

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante : Dr. Ing. Sergio Vargas T.

Profesores Comisión : Dr. Ing. Patricio Álvarez M.

Dr. Ing. Tomás Echaveguren N.

**ANÁLISIS DE MODELOS DE DESEMPEÑO DE
MEPDG PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS
RÍGIDOS EN LA REGIÓN DEL BÍO - BÍO**

PROYECTO DE TÍTULO PRESENTADO EN CONFORMIDAD A LOS REQUISITOS
PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

KARLA RIFFO COFRÉ

CONCEPCIÓN, Marzo 2013

RESUMEN

La guía de diseño empírico mecanicista, (MEPDG), fue editada en el año 2004 por la “*National Cooperative Highway Research Program*” (NCHRP) a través del reporte 1-37A, a modo de reemplazar el enfoque empírico del método propuesto por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO). El método fue elaborado y calibrado en Estados Unidos, por lo tanto, su implementación requiere una adaptación a las condiciones locales.

En este estudio se realizó un análisis de los modelos de desempeño de MEPDG para el diseño de pavimentos rígidos en la Región del Bío-Bío con el fin de realizar un *ranking* de las variables más influyentes.

Se elaboraron diagramas de causalidad para identificar las variables que influyen directamente en los modelos de desempeño. Posteriormente se revisaron estudios anteriores que permitieron identificar los parámetros para la construcción del diseño factorial.

Se realizó un análisis de sensibilidad para medir la influencia de las variables y parámetros de entrada sobre los modelos de desempeño. Se utilizaron dos condiciones climáticas y cuatro niveles de tránsito de la Región del Bío-Bío. Las variables de diseño utilizadas en el análisis fueron: el volumen de tránsito, el espesor de la losa, el ancho de la losa y el tipo de berma. Se elaboró un *ranking* de las variables y parámetros de entrada en función del nivel de influencia, para cada modelo de desempeño.

Se concluyó que el agrietamiento transversal es el indicador de desempeño más sensible a las variables de diseño, así como también que en escenarios de tránsito alto, la sensibilidad de los modelos aumenta.

Palabras Claves: MEPDG, Pavimentos Rígidos, Modelos de desempeño

ABSTRACT

The Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), was published at 2004 by the "National Cooperative Highway Research Program" (NCHRP) through the report 1-37A, in order to replace the empirical method proposed by the "American Association of State Highway and Transportation Officials" (AASHTO). The method was developed and calibrated in the U.S.A., so its implementation requires its adaptation to the local conditions.

This study analyzed the MEPDG performance models for rigid pavement design in the Bío-Bío Region to make a ranking of the most influential variables in the design.

Causal diagrams were developed to identify the variables that directly influence the performance models. Subsequently previous studies were reviewed and used to identify the parameters for the construction of the factorial design.

We performed a sensitivity evaluation to measure the influence of the design input on performance models. We used two climate conditions and four traffic levels from the Bío-Bío Region. Design inputs evaluated in the analyses are: traffic volume, slab thickness, slab length and edge support. They made a list of input parameters and variables depending on the level of influence for each performance model.

It was concluded that transverse cracking performance index is more sensitive to the design variables, as well as in high traffic scenarios, the models sensitivity increases.

Keywords: MEPDG, Rigid Pavements, Performance models

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a la persona que guió mi interés por realizar este trabajo y enfocar mis esfuerzos al estudio de los pavimentos, el profesor Sergio Vargas.

Agradezco de igual forma a:

El profesor Tomás Echaveguren, por su tiempo, disposición y sugerencias, que me ayudaron a realizar esta memoria.

Mauricio Salgado, por enfocar, a diario, mi formación profesional, su disposición, flexibilidad y apoyo.

El profesor Patricio Álvarez, por darme la oportunidad de conocerlo como docente y persona, al trabajar con él.

Juan Pablo Covarrubias, por su colaboración, disposición y entrega de conocimientos.

Al profesor Luis Firinguetti, por su disposición y sugerencias en el análisis estadístico de los resultados.

Agradezco a todo el cuerpo docente, de la Universidad del Bío – Bío, que aportó en mi formación, profesional y personal, durante estos seis años; principalmente el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental así como el Departamento de Química.

También agradezco al personal administrativo de la Universidad, que me apoyó a diario en distintas tareas.

Agradezco a mi madre, por su apoyo a diario, cariño, comprensión y amistad. A mi padre por haber sido quién inspiró todo lo que soy y lo que seré. A mis abuelas, a mi familia, quienes me han ayudado y apoyado incondicionalmente. A mi hijo, quien me enseñó la constancia, la responsabilidad y a querer sobre todas las cosas. A Christian, por apoyarme a diario y enfocar mi futuro. A Mauricio Cataldo, por ser la persona que es, haberme mostrado el mundo científico y brindarme el apoyo necesario.

Finalmente quiero agradecer a todos mis compañeros y amigos, quienes han estado conmigo, durante este proceso y sé que lo seguirán estando.

INDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
Justificación	1
Objetivos.....	1
Objetivo general	1
Objetivos específicos	1
Metodología de trabajo	2
CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO MEPDG	4
Introducción.....	4
Niveles de entrada	4
Modelos de desempeño para pavimentos rígidos	5
Agrietamiento transversal.....	5
Escalonamiento.....	6
Progresión del IRI.....	6
Interacción entre variables de los modelos de desempeño	6
Conclusiones.....	10
CAPÍTULO 3 ESTUDIOS ANTERIORES DE MEPDG	12
Introducción.....	12
Estudios internacionales sobre MEPDG	12
Experiencias nacionales.....	13
Conclusiones.....	17
CAPÍTULO 4 ELABORACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL.....	18
Introducción.....	18
Condiciones de diseño	18
Elección de variables independientes	18
Base de datos climática.....	19
Información de tránsito.....	19

Espesor de la losa	19
Largo de la losa.....	20
Tipo de borde.....	20
Elección de variables dependientes	20
Matriz de diseño	21
Indicadores de sensibilidad.....	¡Error! Marcador no definido.
Elasticidad	23
Diferencia porcentual	24
Conclusiones.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
Introducción.....	23
Sensibilidad a las variables externas	25
Sensibilidad al nivel de tránsito.....	25
Sensibilidad al cambio de la información climática.....	25
Sensibilidad a las variables de diseño	¡Error! Marcador no definido.
Sensibilidad al espesor de la losa	26
Sensibilidad al largo de la losa	27
Sensibilidad al tipo de berma.....	28
Análisis gráfico.....	30
Gráficos de caja	¡Error! Marcador no definido.
Nivel de sensibilidad de los modelos de desempeño.....	30
Donde:	¡Error! Marcador no definido.
<i>Ranking</i> de las variables de diseño	31
Análisis de escenarios.....	¡Error! Marcador no definido.
Conclusiones.....	32
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
REFERENCIAS	36
ANEXOS	40

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Niveles de entrada de datos.....	5
Tabla 2 Influencia de las variables y parámetros de entrada.....	10
Tabla 3 Variables de entrada con mayor influencia según los distintos autores.....	15
Tabla 4 Caracterización de las estaciones de Chillán y Cañete.....	19
Tabla 5 Información de los distintos niveles de volumen de tránsito.....	19
Tabla 6 Rango de variación del espesor de la losa.....	20
Tabla 7 Variación del largo de la losa.....	20
Tabla 8 Variación del tipo de berma.....	20
Tabla 9 Rangos de variables utilizados en la matriz de diseño.....	21
Tabla 10 Matriz de escenarios.....	22
Tabla 11 Clasificación cualitativa de la elasticidad según su módulo.....	23
Tabla 12 Elasticidad de los indicadores de desempeño respecto al tránsito.....	26
Tabla 13 Diferencia porcentual de los indicadores de desempeño respecto al clima.....	27
Tabla 14 Elasticidad de los indicadores de desempeño respecto al espesor de la losa.....	28
Tabla 15 Elasticidad de los indicadores de desempeño respecto al largo de la losa.....	29
Tabla 16 Elasticidad de los indicadores de desempeño respecto al tipo de berma.....	30
Tabla 17 Observaciones de los gráficos de caja.....	32
Tabla 18 Nivel de sensibilidad de los modelos de desempeño.....	35
Tabla 19 Ranking de las variables de diseño según el nivel de tránsito.....	36

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Metodología de trabajo..... 2

Figura 2 Diagrama de causalidad para el modelo de agrietamiento transversal..... 7

Figura 3 Diagrama de causalidad para el modelo de escalonamiento..... 8

Figura 4 Diagrama de causalidad para el modelo de desconche..... 9

Figura 5 Diagrama de causalidad para el modelo de progresión del IRI..... 9

Figura 6 Gráfico caja agrietamiento v/s tránsito – espesor de la losa..... 31

Figura 7 Gráfico análisis ciclo de vida agrietamiento para tres espesores de la losa..... 33

Figura 8 Gráfico análisis ciclo de vida agrietamiento para tres tipos de berma..... 34

Figura 9 Gráfico análisis ciclo de vida agrietamiento para tres espesores de la losa, tránsito bajo, versión 0.7 MEPDG..... 37

Figura 10 Gráfico análisis ciclo de vida agrietamiento para tres espesores de la losa, tránsito bajo, versión 1.1 MEPDG..... 38

Figura 11 Gráfico análisis ciclo de vida agrietamiento para tres tipos de berma, tránsito alto en versión 0.7 MEPDG..... 39

Figura 12 Gráfico análisis ciclo de vida agrietamiento para tres tipos de berma, tránsito alto en versión 1.1 MEPDG..... 40

Figura 13 Gráfico agrietamiento para dos gradientes de construcción..... 41

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El diseño de pavimentos en Chile se basa en el método AASHTO (MOP, 2012a, 2012b) cuyas ecuaciones fueron desarrolladas mediante métodos empíricos a través de pruebas realizadas en Estados Unidos. La Guía (MEPDG), basada en fundamentos mecanicistas-empíricos fue desarrollada por el NCHRP de Estados Unidos para reemplazar el enfoque empírico del método AASHTO.

El método requiere cuantiosa información de tránsito y clima, la cual se encuentra disponible para Estados Unidos, pero no así para otros países. Particularmente en el caso de Chile, se han realizado estudios para la caracterización de datos de clima y tránsito utilizados en MEPDG (Wahr, 2009; Merino, 2010; Vidal, 2011), así como se han realizado estudios prospectivos de los modelos de desempeño para pavimentos asfálticos (Winkler, 2011), los que permitieron identificar las variables más relevantes que influyen en los resultados de diseño y que debiesen tener prioridad en cuanto a clasificación y/o calibración. Sin embargo no se han encontrado estudios prospectivos para el diseño de pavimentos rígidos, cuya finalidad sea jerarquizar variables para priorizar esfuerzos y recursos en su caracterización.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar los modelos de desempeño de MEPDG para el diseño de pavimentos rígidos en la Región del Bío-Bío.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los modelos de desempeño utilizados en el método e identificar parámetros, variables de entrada y sus rangos de aplicación.
- Definir escenarios representativos para las condiciones de diseño en la Región del Bío -Bío.
- Analizar la sensibilidad de los modelos de desempeño para pavimentos rígidos bajo distintos escenarios.

- Jerarquizar según nivel de sensibilidad los parámetros y variables involucradas en el diseño.

1.3 Metodología de trabajo

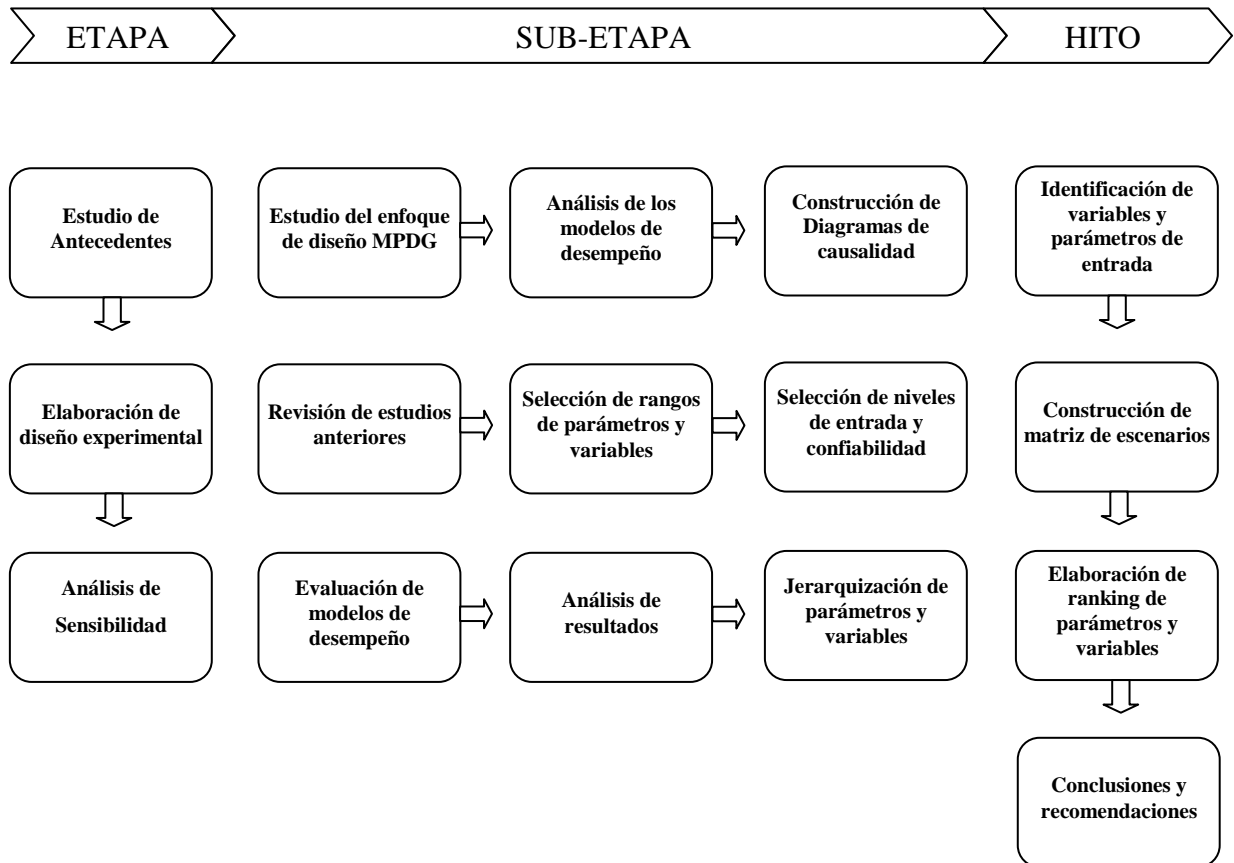


Figura 1 Metodología de trabajo

La Figura 1 representa la metodología de trabajo utilizada, la cual está dividida de la siguiente forma:

En la primera etapa de trabajo se realizó un estudio de antecedentes, que consistió en la revisión de los capítulos del manual de diseño de MEPDG (NCHRP 2004a, 2004b), para identificar el enfoque de diseño de los pavimentos rígidos. Se construyeron diagramas de causalidad que permitieron identificar los parámetros y variables de entrada de los modelos de desempeño.

