciabilidad medida, se calcularon las cantidades de ejes equivalentes necesarios para llegar a la condición observada, y se compararon con las cantidades de ejes equivalentes pasados obtenidos a partir de información histórica de tráfico y pesaje. Finalmente, se realizó la comparación entre las predicciones de la ecuación y el tráfico real soportado por las carreteras estudiadas, emitiéndose recomendaciones.

Resumo

O presente trabalho resume a avaliação da guia AASHTO 93 aplicada ao projeto de pavimentos asfálticos construídos no Altiplano Boliviano, região selecionada para estudo por suas peculiares condições (altitude maior a 3000 m.s.n.m.). Uma grande porcentagem da extensão da Rede de Rodovias de Bolívia atravessa o altiplano com pavimentos asfálticos, projetados segundo a guia AASHTO de 1993, método oficial em Bolívia. Esta metodologia, si bem ha incorporado novos parâmetros para poder ser aplicável a condições distintas de sua espaço de inferência, não foi validada ainda para a realidade nacional, apresentando desvios em suas estimações que são motivo do presente estudo. Informação do inventario da rede fundamental de Rodovias de Bolívia foi utilizada, além de relevamentos de campo realizados pelos autores, para determinar os parâmetros de entrada da equação de projeto AASHTO para treze rodovias da região. Realizo-se o calculo de módulos resilientes de sub-rasante seguindo a metodologia AASHTO a partir de resultados de deflectometria de impacto, e se deram coeficientes estruturais de capa aos materiais encontrados, estimando se deste jeito os números estruturais de cada seção. Utilizaram-se medições de rugosidade superficial IRI, realizadas em 2008, 2010 e 2012, para estimar os índices de manutenção presente em cada seção. Com esta informação se realizaram projeções inversas para determinar os índices de manutenção inicial de cada tramo. A partir da perda de manutenção medida, calcularam se as quantidades de eixos equivalentes precisos para chegar à condição observada, e compararam se com as quantidades de eixos equivalentes obtidos a partir da informação histórica de trafego e pesagem. Finalmente, se realizo a comparação entre as predições da equação e o trafego real suportado pelas estradas estudadas, fazendo-se recomendações.

Palabras Clave: Ecuación AASHTO, altiplano, desempeño de pavimentos, serviciabilidad.

INTRODUCCIÓN

En nuestros días, uno de los métodos más difundidos a nivel internacional para el proyecto de pavimentos es el de la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos publicada por la Asociación Americana de Oficiales Estatales de Transporte y Carreteras (AASHTO) el año 1993, adoptado actualmente en Bolivia como método oficial para el diseño de pavimentos flexibles.

Durante las últimas décadas, se ha construido un gran porcentaje de la extensión de la red vial fundamental de Bolivia atravesando el Altiplano empleando pavimentos flexibles construidos con capas de concreto asfáltico mezclado en caliente sobre bases y terraplenes granulares. Estos pavimentos en su totalidad fueron diseñados empleando el método AASHTO, sin haberse realizado una verificación o calibración previa para adecuarlo a las distintas regiones del país, presentando naturalmente desviaciones en sus estimaciones de desempeño que son motivo del presente estudio.

La necesidad de contar con un método confiable y de sencilla aplicación para el diseño de pavimentos flexibles en nuestra región, que permita además evitar fallas prematuras o el sobredimensionamiento de las obras viales, lleva a buscar soluciones enmarcadas en la verificación y posterior adaptación de métodos desarrollados bajo diferentes condiciones pero con un potencial de calibración que los hace utilizables en un espacio diferente al de su desarrollo. En este contexto, la evaluación de la aplicación del método AASHTO 1993 en una región determinada se ve promisorio para poder comprender las posibles desviaciones que surjan

de su aplicación en un conjunto de condiciones específicas como el clima y materiales de la región occidental de Bolivia.

En el caso de la ecuación de diseño AASHTO, al no poder incorporarse términos más específicos en cuanto al efecto del clima en el pavimento, se ha considerado conveniente analizar el desempeño de pavimentos reales diseñados por este método, construidos en la región del Altiplano Boliviano, y observados después de varios años de servicio mediante la medición de su Índice de Rugosidad Internacional (IRI), indicador que permite obtener una estimación bastante precisa de la serviciabilidad presente (PSI) empleada por el método de diseño analizado.

