



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

Proyecto: LM-PI-GM-INF-05-16

Propuesta para una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos.

Preparado por:

Unidad de Gestión Municipal
LanammeUCR

San José, Costa Rica
Noviembre, 2016



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

1. Informe LM-PI-GM-INF-05-16		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Propuesta para una Guía de Diseño de Bajo Volumen para pavimentos flexibles y semirrígidos		4. Fecha del Informe Noviembre, 2016
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias		
7. Resumen El presente documento muestra la propuesta para una guía de diseño simplificado de pavimentos, enfocada a rutas de bajo volumen de tránsito y que sea de fácil aplicación por los ingenieros gestores de estas rutas. El propósito es determinar estructuras predefinidas que puedan ser seleccionadas mediante un proceso guiado y asistido, en el cual cada usuario pueda discernir entre una estructura u otra con el uso de información básica y vital para cada proyecto como lo son: tránsito promedio diario (TPD), porcentaje de vehículos pesados y capacidad de soporte de subrasantes. Las estructuras a diseñar podrán ser pavimentos flexibles o semirrígidos y para cada combinación de variables podrá existir una estructura de cada tipo, lo que permitirá ampliar el abanico de soluciones para los ingenieros diseñadores. Las estructuras contemplarán variables adicionales como temperatura promedio anual y velocidad de operación, para ajustar los parámetros fundamentales en el diseño de pavimentos flexibles, y todos los materiales propuestos deberán cumplir con especificaciones nacionales, por lo tanto, esta información deberá ser contrastada con la disponible en cada proyecto. Además, se prevé diseñar cada estructura utilizando los criterios de diseño empírico-mecanicista utilizados en Costa Rica, para rutas de menor tránsito (menor a 3 millones de ejes equivalentes de carga). Esto permitirá garantizar que las estructuras propuestas se ajusten a las necesidades de los pavimentos costarricenses y además cumplen con parámetros de desempeño básicos que permitan determinar la integridad de la estructura durante el período de diseño.		
8. Palabras clave PITRA, FEH, conteos, cantonal, factores	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 42
11. Preparado por: Ing. Eliécer Arias Barrantes Unidad de Gestión Municipal Fecha: 21/02/17	Lilly Xu Ye Asistente Unidad de Gestión Municipal Fecha: 21/02/17	12. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD Coordinador Unidad de Pavimentos y Materiales Fecha: 21/02/17
13. Revisado por: Lic. Carlos Campo Cruz, Mba Coordinador Unidad de Gestión Municipal Fecha: 21/02/17	14. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA Fecha: 21/02/17	

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016

Fecha de emisión: 21 de Febrero de 2017

Página 2 de 42



TABLA DE CONTENIDO

1. DESCRIPCIÓN.....	6
2. ANTECEDENTES	6
3. OBJETIVO GENERAL	9
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
5. ESQUEMA CONCEPTUAL.....	10
6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
7. LIMITACIONES.....	13
8. ALCANCES.....	14
9. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	14
9.1. DEFINICIÓN DE BAJO VOLUMEN	14
9.2. ANÁLISIS DEL TRÁNSITO VEHICULAR	14
9.2.1. REGISTRO DE ESALS DE LA RED VIAL CANTONAL.....	14
9.2.2. SELECCIÓN DE LOS RANGOS DE TPD.....	20
9.2.3. SELECCIÓN DE LOS RANGOS DEL PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS	21
9.2.4. ANÁLISIS DEL FACTOR CAMIÓN.....	22
9.2.5. CÁLCULO DE ESALS.....	25
9.2.6. CASOS DE ESTUDIO.....	26
9.3. SUBRASANTE.....	29
9.4. ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	31
10. CONCLUSIONES.....	37
11. REFERENCIAS.....	38



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Municipalidades del país que poseen conteos	15
Tabla 2. Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling de los datos normalizados de ESALs.....	18
Tabla 3. Análisis de percentiles de los datos de ESALs originales y transformados	19
Tabla 4. Resultado de percentiles de los datos de TPD filtrados	21
Tabla 5. Análisis de percentiles de los datos de TPD filtrados	22
Tabla 6. Factor camión promedio para diferentes rutas del país.....	23
Tabla 8. Resumen del valor promedio para el factor camión en diferentes rutas nacionales de Costa Rica	24
Tabla 9. Valor del factor camión de acuerdo con distintos valores de probabilidad.....	24
Tabla 10. Porcentaje de crecimiento de diferentes rutas nacionales.....	26
Tabla 11. ESALs para el período de diseño de 6 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados	28
Tabla 12. ESALs para el período de diseño de 8 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados	28
Tabla 13. ESALs para el período de diseño de 10 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados	28
Tabla 14. ESALs para el período de diseño de 12 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados	29
Tabla 15. Valores de CBR de acuerdo con diferentes percentiles.....	30
Tabla 16. Agrupación de los ESALs de diseño de acuerdo a percentiles.....	31
Tabla 17. Valores de los ESALs de diseño agrupados de acuerdo con diferentes probabilidades	35
Tabla 18. Tipo de estructura para el período de diseño de 6 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados.....	36



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma línea de investigación.....	12
Figura 2. Resultados del análisis estadístico los datos de ESALs.....	16
Figura 3. Prueba de mejor ajuste con la distribución Normal, Transformación de Box-Cox, Lognormal y lognormal de 3 parámetros de los datos de ESALs	17
Figura 4. Resultados del análisis estadístico del comportamiento de los datos de ESALs transformados.....	18
Figura 5. Comparación de percentiles de los ESALs en los distintos periodos de diseño.	20
Figura 16. Combinaciones posibles para la guía de diseño de bajo volumen.	27
Figura 17. Histograma de las agrupaciones de ESALs de diseño	32
Figura 18. Prueba de mejor ajuste con la distribución normal, transformación Box-Cox, Lognormal y Lognormal de 3 parámetros de ESALs agrupados	33
Figura 19. Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para los datos de ESALs de diseño agrupados.....	33
Figura 20. Distribución normal para obtener el logaritmo del valor de ESAL para una probabilidad de 3 %	34
Figura 21. Ejemplo de una posible configuración de un tipo de estructura de pavimento.....	37
Figura 22. Prueba de mejor ajuste con la distribución del valor extremo más pequeño, valor extremo más grande, Gamma y Gamma de 3 parámetros de los datos de ESALs.....	40
Figura 23. Prueba de mejor ajuste con la distribución Logística, Loglogística, Logogística de 3 parámetros y Transformación de Johnson de los datos de ESALs	40
Figura 24. Prueba de mejor ajuste con la distribución Exponencial, Exponencial de 2 parámetros, Weibull y Weibull de 3 parámetros de los datos de ESALs	41
Figura 25. Prueba de mejor ajuste con la distribución del valor extremo más pequeño, valor extremo más grande, Gamma y Gamma de 3 parámetros de los factores camión promedio	41
Figura 26. Prueba de mejor ajuste con la distribución Exponencial, Exponencial de 2 parámetros, Weibull y Weibull de 3 parámetros de los factores camión promedio	42
Figura 27. Prueba de mejor ajuste con la distribución Logística, Loglogística, Logogística de 3 parámetros y Transformación de Johnson de los factores camión promedio	42



1. DESCRIPCIÓN

El presente proyecto pretende generar una propuesta técnica para el diseño simplificado de pavimentos flexibles y semirrígidos para caminos con bajo volumen de tránsito. La estimación de las diferentes variables que se emplearán para el diseño de las estructuras de pavimento se realizó con base en datos recolectados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), a través de la Unidad de Gestión Municipal.

Con esto se pretende generar un catálogo con distintos tipos de estructuras de pavimento de acuerdo con un período de diseño variable, tránsito promedio diario, porcentaje de pesados y la capacidad soportante de la subrasante.

Esta propuesta tiene como propósito crear una metodología para el diseño de estructuras de pavimentos que puedan cumplir con los criterios de desempeño mínimos para el buen funcionamiento desde el punto de vista estructural y también funcional de los pavimentos durante su vida útil, sin tener que realizar todo un diseño detallado de la estructura, ahorrando la inversión de recursos y tiempo cuando se tratan de caminos con bajo volumen de tránsito.

2. ANTECEDENTES

El diseño de pavimentos es un tema muy amplio, involucra muchos aspectos de carácter científico y práctico. Es por este motivo que alrededor del mundo se ha invertido mucho en la investigación, con el propósito de lograr estructuras de pavimentos que sean duraderas para condiciones de tráfico y clima específicas. Debido a que las solicitudes de carga pueden ser muy diferentes es común que se generen procedimientos y guías enfocadas a rutas con un bajo volumen de tráfico, ya que por su baja demanda es posible contar con procesos más simplificados que permitan obtener de estructuras que cumplan con las condiciones requeridas, a continuación, se presenta una breve reseña de procedimientos o guías con dicho enfoque.

La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes, AASHTO por sus siglas en inglés publicó una guía denominada “*Guide for Design of Pavement Structures*”

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 6 de 42
-------------------------------	----------------------------------	----------------



(1993), en donde el capítulo 4 trata el tema de diseños de pavimentos de bajo volumen. En este capítulo abarca el diseño de pavimentos flexibles, rígidos y rutas de lastre mediante la aplicación de nomogramas o catálogos de diseño.

La guía proporciona una tabla o catálogo para determinar el número estructural (SN) del pavimento de acuerdo con el nivel de confiabilidad, la capacidad soportante del suelo, el nivel de tráfico y la región climatológica a la que pertenece. Finalmente, con el SN se determina los valores de los coeficientes de cada capa (a) y se calculan los espesores necesarios.

La guía de AASHTO establece que el rango de ESALs a considerar para el diseño tanto de pavimentos flexibles como rígidos de bajo volumen es de 50 000 a 1 000 000. Además, dado que este análisis aplica para las rutas de bajo volumen, la confiabilidad recomendada para el diseño de estas vías es de 50% o 75%.

Los diseños se hacen considerando las diferentes regiones de climas que presenta Estados Unidos y de acuerdo con la capacidad soportante del suelo se clasifican en muy bueno, bueno, regular, malo y muy malo. Asimismo, el módulo resiliente del suelo tomando en cuenta la estación climatológica. Además, el nivel de serviciabilidad final de los pavimentos debe ser de 1,5 de acuerdo con esta guía.

El Departamento de Transporte de la República de Sudáfrica (1996) en su informe de Recomendaciones Técnicas para Carreteras 4 (TRH 4 por sus siglas en inglés) denominado: "*Structural Design of Flexible Pavements for Interurban and Rural Roads*", en el cual se genera un catálogo de diseño de pavimentos, el cual se puede emplear como una guía para realizar una primera aproximación, pues recomiendan que se realice un análisis más profundo para decidir el diseño final del pavimento.

El catálogo brinda una serie de tablas que se dividen de acuerdo con el tipo de base que se empleará, ya sea base granular para regiones húmedas o secas, base asfáltica, base estabilizada con cemento o base de macadam. Se debe seleccionar entre diferentes rangos de ESALs y 4 categorías de carreteras, siendo la categoría A la más importante y D la menos importante. Esto se refleja en los niveles de confiabilidad de los diseños (para A de 95 %, B de 90 %, C de 80 % y D de 50 %). Finalmente se obtienen distintos espesores y materiales de las capas del pavimento. Cabe mencionar que las estructuras se diseñan



asumiendo que la subrasante posee un CBR mínimo de 15% y si no se cumple se debe mejorar.