La segunda etapa consistió en elaborar el diseño experimental. Se revisaron estudios anteriores para identificar los parámetros y variables a utilizar en el experimento. Finalmente

se definieron los escenarios representativos de la Región del Bío-Bío y se construyó una matriz de diseño, producto de la interacción entre las variables.

La tercera etapa consistió en realizar un análisis de sensibilidad. Se simularon los escenarios en el *software* MEPDG, para posteriormente analizar los resultados y jerarquizar las variables según su nivel de influencia. Se elaboró un *ranking* de parámetros y variables para cada modelo de desempeño.

Finalmente se elaboraron conclusiones sobre el estudio y posibles recomendaciones.

CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO MEPDG

2.1 Introducción

En este capítulo se describe el enfoque, los niveles de entrada y los modelos de desempeño asociados al diseño del método MEPDG.

La Guía de Diseño Empírico Mecanicista (MEPDG) fue desarrollada, entre los años 1998 y 2004, por la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP), a través del reporte NCHRP 1-37A en conjunto con un programa computacional que permite evaluar el daño incremental durante la vida útil de pavimentos rígidos y flexibles. La guía se basa en determinar tensiones y deformaciones en el pavimento, para así evaluar el desempeño del pavimento en función de indicadores.

2.2 Enfoque de diseño MEPDG

El método considera el diseño de estructuras de pavimentos nuevos y rehabilitados basado en principios mecanicistas con aportes empíricos. La herramienta computacional MEPDG permite calcular las tensiones y deformaciones en la estructura, bajo condiciones de tránsito, clima y propiedades de los materiales. Los criterios de diseño se basan en la confiabilidad y las condiciones deseadas en el horizonte de evaluación. La metodología MEPDG considera niveles jerárquicos de las variables y parámetros de entrada, a partir de la fuente de información y los errores asociados a la obtención de esta, para posteriormente calcular el daño incremental del pavimento, a través de indicadores de desempeño.

El proceso de diseño es iterativo, se selecciona un diseño de prueba y se analiza el cumplimiento de los criterios de confiabilidad, se modifica el diseño hasta que este cumpla con los requerimientos especificados.

2.3 Niveles de entrada

El método clasifica los parámetros y variables de entrada según la fuente de procedencia: a través del uso de equipos, información disponible para la zona donde se implemente, normas y correlaciones. El uso de niveles de entrada permite asociar los modelos a cierta confiabilidad.

El método MEPDG clasifica los niveles de entrada de datos en tres, según dominio y precisión de la información. La Tabla 1 detalla los niveles de entrada para la información de clima, tránsito y parámetros de diseño.

Tabla 1 Niveles de entrada de datos
(Winkler, 2011)

Nivel de entrada de datos	Datos climáticos y de tránsito	Datos estructurales
Nivel 1	Se generan bases de datos con mediciones reales y actuales del lugar del proyecto.	Los datos se generan a través de mediciones de equipos y ensayos normados.
Nivel 2	Se desarrollan bases de datos a partir de registros zonales en el tiempo.	Los datos se obtienen a través de correlaciones entre variables.
Nivel 3	La base de datos climática se calcula internamente mediante la interpolación geográfica de dos estaciones cercanas. La base de datos de tránsito se estima a través de valores por defecto.	Se utilizan los valores típicos del lugar del proyecto o aquellos incorporados por defecto.

2.4 Modelos de desempeño para pavimentos rígidos

El diseño de pavimentos rígidos en MEPDG evalúa tres indicadores de desempeño: agrietamiento transversal, escalonamiento e IRI.

2.4.1 Agrietamiento transversal

Se define como un deterioro de carácter estructural, ya que en relación a su incremento disminuye la resistencia del pavimento a través de daños progresivos. Los daños corresponden a grietas superficiales que se originan perpendicularmente al eje de la calzada y se prolongan verticalmente hacia el interior de la losa (top - down) o de abajo hacia arriba (bottom – up) lo

cual depende de las solicitaciones y condiciones ambientales. El modelo de agrietamiento transversal está definido por la Ecuación 1 del Anexo A.

2.4.2 Escalonamiento

El escalonamiento es un deterioro que afecta la estructura del pavimento, y corresponde a la diferencia de elevación entre una losa y otra. El modelo de escalonamiento se detalla en la Ecuación 5 del Anexo A.

2.4.3 Desconche

El desconche es un deterioro que se produce en las juntas, a través de grietas cortas irregulares, generando desprendimientos de fragmentos de concreto. Este se encuentra en la Ecuación 11 del Anexo A.

2.4.4 Progresión del IRI

Es un tipo de deterioro que reduce la funcionalidad del pavimento y corresponde al desgaste acumulado de la rugosidad del pavimento. Depende del IRI inicial del pavimento, se mide en m/km a través de equipos. Es un deterioro que depende del incremento del agrietamiento transversal, escalonamiento y desconche. El modelo de progresión del IRI es detallado en la Ecuación 10 del Anexo A.

2.5 Interacción entre variables de los modelos de desempeño

Los modelos de desempeño relacionan distintas variables y parámetros de forma secuencial para llegar así a un cierto nivel de deterioro. Para identificar la relación entre variables y parámetros se formularon diagramas de causalidad que permitieron observar la influencia de los parámetros y variables de entrada en cada uno de los indicadores de desempeño considerados en el método.

El análisis de los diagramas de causalidad considera la influencia de las tensiones y deformaciones de las capas estructurales en los modelos de desempeño, lo cual refleja el enfoque teórico mecanicista del método; la influencia de parámetros de calibración dependen de las condiciones ambientales (Bustos et al, 2009; Delgadillo et al, 2010) lo cual permite realizar calibraciones locales de los modelos.

La Figura 2 presenta el modelo de agrietamiento transversal, a través de un diagrama de causalidad, donde el porcentaje de agrietamiento está determinado por el daño de fatiga, el cual depende directamente del nivel de tránsito.

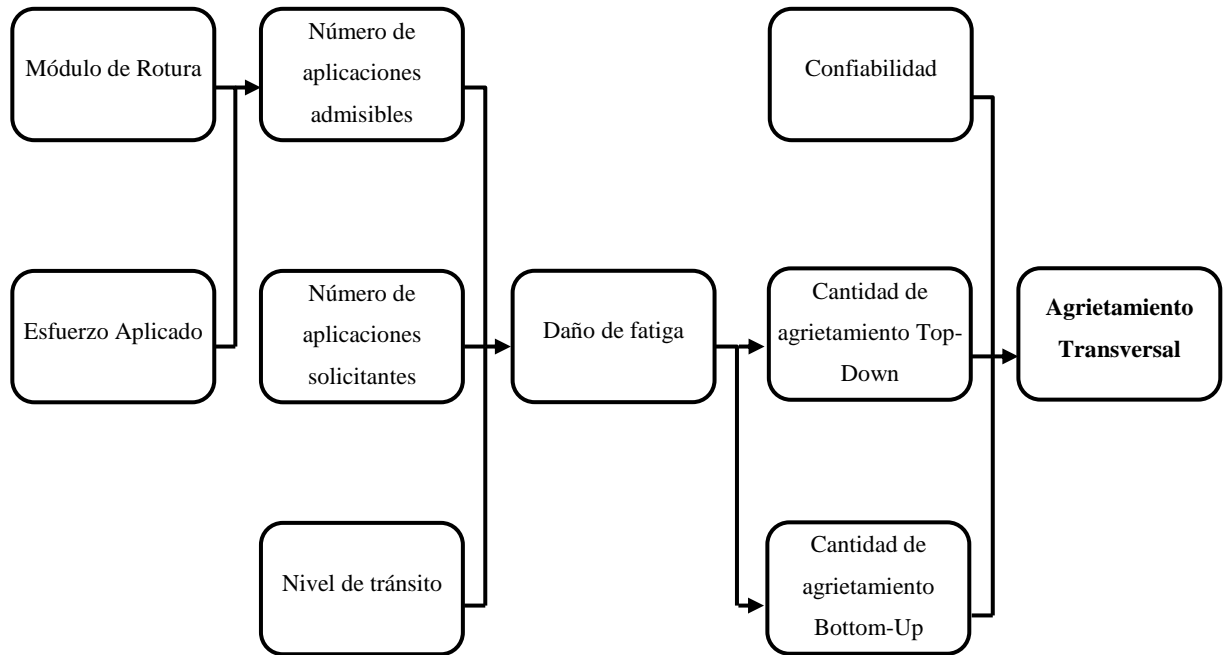


Figura 2 Diagrama de causalidad entre variables para el modelo de agrietamiento transversal

La Figura 3 representa el diagrama de causalidad del modelo de escalonamiento. Se observa que las propiedades de la base y sub-base influyen directamente en el escalonamiento. A su vez las bases de datos climáticas se relacionan indirectamente con el modelo.

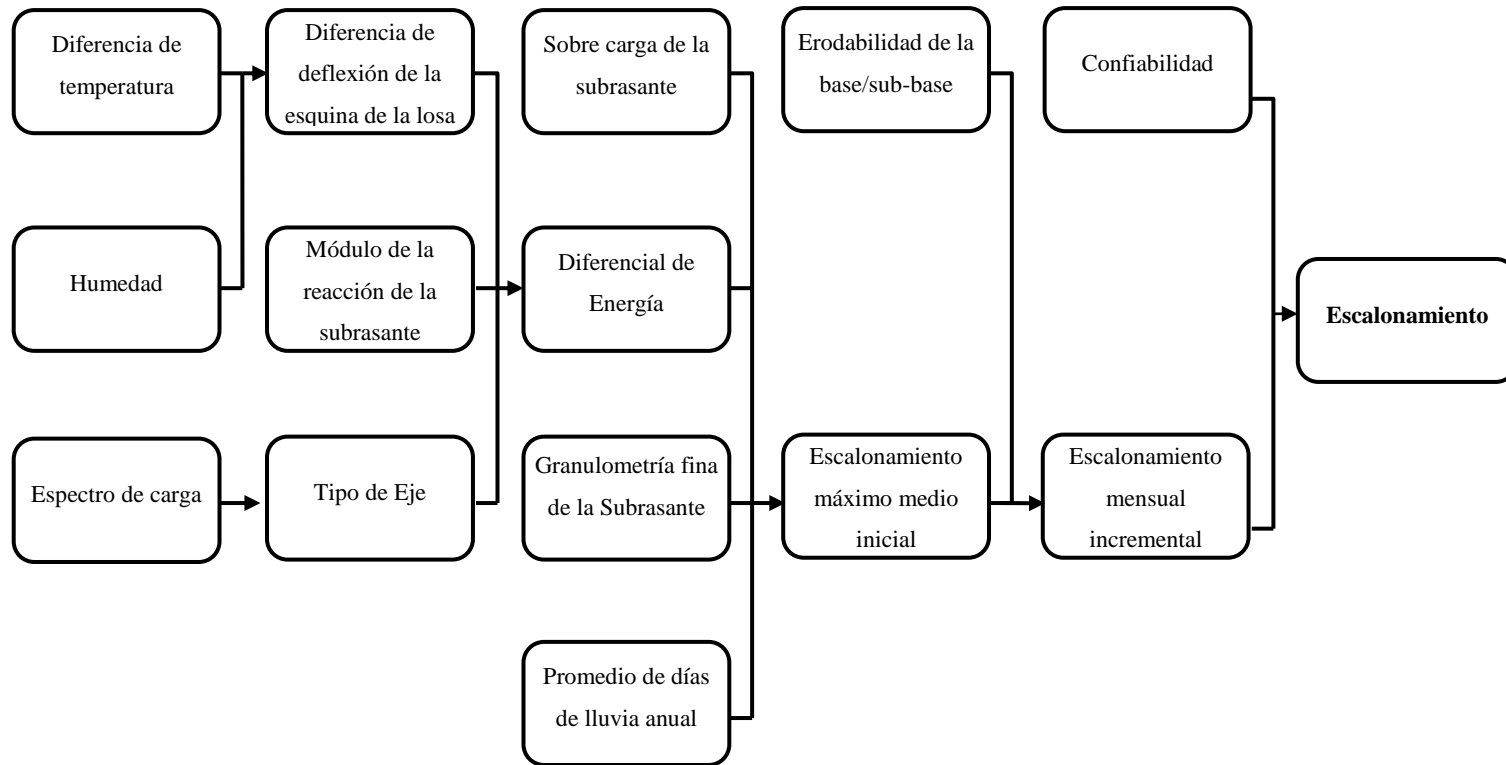


Figura 3 Diagrama de causalidad entre variables para el modelo de escalonamiento

La Figura 4 representa el modelo de desconche, que depende directamente del factor de amplificación, el cual relaciona variables como la base de datos climática y el espesor de la losa.

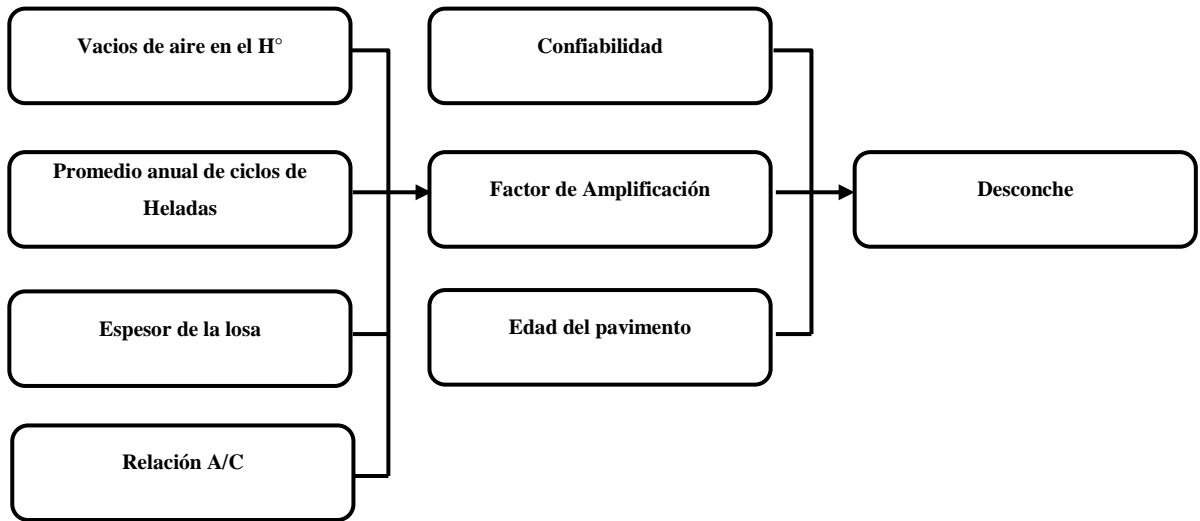


Figura 4 Diagrama de causalidad entre variables para el modelo de desconche

La Figura 5 representa el modelo de progresión del IRI, que depende de los modelos de desconche, agrietamiento transversal y escalonamiento. Así como de la base de datos climática y de propiedades de la sub – rasante.