El Ensayo Vial AASHO y la ecuación obtenida para el diseño de pavimentos

La Guía AASHTO 1993 es un método empírico que permite dimensionar la estructura de un pavimento a partir de información relativamente reducida y de fácil obtención en campo mediante ensayos universalmente conocidos y estandarizados, ofreciendo una metodología comprensible y de sencilla aplicación, lo que ha facilitado su difusión y aceptación en la comunidad técnica de Latinoamérica. Sin embargo, al haber sido desarrollada a partir de la observación del desempeño de tramos construidos con un conjunto limitado de materiales y bajo el efecto del clima específico del norte de los EE.UU., debe ser empleada con los cuidados necesarios para evitar desviaciones en el desempeño esperado del pavimento proyectado al aplicarse en regiones caracterizadas por condiciones climáticas especiales, como las del Altiplano Boliviano.

La aplicación del método AASHTO se basa fundamentalmente en la solución de una ecuación obtenida por análisis de regresión estadística, basada meramente en el desempeño observado de tramos experimentales construidos entre 1956 y 1958 durante el Ensayo Vial AASHO. Estos tramos fueron estudiados bajo cargas controladas durante 1958 a 1960 en Illinois (Chicago), región que fue considerada representativa del norte de los EE.UU. Debido a que las pruebas se realizaron en un solo sitio, el modelo obtenido solamente puede representar el efecto en el pavimento de las variaciones climáticas de la localidad donde se realizaron las pruebas. Las siguientes son las ecuaciones desarrolladas a partir de la experiencia del Ensayo Vial AASHO, (Huang, 2004):

$$G_t = \beta(\log W_t - \log \rho) \quad (1)$$

$$\beta = 0.40 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}} \quad (2)$$

$$\log \rho = 5.93 + 9.36 \log(SN + 1) - 4.79 \log(L_1 + L_2) + 4.33 \log L_2 \quad (3)$$

Donde,

G_t = logaritmo de la relación entre la pérdida de serviciabilidad al tiempo t y la pérdida de serviciabilidad total considerando $p_t=1.5$;

β = valor en función de las variables de diseño que influencia la forma de la curva de relación entre ρ y W_t ;

ρ = valor en función de las variables de diseño que denota el número esperado de repeticiones de carga para alcanzar una serviciabilidad final $p_t=1.5$;

W_t = repeticiones del eje de carga al tiempo t ;

p_t = serviciabilidad del pavimento al tiempo t ;
 L_1 = carga en un solo eje simple, o en un set de ejes tándem, en Kilo libras;
 L_2 = código de eje – 1 para ejes simples, 2 para ejes tándem;
 SN = número estructural del pavimento, que es calculado con la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 \quad (4)$$

en la que a_1 , a_2 y a_3 son coeficientes de capa para la superficie, base y subbase, y D_1 , D_2 y D_3 son los espesores de dichas capas respectivamente.

El anterior conjunto de ecuaciones es aplicable solamente a una subrasante con un módulo resiliente efectivo de 20.7 MPa (3000 lb/pulg²). Estas ecuaciones se simplifican al emplear una carga de eje patrón de 18000 libras (80 KN). Las ecuaciones originales fueron posteriormente modificadas en base a la teoría y la experiencia, con el fin de poder considerar diferentes subrasantes, diferentes condiciones de drenaje de las capas base y subbase, y además incorporar el concepto de confiabilidad en el diseño. La ecuación final publicada en la guía de diseño es la siguiente (AASHTO, 1993):

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094 / (SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \log M_R - 8.07 \quad (5)$$

Los niveles de tráfico del Ensayo Vial AASHO fueron muy limitados si se comparan con los de hoy en día en cuanto a cantidad de repeticiones de cargas y pesos transportados por los vehículos típicos de nuestras carreteras. Por otra parte se consideraron solamente las cargas, presiones de inflado de llantas, velocidades de operación y configuraciones vehiculares representativas de la época, las cuales actualmente son diferentes en cierta medida en nuestro medio. En cuanto a materiales de las capas empleadas para los pavimentos ensayados, se utilizó un conjunto de materiales propios de la región de los grandes lagos de los EE.UU., con predominancia de agregados calizos y suelos finos de subrasante, lo que difiere con las condiciones del Altiplano Boliviano, que presenta mayor disponibilidad de agregados silíceos y suelos de subrasante diversos.