La Dirección de Viabilidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile creó una guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito (2002), en donde se considera la información de tipo de tránsito, CBR de la subrasante, ejes equivalentes y clima.

La guía proporciona un total de 10 cartillas, los cuales se clasifican ya sea para tránsito liviano o pesado. Después se debe determinar el clima: seco, normal o saturado; seguido de 4 diferentes tipos de estructura de pavimentos, para finalmente proporcionar los espesores de las distintas capas de acuerdo con el CBR del suelo y los ejes equivalentes de la ruta.

El Programa Nacional de Cooperación para el Desarrollo de Autopistas (NCHRP por sus siglas en inglés), en el manual *“Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures”* (2004) abarca el tema de caminos de bajo volumen de tránsito. En la parte 4 de la guía se explica acerca de un catálogo de diseño, el cual sirve como un modelo para desarrollar otros catálogos similares de acuerdo con las diferentes condiciones de cada región.

La guía proporciona los espesores de la carpeta asfáltica y la base granular de acuerdo con 3 niveles de tránsito vehicular, 5 niveles de calidad de la subrasante, 2 tipos de agregados para la base, 2 tipos de mejoramientos a la subrasante y 2 zonas climáticas de acuerdo con una confiabilidad de 50 % o 75 %.

Este catálogo sigue una serie de supuestos, entre ellos, que todos los diseños se basan en un requerimiento estructural para un período de diseño de 20 años, con un rango de ESALs de 50 000, 250 000 hasta 750 000 y una confiabilidad de 50 % o 75 %.

Con respecto a las condiciones climáticas, este catálogo únicamente incluye dos regiones: la región norte y la región sur de Estados Unidos. La capacidad soportante del suelo se clasifica en muy bueno, bueno, regular, malo y muy malo de acuerdo con el sistema de clasificación de AASHTO y SUCS. Con estos datos se determina el valor del módulo resiliente para un contenido óptimo de humedad.

El catálogo del NCHRP se creó basándose en el cumplimiento de criterios de desempeño para pavimentos flexibles de bajo volumen, en donde establece que el máximo valor de IRI

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 8 de 42
-------------------------------	----------------------------------	----------------



que puede tener los pavimentos diseñados es de 3,1 mm/m suponiendo que el IRI inicial es de 1,5 mm/m. El ahuellamiento máximo permitido es de 1,52 cm y el agrietamiento por fatiga debe ser menor a un 45 % de las huellas de rodadura.

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Perú en su Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito (2008) en su capítulo 5 presenta un catálogo estructural para superficies de rodamiento. En dicho catálogo se presentan 4 cartillas de acuerdo con el tipo de tráfico, 5 categorías de subrasante según el CBR y se elige entre las opciones A, B o C de acuerdo con el tratamiento de la subrasante (A representa subrasantes sin mejoramiento, B con mejoramiento empleando reemplazo de material o C que es el mejoramiento con adición de cal, cemento o químicos).

Para la determinación de los espesores de cada capa del pavimento se emplea la ecuación del método de NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities, conocido actualmente como AUSTORADS), el cual emplea el valor de CBR y los ejes equivalentes del camino.

Camacho, E (2009) en su tesis "*Catálogo de pavimentos asfálticos para rutas nuevas de bajo volumen*" propone un catálogo de estructuras de pavimentos considerando factores como la composición del tráfico, el tipo de suelo de la subrasante, las características del clima y los materiales a emplear.

El catálogo propone una serie de estructuras de acuerdo a una condición de diseño por serviciabilidad o estructural, brindando los espesores de cada capa ya sea carpeta asfáltica, base granular, base estabilizada o subbase según corresponda. Este catálogo se creó únicamente para pavimentos de construcción nueva o para la reconstrucción total de los existentes.

3. OBJETIVO GENERAL

Generar una guía para el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos que sea aplicable a rutas de bajo volumen mediante un proceso simplificado, de acuerdo con las solicitudes de carga y capacidad de soporte de subrasantes en Costa Rica.

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 9 de 42
-------------------------------	----------------------------------	----------------



4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica sobre metodologías de diseño que sean aplicables a rutas de bajo volumen.
- Elaborar el marco metodológico que permita desarrollar un procedimiento de diseño simplificado para pavimentos flexibles y semirrígidos.
- Caracterizar los patrones de flujo vehicular en la red vial cantonal con base en la información recolectada, para determinar la demanda vehicular en relación con los vehículos pesados.
- Brindar recomendaciones sobre las categorías de análisis que pueden utilizarse en dicha metodología.

5. ESQUEMA CONCEPTUAL

En la Figura 1. se muestra un flujograma que resume la metodología planteada para determinar los principales elementos a considerar en la presente propuesta de guía de diseño para pavimentos de bajo volumen, que cumplan con los principales criterios empírico-mecanicista utilizados en Costa Rica y que considere los parámetros de carga y tipo de suelo según las bases de datos recopiladas por el LanammeUCR

En una primera fase se realizará una revisión bibliográfica, recopilación de información referente a las metodologías utilizadas a nivel internacional y un análisis de bases de datos existentes, con el propósito de determinar su compatibilidad según los parámetros requeridos para poder identificar la cantidad de ESALs de diseño a considerar como bajo volumen y poder generar un matriz de demanda de tráfico para diferentes combinaciones de variables.

Se realizó un análisis de conteos vehiculares realizados en la red vial cantonal, con el objetivo de identificar el flujo de bajo volumen y los parámetros asociados a el mismo, por ejemplo, el porcentaje de vehículos pesados y TPD asociado. Esto permite definir de manera preliminar una matriz de flujos vehiculares y porcentajes de vehículos pesados con los que es posible estimar demandas de tráfico para diferentes condiciones que pueden ser usadas

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 10 de 42
-------------------------------	----------------------------------	-----------------



como insumos para los diseños por elaborar. Estos parámetros son esenciales para poder estimar a que flujos vehiculares pueden estar expuestos los pavimentos de bajo volumen, además, se agregarán otros parámetros acordes a la realidad costarricense.

Otro parámetro fundamental en el diseño de pavimentos es la capacidad de soporte de la subrasante, por tal motivo es que se ha propuesto tomar como base las mediciones de campo realizadas por la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR. Con el análisis de esta información se espera obtener información valiosa de la distribución de los valores de CBR a esperar en rutas cantonales, los cuales pueden ser usados como referencia para realizar los diseños de pavimentos.

Los parámetros descritos previamente permitirán obtener parámetros de diseño que sean lo más representativo posible de rutas de bajos volumen, las cuales están estrechamente relacionadas con rutas cantonales, sin dejar de lado que para cada condición de CBR, TPD y porcentaje de vehículos puede haber rutas nacionales de bajo volumen que de la misma forma podrían ser incluidas en el presente procedimiento.

A partir de esto se propondrá una línea de diseño a seguir por parte de los usuarios, la cual puede estar enfocada a cartillas o nomogramas para condiciones específicas. Cada podrá realizar la escogencia de una o más estructuras de pavimento que cumplan con las condiciones particulares de un sitio en cuanto a demanda y capacidad soportante.

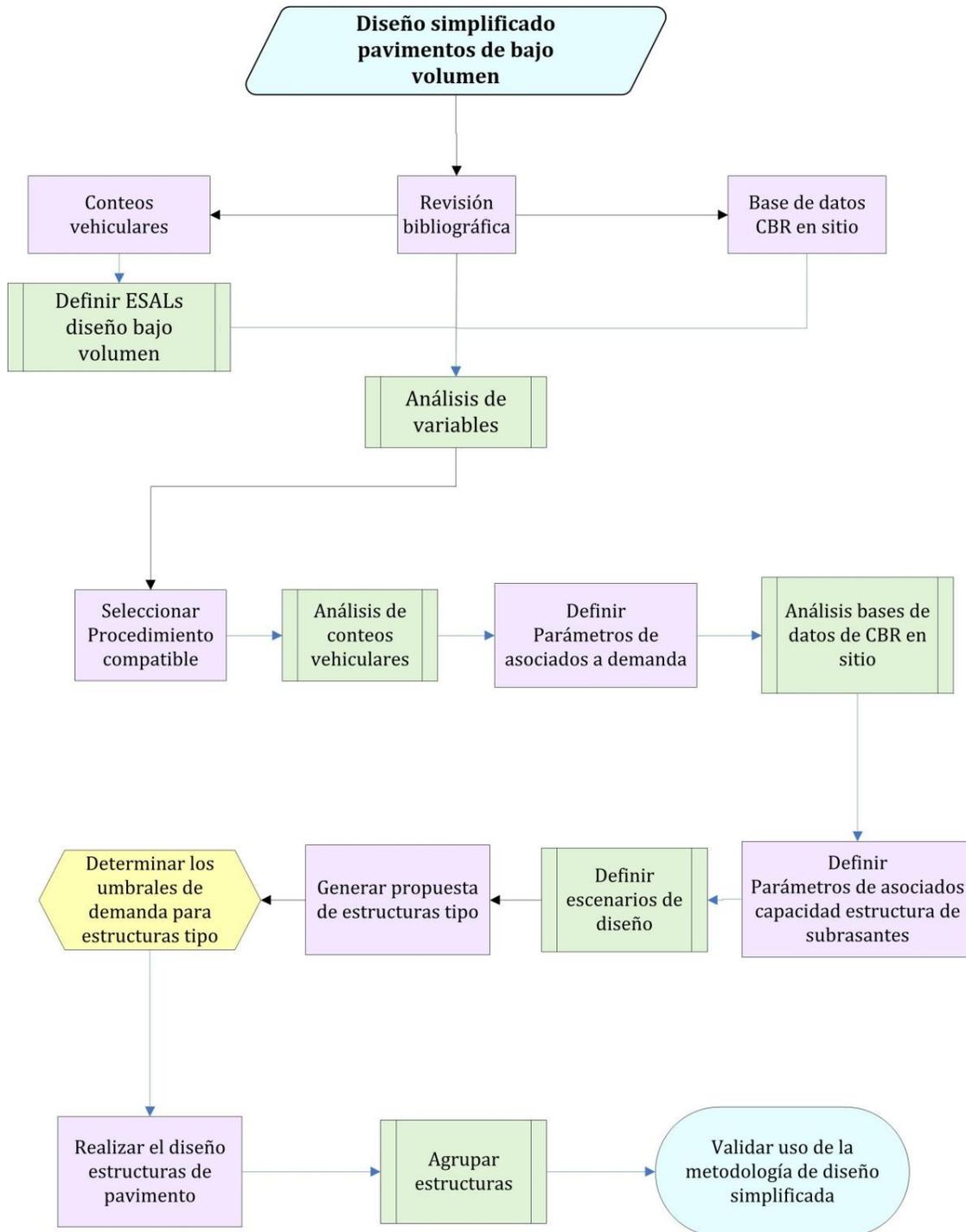


Figura 1. Flujograma línea de investigación.