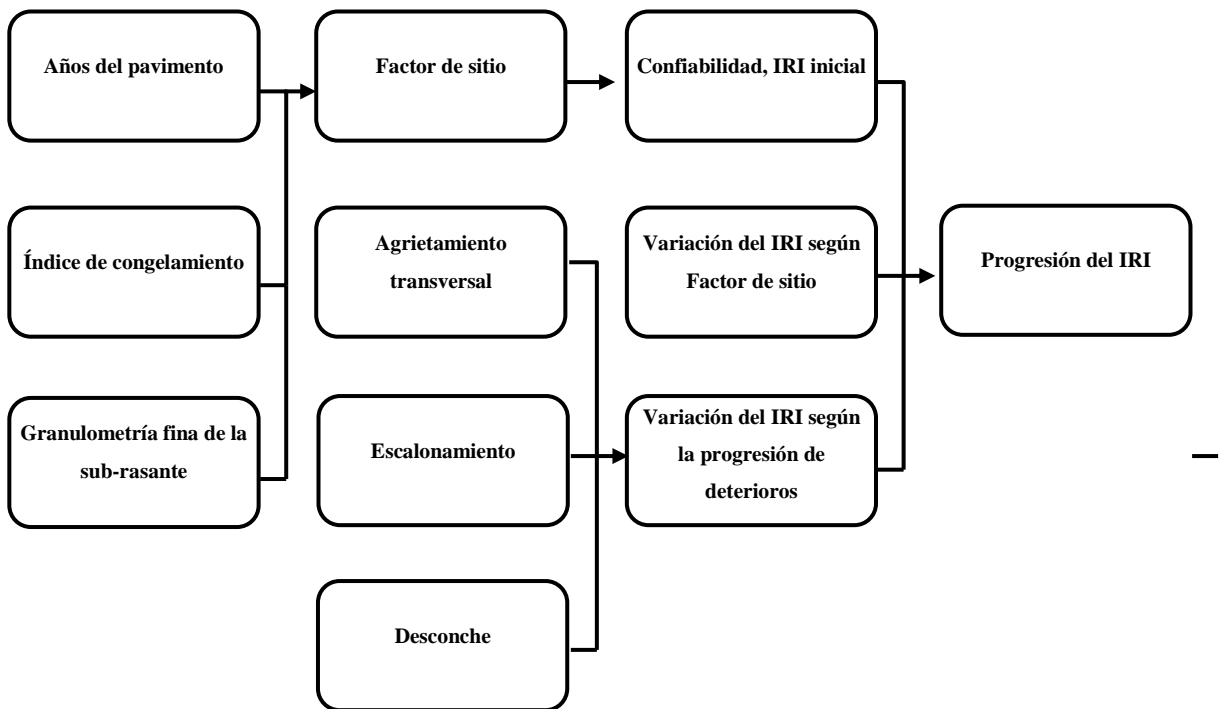


Figura 5 Diagrama de causalidad entre variables para el modelo de progresión del IRI

2.6 Conclusiones

Los diagramas de causalidad permitieron diferenciar las variables y parámetros con influencia directa de aquellos con influencia indirecta a través de una variable intermedia o modelo de desempeño.

La Tabla 2 clasifica las variables y parámetros de entrada según el grado de influencia en el modelo de desempeño. Una variable con influencia directa es aquella que está presente en la ecuación del modelo y es indirecta si se relaciona a través del cálculo de otras variables.

Tabla 2 Influencia de los parámetros y variables de entrada en los modelos de desempeño

Variables de entrada	Agrietamiento transversal	Escalonamiento	IRI
Información climática	○	◉	●
Información de tránsito	●	◉	◉
Resistencia y espesor de la losa de Hormigón	●	◉	◉
Propiedades de la base y sub-base	○	●	●

Nota: La Tabla 2 representa el nivel de influencia de las variables a través de la siguiente nomenclatura:

- Influencia directa
- ◉ Influencia indirecta
- No influye

De la descripción anterior, se concluye que el modelo de agrietamiento transversal depende directamente del nivel de tránsito y de las propiedades de la losa. El modelo de escalonamiento depende directamente de las propiedades de la base y sub-base, mientras que los datos climáticos, de tránsito y propiedades de la losa tienen relación intermedia. En el caso

del modelo de progresión del IRI, este depende de forma directa de los otros modelos de desempeño y de forma indirecta de las propiedades de la base y sub-base.

CAPÍTULO 3 ESTUDIOS ANTERIORES DE MEPDG

3.1 Introducción

En este capítulo se describen estudios anteriores sobre MEPDG, con el objetivo de identificar con mayor detalle los parámetros y variables de entrada para realizar posteriormente el análisis de sensibilidad.

Se consideró, en primera instancia, los estudios realizados por el NCHRP (2004b), (Wahr et al, 2009; Aguiar-Moya et al, 2009; Glucu et al, 2009; Ceylan et al, 2012; Schwartz et al, 2011) los cuales realizaron análisis de sensibilidad de los distintos modelos para evaluar la influencia de las distintas variables y parámetros de entrada que se incluyen en el método. Los análisis prospectivos realizados por Qiang LI et al (2011), Khazanovich y Darter (2012) y las calibraciones del método (Bustos et al, 2009; Delgadillo et al, 2009) permiten enfocar el uso de los recursos a nivel nacional e internacional.

Se revisaron estudios anteriores realizados por Merino (2010), Vidal (2010) y Winkler (2011), de los cuales se consideró información representativa de clima, tránsito y propiedades de diseño para los escenarios representativos de la Región del Bío – Bío.

3.2 Estudios internacionales sobre MEPDG

NCHRP (2004a, 2004b) realizó un análisis de sensibilidad de parámetros y variables de entrada para el diseño de pavimentos de rígidos, concluyendo que la sensibilidad de los deterioros ante cierto rango de variables depende de los posibles escenarios a evaluar.

Posterior al estudio antes mencionado el NCHRP publicó el reporte 1-47 (Schwartz et al, 2011), en el cual se realizó un análisis de sensibilidad considerando distintos tipos de pavimento, cinco condiciones climáticas distintas y tres niveles de tránsito (1000, 7500, 25000 veh/día). la sensibilidad de parámetros de diseño geométrico, propiedades de los materiales, profundidad de la napa y tipo de sub-base, resultando muy sensible el escalonamiento al clima y material de la base; mientras que el escalonamiento y agrietamiento presentaron una alta sensibilidad a la variabilidad en el nivel de tránsito, espaciamiento de las juntas y al espesor de la losa.

Ceylan et al (2012), realizaron un análisis de sensibilidad donde se consideraron tres niveles de tránsito y cinco estaciones climáticas; concluyendo que las propiedades de los materiales

son los parámetros de entrada más influyentes en los índices de desempeño, dentro de los cuales el agrietamiento transversal resultó más sensible.

En el análisis de sensibilidad realizado por Glucu et al (2009) se consideraron bases climáticas de estaciones en Iowa para zonas lluviosas y húmedas así como también zonas más templadas. Se estudió el efecto de los distintos parámetros de entrada a partir de un análisis comparativo de las tres versiones del *software* MEPDG (0.7, 0.9, 1). Los parámetros y variables de entrada que resultaron con alta sensibilidad son: el espesor de la losa, las propiedades de las barras, el espaciamiento de las juntas y propiedades de resistencia del hormigón.

Aguar–Moya et al (2009), consideraron la variabilidad del espesor de las capas de asfalto y granulares a través de un análisis de sensibilidad. De los resultados obtenidos, se señala que los modelos de desempeño no son sensibles al espesor de las capas.

Bustos et al (2009), consideraron bases climáticas de distintas regiones de Argentina para la calibración del método considerando regiones secas, húmedas y sub-húmedas. Según un análisis de sensibilidad, resultó que el coeficiente más sensible frente al modelo de escalonamiento es el coeficiente de erodabilidad que considera tipo de suelo, edad del pavimento e incremento de la separación entre las juntas transversales.

Qiang LI et al (2011), consideraron la importancia de los niveles de entrada que requiere MEPDG y recomendaron calibrar el método según las condiciones nacionales donde este se implemente.

Khazanovich y Darter (2012), realizaron una recopilación de distintas experiencias y aprendizajes desde la creación de MEPDG, de los cuales realizaron recomendaciones como: incluir el modelo de agrietamiento longitudinal a partir de investigaciones realizadas por Hiller y Roesler (2008); la importancia de crear procedimientos para obtener parámetros altamente sensibles como la temperatura efectiva de alabeo; considerar la fricción en la losa y la base para el cálculo del módulo de reacción de la sub-rasante y considerar proyectos de rehabilitación de pavimentos en el modelo.

3.3 Experiencias nacionales

El estudio de implementación de MEPDG para condiciones dadas en Chile realizada por Delgadillo et al (2011) consideró un análisis comparativo de los métodos de diseño utilizados en Chile (AASHTO 93 y AASHTO 98) utilizando el *software* PAVIVIAL versus la guía de diseño MEPDG. Concluyeron que el diseño de pavimentos rígidos basado en AASHTO está sobre-dimensionado en relación a los resultados del método MEPDG. El estudio consideró

información de distintas estaciones meteorológicas, niveles de tránsito y parámetros de diseño.

Wahr et al (2009) realizaron una comparación de diseños para pavimentos rígidos nuevos entre la metodología vigente en Chile (AASHTO 93 y Manual de Carreteras MOP 2002) y MEPDG. El estudio reveló diferencias entre el diseño de la estructura del pavimento considerado por la metodología actual con respecto al diseño MEPDG. Aplicaron los tres métodos a 4 estructuras de pavimento y se realizó un análisis de sensibilidad de parámetros como el CBR de la sub-rasante y el espaciamiento de las juntas. Los principales resultados indicaron que los diseños en MEPDG son más delgados respecto a los obtenidos por MOP 2002, diferencia que aumenta a medida que aumentan las solicitudes de tránsito. También realizaron una sensibilización de los distintos niveles de entrada de datos, concluyendo que el diseño no es sensible a los niveles de entrada. La sensibilización del CBR de la sub-rasante demostró que la estructuración del pavimento es poco sensible a una variación en dicho parámetro.

Vidal (2010) estudió la aplicación y el análisis del método para pavimentos rígidos en la Región del Bío - Bío, estableciendo la división de zonas climáticas en central y costera. Se elaboraron espectros de carga a partir de dos plazas de pesaje de la región (Chaimávida y Aguas Amarillas) caracterizando el flujo de tránsito predominante (Camiones simples 39% y buses 24%) a partir de información entregada por Valdebenito (2011) y considerando el aporte que las clases vehiculares definidas por el MOP ejercen sobre los espectros de carga. Este estudio determinó que el agrietamiento transversal es el modelo de desempeño más significativo para la vida de diseño de pavimentos rígidos en la Región del Bío - Bío.

Merino (2010) elaboró bases de datos climáticas requeridas por el método para distintas estaciones en la Región del Bío - Bío, obteniendo resultados de diseño distintos a los al utilizar bases climáticas correspondientes a estaciones de Estados Unidos. Merino utilizó espectros de carga estimados, debido a que no fue posible obtener información de pesaje en movimiento, por escasez de recursos y equipos. De los resultados obtenidos, concluyó que los espectros de carga regionales producen un mayor daño en comparación a los incluidos en el *software*.

Winkler (2012) realizó un análisis prospectivo del método a través de un análisis de sensibilidad de los parámetros y variables que influyen en los modelos de desempeño para pavimentos asfálticos considerando condiciones climáticas y de tránsito de la Región del Bío - Bío, estableciendo que la validez de los resultados depende de las condiciones de experimentación utilizadas en el análisis.

3.4 Variables con mayor incidencia según los distintos autores

La revisión de distintos estudios permitió identificar los parámetros y variables de entrada que resultaron más influyentes según distintos análisis de sensibilidad. La Tabla 3 presenta las variables de entrada más influyentes para cada modelo de desempeño, según cada autor.

Tabla 3 Variables de entrada con mayor incidencia según distintos autores para cada modelo de desempeño

Autor	Agrietamiento transversal	Escalonamiento	IRI
NCHRP (2004a, 2004b)	<ul style="list-style-type: none"> - Recorrido medio de la rueda 	<ul style="list-style-type: none"> - Espesor de la losa - Espaciamiento de las juntas - Barras de traspaso de carga 	<p>No se menciona sobre incidencia de las variables.</p>
Schwartz et al (2011)	<ul style="list-style-type: none"> - Recorrido medio de la rueda - Diferencia de temperatura efectiva de alabeo - Módulo de rotura - Esfuerzo de compresión - Coeficiente expansión térmica - Espaciamiento de las juntas - TMDA inicial 	<ul style="list-style-type: none"> - Espesor de la losa - Espaciamiento de las juntas - Tipo de borde - TMDA inicial - Clima - Diferencia de temperatura efectiva de alabeo - Coeficiente expansión térmica - Rigidez de la base granular 	<ul style="list-style-type: none"> - Espaciamiento de las juntas
Ceylan et al (2011)	<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de rotura - Espesor de la losa - Espaciamiento de las juntas - Tipo de berma 	<ul style="list-style-type: none"> - Peso unitario - Diámetro de las barras - Espaciamiento de las juntas 	<ul style="list-style-type: none"> - Espesor de la losa - Módulo de rotura

Tabla 3 Variables de entrada con mayor incidencia según distintos autores para cada modelo de desempeño, continuación

Autor	Agrietamiento transversal	Escalonamiento	IRI
Glucu et al (2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de expansión térmica - Conductividad térmica - Espesor de la losa - Módulo de rotura - Esfuerzo de compresión - Largo de la losa 	<ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente expansión térmica 	<ul style="list-style-type: none"> - Diferencia de temperatura efectiva alabeo - Espesor de la losa
Bustos et al (2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Índice de humedad de Thornthwaite - Clima 	<ul style="list-style-type: none"> - Erodabilidad - Clima - Tipo de suelo - Edad del pavimento - Largo de la losa 	No se menciona sobre incidencia de las variables.
Wahr et al (2009)	<ul style="list-style-type: none"> - Largo de la losa 		No se menciona sobre incidencia de las variables.

La Tabla 3 representa las distintas conclusiones de estudios donde se sensibilizaron distintas variables y parámetros de entrada.