Aún con sus limitaciones, la ecuación (5) presenta la ventaja de poder ser modificada en el término final, o de añadir algún término que represente el efecto del clima específico o las condiciones generales de un lugar o región, o también se tiene la posibilidad de incorporar un factor multiplicador que afecte al término $\log W_{18}$, obteniéndose en ambos casos un número de ejes equivalentes modificado para un desempeño estimado.

Al tratarse de una metodología de diseño basada meramente en el desempeño funcional, expresado como una pérdida en la “serviciabilidad” del pavimento, es necesario realizar la evaluación de sus resultados empleando un parámetro que sirva de indicador del “nivel de servicio” que brinda la superficie al momento de la evaluación.

El concepto de serviciabilidad y el índice de serviciabilidad presente

Debe entenderse como serviciabilidad al nivel de servicio que ofrece al tráfico una sección determinada de pavimento al momento de su evaluación, expresando el nivel de servicio mediante una calificación objetiva de 0 a 5. El concepto del desempeño medido de acuerdo al nivel de servicio que brinda el pavimento fue desarrollado por Carey e Irick durante el Ensayo Vial AASHO (Huang, 2004).

El nivel de servicio fue expresado por el Índice de Serviciabilidad Presente, o PSI por sus siglas en inglés, el cual fue obtenido inicialmente como una expresión matemática para la estimación del Índice de Calificación del nivel de servicio presente, o PSR en inglés. El PSI se definió como función de la variación media del perfil longitudinal del pavimento en las huellas de circulación de los vehículos y la cantidad de deterioros de la superficie (bacheos, profundidad media del ahuellamiento, grietas, etc.). La ecuación que expresa el PSI para pavimentos flexibles, obtenida a partir de 74 secciones de prueba es la siguiente:

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + \overline{SV}) - 1.38 \overline{RD}^2 - 0.01 \sqrt{(C + P)} \quad (6)$$

Donde,

\overline{SV} = varianza media de las pendientes medidas en ambas huellas, en rad $\times 10^{-6}$;

\overline{RD} = profundidad media de ahuellamientos, en pulgadas;

C = longitud de agrietamientos por área, en pies lineales por cada 1000 pies²;

P = área de bacheos, en pies cuadrados por cada 1000 pies²

Relación entre el nivel de servicio y la rugosidad superficial del pavimento

La ecuación (6) muestra una relación directa entre el nivel de servicio que brinda el pavimento en un determinado momento (PSI) y las variaciones en el perfil longitudinal de la superficie. Lo anterior permite afirmar que un parámetro de caracterización del perfil longitudinal del pavimento, como el Índice de Rugosidad Internacional o IRI, es capaz de correlacionarse de gran manera con el índice de serviciabilidad PSI.

El Índice de Rugosidad Internacional fue desarrollado por el Banco Mundial en 1982, y se define como la pendiente promedio rectificada de la superficie, la cual es una relación entre la distancia vertical total acumulada por el movimiento de la suspensión de un vehículo estandarizado para una distancia de viaje recorrida a 80 Km/h, (Huang, 2004). De esta manera, al ser dependiente del perfil longitudinal del pavimento, se obtienen buenas correlaciones entre PSI e IRI. A continuación se presenta la ecuación de correlación entre los parámetros mencionados, obtenida por Patterson et.al a partir de tramos de prueba del experimento vial del Banco Mundial (1987), empleando mediciones de campo.

$$PSI = 5 \times e^{(-0.1818 \times IRI)} \quad \text{Para IRI en unidades m/Km} \quad (7)$$

METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA EVALUACIÓN DE LA ECUACIÓN AASHTO DE 1993

El estudio fue planteado con el objetivo de evaluar los resultados de la aplicación de la ecuación AASHTO empleada en el diseño de pavimentos flexibles construidos en el Altiplano Boliviano. Para esto se utilizó la base de datos del inventario vial del país provista por la Administradora Boliviana de Carreteras, seleccionándose aquellas carreteras que se encuentran emplazadas en la región mencionada, buscando que todas las carreteras analizadas atravesasen regiones con climas áridos, característicos del occidente de Bolivia.