6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La red vial de Costa Rica está compuesta por aproximadamente 42 700 km de carreteras, de los cuales 7 500 km corresponden a la Red Vial Nacional (RVN) y 35 236 km corresponden a la Red Vial Cantonal (RVC). Según datos del MOPT (2012) sólo 4 561 km de la RVC se encuentran asfaltados, 442 km son de concreto, 1496 tratamiento superficial y el resto son de grava o tierra. Cabe mencionar además que el estado de los pocos kilómetros asfaltados de la RVC no está en las mejores condiciones.

En Costa Rica, gran cantidad de caminos se han pavimentado sin la realización un diseño previo, y muchas veces se determinan los espesores de las diferentes capas desde el punto de vista económico en lugar de un criterio técnico, generando con ello estructuras con un desempeño inadecuado.

Con la concepción de una guía de diseño de bajo volumen para pavimentos flexibles y semirígidos se brindaría una herramienta práctica y de fácil aplicación para mejorar las diferentes vías del país con bajo volumen, incrementando de esta forma la vida útil de los caminos y aumentando la cantidad de tramos asfaltados en buena calidad.

Con la implementación de esta guía se pretende contribuir en el mejoramiento del acceso a diferentes zonas rurales del país, permitiendo así el incremento en la calidad de vida de las comunidades, facilitando el transporte de mercadería y el acceso a servicios básicos.

7. LIMITACIONES

- Las variables utilizadas en cuanto a TPD y porcentaje de vehículos pesados son producto del análisis de sólo 342 conteos en la red vial cantonal de Costa Rica. Sin embargo, esta cantidad está en aumento continuo y muestra una tendencia bien definida en cuanto a demanda vehicular (Arias, 2014), según muestra más adelante en este documento.
- Inicialmente se prevé que dicho documento sólo sea aplicable a una cantidad limitada de ejes equivalente, sin embargo, para tal política se analizaran las combinaciones de



carga posibles en las rutas de bajo volumen considerando: TPD, % pesados y período de diseño.

- Para los diseños propuestos se considerará condiciones que satisfagan la demanda hidráulica de la zona, esto debido a que la infraestructura vial se debe analizar de forma integral.

8. Alcances

- En esta primera versión de la guía se contempla el diseño de pavimentos flexibles y semirrígidos, no contempla estructuras de concreto. En una próxima versión se pretende sean incluidos, así como pavimentos de adoquín.
- En esta primera versión de la guía el enfoque está dirigido sólo a pavimentos nuevos.

9. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS VARIABLES DE DISEÑO

9.1. Definición de bajo volumen

Tomando en consideración los criterios internacionales y nacionales se establece que para esta guía un pavimento de bajo volumen es aquel que presenta un rango de ejes equivalentes en su mayoría entre 30.000 y 1.300.000 ESALs, y en una menor cantidad valores que no excedan los 3.000.000 de ESALs. Esto según valores recomendados por la Guía de diseño de Sudáfrica (Departamento de Transporte de la República de Sudáfrica, 1996), la guía de diseño estadounidense MEPDG del 2004 (National Cooperative Highway Research Program, 2004) y la guía de diseño AASHTO de 1993.

9.2. Análisis del tránsito vehicular

9.2.1. Registro de ESALs de la Red Vial Cantonal

Con el fin de identificar la demanda de ESALs en la Red Vial Cantonal, se cuenta con un total de 360 conteos registrados entre los años 2008 y 2014, de los cuales 342 son los que poseen el cálculo de ESALs y por tanto los que se emplearán en el análisis. Las municipalidades que poseen conteos se muestran en la Tabla 1.

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 14 de 42
-------------------------------	----------------------------------	-----------------



Tabla 1. Municipalidades del país que poseen conteos

Municipalidades		
Bajo Rodríguez	Liberia	Paraíso
Cañas	Montes de Oro	Pérez Zeledón
Carrillo	Zarcero	San José
Cartago	Mora	San Ramón
Curridabat	Moravia	Santa Ana
Flores	Nandayure	Tilarán
Grecia	Orotina	Upala
La Unión		

Para la selección de los periodos de diseño se consideró 6 años como el periodo mínimo de diseño, esto ya que según estudios internacionales la vida útil mínima que debe soportar una sobrecapa delgada de mezcla asfáltica es cercana a los 6 años (National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council, 2001).

Para el caso del periodo máximo de diseño se tomó en cuenta lo que se recomienda para carreteras de bajo volumen de tránsito, el cual puede ser de 10 a 20 años (SIECA, 2002), además. Sin embargo, para este proyecto se recomienda un periodo máximo de 12 años con el propósito de restringir la cantidad de ejes equivalentes admisibles y reducir el riesgo en el uso de la herramienta.

Para los periodos intermedios se decide incrementar dos años por periodo, partiendo de 6 años, esto para mantener una simetría en los intervalos seleccionados.

Finalmente se consideran los ESALs para los siguientes periodos de diseño, con el objetivo de que el aumento de la demanda pueda ser escalonado con un máximo de 12 años:

- 6 años
- 8 años
- 10 años
- 12 años

Inicialmente se analizó el comportamiento de los datos de ESALs, para esto se muestra a continuación un análisis estadístico básico con datos de ESALs para el periodo de diseño de 8 años.

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 15 de 42
-------------------------------	----------------------------------	-----------------

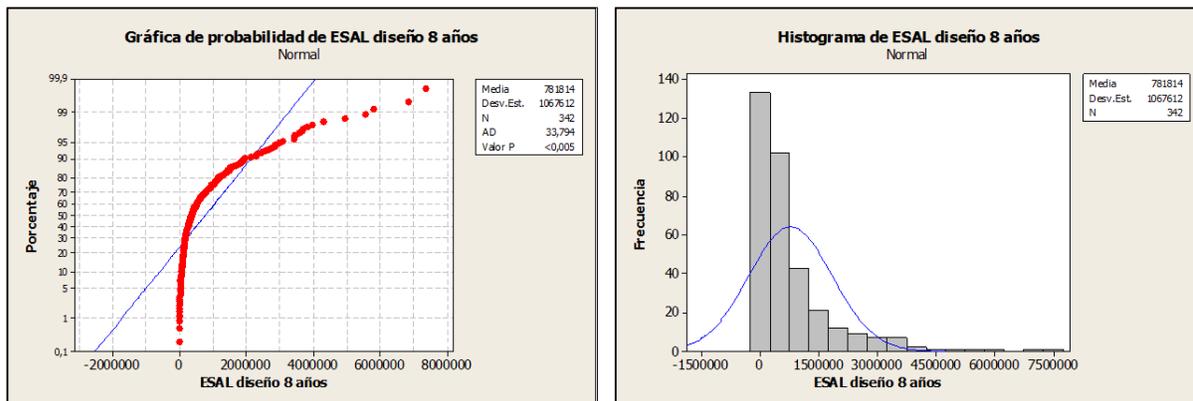


Figura 2. Resultados del análisis estadístico los datos de ESALs

Con lo cual se determinó que los datos no siguen un comportamiento normal, más bien presentan un sesgo positivo, lo cual es de esperar ya que la cantidad de rutas con ESALs bajos es mayor que las rutas con ESALs altos (la base de datos proviene de conteos en la red vial cantonal)

Debido a esto se realizó la identificación de la distribución de probabilidad de mejor ajuste, en la Figura 3 se puede observar la distribución de mejor ajuste, en el **Anexo A** se pueden observar el total de distribuciones que se probaron.

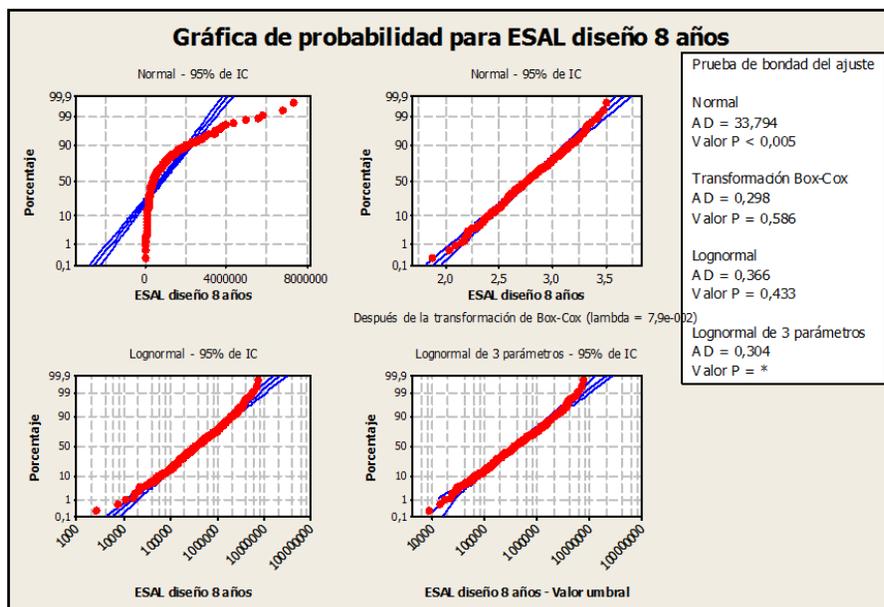


Figura 3. Prueba de mejor ajuste con la distribución Normal, Transformación de Box-Cox, Lognormal y lognormal de 3 parámetros de los datos de ESALS

Se obtiene que la transformación de Johnson, de Box – Cox y Lognormal de dos parámetros cumplen con la probabilidad mayor que 0,05, lo cual indica que ajusta los datos a una distribución normal, para mayor detalle se puede consultar el anexo A. Se decide emplear la transformación Lognormal de dos parámetros, por ser la transformación que manipula mucho menos los datos originales, respecto a la transformación de Johnson.

Se procede a realizar el análisis del comportamiento de los datos transformados a la distribución de Lognormal. En la siguiente figura puede apreciarse que la transformación si bien es simple, funciona para normalizar los datos. En la gráfica de la izquierda se muestra la gráfica de probabilidad, la pendiente próxima a 45° es característica de datos con una distribución normal, y la gráfica de la derecha permite ver un histograma con una distribución muy similar a una campana da Gauss, de igual forma característica de una distribución normal.