3.5 Conclusiones

La revisión de distintos autores permitió identificar, las variables más influyentes en el diseño de pavimentos rígidos y complementar las conclusiones obtenidas en la descripción del método MEPDG.

La Tabla 3 es un resumen del resultado de los análisis de sensibilidad realizados por los distintos autores. Con respecto a la influencia de las distintas variables en los modelos de desempeño, se observó similitud en los resultados, como los parámetros de diseño.

El IRI es el modelo de desempeño menos sensible a los distintos parámetros y variables de entrada ya que este depende indirectamente de estas, por la forma en que se construyó el modelo.

Al comparar los resultados de estudios anteriores, se observó divergencia entre las variables más influyentes de un modelo y otro, concluyendo que la sensibilidad de los modelos de desempeño, dependerá de las condiciones de contorno del experimento: propiedades de diseño, información de clima y de tránsito.

La construcción de diagramas de causalidad y la revisión de distintos estudios permitió identificar las variables y parámetros a utilizar en este estudio, estos son: el nivel de tránsito, la base de datos climática, el espesor de la losa, el tipo de berma y el largo de la losa, para sensibilizar los modelos de desempeño: agrietamiento transversal, IRI y escalonamiento.

CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE DISEÑO

4.1 Introducción

Este capítulo detalla la construcción de la matriz de diseño, esta consta de dos o más factores, cada uno con distintos valores o niveles, cuyas unidades experimentales cubren todas las posibles combinaciones de esos niveles para todos los factores. Este experimento permitió estudiar el efecto de cada factor sobre una variable de respuesta, así como el efecto de las interacciones entre factores sobre dicha variable.

El rango de variables y parámetros de entrada fue considerado a partir de la información nacional existente e investigaciones anteriores en la Región del Bío-Bío (Merino 2010, Valdebenito 2011, Vidal 2011, Winkler 2012).

4.2 Condiciones de diseño

Para cada variable, se establecieron rangos de variación; los que permitieron, a través de una matriz de diseño, condicionar el número de escenarios a evaluar a partir de todas las combinaciones posibles.

Las variables independientes son el nivel de tránsito, la base de datos climática, el espesor de la losa, el largo de la losa y el tipo de berma.

Se utilizó un diseño base que consistió en una estructura de pavimento rígido nuevo para cada escenario; manteniendo fija la base, la granulometría, el tipo de cemento y las propiedades del hormigón.

Se utilizó la elasticidad como indicador para evaluar la sensibilidad de los modelos de desempeño en relación a las variables independientes y elaborar un *ranking* de variables de diseño según su nivel de sensibilidad.

4.3 Elección de variables independientes

La elección de las variables independientes, se basó en los resultados obtenidos por los distintos autores revisados, la realidad nacional y la normativa de diseño de pavimentos rígidos. Las variables independientes son la información climática y de tránsito, el espesor de la losa, el tipo de berma y el largo de la losa.

4.3.1 Base de datos climática

Las bases de datos climáticas de la Región del Bío-Bío fueron desarrolladas por Merino (2010), para distintas estaciones de la región, a partir de requerimientos de la guía MEPDG. La elección de las bases climáticas consideró un clima de la zona costera, por el nivel de precipitaciones y humedad, y otro del valle central. La Tabla 4 caracteriza las estaciones de Chillán y Cañete con respecto a los requerimientos de MEPDG.

Tabla 4 Caracterización de las estaciones de Chillán y Cañete.

Clima	Estación climática	Velocidad del viento (m/s)	Días con el cielo despejado (%)	Humedad ambiental (%)	Temperatura del aire (°C)	Precipitaciones acumuladas (mm)
C1	Chillán	1,9	65	75,4	13,6	846
C2	Cañete	1,1	61,3	83,7	10,6	982

4.3.2 Tránsito

Se utilizó un solo nivel de espectro de carga ya que la variabilidad de este, en la Región del Bío – Bío, no incide de forma significativa en el estado del pavimento (Vidal, 2010).

Se utilizó la información de tránsito recolectada por Valdebenito (2010). La información de tránsito se agrupó en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, los cuales se presentan en la Tabla 5. El detalle de los niveles de tránsito, se encuentra en el Anexo C.

Tabla 5 Información de los distintos niveles de volumen de tránsito

Nivel de tránsito	TMDA (veh/día)	Nomenclatura usada matriz de diseño
Bajo	246	T1
Medio	658	T2
Alto	1451	T3
Muy alto	4815	T4

4.3.3 Espesor de la losa

Para el espesor de la losa se consideraron cuatro niveles de variación. La elección de los niveles de espesor de losa se basó en las especificaciones de diseño recomendadas por el MOP (2012b). Los espesores de la losa fueron diseñados para los niveles de tránsito

anteriormente señalados. La Tabla 6 muestra los distintos niveles de tránsito y espesores de losa utilizados, cuyos rangos de variación están representados por las celdas ennegrecidas.

Tabla 6 Rango de variación del espesor de la losa con respecto a los niveles de tránsito

Nivel de tránsito	Espesor de la losa (cm)				
	13	18	23	28	33
B					
M					
A					
MA					

4.3.4 Largo de la losa

Se consideraron tres niveles de largo de la losa a partir de especificaciones del MOP (2012b). La Tabla 7 muestra los niveles del largo de la losa y la nomenclatura a utilizar en la matriz de diseño.

Tabla 7 Variación del largo de la losa

Ancho	Nivel	Largo de la losa (m)
L1	Bajo	3
L2	Medio	4
L3	Alto	5

4.3.5 Tipo de borde

Se utilizaron tres tipos de berma según lo establecido en MOP (2012b). La Tabla 8, muestra los niveles del tipo de borde y la nomenclatura a utilizar en la matriz de diseño.

Tabla 8 Variación del tipo de berma

Borde	Tipo de berma
B1	Libre
B2	Hormigón amarrada
B3	Pista con sobre-ancho

4.4 Elección de variables dependientes

El objetivo del análisis de sensibilidad es determinar el nivel de influencia de las distintas variables y parámetros sobre los modelos de desempeño, que determinan el estado del pavimento. Las variables dependientes o de respuesta son los indicadores de desempeño

producto del diseño de un pavimentos, condicionado por los distintos escenarios, a través del programa computacional. Las variables dependientes son el agrietamiento transversal, el escalonamiento y la progresión del IRI.

4.5 Matriz de diseño

La matriz de diseño muestra todos los escenarios del diseño factorial. Estos corresponden a la interacción entre variables, cuyos rangos se definieron anteriormente. La Tabla 9 representa las variables utilizadas en la matriz de diseño y sus rangos.

Tabla 9 Nomenclatura de variables utilizadas en la matriz de diseño

Variable	Rango de variación
Nivel de tránsito	T1: Alto, T2: Medio, T3: Alto, T4: Muy Alto
Base de datos climática	C1: Chillán, C2: Cañete
Espesor de la losa	E1: Alto, E2: Medio, E3: Bajo
Largo de la losa	L1: 3, L2: 4, L3: 5 (cm)
Tipo de borde	B1: Libre, B2: Hormigón amarrada, B3: Sobre - ancho

La Tabla 10 representa la matriz de diseño, producto de la interacción entre las variables del diseño factorial y los rangos definidos anteriormente. La matriz de diseño dio como resultado la simulación de 216 escenarios, para la cual se utilizó la siguiente nomenclatura:

e_i : Escenario correspondiente a la simulación i .

i : número de simulaciones para la estación climática C1 y C2 según corresponda

Tabla 10 Matriz de diseño

		C1									C2								
		J1			J2			J3			J1			J2			J3		
		B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
T1	E1	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e109	e110	e111	e112	e113	e114	e115	e116	e117
	E2	e10	e11	e12	e13	e14	e15	e16	e17	e18	e118	e119	e120	e121	e122	e123	e124	e125	e126
	E3	e19	e20	e21	e22	e23	e24	e25	e26	e27	e127	e128	e129	e130	e131	e132	e133	e134	e135
T2	E1	e28	e29	e30	e31	e32	e33	e34	e35	e36	e136	e137	e138	e139	e140	e141	e142	e143	e144
	E2	e37	e38	e39	e40	e41	e42	e43	e44	e45	e145	e146	e147	e148	e149	e150	e151	e152	e153
	E3	e46	e47	e48	e49	e50	e51	e52	e53	e54	e154	e155	e156	e157	e158	e159	e160	e161	e162
T3	E1	e55	e56	e57	e58	e59	e60	e51	e62	e63	e163	e164	e165	e166	e167	e168	e169	e170	e171
	E2	e64	e65	e66	e67	e68	e69	e70	e71	e72	e172	e173	e174	e175	e176	e177	e178	e179	e180
	E3	e73	e74	e75	e76	e77	e78	e79	e80	e81	e181	e182	e183	e184	e185	e186	e187	e188	e189
T4	E1	e82	e83	e84	e85	e86	e87	e88	e89	e90	e190	e191	e192	e193	e194	e195	e196	e197	e198
	E2	e91	e92	e93	e94	e95	e96	e97	e98	e99	e199	e200	e201	e202	e203	e204	e205	e206	e207
	E3	e100	e101	e102	e103	e104	e105	e106	e107	e108	e208	e209	e210	e211	e212	e213	e214	e215	e216

4.6 Conclusiones

La elección de los rangos de las variables se basó en las recomendaciones de diseño establecidas por el Manual de Carreteras (MOP, 2012a). Los rangos de variación del espesor de la losa fueron bajos, medios, altos y muy altos, para cada nivel de tránsito respectivamente, logrando de esta forma consistencia en el diseño. El espesor de la losa se varió entre 18 y 23 cm, para los niveles bajos y medios de tránsito, entre 18 y 28 cm para el nivel alto de tránsito y entre 23 y 33 cm para el nivel de tránsito muy alto.

La elección de los datos de entrada, como propiedades de la mezcla y del suelo, se basó en especificaciones del Manual de Carreteras (MOP, 2012a) y para aquellos valores de los cuales no se tenían datos reales, se utilizaron los valores por defecto de la guía.

La interacción entre variables y sus rangos de variación, permitieron definir una matriz de diseño, en la cual se establecieron 216 escenarios de simulación.

Se realizó una matriz de diseño de carácter determinista en la cual se establecieron valores fijos para cada escenario, relacionado a cada valor de respuesta correspondiente a los indicadores de desempeño: IRI, escalonamiento y agrietamiento transversal.

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

Este capítulo contiene el análisis de resultados obtenidos luego de simular cada uno de los escenarios, en el programa computacional MEPDG, definidos en el capítulo anterior. El análisis de resultados consistió, en primera instancia, en analizar visualmente los resultados, para posteriormente calcular la elasticidad de los indicadores de desempeño, con respecto a la variación del clima, el nivel de tránsito, el espesor de la losa, el tipo de berma y el largo de la losa. Posteriormente se construyó un *ranking* de las variables más influyentes para cada indicador de desempeño, según el nivel de tránsito (bajo-medio y alto).

En el análisis, se consideró apartar los resultados del nivel de tránsito muy alto, ya que podrían alterar el cálculo de las elasticidades, debido a su falta de coherencia y por pertenecer a una ruta específica de la Región del Bío – Bío.

El nivel de los datos de entrada, para cada escenario, se especifica en la Tabla B1 del Anexo B. Los resultados de la simulación se presentan de forma ordenada en la planilla adjunta en el Anexo digital A. Las elasticidades y diferencias porcentuales se encuentran en el Anexo digital B.

Los resultados que se presentan, son el promedio de los datos agrupados según cada base de datos climática y nivel de tránsito.

5.2 Indicadores de sensibilidad

El nivel de influencia de las variables independientes con respecto a los modelos de desempeño se determinó a través de indicadores de sensibilidad, apoyados en distintos criterios estadísticos que permitieron el desarrollo del análisis de sensibilidad.

5.2.1 Elasticidad

La elasticidad es un concepto económico, para cuantificar la variación experimentada por una variable al cambiar otra. Mide la sensibilidad de la variable dependiente con respecto a la independiente.

Una elasticidad negativa representa la relación inversa entre variables, por lo tanto para motivos de esta investigación se consideró como valor absoluto.

La ecuación 1 muestra el cálculo de la elasticidad:

$$C_{Ji} = \frac{\% \Delta J_i}{\% \Delta X_i} = \frac{(J_m - J_n) / J_n * 100}{(X_{m,i} - X_{n,i})} \quad (1)$$

Donde:

C_{Ji} : Elasticidad de la variable dependiente con respecto a un cambio en el dato de entrada i.

$\% \Delta J_i$: Variación porcentual de la variable dependiente J para el dato de entrada i.

$\% \Delta X_i$: Variación porcentual del dato de entrada i.

J_m : Variable dependiente obtenida a partir de la condición modificada m.

J_n : Variable dependiente obtenida a partir de la condición inicial n.

$X_{m,i}$: Valor del dato de entrada i en la condición modificada m.

$X_{n,i}$: Valor del dato de entrada i en la condición inicial n.

La Tabla 11 clasifica el nivel de sensibilidad de las variables según su elasticidad, esta clasificación se relaciona con la utilizada por Thenoux et al (2006) en el análisis de sensibilidad de HDM-4, así como los distintos estudios en que se realizaron análisis de sensibilidad (NCHRP, (2004b); Ceylan et al, (2012);

Tabla 11 Clasificación cualitativa de la elasticidad según su módulo

Valor absoluto de la elasticidad	Nivel de sensibilidad	Nomenclatura
Menor a 0,5	Sensibilidad baja	SB
Entre 0,5 y 1	Sensibilidad media	SM
Entre 1 y 5	Sensibilidad alta	SA
Mayor a 5	Sensibilidad muy alta	SMA

5.2.2 Diferencia porcentual

Para evaluar la sensibilidad de aquellas variables no cuantificables: información climática y el tipo de berma, si no que indican una condición o un grupo de parámetros, se utilizó la diferencia porcentual entre la variación de un dato de salida (dependiente) con respecto al cambio de condición de un dato de entrada (independiente).

Las variables no cuantificables son el clima, el cual varía de una estación a otra, y el tipo de berma, que puede ser: sin berma, amarrada de hormigón y con sobre - ancho.

5.3 Sensibilidad a las variables independientes

El cálculo de la sensibilidad de los indicadores de desempeño a las variables externas (clima y tránsito), se presenta a continuación. Se utilizó la nomenclatura especificada en la matriz de diseño.

5.3.1 Sensibilidad al nivel de tránsito

La Tabla 12 muestra las elasticidades calculadas para los indicadores de desempeño con respecto al nivel de tránsito, para cada tipo de clima.

Tabla 12 Elasticidad de los indicadores de desempeño con respecto al tránsito

Variación entre niveles de tránsito				
Indicador de desempeño	T1-T2		T2-T3	
	Chillán	Cañete	Chillán	Cañete
IRI	0,44	0,47	3,18	1,23
Escalonamiento	0,44	0,47	1,75	1,78
Agrietamiento transversal	0,19	0,22	0,17	3,63

Se observa que:

Todos los indicadores de desempeño presentan baja sensibilidad ante variaciones del nivel de tránsito bajo y medio, para ambos tipos de clima, con elasticidades menores a 0,5.