La evaluación fue realizada mediante la comparación del desempeño real observado en tramos en servicio construidos en el Altiplano Boliviano, con el desempeño estimado para estos tramos, calculado empleando el modelo de AASHTO para obtener la pérdida de serviciabilidad correspondiente a los periodos de operación de cada tramo.

Conjunto de datos empleados en el análisis

Se utilizó la base de datos de desempeño de 13 carreteras del altiplano, las cuales fueron divididas en subtramos o secciones de características homogéneas, definidas mediante el análisis de diferencias acumuladas, basado en el ahuellamiento existente, extensión de áreas fisuradas, IRI, deflexión máxima obtenida con el deflectómetro de impacto, y módulo resiliente de la subrasante obtenido por retrocálculo según el procedimiento de la guía AASHTO 93.

Se determinó un total de 167 subtramos, todos construidos con superficie de concreto asfáltico mezclado en caliente de granulometría densa y con espesores construidos entre 5 y 15 cm, empleando capas base y subbase granulares. La Tabla 1 presenta las carreteras seleccionadas para el estudio, así como los años de apertura al tráfico y medición de rugosidad superficial.

Tabla 1: Tramos empleados para el análisis de la ecuación AASHTO 93

Ruta RVF	Departamento	Tramo	Longitud (km)	Año apertura	Años de medición de IRI
1	La Paz	Achica Arriba - Calamarca	20.00	2005*	2008, 2010
	La Paz	Ayo Ayo - Patacamaya	20.16	2005*	2008, 2010
	La Paz	Sica Sica - Cruce Luribay	16.15	2005*	2008, 2010
	La Paz	Cruce Luribay - Panduro	20.06	2005*	2008, 2010
	Potosí	Ventilla - Yocalla	62.50	2004	2008, 2012
	Potosí	Yocalla - Tarapaya	19.50	2004	2008, 2012
	Potosí	Potosí - Cuchu Ingenio	35.90	2004	2008, 2012
4	Oruro	Caihuasi - Huayllamarca	30.00	1993	2008
	Cochabamba	Huayllamarca - Confital	25.00	1993	2008
7	Cochabamba	Cochabamba – La Angostura	9.20	1999	2012
12	Oruro	Oruro – Capachos	3.10	1998	2012
2	La Paz	Río Seco – Patamanta	25.00	2001	2008
4	Oruro	Caracollo – Caihuasi	17.25	1994	2008

* Año de conclusión del refuerzo del tramo con concreto asfáltico mezclado en caliente

La Tabla 1 muestra los distintos años de habilitación de cada tramo al tráfico. La pérdida de serviciabilidad de cada subtramo utilizado en el análisis fue estimada a partir de mediciones de rugosidad superficial a distintas edades debido a los distintos años de apertura de las carreteras, expresadas en términos del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento, las cuales fueron empleadas para estimar los índices de serviciabilidad a un tiempo t mediante la ecuación de correlación IRI-PSI propuesta por Patterson et.al (7). Como no se conocía el valor del PSI o IRI inicial al momento de la habilitación al tráfico de cada carretera, se realizó una proyección inversa del desarrollo de la rugosidad superficial, encontrándose de esta manera un valor estimado de IRI inicial, el cual fue aceptado como válido siguiendo la tendencia de la curva de pérdida de nivel de servicio. La Figura 1 presenta el análisis gráfico realizado para definir los valores iniciales de IRI de los tramos evaluados, los cuales sirvieron para estimar los índices de serviciabilidad inicial presentados en la Figura 2.