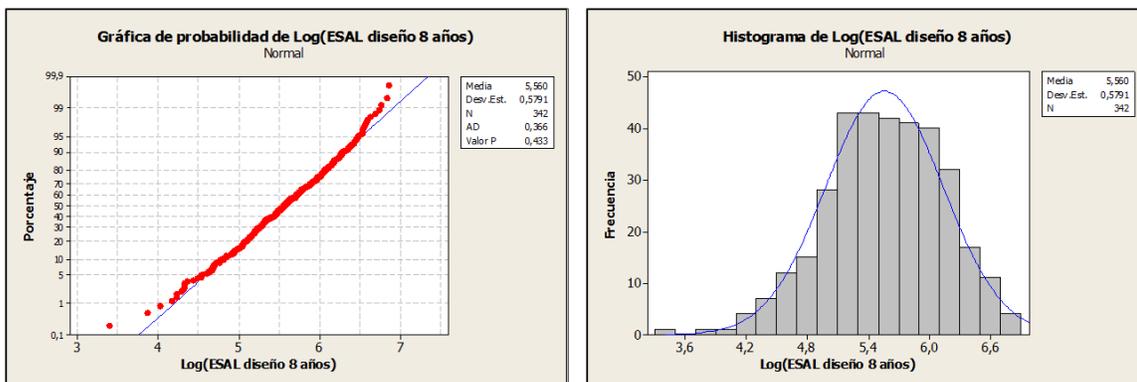


Figura 4. Resultados del análisis estadístico del comportamiento de los datos de ESALs transformados

Al realizar la prueba de normalidad de Anderson-Darling, se obtienen los siguientes datos:

Tabla 2. Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling de los datos normalizados de ESALs

Prueba de normalidad de Anderson-Darling	
A-cuadrado	0,37
Valor P	0,433
Media	363412
Desviación Estándar	3,80
Varianza	2,16
Asimetría	-0,30
Kurtosis	0,10
N	342
Mínimo	2.515
1er cuartil	151.286
Mediana	370.169
3er cuartil	971.628
Máximo	7.370.552
Intervalo de confianza de 95 % para la media	
315355	418.794
Intervalo de confianza de 95 % para la mediana	
309528	429.339
Intervalo de confianza de 95 % para la desviación estándar	
3,46	4,23

Con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, el valor crítico de A_T^2 es de 0,75, como $A^2 = 0,37 < A_T^2 = 0,752$ y el valor de $P > 0,05$, se prueba la normalidad de los datos. Analizando el valor negativo de la asimetría, la cola de la distribución se alarga ligeramente hacia los valores inferiores de la media, como se puede apreciar en la Figura 4. Además, como el valor del



coeficiente de Kurtosis es cercano a 0, implica los datos tienen un comportamiento de curva normal. Asimismo, la proximidad entre los valores de la media y la mediana se debe de igual forma a que la distribución de los datos tiene una tendencia de distribución no sesgada

Seguidamente se analizan los percentiles de los datos originales y los transformados, en donde se puede apreciar que la diferencia entre estos dos datos es mínima, (debido al buen ajuste que existe entre ellos) como se puede apreciar en la siguiente tabla, por lo tanto, se decide trabajar con la distribución original de los datos.

Tabla 3. Análisis de percentiles de los datos de ESALs originales y transformados

Datos Estadísticos	ESALs 8 años	Log(ESALs 8 años)	10*Log(ESALs 8 años)
Promedio	781.814	5,56	363.405
Desviación estándar	1.067.612	0,58	3,79
CV	1,37	0,1	0
Percentil 75	961.576	5,98	961.576
Percentil 80	1.159.608	6,06	1.159.605
Percentil 85	1.493.368	6,17	1.493.368
Percentil 90	1.944.975	6,29	1.944.973
Percentil 95	2.975.703	6,47	2.975.626
Percentil 97.5	3.692.431	6,57	3.692.345
Percentil 98	3.866.901	6,59	3.866.484
Percentil 99	5.315.847	6,72	5.307.857
Percentil 99.9	7.192.808	6,86	7.188.532

Con el análisis realizado de la demanda actual de ejes equivalentes se considera clave seleccionar un umbral máximo de diseño, que permita identificar qué combinaciones de variables son válidas para obtener una cantidad de ejes equivalentes que permita realizar un diseño simplificado y que se mantengan las condiciones adecuadas para aceptar dicho diseño como válido.

Finalmente al comparar todos los ESALs de los diferentes periodos de diseño sugeridos, se propone utilizar como umbral el percentil 85 (cercano a 1,5 millones de ejes equivalentes) como el valor para definir los caminos que serán diseñados por la metodología simplificada, ya que se espera que el valor seleccionado sea menor a los 3 millones de ejes equivalentes, el cual es el umbral de bajo volumen recomendado en la Guía Interina de Diseño de Pavimentos Empírica-Mecanicista para Costa Rica que está siendo desarrollada por el LanammeUCR.

Además, el valor de 1,5 millones de ejes equivalentes es un valor bajo y está acorde a umbrales utilizados a nivel internacional para este tipo de rutas. Como referencias se tiene que la guía sudafricana en las categorías de bajo (ES1) tráfico considera hasta 1 millón de ejes equivalentes y para mediano tráfico (ES2) hasta los 3 millones de ejes equivalentes (South African National Roads Agency Ltd, 2013). La guía de bajo volumen de la MEPDG en su versión del 2004 considera valores de 50 000 hasta los 750000 vehículos pesados en el período de diseño, que para los factores camión de Costa Rica puede ser equivalente a 82.000 y 1.230.000 de ejes equivalentes

En la siguiente figura se muestra una comparación de los diferentes percentiles para los diferentes periodos de diseño

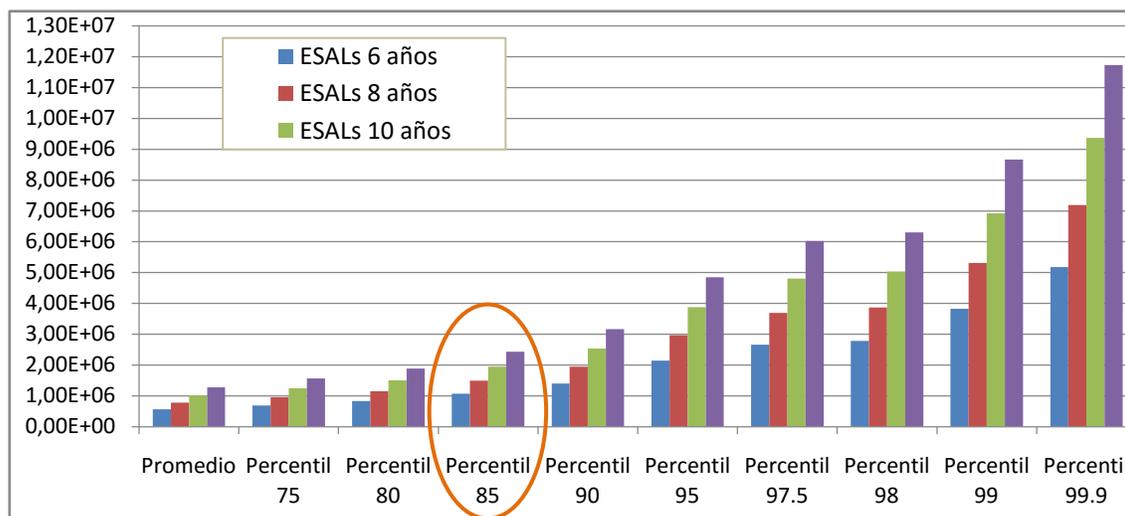


Figura 5. Comparación de percentiles de los ESALs en los distintos periodos de diseño.

9.2.2. Selección de los rangos de TPD

Para la selección de los rangos de TPD, se cuenta con un total de 342 datos, sin embargo, se debe realizar la selección de aquellos casos en donde los ESALs sean menores 1,5 millones de ejes equivalentes, definido previamente como el umbral máximo de ESALs para esta guía de diseño, obteniendo así un total de 291 datos. Este permitirá analizar la distribución de TPD para las condiciones que flujo vehicular en los casos considerados dentro de los 1,5 millones de ejes equivalentes.



Tabla 4. Resultado de percentiles de los datos de TPD filtrados

Dato	Valor
Promedio	2.559
Desviación estándar	2.222
CV	1
Percentil 15	580
Percentil 25	817
Percentil 35	1.204
Percentil 50	1.899
Percentil 75	3.678
Percentil 80	4.268
Percentil 85	4.789
Percentil 90	5.461
Percentil 95	7.333
Percentil 97.5	8.316
Percentil 98	8.512
Percentil 99	9.105
Percentil 99.9	10.939

}

- Percentil 15: 500
- Percentil 25: 800
- Percentil 35: 1200
- Percentil 50: 2000
- Percentil 75: 3500
- Percentil 85: 5000

Al analizar los percentiles de los datos con la filtración realizada para determinar los valores posibles de TPD, se observa que a partir del percentil 95 hay un incremento considerable del valor de TPD al variar poco el percentil, ya que en sólo un 15% de los datos se da un aumento de 4789 a aproximadamente 11.000 vehículos por día. Es por ello que se recomienda seleccionar un rango de TPD desde el percentil 15 con un TPD de 500 hasta el percentil 85 con 5000 vehículos por día aproximadamente.

9.2.3. Selección de los rangos del porcentaje de vehículos pesados

Para la selección de los rangos del porcentaje de vehículos pesados, de igual forma se cuentan con un total de 342 datos, de los cuales al filtrar aquellos que posean los ESALs inferior a 1,5 millones se tiene un total de 291 datos.



Tabla 5. Análisis de percentiles de los datos de TPD filtrados

Variable	Valor		
Promedio	6,08	}	
Desviación estándar	6,55		
CV	1,08		
Percentil 15	2,75		Percentil 15: 3 %
Percentil 25	3,29		Percentil 35: 4 %
Percentil 35	3,95		Percentil 50: 5 %
Percentil 50	5,00		Percentil 75: 7 %
Percentil 75	7,30		Percentil 85: 8,5 %
Percentil 80	7,87		Percentil 95: 14 %
Percentil 85	8,76		Percentil 97,5: 15 %
Percentil 90	10,50		
Percentil 95	13,62		
Percentil 97.5	15,08		
Percentil 98	15,38		
Percentil 99	19,45		
Percentil 99.9	77,53		

Se puede apreciar que a partir del percentil 98 hay un incremento considerable del valor para el porcentaje de pesados, es por ello que se establece un rango de porcentaje de vehículos pesados desde el percentil 15 con un porcentaje de pesados del 3 % hasta el percentil 97,5 con un porcentaje de pesados del 15 %.

9.2.4. Análisis del factor camión

En la siguiente tabla se muestran los factores camión para Costa Rica determinados en las estaciones de pesaje del Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica entre los años 2008 – 2011, en la encuesta de carga del 2007 realizada por el LanammeUCR y de un Trabajo Final de Graduación asociado a buses.