El IRI y el escalonamiento son altamente sensibles a variaciones entre niveles medios y altos de tránsito, para ambos climas, con elasticidades de 3,18 y 1,23 para el IRI, y de 1,75 y 1,78 para el escalonamiento. El agrietamiento transversal es altamente sensible a variaciones entre el tránsito medio y alto, para la zona climática Cañete.

5.3.2 Sensibilidad al cambio de la información climática

La sensibilidad del clima se determinó a través de diferencias porcentuales entre escenarios.

En la Tabla 13 se muestran las diferencias porcentuales, de los índices de desempeño, con respecto al clima para los distintos niveles de tránsito.

Tabla 13 Diferencia porcentual de los indicadores de desempeño con respecto al clima

Diferencia porcentual (%) entre el las bases climáticas Chillán y Cañete			
Tipo de deterioro	Nivel de tránsito		
	Bajo (C2-C1)	Medio (C2-C1)	Alto (C2-C1)
IRI	8	6	39
Escalonamiento	8	6	43
Agrietamiento transversal	187	162	2617

De la Tabla 13, se observa que:

El agrietamiento es el índice de desempeño más sensible a una variación en el clima, con diferenciales de 187%, 162% y 2617% para tránsito escenarios con tránsito bajo, medio y alto, respectivamente.

El IRI y el escalonamiento presentan una baja sensibilidad a cambios en las bases de datos climáticas, con 8% para escenarios con niveles bajos de tránsito y 6% para tránsito medio.

En escenarios de tránsito alto los modelos de IRI, escalonamiento y agrietamiento transversal presentan mayores diferencias porcentuales, (39%, 43% y 2617%, respectivamente), en relación a los niveles de tránsito bajo y medio.

El agrietamiento presenta una diferencia porcentual de 2617% en escenarios de tránsito alto, por lo tanto resulta el indicador de desempeño más sensible a la variación de bases de datos climáticas.

5.3.3 Sensibilidad al espesor de la losa

La Tabla 14 presenta la elasticidad de los indicadores de desempeño con respecto a la variación del espesor de la losa.

Tabla 14 Elasticidad de los indicadores de desempeño con respecto al espesor de la losa

Nivel de tránsito	Bajo				Medio				Alto			
	E1-E2		E2-E3		E1-E2		E2-E3		E1-E2		E2-E3	
Tipo de deterioro	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
IRI	3,17	1,80	3,28	3,42	2,84	1,80	3,61	3,54	3,18	1,31	5,63	9,35
Escalonamiento	3,17	1,80	3,28	3,42	2,84	1,80	3,61	3,54	3,09	1,58	7,97	11,57
Agrietamiento transversal	0,86	0,69	26,72	361,70	0,03	0,32	12,89	221,63	1,50	0,03	2,70	974,04

De los resultados de la Tabla 14, se observa que:

Al variar el espesor de la losa desde un nivel bajo a uno medio, los modelos de IRI y escalonamiento presentan elasticidades altas e idénticas para niveles de tránsito bajo y medio, con valores de 3,17 y 2,84 para la base de datos climática Chillán y de 1,8 para Cañete.

Para niveles altos de tránsito, el IRI y el escalonamiento presentan elasticidades altas al variar de un espesor de la losa bajo a uno medio, con valores aproximados de 3 y 1, para Chillán y Cañete respectivamente; y elasticidades muy altas al variar de un espesor de la losa medio a alto, con valores de 5,63 y 9,35 de escalonamiento, en Chillán y Cañete, y de 7,97 y 11,57 de IRI, en Chillán y Cañete.

El agrietamiento presenta baja sensibilidad a una variación de espesor de la losa bajo a uno medio (entre 0,03 y 0,69), en niveles de tránsito bajo y medio, observándose una tendencia que difiere de los otros modelos de desempeño.

La variación de un espesor de la losa medio a alto disminuye el agrietamiento a 0, en casos donde se utiliza una berma amarrada de hormigón, motivo por el cual el agrietamiento es altamente sensible al espesor de la losa, para escenarios de tránsito bajo (361,7), medio (221,6) y altos (974).

5.3.4 Sensibilidad al largo de la losa

La Tabla 15 presenta la elasticidad de los indicadores de desempeño con respecto a la variación del largo de la losa.

Tabla 15 Elasticidad de los indicadores de desempeño con respecto al largo de la losa

Nivel de tránsito	Bajo				Medio				Alto			
Variación entre largos	L1-L2		L2-L3		L1-L2		L2-L3		L1-L2		L2-L3	
Tipo de deterioro	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
IRI	0,74	0,33	1,11	1,27	0,34	0,34	1,14	1,28	6,11	0,71	6,65	8,16
Escalonamiento	0,74	0,35	1,11	1,27	0,34	0,34	1,14	1,28	4,23	0,59	3,36	4,99
Agrietamiento transversal	1,62	1,58	0,62	1,12	0,95	1,43	0,44	0,92	0,99	1,36	1,30	1,66

De la Tabla 15, se observa que:

El IRI es muy sensible a variaciones de largo de la losa entre niveles medios y altos, con elasticidades altas al variar de un largo de la losa medio a alto (1,1, 1,28) en Chillán y Cañete, para escenarios con tránsito bajo y medio. En escenarios de tránsito alto, el IRI es el modelo de desempeño más sensible a variaciones en el largo de la losa con elasticidades muy altas de 6,65 y 8,16 para las bases de datos climáticas Chillán y Cañete, respectivamente.

El IRI y el escalonamiento presentan elasticidades bajas e idénticas, del rango de 0,3, al variar de un largo de la losa bajo a medio, en escenarios de tránsito bajo y medio. Para escenarios de tránsito alto, el IRI y el escalonamiento se vuelven notoriamente sensible (6,11 y 4,23) para la base de datos climática Chillán. Sin embargo, para Cañete, el IRI y el escalonamiento tienen baja sensibilidad (0,71 y 0,59) a variaciones entre largos de losas bajos y medios.

5.3.5 Sensibilidad al tipo de berma

La Tabla 16 presenta la elasticidad de los indicadores de desempeño con respecto a la variación del tipo de berma.

Tabla 16 Diferencia porcentual de los indicadores de desempeño con respecto al tipo de berma

Diferencia porcentual (%)												
Nivel de tránsito	Bajo				Medio				Alto			
Variación entre tipos berma	B1-B2		B2-B3		B1-B2		B2-B3		B1-B2		B2-B3	
Tipo de deterioro	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
IRI	0	16	1	141	14	18	1	71	59	27	3	2
Escalonamiento	0	16	1	17	14	18	1	9	101	31	2	2
Agrietamiento transversal	18	75	87	369	20	65	65	228	7	1840	27	107

De la Tabla 16, se observa que:

En escenarios de tránsito bajo y estación climática Chillán, el IRI y el escalonamiento presentan valores idénticos al variar el tipo de berma, con diferencias porcentuales nulas. Para escenarios en la estación climática Cañete, el IRI y el presentan bajas diferencias porcentuales (16%) al variar de un borde libre a un tipo de berma amarrada de hormigón, sin embargo el IRI se vuelve altamente sensible al variar de un tipo de berma amarrada de hormigón a una con sobre-ancho con 141% de diferencia porcentual entre una y otra, mientras que el escalonamiento es poco sensible con una diferencia porcentual de 17%.

En escenarios de tránsito medio la situación descrita anteriormente se mantiene, con diferencias porcentuales bajas (entre 1 y 14%) para el IRI y escalonamiento, a diferencia de la variación entre una berma amarrada de hormigón y una ensanchada, para la base de datos climática de Cañete, donde el IRI es altamente sensible, con una diferencia porcentual de 71%.

El agrietamiento es el índice de desempeño más sensible a un cambio en el tipo de berma con valores de 228% hasta 1840 % de diferencia al variar entre aquellos pavimentos sin berma y con berma ensanchada para la estación climática Cañete. Las diferencias porcentuales más bajas se presentan para la base de datos climática Chillán.

5.4 Gráficos de caja

Se elaboraron gráficos de caja, con el fin de mostrar la variación entre los distintos escenarios. Se graficó cada deterioro en función de la interacción del nivel de tránsito con el espesor de la losa, la base de datos climática, el tipo de berma y el largo de la losa.

Se analizó cada gráfico de caja y se elaboró una tabla resumen, donde se hace referencia a las observaciones de cada uno de los gráficos de caja que se encuentran en el Anexo D (Gráfico D1 a D12).

Tabla 17 Observaciones de los gráficos de caja

Gráfico	Deterioro	Variable 1	Variable 2	Escenarios con mayor dispersión de datos observada
D1	Agrietamiento	Nivel de tránsito	Espesor de la losa	En escenarios con espesores altos.
D2			Clima	Todos los escenarios con base de datos climática Cañete.
D3			Tipo de berma	En escenarios
D4			Largo de la losa	Largo bajo de losa (3m) para todo nivel de tránsito y largo de 4 m para tránsito alto.
D5	IRI	Nivel de tránsito	Espesor de la losa	Espesor bajo de la losa para tránsito alto.
D6			Clima	Nivel alto de tránsito para C1 y C2
D7			Tipo de berma	Nivel alto de tránsito para todo tipo berma.
D8			Largo de la losa	Nivel alto de tránsito para todos los largos de la losa.
D9	Escalonamiento	Nivel de tránsito	Espesor de la losa	Espesor bajo de la losa para tránsito alto.
D10			Clima	Nivel alto tránsito para C1 y C2
D11			Tipo de berma	Nivel alto de tránsito para todo tipo berma.
D12			Largo de la losa	Nivel alto de tránsito para todo largo losa.

5.5 Nivel de sensibilidad de los modelos de desempeño

El nivel de sensibilidad de los modelos de desempeño, se clasifica cualitativamente según lo descrito en la Tabla 12. La Tabla 18 muestra el nivel de sensibilidad de los modelos de desempeño respecto de las variables involucradas en la modelación, a partir del cálculo de elasticidades. Se agruparon los resultados para los niveles de tránsito bajo y medio, ya que el cálculo de elasticidades dio resultados similares.

Tabla 18 Nivel de sensibilidad de los modelos de desempeño respecto a las variables involucradas en la modelación

Nivel de tránsito	Bajo - Medio			Alto		
	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento
Tránsito	↓	↓	↑	↑↑	↑↑	↑↑
Clima	↓	↓	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑
Espesor de la losa	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Largo de la losa	↑	↑↑	↑	↑↑	↑	↑
Tipo de berma	↑↑	↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑↑

Donde:

↓: Sensibilidad baja

↑: Sensibilidad media

↑↑: Sensibilidad alta

↑↑↑: Sensibilidad muy alta

5.6 Ranking de las variables de diseño

La sensibilidad de los índices de desempeño, a las variables de diseño y la información climática, se representó con un *ranking*. Se ordenaron de mayor a menor las variables según su elasticidad, para cada nivel de tránsito.

Tabla 19 Ranking de variables de diseño según el volumen de tránsito

Deterioro	Nivel de tránsito		
	Bajo - Medio	Alto	
IRI	Espesor de la losa	Largo de la losa	1°
	Tipo de berma	Espesor de la losa	2°
	Largo de la losa	Clima	3°
	Clima	Tipo de berma	4°
Escalonamiento	Espesor de la losa	Espesor de la losa	1°
	Largo de la losa	Clima	2°
	Tipo de berma	Tipo de berma	3°
	Clima	Largo de la losa	4°
Agrietamiento	Espesor de la losa	Espesor de la losa	1°
	Clima	Clima	2°
	Tipo de berma	Tipo de berma	3°
	Largo de la losa	Largo de la losa	4°

En el Anexo E se observa gráficamente el *ranking* de variables a partir de diferencias porcentuales.

Conclusiones

El cálculo de elasticidades permitió observar la diferencia entre los valores que toman los índices de desempeño con respecto a cambios en los rangos de las variables.

Se concluyó que el agrietamiento es el indicador de desempeño más sensible a variaciones del espesor de la losa, la base de datos climática y el tipo de berma.

En escenarios con niveles de tránsito alto los deterioros se hacen más sensibles a variaciones en el espesor de la losa.

Con respecto a variaciones en la base de datos climática, se concluye que esto no es influyente para el IRI y el escalonamiento, sin embargo, el agrietamiento es altamente sensible con cambios de hasta 180% para niveles medios de tránsito y de hasta 2600% para niveles de tránsito alto.

De la variación de los espesores de la losa se concluye que el IRI y el escalonamiento presentan elasticidades altas e idénticas, (entre 1,8 y 3,17), para escenarios con tránsito bajo y medio, al variar entre un espesor de la losa bajo a medio. En escenarios con niveles de tránsito alto y al variar de un espesor de la losa medio a alto los modelos de IRI y escalonamiento presentan altas elasticidades con valores de 9 y 11 respectivamente. El agrietamiento es altamente sensible, con elasticidades que van desde 361,7 hasta 974, ante variaciones entre espesores medios y altos en escenarios con niveles bajos, medios y altos de tránsito.

De la variación del largo de la losa se concluye que el IRI es altamente sensible en escenarios con tránsito alto, con elasticidades entre 6 y 8. Mientras que en escenarios con tránsito bajo y medio la variación entre un largo de la losa bajo y medio produce elasticidades bajas, entre 0,34 y 0,74. El escalonamiento presentó elasticidades idénticas al IRI en niveles bajos y medios de tránsito y elasticidades entre 3,36 y 4,99 para tránsito alto, lo que hace al escalonamiento muy sensible a cambios en el largo de la losa, después del IRI.

Del cálculo de elasticidades para medir la sensibilidad de los índices de desempeño para escenarios con distintos tipos de berma se concluye que el cambio entre un pavimento sin berma a uno con berma amarrada presenta valores bajos de elasticidad para los niveles de tránsito bajo y medio. El agrietamiento es el índice de desempeño más sensible a una variación en el tipo de berma con valores de 1840% de diferencia porcentual para niveles altos de tránsito.

El análisis gráfico permitió observar la dispersión de los datos y aquellos patrones de comportamiento que se dieron en distintos niveles de tránsito. Al graficar la interacción entre las variables con los distintos niveles de tránsito, complementaron las conclusiones sacadas del análisis de resultados. De la Tabla 17, se puede concluir que la mayor dispersión de datos se dio en escenarios con tránsito alto.

Debido a que el agrietamiento es el índice de deterioro más sensible al espesor de la losa y el tipo de berma, los gráficos que representan el incremento del deterioro en el tiempo, permitieron aclarar esta condición.