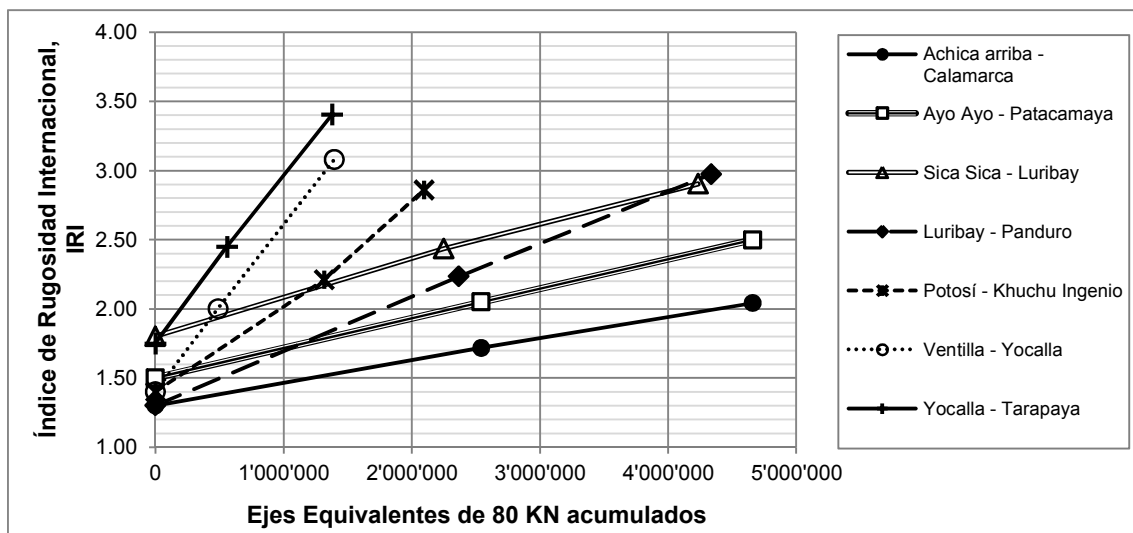


Figura 1: Estimación del IRI inicial para los tramos analizados mediante proyección inversa

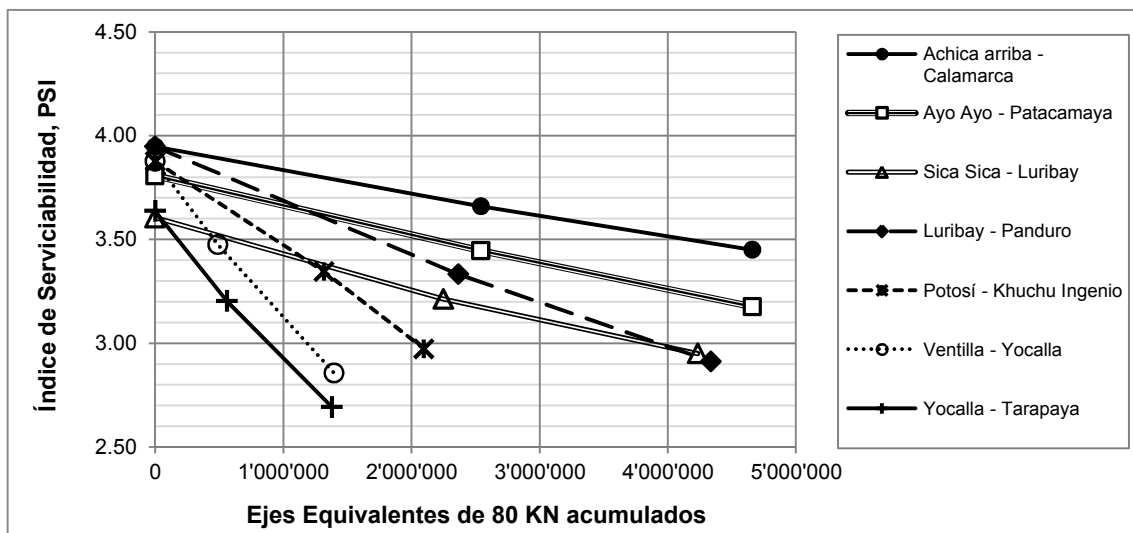


Figura 2: Estimación del PSI inicial para los tramos analizados mediante proyección inversa

Se emplearon los resultados de mediciones del Índice de Rugosidad Superficial realizadas el año 2008 en todos los tramos analizados, además de mediciones nuevas de IRI de los años 2010 y 2012 para algunas carreteras. Por otra parte, la información de deflectometría de impacto existente en el inventario vial nacional permitió calcular además el módulo resiliente de la subrasante, dato importante para el empleo de la ecuación AASHTO.