Tabla 6. Factor camión promedio para diferentes rutas del país

Fuente	Ruta	Tipo de vehículo	Factor Camión								
			Pick Up	C2+	C2	Bus C2	C3	C4	T2-S1	T3-S1	T3-S2
Determinación de los factores camión promedio en las estaciones de pesaje en Cosat Rica 2008-2011	Ruta 32 San José - Limón		-	-	0.242	-	0.82	1.375	0.961	1.565	1.685
	Ruta 32 Limón - San José		-	-	0.21	-	0.599	0.573	0.675	0.745	0.813
	Ruta 1 Cañas - San José		-	-	0.34	-	0.846	0.792	0.749	1.167	1.603
	Ruta 2 San José - Cartago		-	-	0.214	-	0.689	1.102	0.438	1.068	1.016
	Ruta 2 Cartago - San José		-	-	0.205	-	0.880	1.199	1.874	1.273	1.394
	Ruta 2 Paso Canoas - San José		-	-	0.268	-	0.604	0.956	0.668	0.936	1.072
Encuesta de Carga 2007	Ruta 1: General Cañas (Peaje)		0.011	0.019	0.734	2.022	2.721	-	-	-	2.102
	Ruta 1: Bernardo Soto Naranjo (Peaje)		0.011	0.0116	0.902	3.68	1.971	-	-	-	3.701
	Ruta 1: Bernardo Soto Esparza (Peaje)		0.011	0.233	0.723	2.911	2.834	-	-	-	4.153
	Ruta 2: Florencio del Castillo (Peaje)		0.015	0.031	-	1.473	-	-	-	-	-
	Ruta 2: Pérez Zaldón (Tránsito)		0.012	0.014	0.446	1.858	3.33	-	-	-	2.08
	Ruta 27 Próspero Fernández (Peaje)		0.011	0.016	1.163	1.957	3.155	-	-	-	2.695
	Ruta 32 Braulio Carrillo (Peaje)		0.011	0.022	-	3.692	-	-	-	-	-
Ruta 140 San Carlos (Ciudad Quesada)		0.012	0.014	0.521	2.107	3.773	-	-	-	3.861	
Factores Camión TFG Juan Carlos Espinoza 2013	Bus Urbano		-	-	-	1.02	-	-	-	-	-
	Bus Interurbano		-	-	-	2.88	-	-	-	-	-
Promedio			0.01	0.05	0.50	2.36	1.85	1.00	0.89	1.13	2.18
Desviación Estándar			0.00	0.08	0.32	0.90	1.24	0.29	0.51	0.28	1.17

Fuente: (Espinoza Gonzales, 2013) (Allen, Ulloa, Sibaja & Badilla, 2007) (Vargas & Allen, 2014). Modificado Arias, 2014

Con el propósito de realizar el computo de los ejes equivalentes de diseño se propone utilizar un valor representativo de factor camión para Costa Rica, utilizando los datos que se han registrado hasta la fecha en rutas nacionales. Para esto se resume en la siguiente tabla los valores promedio del factor camión que han sido medidos en Costa Rica. Además, se propone utilizar un valor conservador, asociándolo a un percentil del 85%.



Tabla 7. Resumen del valor promedio para el factor camión en diferentes rutas nacionales de Costa Rica

Fuente	Ruta	Factor Camión (FC)
		Pesados
Lanamme 2007	Próspero Fernandez ruta 27	1,77
	Florencio del Castillo Ruta 2	1,84
	General Cañas ruta 1	1,31
	Braulio Carrillo ruta 32	3,05
	Naranjo Bernardo Soto ruta 1	2,44
	Esparza Bernardo Soto ruta 1	3,19
	San Carlos ruta 140	1,50
	Pérez Zeledón ruta 2	1,31
MOPT 2009-2011	Ruta 32 San José-Limón	1,24
	Ruta 32 Limón-San José	0,66
	Ruta 1 Cañas-San José	1,04
	Ruta 2 San José-Cartago	0,87
	Ruta 2 Cartago-San José	1,26
	Ruta 2 Paso Canoas-San José	0,79
TFG Juan Carlos	Bus Urbano	1,02
	Bus Interurbano	2,88
	Promedio	1,64
	Desviación estándar	0,82
	CV	0,50

En la siguiente tabla se puede apreciar que el percentil 85 %, para el factor camión es de 2,49. Por lo tanto para los procedimientos siguientes se utiliza como referencia este factor camión (FC).

Tabla 8. Valor del factor camión de acuerdo con distintos valores de probabilidad

Percentil	Factor camión
80%	2,33
85%	2,49
95%	2,99



9.2.5. Cálculo de ESALs

Para el cálculo del ESALs se emplean las siguientes fórmulas

$$ESAL_{día} = \%tipodevehículo * TPDA * FC$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * 365 * GF * DS * LDF$$

$$GF = \frac{|(1 + r)^y - 1|}{r}$$

Donde:

- ESAL: Ejes equivalentes
- FC: Factor Camión
- GF: Factor de crecimiento vehicular
- DS: Factor direccional.
- LDF: Porcentaje de vehículos por carril.
- R: Razón de crecimiento
- y: Cantidad de años

Para esta propuesta de diseño se emplearán los siguientes datos:

- Factor direccional: 70 %
- Porcentaje de vehículos por carril: 100 %
- Factor camión: 2.42
- Porcentaje de crecimiento: 4 %

La razón de crecimiento se determinó al analizar documentación nacional como, por ejemplo, la base de datos de conteos vehiculares de carreteras nacionales que tuvieran los conteos clasificados de acuerdo con el tipo de vehículos, de esta forma únicamente se tomaron en cuenta los vehículos pesados y se analizaron sus porcentajes de crecimiento anuales. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos:

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 25 de 42
-------------------------------	----------------------------------	-----------------



Tabla 9. Porcentaje de crecimiento de diferentes rutas nacionales

Ruta	Años	Porcentaje de Crecimiento	Porcentaje de crecimiento (Crecimiento Geométrico)
Bernardo Soto, Ruta 1	6	4,7%	4,6%
Florencio del Castillo, Ruta 2	11	7,6%	6,9%
Próspero Fernández, Ruta 27	9	7,3%	7,9%
Braulio Carrillo, Ruta 32	11	3,8%	3,5%
Factor de crecimiento promedio		5,88%	5,73%

Se obtuvo aproximadamente un 5,8 % de crecimiento para rutas nacionales de alto tránsito vehicular, es por ello que para este proyecto se propone un valor de 4%. Además, documentos como el Plan Nacional de desarrollo 2015-2018, Plan nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035 e incremento anual del PIB están cercanos a este valor.

9.2.6. Casos de estudio

De acuerdo a todo el análisis previamente presentado, se obtienen un total de 168 posibles combinaciones, a continuación, se presenta un esquema de dichas combinaciones de diseño:

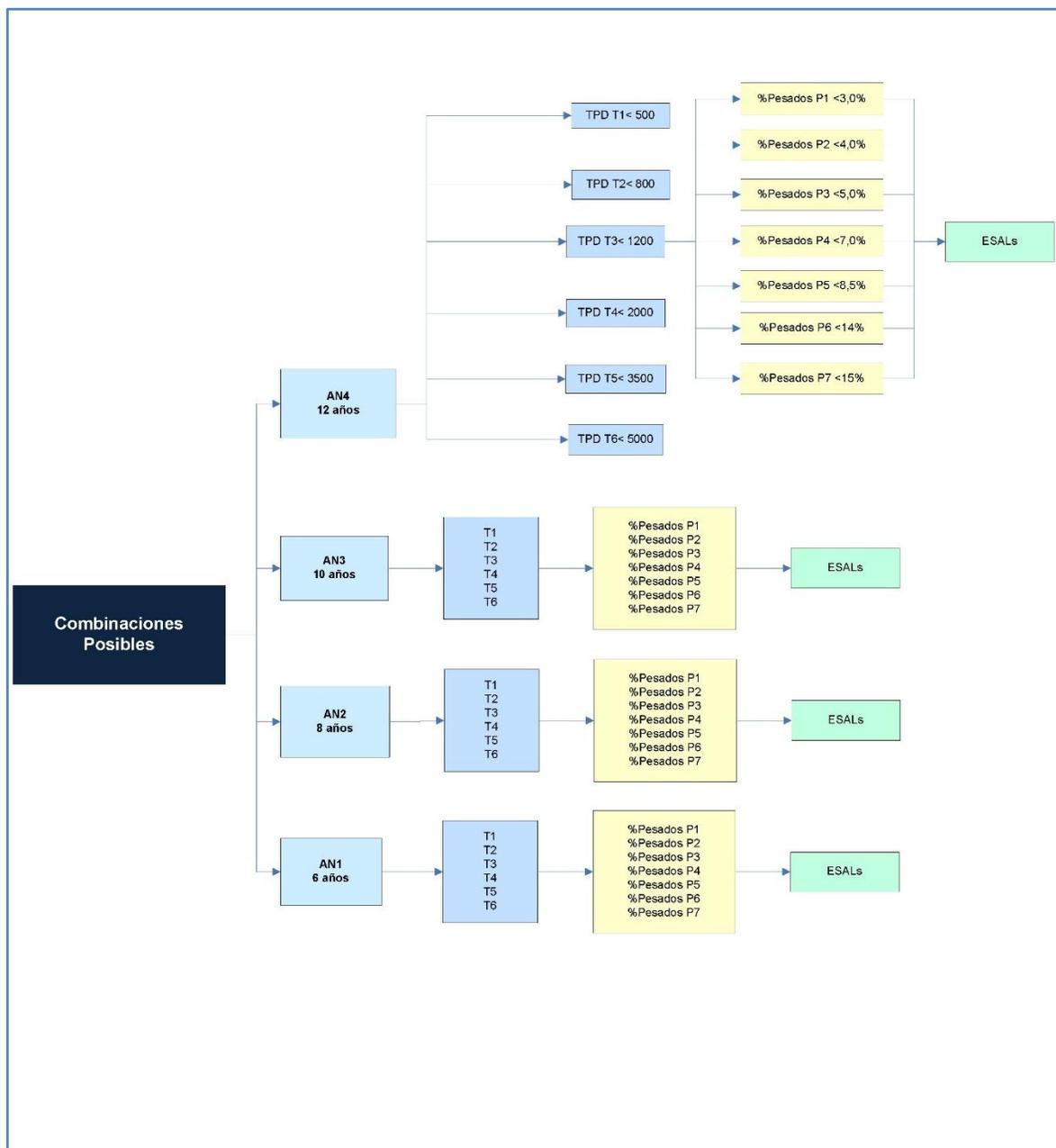


Figura 6. Combinaciones posibles para la guía de diseño de bajo volumen.

Con el esquema anterior se crean matrices de posibles valores de ESALs para cada periodo de diseño de acuerdo con las distintas combinaciones de TPD y de porcentaje de pesados.



Tabla 10. ESALs para el período de diseño de 6 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

Período de diseño = 6 Años						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	AN1T1P1	AN1T2P1	AN1T3P1	AN1T4P1	AN1T5P1	AN1T6P1
P2	AN1T1P2	AN1T2P2	AN1T3P2	AN1T4P2	AN1T5P2	AN1T6P2
P3	AN1T1P3	AN1T2P3	AN1T3P3	AN1T4P3	AN1T5P3	AN1T6P3
P4	AN1T1P4	AN1T2P4	AN1T3P4	AN1T4P4	AN1T5P4	AN1T6P4
P5	AN1T1P5	AN1T2P5	AN1T3P5	AN1T4P5	AN1T5P5	AN1T6P5
P6	AN1T1P6	AN1T2P6	AN1T3P6	AN1T4P6	AN1T5P6	AN1T6P6
P7	AN1T1P7	AN1T2P7	AN1T3P7	AN1T4P7	AN1T5P7	AN1T6P7

Período de diseño = 6 Años						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	61587	98539	147809	246348	431109	615870
P2	82116	131386	197078	328464	574812	821160
P3	102645	164232	246348	410580	718515	1026449
P4	143703	229925	344887	574812	1005920	1437029
P5	174496	279194	418791	697986	1221475	1744964
P6	287406	459849	689774	1149623	2011841	2874058
P7	307935	492696	739044	1231739	2155544	3079348

Tabla 11. ESALs para el período de diseño de 8 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