Debido a que algunos resultados resultaron distintos al comportamiento teórico de un pavimento rígido, para niveles de tránsito muy altos y respecto a cambios en el espesor de la losa, el tipo de berma y el largo de la losa. Se realizó el análisis comparativo entre las simulaciones realizadas en la versión 0.7 y 1.1, el cual permitió demostrar que la versión 1.1 es más exacta ya que su calibración es reciente y los modelos han sufrido ajustes.

El último punto del análisis de resultados, consistió en sensibilizar para un escenario, el valor del gradiente de construcción; comparando el valor por defecto (-23°F) con un valor medio, calculado para Chile (-34°F), y definir la alta sensibilidad de los modelos de desempeño, sobre todo del agrietamiento a este valor.

Finalmente se concluye que la sensibilidad de los índices de desempeño a las variables como el nivel de tránsito, la base de datos climática, el espesor de la losa, el tipo de berma y el largo de la losa, dependerá del rango de variación de estas y el nivel de tránsito de los escenarios a estudiar.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La revisión de investigaciones existentes permitió identificar las variables de entrada más influyentes para posteriormente elaborar el modelo de simulación y medir la sensibilidad de los deterioros para el diseño de pavimentos rígidos en la Región del Bío - Bío.

De la revisión de estudios anteriores se concluyó que:

La interpretación de los resultados de una simulación depende del contexto en el que este se encuentre, es decir, de las condiciones de contorno en las que se den los escenarios de simulación (tránsito, clima, granulometría, condiciones de diseño), de los criterios e inferencias que se establezcan en el periodo de planificación, la elección de las variables y su rango de variación.

Luego de obtener los resultados de la simulación, agruparlos y calcular sensibilidades se observó que la diferencia entre niveles de tránsito bajo y medio es prácticamente nula, por lo que se agruparon los niveles bajos y medios para efecto de simplificar el análisis de resultados.

Para escenarios con tránsito bajo y medio se concluye que:

- El agrietamiento es el modelo de desempeño más sensible a cambios en las variables de entrada. Se observó alta sensibilidad ante variaciones entre espesores de la losa, cambio de base de datos climática y variaciones en el tipo de berma.
- El escalonamiento es el modelo de desempeño menos sensible a cambios en las variables de entrada, las elasticidades calculadas resultaron idénticas a las del IRI en cambios en el espesor de la losa, el largo de la losa y el tipo de berma. De esta forma se concluye que las variables más influyentes son el espesor, el largo de la losa y el tipo de berma.

El comportamiento de los modelos de desempeño se vio alterado para niveles de tránsito alto, de esta forma se agruparon los resultados para tránsito alto:

- El agrietamiento es el modelo de desempeño, en el que las variables de entrada tienen mayor influencia. Las elasticidades calculadas resultaron con rangos muy altos. El clima es la variable más influyente con una diferencia porcentual de 2617%. El porcentaje de losas agrietadas es mayor en la estación climática Chillán, donde los diferenciales de temperatura son mayores. Una variación entre niveles medios y altos de espesor de la losa presentó una alta elasticidad. El largo de la losa es la variable

menos influyente con elasticidades de 1 aproximadamente. De esta forma para niveles de tránsito alto, las variables más influyentes en el modelo de agrietamiento transversal son el espesor de la losa, la base de datos climática, el tipo de berma y el largo de la losa.

- El IRI presenta elasticidades muy altas al variar los distintos rangos del largo de la losa. El IRI es altamente sensible a la variación entre rangos medios y altos de espesores de la losa. La variación del tipo de berma es menos influyente que las variables analizadas anteriormente. El orden de influencia de las variables se establece de la siguiente forma: largo de la losa, espesor de la losa, clima y tipo de berma.
- El escalonamiento presentó elasticidades altas ante variaciones entre espesores de la losa bajos y medios.. De esta forma la influencia de variables queda definida en el siguiente orden: espesor de la losa, clima, tipo de berma y largo de la losa.
- El modelo de progresión del IRI presentó elasticidades idénticas al escalonamiento en un 80% de los análisis, esto se debe a que este modelo está construido de tal forma que es dependiente a su vez del cálculo de los modelos que lo componen, entre estos el escalonamiento.

Del análisis de sensibilidad de los modelos de desempeño, se concluyó que el agrietamiento transversal es el indicador de desempeño más sensible a las variables de diseño, situación que se incrementa en escenarios con niveles de tránsito alto.

Finalmente se concluye que la necesidad de recursos para la obtención de datos es la principal limitante en el diseño e implementación a escala real de pavimentos rígidos en la Región del Bío-Bío. Es necesario el uso de sistema de pesaje en movimiento para la correcta elaboración de espectros de carga y la obtención actualizada de datos climáticos. De igual forma se requiere evaluar el costo económico de implementar equipos para la obtención de estos datos.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un experimento de simulación que considere otras variables de entrada como la sensibilidad del gradiente de construcción, diferencial térmico de alabeo en la losa, granulometría de la base y sub-base y la obtención de distintas propiedades de los materiales para establecer rangos de entrada de las variables.

REFERENCIAS

MOP (2012a) Manual de Carreteras Volumen N° 3: Instrucciones y Criterios de Diseño. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas.

MOP (2012b) Manual de Carreteras Volumen N° 5: Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas.

MOP (2012c) Manual de Carreteras Volumen N° 7: Mantenimiento Vial. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas.

MOP (2012d) Manual de Carreteras Volumen N° 8: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control. Dirección de Vialidad. Ministerio de Obras Públicas.

NCHRP (2004a) Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report. NCHRP Project 1-37A. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, National Research Council. Estados Unidos.

NCHRP (2004b) Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix FF: Calibration Sections for Rigid Pavements. NCHRP Project 1-37A. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, National Research Council. Estados Unidos

Thenoux G., De Solminhac H., Halles F., Chamorro A., Hidalgo P., Encina C., Márquez W., (2006) Análisis de Sensibilidad de Parámetros del Modelo HDM-4 y Actualización de Metodología para la Determinación del Estado de Caminos Pavimentados. Resumen ejecutivo – MÓDULO A, DICTUC S.A. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. Santiago de Chile

Schwartz C.W., Li R., Kim S.H., Ceylan H., Geopalakrishnan K., (2011). Project 1-47 Sensitivity Evaluation of MEPDG Performance Prediction, Final Report. National Cooperative Highway Research Program, University of Maryland, Iowa State University. Transportation Research Board. Estados Unidos.

Khazanovich L., Darter M. I., (). Lesson Learned from MEPDG Development: A Confession of the JPCP MEPDG Developers. University of Minnesota. Estados Unidos.

NCHRP (2002) MEPDG. Versión 0.7. Applied Research Associates, Inc. Estados Unidos.

NCHRP (2009) MEPDG. Versión 1.100. Applied Research Associates, Inc. Estados Unidos.

AASHTO (2008) Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. American Association of State Highway and Transportation Officials. Estados Unidos.

Ceylan H. , Kim S. , Shwartz C.W. , Li R., and Geopalakrishnan K.(2012). Effect of PCC Material Properties on MEPDG Jointed Plain Concrete Pavement (JPCP) Performance Prediction. Iowa State University. Estados Unidos.

Delgadillo, R., C. Wahr y J. Alarcón (2010). Towards the Implementation of the MEPDG in Latin-America, Preliminary Work Carried Out in Chile. Paper 11-3848, TRB 90th Annual Meeting, Universidad Técnica Federico Santa María.

Bustos, M. G. Cordo, B. Girardi, P. Pereyra, M. O. (2009). Calibración a Condiciones Locales en Argentina de la Guía Empírico-Mecanicista para el Diseño de Pavimentos Rígidos. XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, Mar del Plata, Argentina.

T. Khanum, M. Hossain, S. A. Romanoschi y R. Barezinsky (2006). Concrete Pavement Design in Kansas Following the Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide. Iowa State University. Estados Unidos.

A. Glucu, H. Ceylan, G. Kasthurirangan y S. Kim (2009). Sensitivity Analysis of Rigid Pavement Using Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Iowa State University. Estados Unidos.

Qiang LI, Danny X. XIAO, Kelvin C. P. WANG, Kevin D. HALL, Yanjun QIU (2011). Mechanistic-Empirical pavement design guide (MEPDG): a bird's-eye view. Journal of modern transportation 2011 19(2): 114-133.

Aguilar – Moya J.P., Banerjee A., Prozzi J.A., (2009). Sensitivity analysis of the M-E PDG using measured probability distributions of pavement layer thickness. TRB 2009 Annual Meeting.

Wahr, C y G. Zembo, (2008). Guía de Diseño Empírico Mecanicista: Comparación de Diseño para Pavimentos Rígidos Nuevos de Hormigón. 9° PROVIAL Puerto Varas, Chile.

Merino, J. (2010). Metodología de Elaboración de Datos de Tránsito y Clima para el Diseño de Pavimentos Flexibles Usando MEPDG en Chile. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción, Concepción.

Winkler, G. (2012). Análisis de Modelos de Desempeño para Pavimentos Asfálticos con MEPDG. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción, Concepción.

Vidal, A. (2011). Análisis y Aplicación de MEPDG para el diseño de Pavimentos Rígidos en la Región del Bío-Bío. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío, Concepción.

Valdebenito, C. (2011). “Caracterización del flujo vehicular de la red vial básica en la región del Bío-Bío”. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad del Bío-Bío, Concepción.

Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Casanoves F., Di Rienzo J.A., Robledo C.W. (2008). INFOSTAT, Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

INDICE ANEXOS

ANEXO A: Modelos de deterioro para pavimentos rígidos según el método MEPDG	54
ANEXO B: Datos de entrada utilizados para la simulación de escenarios en MEPDG	60
ANEXO C: Información de tránsito.....	68
ANEXO D: Análisis gráfico de resultados de la simulación.....	76
ANEXO E: <i>Ranking</i> de variables a partir de diferencias porcentuales.....	89
ANEXO F: Resultados de la simulación para tránsito muy.....	92

ANEXOS

**ANEXO A: MODELOS DE DESEMPEÑO PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS SEGÚN
EL MÉTODO MEPDG**

Modelo de agrietamiento transversal

Agrietamiento total

$$CRK = \frac{1}{1+FD^{-1.68}} \quad (1)$$

Donde:

CRK = Cantidad de agrietamiento de top-down o bottom-up.

FD = Daño de fatiga.

Agrietamiento total

$$TCRACK = CRK_{Bottom-up} + CRK_{Top-down} - CRK_{Bottom-up} \cdot CRK_{Top-down} \cdot 100\% \quad (2)$$

Donde:

TCRACK = Agrietamiento total (%).

$CRK_{Bottom-up}$ = Agrietamiento bottom-up estimado.

$CRK_{Top-down}$ = Agrietamiento top-down estimado.

Daño de fatiga

$$FD = \frac{n_{i,j,k,l,m,n}}{N_{i,j,k,l,m,n}} \quad (3)$$

$n_{i,j,k,l,m,n}$ = Número de aplicaciones de carga admisible en la condición i,j,k,l,m,n.

$N_{i,j,k,l,m,n}$ = Número de aplicaciones de carga solicitante en la condición i,j,k,l,m,n.

i = Año, el cual representa el cambio del modulo de ruptura (MR), la condición de la capa de enlace y el deterioro de la berma.

j = Mes, representa el cambio mensual de la base y el modulo dinámico efectivo de la reacción de la subbase.

k = Tipo de eje (simple, doble y triple).

l = Carga incremental por tipo de eje.

m = Diferencial de temperatura.

n = Tráfico.

Número de repeticiones de carga admisible

$$\log N_{i,j,k,l,m,n} = C_1 \frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}}^{C_2} + 0,4371 \quad (4)$$

MR_i = Modulo de rotura en el año i, PSI.

$\sigma_{i,j,k,l,m,n}$ = Esfuerzo aplicado en la condición i,j,k,l,m,n.

C_1 = 2,0

C_2 = 1,22

Modelo de escalonamiento de junta transversal

Escalonamiento total

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m \Delta Fault_i \quad (5)$$

$$\Delta Fault_i = C_{34} \cdot (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 \cdot DE_i \quad (6)$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \cdot \sum_{j=1}^m DE_j \cdot \text{Log}(1 + C_5 \cdot 5.0^{EROD})^{C_b} \quad (7)$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} \cdot \delta_{curling} \cdot \text{Log}(1 + C_5 \cdot 5.0^{EROD}) \cdot \text{Log}\left(\frac{P_{200} \cdot \text{WetDays}}{P_S}\right)^{C_6} \quad (8)$$

Donde:

$Fault_m$ = E escalonamiento medio al final del mes m, in.

$\Delta Fault_i$ = Daño incremental mensual producido por el escalonamiento medio durante el mes i,in.

$FAULTMAX_i$ = Máximo escalonamiento medio en el mes i,in.

$FAULMAX_0$ = Máximo escalonamiento medio inicial, in.

EROD = Factor de erodabilidad base/sub base.

DE_j	=	Diferencial de energía de deformación acumulado durante el mes j.
$\delta_{curling}$	=	Máxima deformación media mensual en la esquina de la losa (hacia arriba) producida por la curvatura de la temperatura y deformación por humedad.
P_s	=	Sobrecarga de la sub rasante, lb.
P_{200}	=	Porcentaje de material de la sub rasante que pasa por el tamiz N°200.
WetDays	=	Promedio anual del número de días de lluvia (mayores a 0.1 in de precipitación).

Diferencial de energía de deformación acumulado

$$DE = \frac{k}{2} (\delta_{loaded}^2 - \delta_{unloaded}^2) \quad (9)$$

Donde:

k = Modulo k de la subrasante.

$\delta_{loaded}^2 - \delta_{unloaded}^2$ = Diferencial de deflexión de carga y descarga de la esquina de la losa.

Modelo de progresión del IRI

IRI total

$$IRI = IRI_I + C1 \cdot CRK + C2 \cdot SPALL + C3 \cdot TFAULT \quad (10)$$

Donde:

IRI	=	IRI estimado, in/mi.
IRI_I	=	Rugosidad inicial medida como IRI, in/mi.
CRK	=	Porcentaje de losas con agrietamiento transversal (todas las severidades).
SPALL	=	Porcentaje de juntas con desconche (severidades medias o altas).
TFAULT	=	Escalonamiento total acumulado, in.
SF	=	Factor de sitio.
C1	=	0.8203
C2	=	0.4417
C3	=	1.4929

$$C4 = 25.24$$

Factor de sitio

$$SF = AGE \cdot 1 + 0.5556 \cdot FI \cdot (1 + P_{200}) \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

Donde:

AGE = Edad del pavimento, años.

FI = Índice de congelamiento, °F- días.

P₂₀₀ = Porcentaje de material de la sub rasante que pasa por el tamiz N°200.

Modelo de progresión de desconche

$$SPALL = \frac{AGE}{AGE+0.01} \cdot \frac{100}{1+1.005^{(-12 \cdot AGE+SCF)}} \quad (11)$$

Donde:

SPALL = Porcentaje de juntas con desconche (severidades medias y altas).