El tráfico histórico de cada tramo evaluado fue obtenido a partir de la información de la Estadística Vial de la Administradora Boliviana de Carreteras, utilizándose los conteos vehiculares realizados mensualmente en todas las carreteras e información de pesaje registrada por estaciones emplazadas en los tramos analizados. El pesaje fue empleado para obtener factores equivalentes de carga por tipo de camión, para así calcular la cantidad de ejes equivalentes de 80 KN que transitaban en cada carretera, obteniéndose así una estimación de las solicitaciones sufridas por los tramos.

Suposiciones adoptadas para la aplicación de la ecuación AASHTO

Para realizar la evaluación objeto del estudio, al no haberse encontrado información acerca de los valores empleados para varios parámetros de diseño de las 13 carreteras en estudio, fue necesario adoptar valores típicos para algunos parámetros y datos de entrada de la ecuación analizada.

La definición de los parámetros de diseño se basó en las prácticas más comunes y las especificaciones típicamente utilizadas en la construcción de carreteras del occidente Boliviano. Al tratarse de pavimentos flexibles con paquetes estructurales granulares, se consideró que no se generarían grandes diferencias en el análisis al adoptarse valores para representar las características de estos materiales.

Las carreteras del occidente Boliviano generalmente son construidas con materiales de capa Base de alta calidad, con fracciones de material triturado y una exigencia de valor relativo de soporte California (CBR) mínimo de 80% durante la construcción. Las capas de subbase son de la misma manera capas granulares con una exigencia en términos de CBR de 40%. Estas especificaciones generalmente se repiten, generando una práctica común de construcción y control de calidad.

Como se mencionó anteriormente, para emplear la ecuación AASHTO es necesario adoptar coeficientes de aporte estructural por capa, representados por a_1 , a_2 y a_3 en la ecuación 4. De esta manera, se adoptaron los siguientes valores:

- Coeficiente de aporte para concreto asfáltico preparado en caliente (a_1): 0.43
- Coeficiente de aporte para capa base granular triturada (a_2): 0.14
- Coeficiente de aporte para capa subbase granular (a_3): 0.11
- Coeficiente de aporte para capa de coronamiento de terraplén granular: 0.09

Adicionalmente, se empleó una desviación estándar de 0.49 para todos los tramos, y valores para los coeficientes de drenaje de las capas de 1.0, esto con el fin de estimar el efecto del clima sin modificaciones o correcciones por condiciones de humedad diferentes a las del ensayo AASHO.

RESULTADOS OBTENIDOS

La evaluación de la ecuación AASHTO 93 se realizó mediante la comparación del tráfico real total soportado por los pavimentos hasta el momento de la medición versus el tráfico total calculado para la serviciabilidad estimada al momento de la medición del IRI. Al tratarse de una comparación del desempeño de los pavimentos estudiados con las estimaciones de la ecuación analizada, se utilizó una confiabilidad del 50% para los cálculos, de esta manera el modelo original de AASHTO no es modificado por el factor $Z_R S_0$ de la ecuación 5.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 3, pudiendo observarse una clara desviación entre la estimación del modelo AASHTO original y el desempeño real observado en campo al emplearse la ecuación sin ser afectada por la confiabilidad del diseño, es decir para una probabilidad de falla del 50%.