Período de diseño = 8 Años						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	AN2T1P1	AN2T2P1	AN2T3P1	AN2T4P1	AN2T5P1	AN2T6P1
P2	AN2T1P2	AN2T2P2	AN2T3P2	AN2T4P2	AN2T5P2	AN2T6P2
P3	AN2T1P3	AN2T2P3	AN2T3P3	AN2T4P3	AN2T5P3	AN2T6P3
P4	AN2T1P4	AN2T2P4	AN2T3P4	AN2T4P4	AN2T5P4	AN2T6P4
P5	AN2T1P5	AN2T2P5	AN2T3P5	AN2T4P5	AN2T5P5	AN2T6P5
P6	AN2T1P6	AN2T2P6	AN2T3P6	AN2T4P6	AN2T5P6	AN2T6P6
P7	AN2T1P7	AN2T2P7	AN2T3P7	AN2T4P7	AN2T5P7	AN2T6P7

Período de diseño = 8 Años						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	85554	136886	205329	342215	598877	855538
P2	114072	182515	273772	456287	798502	1140717
P3	142590	228143	342215	570359	998128	1425897
P4	199626	319401	479101	798502	1397379	1996255
P5	242402	387844	581766	969610	1696817	2424024
P6	399251	638802	958203	1597004	2794757	3992511
P7	427769	684430	1026646	1711076	2994383	4277690

Tabla 12. ESALs para el período de diseño de 10 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

Período de diseño = 10 Años						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	AN3T1P1	AN3T2P1	AN3T3P1	AN3T4P1	AN3T5P1	AN3T6P1
P2	AN3T1P2	AN3T2P2	AN3T3P2	AN3T4P2	AN3T5P2	AN3T6P2
P3	AN3T1P3	AN3T2P3	AN3T3P3	AN3T4P3	AN3T5P3	AN3T6P3
P4	AN3T1P4	AN3T2P4	AN3T3P4	AN3T4P4	AN3T5P4	AN3T6P4
P5	AN3T1P5	AN3T2P5	AN3T3P5	AN3T4P5	AN3T5P5	AN3T6P5
P6	AN3T1P6	AN3T2P6	AN3T3P6	AN3T4P6	AN3T5P6	AN3T6P6
P7	AN3T1P7	AN3T2P7	AN3T3P7	AN3T4P7	AN3T5P7	AN3T6P7

Período de diseño = 10 Años						
Tránsito promedio diario						
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	111476	178362	267543	445905	780334	1114763
P2	148635	237816	356724	594540	1040446	1486351
P3	185794	297270	445905	743176	1300557	1857939
P4	260111	416178	624267	1040446	1820780	2601114
P5	315850	505359	758039	1263398	2210947	3158496
P6	520223	832357	1248535	2080891	3641560	5202229
P7	557382	891811	1337716	2229527	3901671	5573816



Tabla 13. ESALs para el período de diseño de 12 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

Período de diseño = 12 Años						
Pesados	Tránsito promedio diario					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	AN4T1P1	AN4T2P1	AN4T3P1	AN4T4P1	AN4T5P1	AN4T6P1
P2	AN4T1P2	AN4T2P2	AN4T3P2	AN4T4P2	AN4T5P2	AN4T6P2
P3	AN4T1P3	AN4T2P3	AN4T3P3	AN4T4P3	AN4T5P3	AN4T6P3
P4	AN4T1P4	AN4T2P4	AN4T3P4	AN4T4P4	AN4T5P4	AN4T6P4
P5	AN4T1P5	AN4T2P5	AN4T3P5	AN4T4P5	AN4T5P5	AN4T6P5
P6	AN4T1P6	AN4T2P6	AN4T3P6	AN4T4P6	AN4T5P6	AN4T6P6
P7	AN4T1P7	AN4T2P7	AN4T3P7	AN4T4P7	AN4T5P7	AN4T6P7

Período de diseño = 12 Años						
Pesados	Tránsito promedio diario					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	139514	223223	334834	558057	976599	1395141
P2	186019	297630	446445	744075	1302132	1860188
P3	232524	372038	558057	930094	1627665	2325235
P4	325533	520853	781279	1302132	2278731	3255330
P5	395290	632464	948696	1581160	2767030	3952900
P6	651066	1041705	1562558	2604264	4557462	6510659
P7	697571	1116113	1674170	2790283	4882995	6975706

Se puede apreciar en las matrices que conforme se incrementan los valores de TPD y el porcentaje de pesados en cada periodo de diseño los valores de ESALs que se obtienen podrían estar fuera del rango establecido, el cual corresponde a un máximo de 1,5 millones de ejes equivalentes.

Los valores en color rojo representan dichas condiciones de carga y no se recomienda realizar el proceso de diseño simplificado, ya que excede el valor 1,5 millones de ejes de equivalentes. Por lo tanto, para estas condiciones se recomienda realizar un procedimiento formal de diseño, que contemple las condiciones de carga y capacidad de soporte específicas para el sitio de análisis.

9.3. Subrasante

Se realiza un análisis de CBR en situ de acuerdo con la base de datos existente en la Unidad de Gestión Municipal del LanammeUCR, siguiendo un procedimiento similar al discutido en capítulos anteriores. Esta base de datos contiene los valores de CBR en sitio, utilizando como base el equipo “anillo de carga”. En cual mide la fuerza requerida para penetrar una cierta distancia y mediante el uso de correlaciones específicas para cada suelo se puede estimar el valor de CBR.



Tabla 14. Valores de CBR de acuerdo con diferentes percentiles

Percentil	CBR	Descripción
100.0%	37.6	Máximo
99.5%	19.3	
97.5%	13.8	
95.0%	13.0	
90.0%	11.4	
87.5%	10.0	
85.0%	9.2	
80.0%	7.0	
75.0%	5.7	Tercer cuartil
50.0%	3.9	Mediana
25.0%	3.1	Primer cuartil
10.0%	2.6	
2.5%	2.2	
0.5%	1.3	
0.0%	0.6	Mínimo

}

3% - 3.9%

3.9% - 5.7%

5.7% - 9.2 %

9.2% - 11.4 %

>11.4 %

De acuerdo con los datos analizados:

- Menor o Igual a 3%, un 24% de los datos.
- Entre 3.1% y 3.9%, un 25 % de los datos.
- Entre 3.9% y 5.7%, un 25% de los datos.
- Entre 5.7% y 9.2%, un 10% de los datos.
- Entre 9.2% y 11.4%, un 5% de los datos.
- Mayor al 11.4%, un 10% de los datos.

Además, de acuerdo con el análisis de la transformación de Johnson, extraído del informe LM-PI-GM-05-2014 (Arias Barrantes, Allen Monge, & Sánchez Solano, 2014), el promedio para los valores de “CBR en sitio” es de 3.9 % con un intervalo para la media al 95 % de confianza (3.5 % - 3.9%)

Para el caso de la subbase, base y mezcla asfáltica, se emplearán los valores mínimos de módulo resiliente establecido por AASHTO y el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes, CR-2010.



9.4. Estructura del pavimento

Con base en la información anterior existen 168 posibles combinaciones de tránsito y 5 posibles combinaciones de subrasantes, dando un total de 840 posibles diseños de estructuras de pavimento. Por lo tanto, se opta por agrupar los ESALs de diseño por percentiles para crear intervalos que sean más prácticos y después corroborar estas agrupaciones.

Tabla 15. Agrupación de los ESALs de diseño de acuerdo a percentiles

Percentil	ESAL Diseño
3%	111502
6%	142612
9%	174612
12%	197180
15%	230055
18%	247174
21%	288096
24%	319891
27%	342456
30%	395686
33%	428136
36%	456714
39%	520305
42%	570982
45%	601426
48%	656404
51%	722005
54%	780504
57%	836761
60%	960484
63%	1026491
66%	1115060
69%	1235602
72%	1310672
75%	1449360
78%	1639756
81%	1830813
84%	2101794
87%	2353884
90%	2791625
93%	3188514
96%	4083768



Percentil	ESAL Diseño
99%	5882974

Seguidamente se realiza el análisis estadístico básico de las agrupaciones de ESALs.

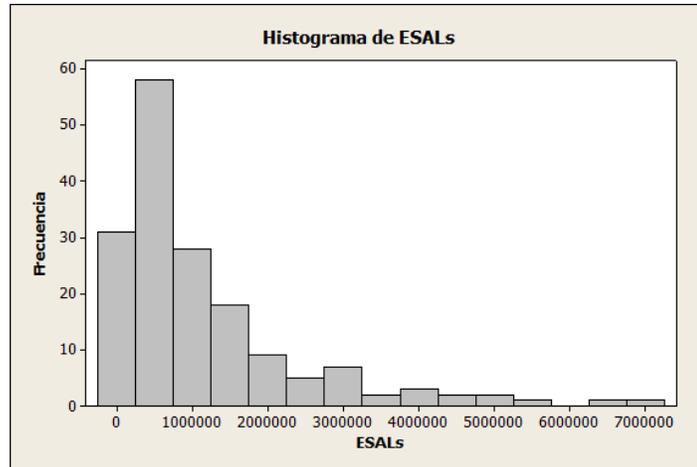


Figura 7. Histograma de las agrupaciones de ESALs de diseño

De acuerdo con el histograma de las agrupaciones de ESALs de diseño, se determinó que los datos no tienen un comportamiento normal, pues presentan un sesgo positivo ya que la cantidad de rutas con ESALs altos es mucho menor que las rutas con ESALs bajos al tratarse de datos de la red vial cantonal.

Se realizó la identificación de la distribución de probabilidad de mejor ajuste, en la Figura 8, en donde se observa que la transformación de Box-Cox y Lognormal son las que mejor se ajustan al tener un valor de $A^2 = 0,231 < A_7^2 = 0,752$ y el valor de $P > 0,05$. Sin embargo, se elige la transformación de Lognormal al ser la distribución que manipula menos los datos.

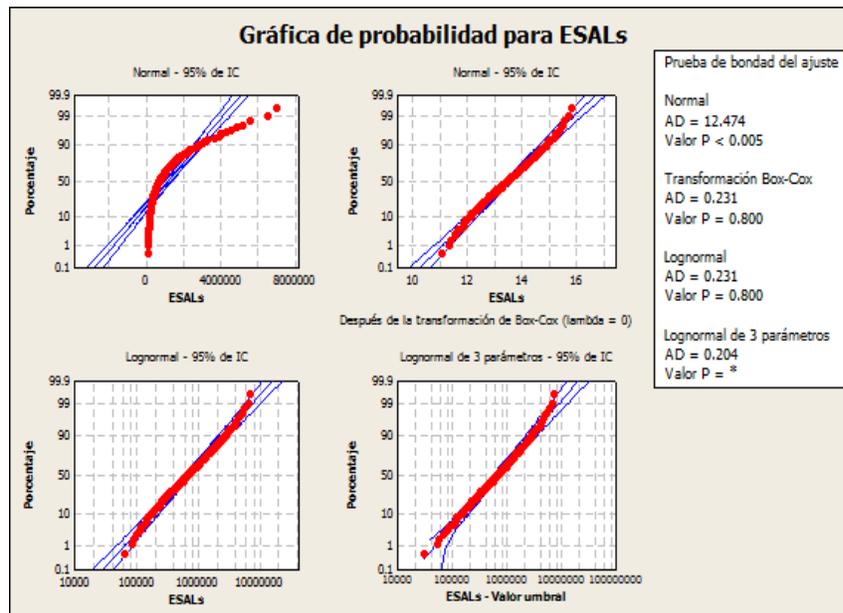


Figura 8. Prueba de mejor ajuste con la distribución normal, transformación Box-Cox, Lognormal y Lognormal de 3 parámetros de ESALS agrupados

Se procede a realizar el análisis del comportamiento de los datos transformados a la distribución de Lognormal.