AGE = Edad del pavimento desde la construcción, años.

SCF = Factor de amplificación basado en el emplazamiento, diseño y variables relacionadas con el clima.

Factor de amplificación

$$SFC = -1400 + 350 \cdot AIR\% \cdot 0.5 + PREFORM + 3.4 f'c \cdot 0.4 - 0.2 \cdot FTCYC \cdot AGE + 43 h_{pcc} - 536 WC_{Ratio} \quad (12)$$

Donde:

AIR% = Contenido de aire en el H°, porcentaje.

AGE = Tiempo desde la construcción, años.

PREFORM = 1 si presenta sellante; 0 si no presenta.

f'c = Resistencia a la compresión, psi.

FTCYC = Promedio anual de números de ciclos de congelamiento y descongelamiento.

h_{pcc} = Espesor de la losa de Hormigón, in.

WC_{Ratio} = Relación de agua/cemento en el hormigón.

**ANEXO B: DATOS DE ENTRADA UTILIZADOS PARA SIMULACIÓN DE
ESCENARIOS EN MEDPG**

Tabla B1 Niveles de entrada de datos utilizados en la modelación

Variables y parámetros de entrada	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Información de clima y tránsito	Información local (Región del Bío – Bío) obtenida en mediciones y MOP		
Propiedades físicas y químicas del concreto	Información obtenida a través de consideraciones del MOP		Valores por defecto
Características mecánicas del material granular		Se determinó la resistencia de la base, subbase y subrasante mediante su correlación con el CBR	Se utilizó un valor típico para el coeficiente de Poisson según la clasificación del material
Propiedades del material granular ocupadas en el modelo climático			Valores por defecto

Nota: La Tabla A1 presenta los niveles de entrada utilizados para definir los distintos escenarios.

**Tabla B2 Características mecánicas del material granular
(Winkler, 2011)**

Descripción de la variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Coeficiente de Poisson	Es determinado mediante AASHTO T 307	Es determinado mediante correlaciones (no se recomienda una ecuación específica)	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Resistencia de la capa granular	El módulo resiliente determinado mediante AASHTO T 307	Alternativa 1: La capacidad de soporte, CBR, es determinada mediante AASHTO T 193 Alternativa 2: El valor de resistencia R de Hveem es determinado mediante AASHTO T 190 Alternativa 3: La penetración del cono dinámico es determinada mediante AASHTO T 206 Alternativa 4: La granulometría y el índice de plasticidad son determinados mediante AASHTO T 27 y AASHTO T 90, respectivamente	Se utilizan valores típicos en función de la clasificación AASHTO del material granular

Tabla B3 Propiedades del material granular utilizadas por el modelo climático integrado, (Merino, 2010)

Descripción de la variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Índice de plasticidad	Es determinado mediante AASHTO T 90	No aplica	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Límite líquido	Es determinado mediante AASHTO T 89	No aplica	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Granulometría	Es determinado mediante AASHTO T 27	No aplica	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Gravedad específica	Se determina mediante AASHTO T 100	Es determinada mediante correlaciones con la granulometría y el índice de plasticidad	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Densidad seca máxima y humedad óptima	Son determinadas mediante AASHTO T 99 ó AASHTO T 180, según el tipo de material granular	Son determinadas mediante correlaciones con la granulometría, la gravedad específica y el índice de plasticidad	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Conductividad hidráulica saturada	Es determinada mediante AASHTO T 215	Es determinada mediante correlaciones con la granulometría y el índice de plasticidad	Se utilizan valores típicos según el tipo de material granular
Parámetros de la curva característica del agua en el suelo (ecuación de Fredlung y Xing)	Se determina midiendo la succión del material granular para diferentes contenidos volumétricos de agua (no se recomienda un protocolo específico)	Son determinados mediante correlaciones con la gravedad específica, la densidad seca máxima, la humedad óptima, el índice plástico y la granulometría, obtenidos mediante los protocolos establecidos en el nivel 1	Similar al procedimiento del nivel 2, salvo que la gravedad específica es determinada mediante correlaciones con la granulometría y el índice de plasticidad

Tabla B4 Condición de serviciabilidad

Variable de entrada	Unidad	Valor asignado	Referencia
Horizonte del proyecto	Años	20	MOP (2012a): Tabla 3.604.103
IRI inicial	m/km	1,5	MOP (2012c): Tabla 7.101.2.B
Nivel de confiabilidad	%	90	AASHTO (2008): Tabla 8-2

Tabla B5 Propiedades químicas y mecánicas del cemento

Variable de entrada	Valor asignado	Unidad	Referencia
Peso unitario	150	pcf	NCHRP (2009): Valores por defecto
Coefficiente de Poisson	0,2		
Coefficiente expansión térmica	5,5	$^{\circ}\text{F} * 10^{-6}$	
Conductividad térmica	1,25	BTU/hr-ft-F	
Capacidad calorífica	0,28	BTU/lb-F	
Tipo Cemento	I		
Contenido de cemento	800	(lb/yd ³)	
Razón de agua cemento	0,45		
Tipo agregado	limo		
Temperatura de curado	103	$^{\circ}\text{F}$	
Contracción última en 40% de humedad relativa	976	microtensión	
Contracción reversible	50%		
Método de curado	Compuesto		
Resistencia a la flexotracción	5	MPa	
Modulo de elasticidad	29.000	MPa	
Resistencia a la compresión	36	MPa	

Tabla B6 Características de flujo vehicular y solicitudes de tránsito

Variable de entrada	Unidad	Valor asignado	Referencia
Número de pistas por sentido	Pistas	1	Merino (2010)
Porcentaje de vehículos pesados en la dirección de diseño	%	100	
Porcentaje de vehículos pesados en la pista de diseño	%	50	
Velocidad de operación	km/h	75	
Factores de ajuste mensual por tipo de vehículo pesado	Adim	Anexo 4.1, Tabla 2	
Distribución por tipo de vehículo pesado	%	Anexo 4.1, Tabla 3	
Distribución horaria por tipo de vehículos pesado	%	Anexo 4.1, Tabla 4	
Factores de crecimiento de tránsito por tipo de vehículo pesado	%	Anexo 4.1, Tabla 5	
Distribución mensual de ejes simples, tándem, trídem y cuádruples para determinados rangos de carga para cada tipo de vehículo pesado	%	Anexo 4.1, Tabla 6	
Ubicación media de la rueda	cm	45	
Desviación lateral del tránsito (<i>wandering</i>)	cm	25	
Ancho de la pista de diseño	m	3,65	
Número de ejes simples, tándem, trídem y cuádruples por cada tipo de vehículo pesado	Ejes	Anexo 4.1, Tabla 7	Merino (2010)

Tabla B7 Características de flujo vehicular y solicitudes de tránsito

Variable de entrada	Unidad	Valor asignado	Referencia
Ancho de eje promedio entre los bordes	m	2,60	NCHRP (2009): Valores por defecto
Espaciamiento transversal entre centros de llantas doble neumático	cm	30	
Espaciamiento longitudinal entre los centros de los neumáticos para ejes tandem	cm	130	
Espaciamiento longitudinal entre los centros de los neumáticos para ejes tridem y cuádruples	cm	125	
Distancia corta promedio entre el manubrio y el primer eje cargado	m	3,65	
Distancia media promedio entre el manubrio y el primer eje cargado	m	4,57	
Distancia larga promedio entre el manubrio y el primer eje cargado	m	5,50	
Porcentaje de vehículos con espaciamiento corto, medio y largo promedio	%	33	

Tabla B8 Información de los distintos niveles de volumen de tránsito

Variable de entrada	T1	T2	T3
TMDA en ambos sentidos	246,6	658,4	1451
Vehículos pesados del TMDA (%)	31,57	35,91	44,94
Factor de distribución direccional (%)	52,5		
Factor de distribución por pista (%)	100		
Velocidad de operación (Km/h)	75		
Número de pistas por sentido	1		

Tabla B9 Características de la base y sub-rasante

Variable de entrada	Unidad	Sub-base	Sub-rasante	Referencia
Tipo de material granular	Clasif. USCS	A-1-A Base: Grava (GW, GP)		MOP (2012a): Tabla 3.604.206.B
Capacidad de soporte, CBR	%	60		MOP (2012d): Artículo 8.101.1 (Base y subbase)
Módulo resiliente (estimado en base al CBR)	MPa	275		
Coefficiente de Poisson	Adim	0,35		NCHRP (2009): Valores por defecto
Coef. presión lateral	Adim	0,5		

ANEXO C: INFORMACIÓN DE TRÁNSITO

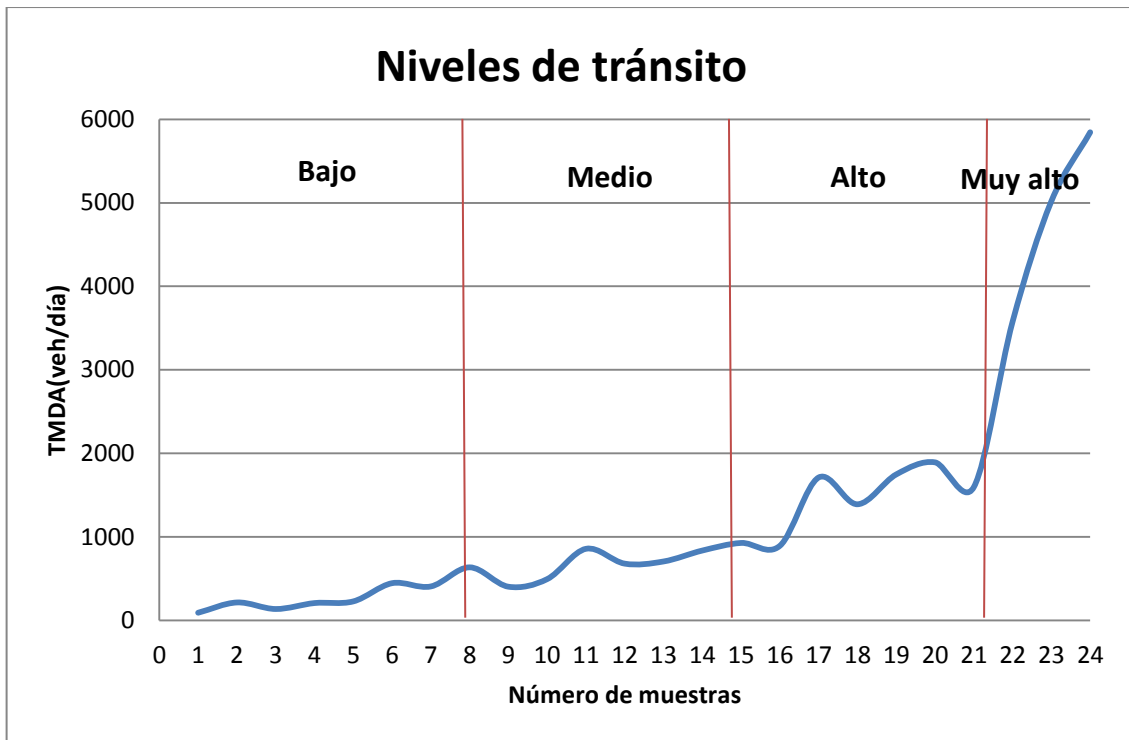


Figura C1 Distribución de los niveles de tránsito

Tabla C1 Clasificación de niveles de tránsito
(Fuente Valdebenito, 2010)

Ruta	Estaciones	TMDA 2010 (veh/día)	Promedio TMDA	EE	Promedio EE (miles)	Nivel de tránsito
Q - 50	49 - Cabrero	1596	1451	41189790	25936,4	A
148	Conce - 49	1892		40774349		
180	L. A. - 86	1748		3449535		
160	67-97	1390		30918801		
	122-69	1711		26754309		
180	102 - Renaico	893		19243300		
152	ITATA	927		19224678		
180	86 - 100	836	658,4	16234586	10816,4	M
160	97-124	705		12597143		
180	100 - 102	679		12444895		
150	Conce - Tomé	857		10280684		
126	24 - 13	494		9764432		
	34 - 24	403		8108362		
148	45 - 5 Sur	635		6284520		
160	124-Lebu	406	246,6	6092164	3653,4	B
148	44 - 45	445		5453632		
126	11 - Cauquenes	227		4616835		
156	128 - 75	207		3449535		
	75 - Coihue	136		2871480		
148	49 - 44	214		1675731		
126	Tome - 34	91		1414321		

Nota: Según el número de muestras y su distribución el tránsito se divide en tres niveles de igual tamaño muestral.