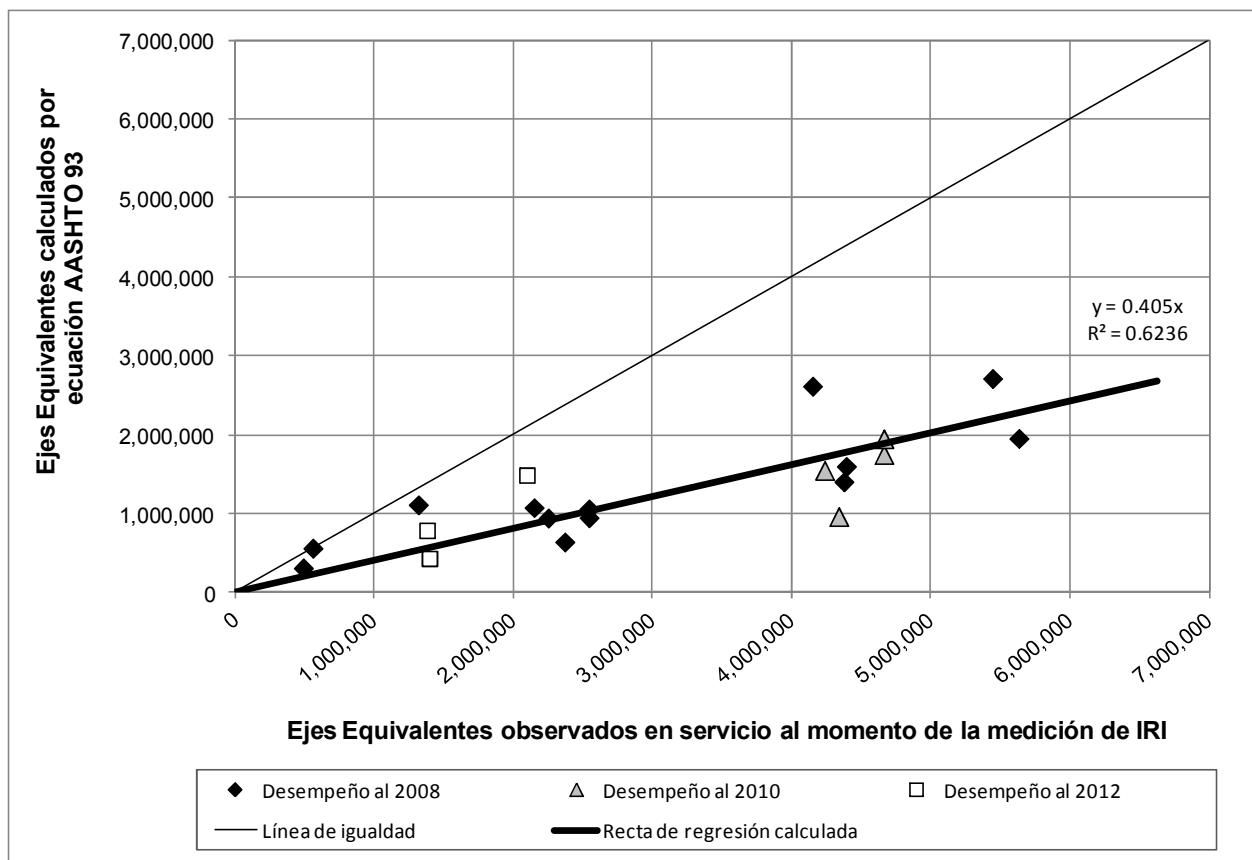


Figura 3: Comparación entre tráfico real soportado y tráfico estimado por el modelo AASHTO

La comparación realizada para una confiabilidad del 50% muestra que el modelo AASHTO 93 tiende a sobredimensionar un pavimento en una razón de aproximadamente 2.5 veces bajo las condiciones del Altiplano Boliviano, es decir estimando el tráfico necesario para alcanzar la falla o serviciabilidad final como un 40% del tráfico que realmente se necesita para llevar al pavimento a una degradación tal que se observe un determinado nivel de serviciabilidad o PSI, calculando el PSI a partir del Índice de Rugosidad Internacional medido en la superficie del pavimento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis realizado permite concluir que la ecuación AASHTO 93 para diseño de pavimentos flexibles tiende a sobredimensionar un pavimento en una razón aproximada de 2.5 veces bajo las condiciones del Altiplano Boliviano, tratándose de pavimentos con superficie de concreto asfáltico mezclado en caliente, bases y subbases granulares, y construidos en regiones áridas y de altura como las analizadas.

Al haberse observado mejores desempeños en servicio que los esperados según el modelo original, se recomienda la utilización de menores factores de confiabilidad del diseño para el cálculo de espesores de pavimentos, de esta manera se evitará el uso de espesores muy reforzados y se lograrán proyectos más económicos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Administradora Boliviana de Carreteras por brindar información sobre los tramos analizados.

REFERENCIAS

- Huang Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design. Prentice Hall.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for design of pavement structures, Washington, D.C, 1993