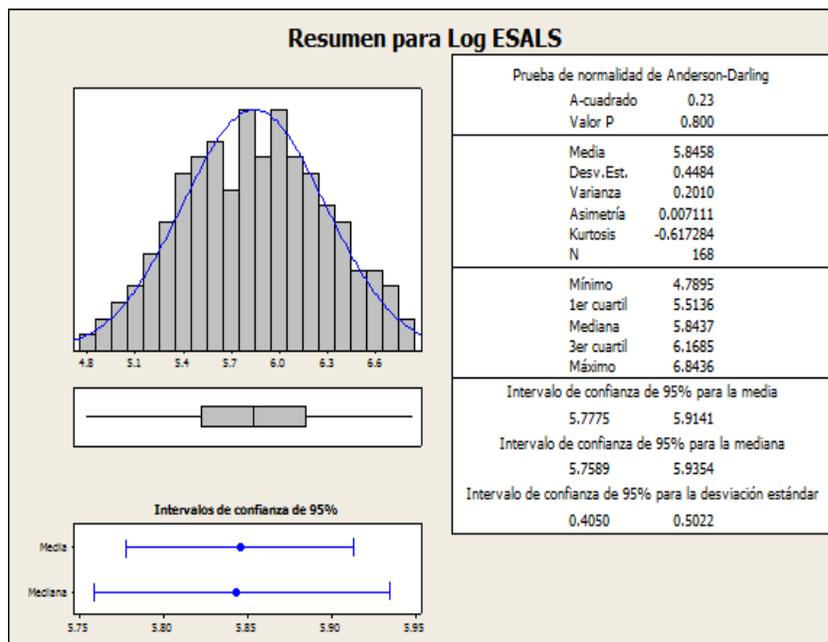


Figura 9. Resultados de la prueba de normalidad de Anderson-Darling para los datos de ESALS de diseño agrupados

De acuerdo con la prueba de Anderson-Darling, $A^2 = 0,231 < A_7^2 = 0,752$ y el valor de $P > 0,05$, además los valores de asimetría y kurtosis son muy cercanos a 0 y existe una gran proximidad entre los valores de la media y la mediana, entonces se puede decir que la distribución de los datos tiene una tendencia a adaptarse a la forma de la campana de Gauss y por lo tanto tienen un comportamiento normal.

Con los datos transformados a la distribución Lognormal, se procede a determinar los valores de ESALs de diseño agrupados para las diferentes probabilidades.

A continuación, en la Figura 10 se muestra un ejemplo de la distribución normal para obtener el logaritmo del valor de ESAL para una probabilidad de 3 % y en la Tabla 16 se muestran los resultados de ESALs de diseños agrupados en las diferentes probabilidades.

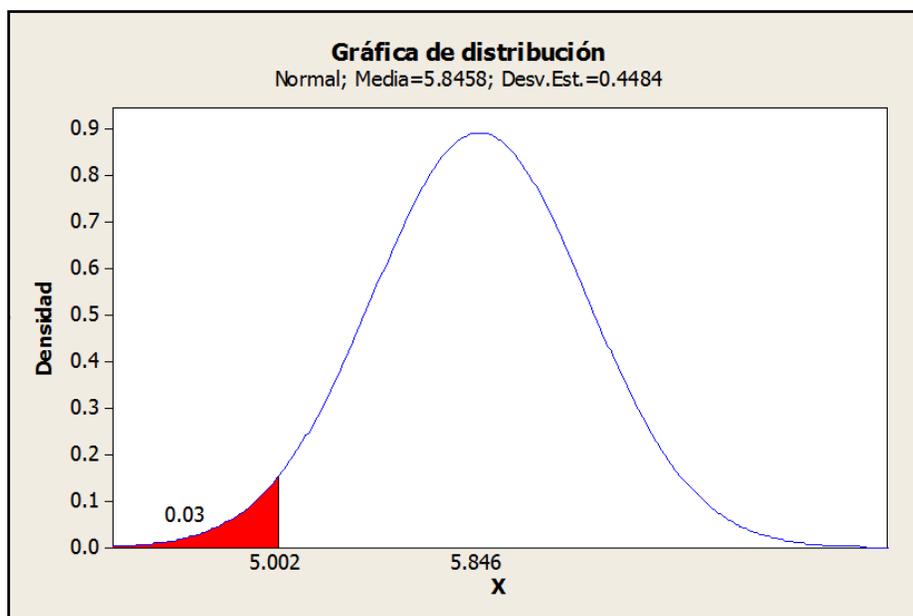


Figura 10. Distribución normal para obtener el logaritmo del valor de ESAL para una probabilidad de 3 %



Tabla 16. Valores de los ESALs de diseño agrupados de acuerdo con diferentes probabilidades

Probabilidad	Log Valor	Valor
0,03	5,0025	100566
0,06	5,1486	140812
0,09	5,2446	175633
0,12	5,3189	208418
0,15	5,3811	240471
0,18	5,4354	272490
0,21	5,4842	304930
0,24	5,5291	338138
0,27	5,5710	372404
0,3	5,6107	407999
0,33	5,6485	445187
0,36	5,6851	484247
0,39	5,7206	525477
0,42	5,7553	569208
0,45	5,7895	615820
0,48	5,8233	665750
0,51	5,8570	719517
0,54	5,8908	777740
0,57	5,9249	841175
0,6	5,9594	910753
0,63	5,9946	987650
0,66	6,0307	1073368
0,69	6,0681	1169875
0,72	6,1071	1279812
0,75	6,1482	1406829
0,78	6,1921	1556150
0,81	6,2394	1735596
0,84	6,2917	1957559
Media		5,8458
Desviación Estándar		0,4484

Después de corroborar las agrupaciones realizadas, se tienen un total de 26 valores de ESALs, combinados con los 5 valores posibles de CBR, se obtiene un total de 130 diseños.

Las estructuras planteadas deben cumplir con los siguientes criterios:

Informe: LM-PI-GM-INF-05-2016	Fecha de emisión: Noviembre 2016	Página 35 de 42
-------------------------------	----------------------------------	-----------------



- Los materiales empleados cumplen con los requisitos establecidos en el CR-2010
- Se emplean modelos genéricos internacionales para módulos resilientes de mezclas materiales granulares y suelos.
- Se utilizará el diseño Mecanístico-Empírico básico, de acuerdo a los lineamientos publicados por el LanammeUCR.
- estarán formadas por:
 - MAC-BG-SB
 - MAC-BG
 - MAC-BE

A continuación, se presenta una matriz con los diferentes tipos de estructuras de acuerdo con el porcentaje de pesados y el TPD.

Tabla 17. Tipo de estructura para el período de diseño de 6 años de acuerdo con las diferentes combinaciones de TPD y Pesados

Período de diseño = 6 Años						
	Tránsito promedio diario					
Pesados	T1	T2	T3	T4	T5	T6
P1	EP1	EP1	EP2	EP3	EP3	EP4
P2	EP1	EP2	EP3	EP3	EP4	EP4
P3	EP2	EP2	EP3	EP4	EP4	EP1
P4	EP3	EP3	EP4	EP4	EP5	EP5
P5	EP4	EP4	EP4	EP5	EP5	x
P6	EP5	EP5	EP5	EP5	x	x
P7	EP5	EP5	EP5	EP5	x	x

De acuerdo con el tipo de estructura, cada pavimento tendrá aproximadamente una forma similar a la siguiente figura, variando los espesores y en algunos casos se podrán incorporar bases estabilizadas con cemento o emulsión.

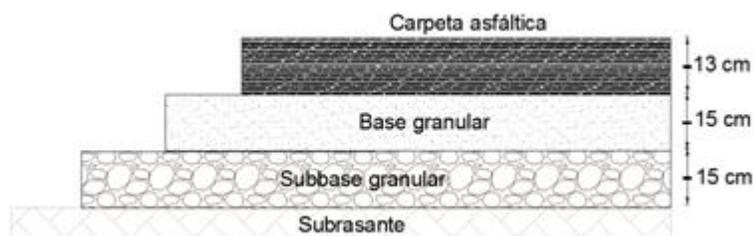


Figura 11. Ejemplo de una posible configuración de un tipo de estructura de pavimento

10. CONCLUSIONES

- La presente propuesta pretende recopilar la información de necesaria para proponer parámetros de diseño que sean lo más cercano posible a las rutas de bajo volumen existentes en Costa Rica.
- Se logró definir una serie de parámetros en cuanto a flujo vehicular, porcentaje de pesados, capacidad de soporte en subrasantes y factores camión; muy necesarios para realizar el diseño de pavimentos.
- La matriz que se creó contiene los parámetros necesarios para lograr diferentes configuraciones de demanda, a partir de períodos de diseño y configuración del flujo vehicular; sin embargo, las agrupaciones permitirán optimizar la cantidad de diseños a realizar en vista que se puede lograr valores similares de ESALs a partir de diferentes configuraciones de flujo vehicular.
- El procedimiento a seguir contempla el diseño de estructuras “tipo”, flexibles y semirrígidas que sean compatibles bajo condiciones específicas, utilizando conceptos mecánico-empíricos del diseño de pavimentos.
- Para lograr la mayor compatibilidad posible entre la teoría y la práctica actual en Costa Rica se tomarán como referencia las propiedades de materiales que se recomiendan en el CR-2010.



11. REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC: AASHTO.
- Arias Barrantes, E. E., Allen Monge, J., & Sánchez Solano, E. (2014). *Análisis de la distribución de probabilidad asociada con el CBR "in situ" de la subrasante en sondeos realizados sobre ña red vial cantonal*. San Pedro: Lanamme UCR.
- Arias, E. (2014). *Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos*. San José.
- Camacho, E. (2009). *Trabajo Final de Graduación: Catálogo de pavimentos asfálticos para rutas nuevas de bajo volumen*. Universidad de Costa Rica. San Pedro.
- Cañas, A. (2014). *Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018 - Capítulo 5: Propuestas Estratégicas Sectoriales*. San José, Costa Rica.
- Departamento de Transporte de la República de Sudáfrica. (1996). *TRH4: Structural Design of Flexible Pavement for Interurban and Rural Roads*. Pretoria, Sudáfrica.
- Dirección de Viabilidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2002). *Guía de diseño estructural de pavimentos para caminos de bajo volumen de tránsito*. Chile.
- Espinoza, J. C. (2013). *Determinación de factores camión y espectros de carga representativos de autobuses urbanos e interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica. (Tesis inédita de licenciatura)*. Universidad de Costa Rica, San Pedro.
- Johnson, R. (1997). *Probabilidad y estadística para ingenieros de Miller y Freund*. Madison Wisconsin: Prentice Hall.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2011). *Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035 - Memoria*. San José, Costa Rica.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010*. San José: MOPT.
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2008). *Manual para el diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito*. Lima, Perú.
- Montgomery, D., & Runger, G. (2006). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México: Limusa Wiley.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Illinois: NCHPR.



National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board National Research Council. (2001). *Rahilitation Strategies for Highway Pavements-project C1-38*.

SIECA. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Guatemala.

South African National Roads Agency Ltd. (2013). Chapter 10-Pavement Design. In *South African Pavement Engineering Manual* (p. 134).

Ulloa, Á., Badilla, G., Allen, J., & Sibaja, D. (2007). *Encuesta de Carga*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, San José.

Vargas, C., & Allen, J. (2014). *Determinación de los factores camión promedio en estaciones de pesaje en Costa Rica: Periodo 2008-2011*. San José.

Anexo A. Pruebas para identificar la distribución de probabilidad de mejor ajuste de los datos de ESALs para 8 años de diseño

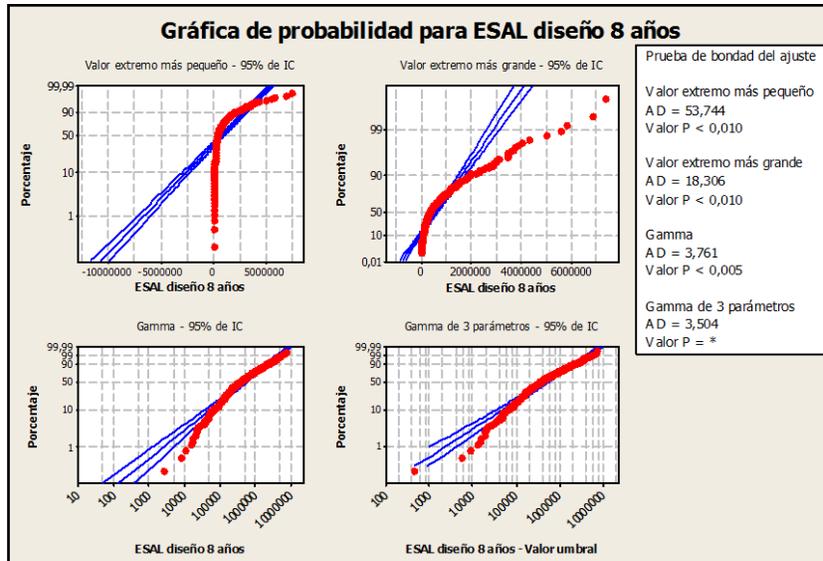


Figura 12. Prueba de mejor ajuste con la distribución del valor extremo más pequeño, valor extremo más grande, Gamma y Gamma de 3 parámetros de los datos de ESALs

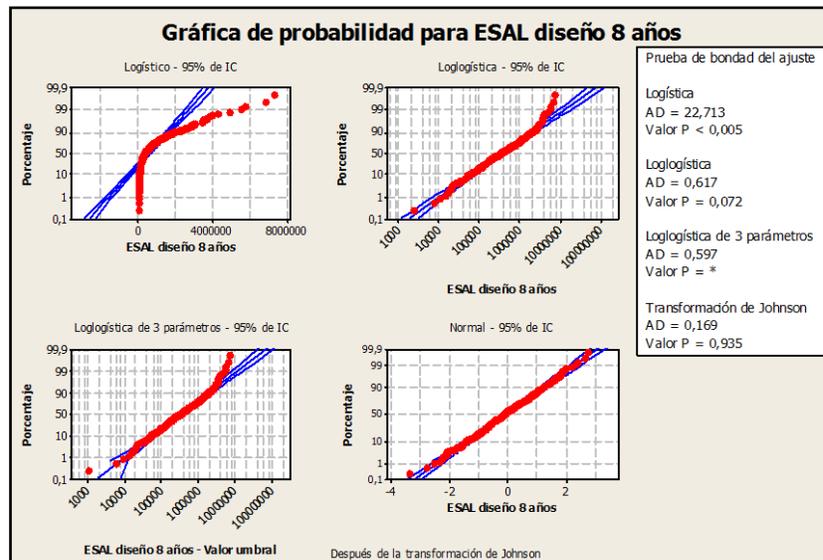


Figura 13. Prueba de mejor ajuste con la distribución Logística, Log logística, Logística de 3 parámetros y Transformación de Johnson de los datos de ESALs

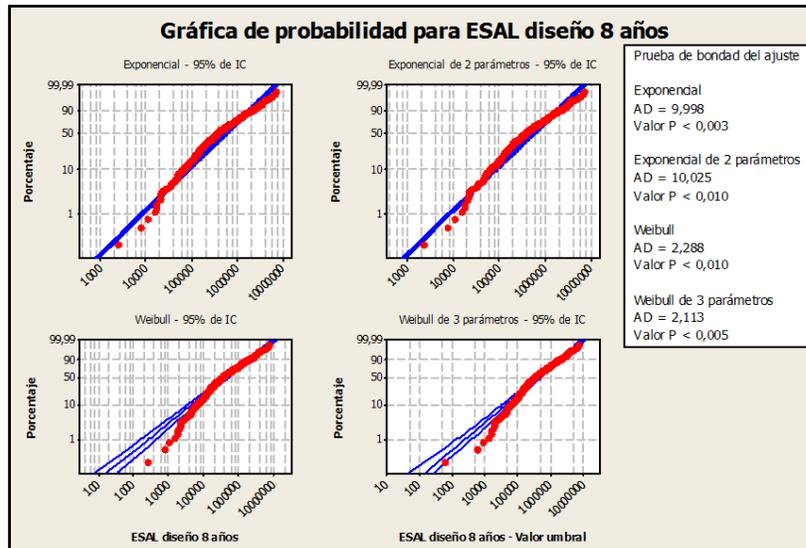


Figura 14. Prueba de mejor ajuste con la distribución Exponencial, Exponencial de 2 parámetros, Weibull y Weibull de 3 parámetros de los datos de ESALs

Anexo B. Pruebas para identificar la distribución de probabilidad de mejor ajuste de los datos de los factores camión promedio

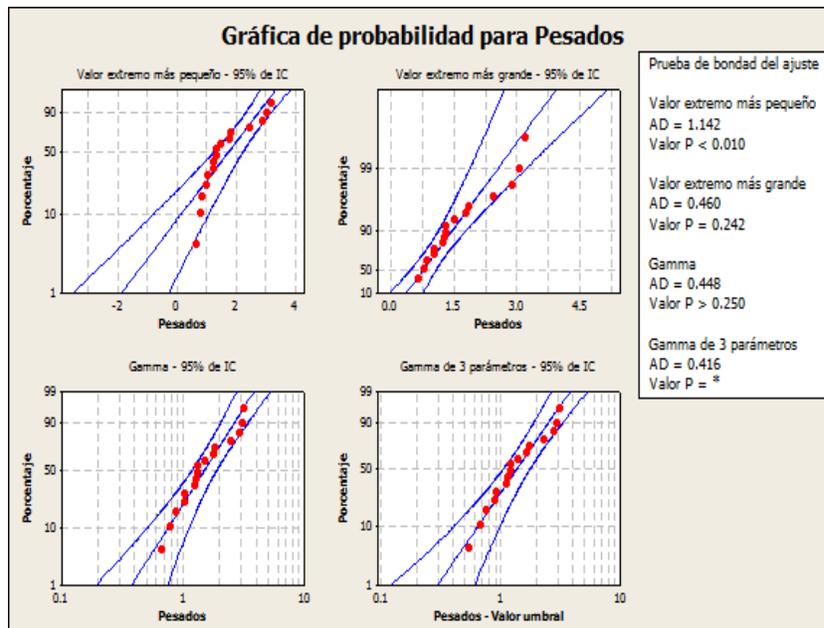


Figura 15. Prueba de mejor ajuste con la distribución del valor extremo más pequeño, valor extremo más grande, Gamma y Gamma de 3 parámetros de los factores camión promedio

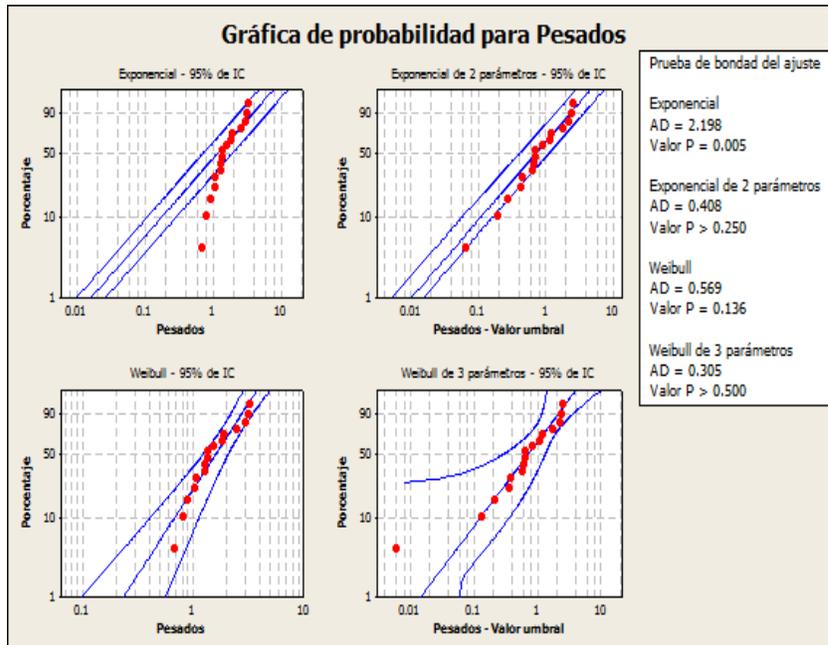


Figura 16. Prueba de mejor ajuste con la distribución Exponencial, Exponencial de 2 parámetros, Weibull y Weibull de 3 parámetros de los factores camión promedio

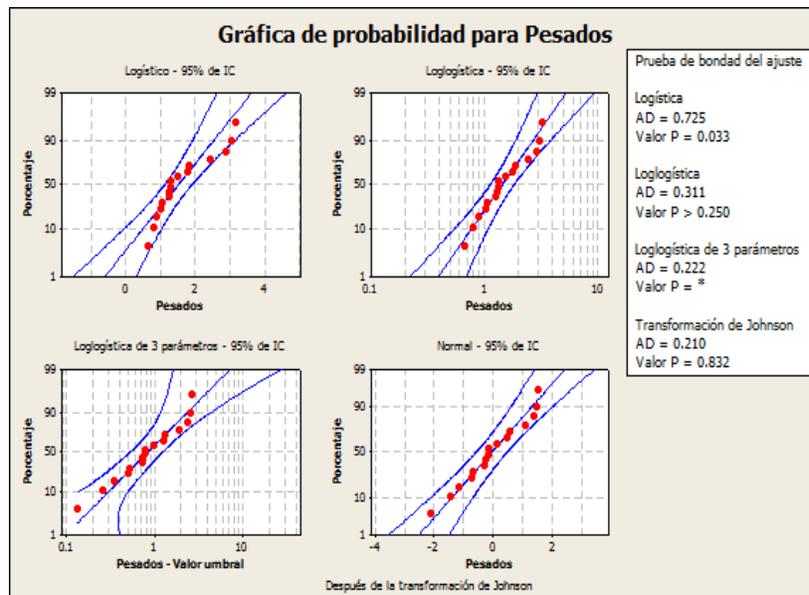


Figura 17. Prueba de mejor ajuste con la distribución Logística, Log logística, Logística de 3 parámetros y Transformación de Johnson de los factores camión promedio