**Tabla C2 Clasificación de vehículos pesados según la FHWA
(Adaptación NCHRP, 2004)**


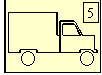





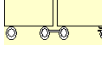
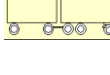
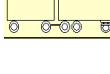
Clase FHWA	Configuración de ejes	Descripción
Clase 4		Bus
Clase 5		Camión simple de 2 ejes
Clase 6		Camión simple de 3 ejes
Clase 7		Camión simple de 4 o más ejes
Clase 8		Camión con semi-remolque de 4 o menos ejes
Clase 9		Camión con semi-remolque de 5 ejes
Clase 10		Camión con semi-remolque de 6 o más ejes
Clase 11		Camión con remolque de 5 o menos Ejes
Clase 12		Camión con remolque de 6 ejes
Clase 13		Camión con remolque de 7 o más ejes

Tabla C3 Factores de ajuste mensual para la Región del Biobío (Merino, 2010)

Mes	Factores de Ajuste Mensual por clase FHWA								
	4	5	6	8	9	10	11	12	13
Enero	1,09	1,07	1,02	1,07	1,06	1,11	1,06	1,11	1,11
Febrero	1,12	1,08	1,05	1,05	1,05	1,11	1,05	1,11	1,11
Marzo	1,06	1,05	1,04	1,05	1,04	1,15	1,04	1,15	1,15
Abril	1,01	1,00	0,99	1,00	1,00	0,96	1,00	0,96	0,96
Mayo	1,01	0,94	0,92	0,97	1,01	0,82	1,01	0,82	0,82
Junio	1,02	0,91	0,91	0,93	0,95	0,75	0,94	0,75	0,75
Julio	1,01	0,90	0,94	0,93	0,96	0,76	0,96	0,76	0,76
Agosto	1,06	0,94	0,96	0,99	1,01	0,85	1,01	0,85	0,85
Septiembre	0,93	0,97	0,99	0,96	0,96	0,93	0,96	0,93	0,93
Octubre	0,84	0,98	1,02	0,95	0,93	1,07	0,93	1,07	1,07
Noviembre	0,91	1,05	1,07	1,03	1,03	1,21	1,03	1,21	1,21
Diciembre	0,93	1,06	1,07	1,05	1,00	1,13	1,01	1,13	1,13

Tabla C4 Composición vehicular para la Región del Biobío

(Adaptación Merino, 2010)

Clasificación FHWA	4	5	6	8	9	10	11	12	13
Composición vehicular (%)	22,0	36,5	13,2	1,6	2,3	3,4	16,1	4,1	0,8

Tabla C5 Distribución horaria media de la Región del Biobío (Merino, 2010)

Horario		FDH (%)	Horario		FDH (%)
0:00	1:00	2,2	12:00	13:00	5,1
1:00	2:00	2,3	13:00	14:00	4,8
2:00	3:00	1,8	14:00	15:00	5,0
3:00	4:00	1,8	15:00	16:00	5,2
4:00	5:00	1,8	16:00	17:00	5,8
5:00	6:00	1,8	17:00	18:00	6,0
6:00	7:00	2,6	18:00	19:00	6,0
7:00	8:00	4,1	19:00	20:00	6,2
8:00	9:00	5,0	20:00	21:00	5,9
9:00	10:00	5,2	21:00	22:00	4,6
10:00	11:00	5,7	22:00	23:00	3,4
11:00	12:00	5,3	23:00	0:00	2,4

**Tabla C6 Tasas de crecimiento del tránsito para la Región del Biobío
(Adaptación Merino, 2010)**

Clasificación FHWA	4	5	6	8	9	10	11	12	13
Tasa de crecimiento (%)	0,0	0,0	2,1	9,1	9,1	9,1	1,5	1,5	1,5

Tabla C7 Estratigrafía liviana utilizada para calcular los espectros de carga (Merino, 2010)

Rangos		Buses	Camion 2 Ejes	Camión Múltiples
KN		Estratigrafía 1.000 veh	Estratigrafía 1.000 veh	Estratigrafía 1.000 veh
Ejes Simple				
0	50	860	1456	1250
50	60	280	135	250
60	70	140	78	160
70	80	230	60	100
80	90	290	55	120
90	100	110	70	150
100	110	40	59	155
110	120	30	44	120
120	130	20	28	40
130	140	0	6	18
140	150	0	6	5
150	160	0	4	3
Σ Ejes		2000	2001	2371
Ejes Tándem				
0	110			410
110	120			24
120	130			32
130	140			30
140	150			45
150	160			50
160	170			45
170	180			52
180	190			40
190	200			25
200	210			17
210	220			15
220	230			15
230	240			12
240	250			12
250	260			10
Ejes Totales		2000	2001	3205

**Tabla C8 Número de ejes por camión calculados para la Región del Biobío
(Merino, 2010)**

Clasificación FHWA	Cantidad de ejes		
	simple	doble	triple
4	1,85	0,17	0,00
5	2,00	0,00	0,00
6	1,00	1,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00
8	2,26	0,74	0,00
9	1,00	2,00	0,00
10	1,00	1,00	1,00
11	3,23	0,80	0,00
12	2,96	1,52	0,00
13	3,00	2,00	0,00

ANEXO D: ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

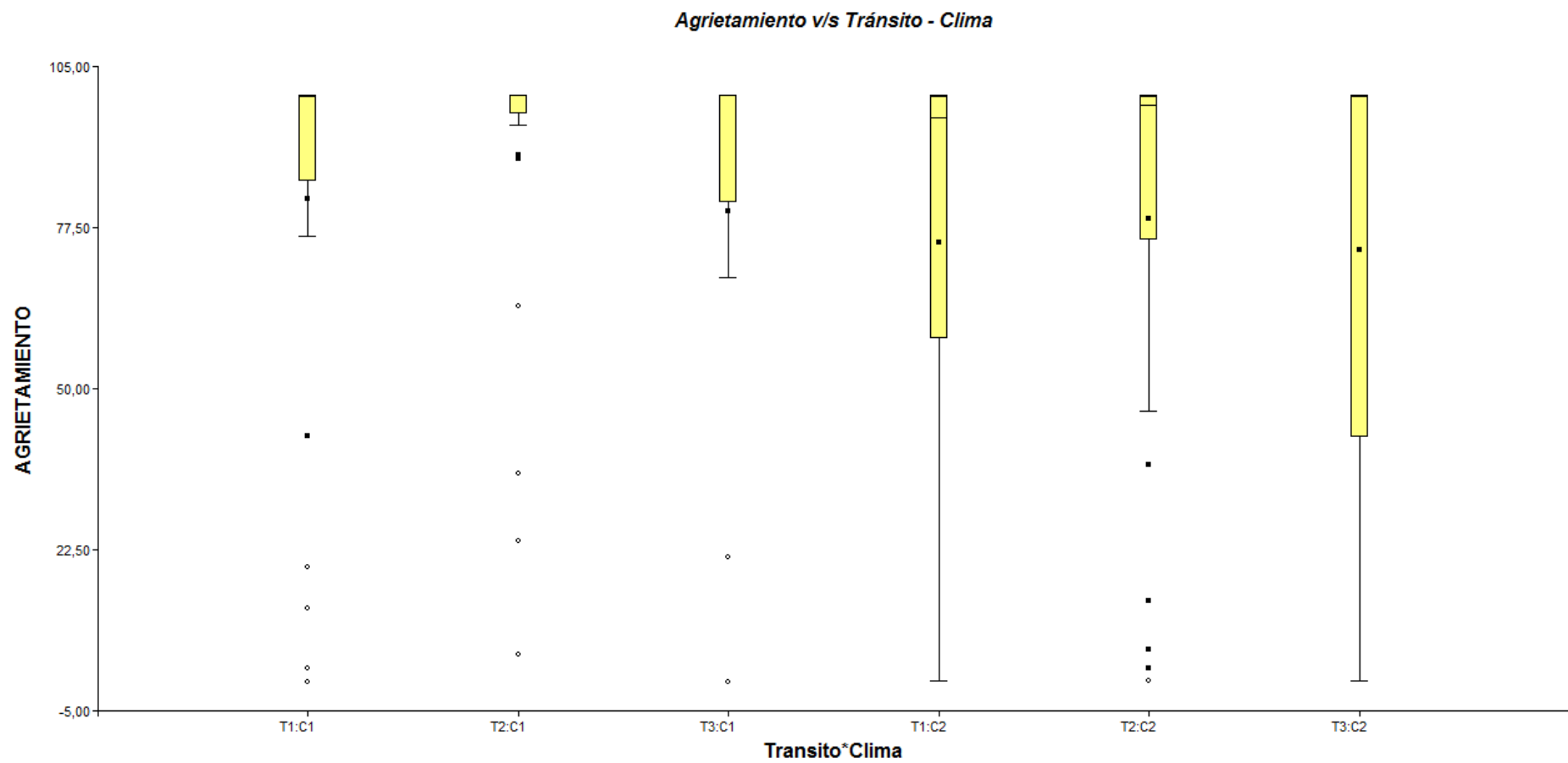


Figura E1 Gráfico de caja Agrietamiento v/s Tránsito – Base de datos climática

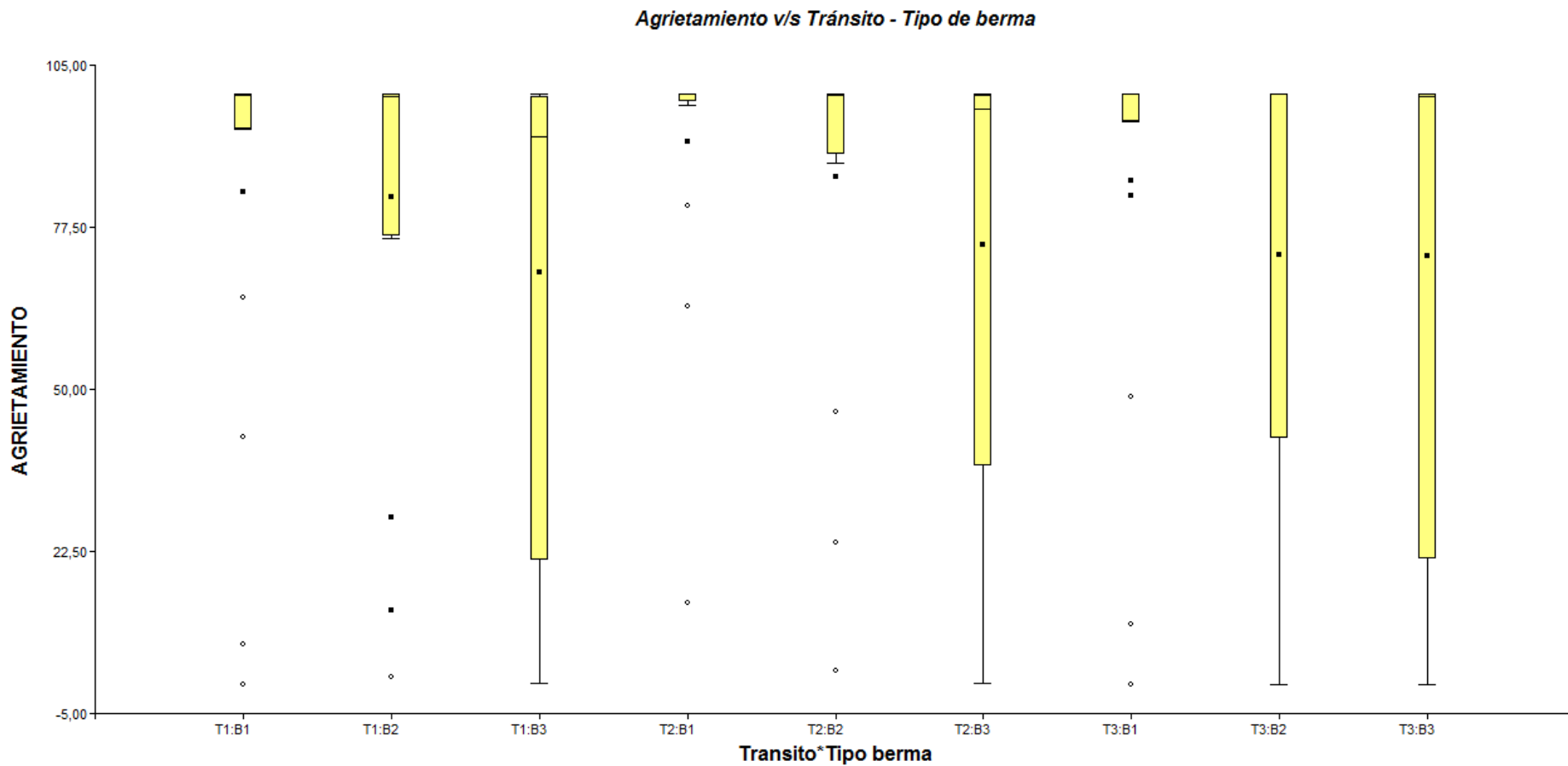


Figura E2 Gráfico de caja Agrietamiento v/s Tránsito – Tipo de berma

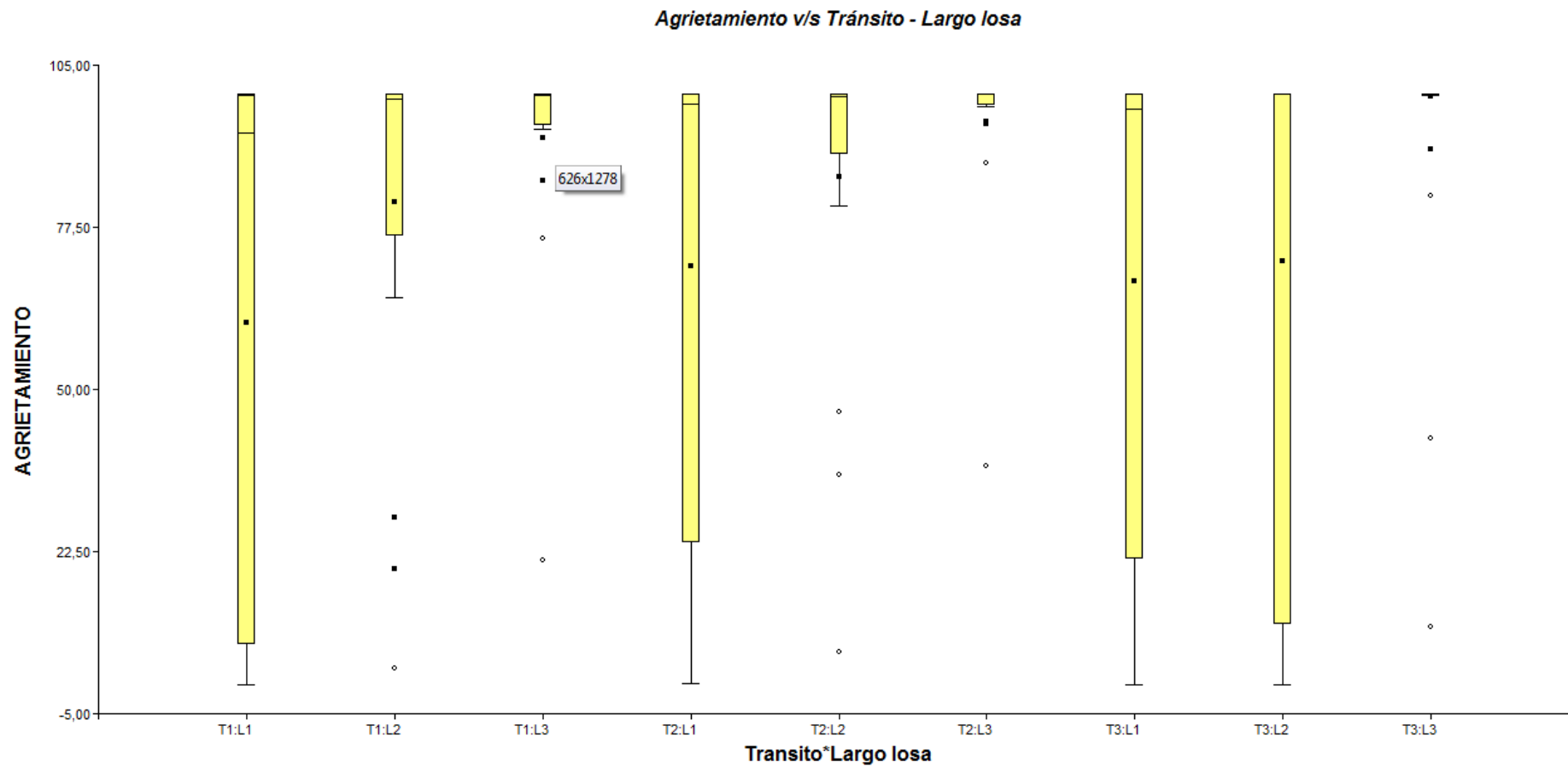


Figura E3 Gráfico de caja Agrietamiento v/s Tránsito – Largo de la losa

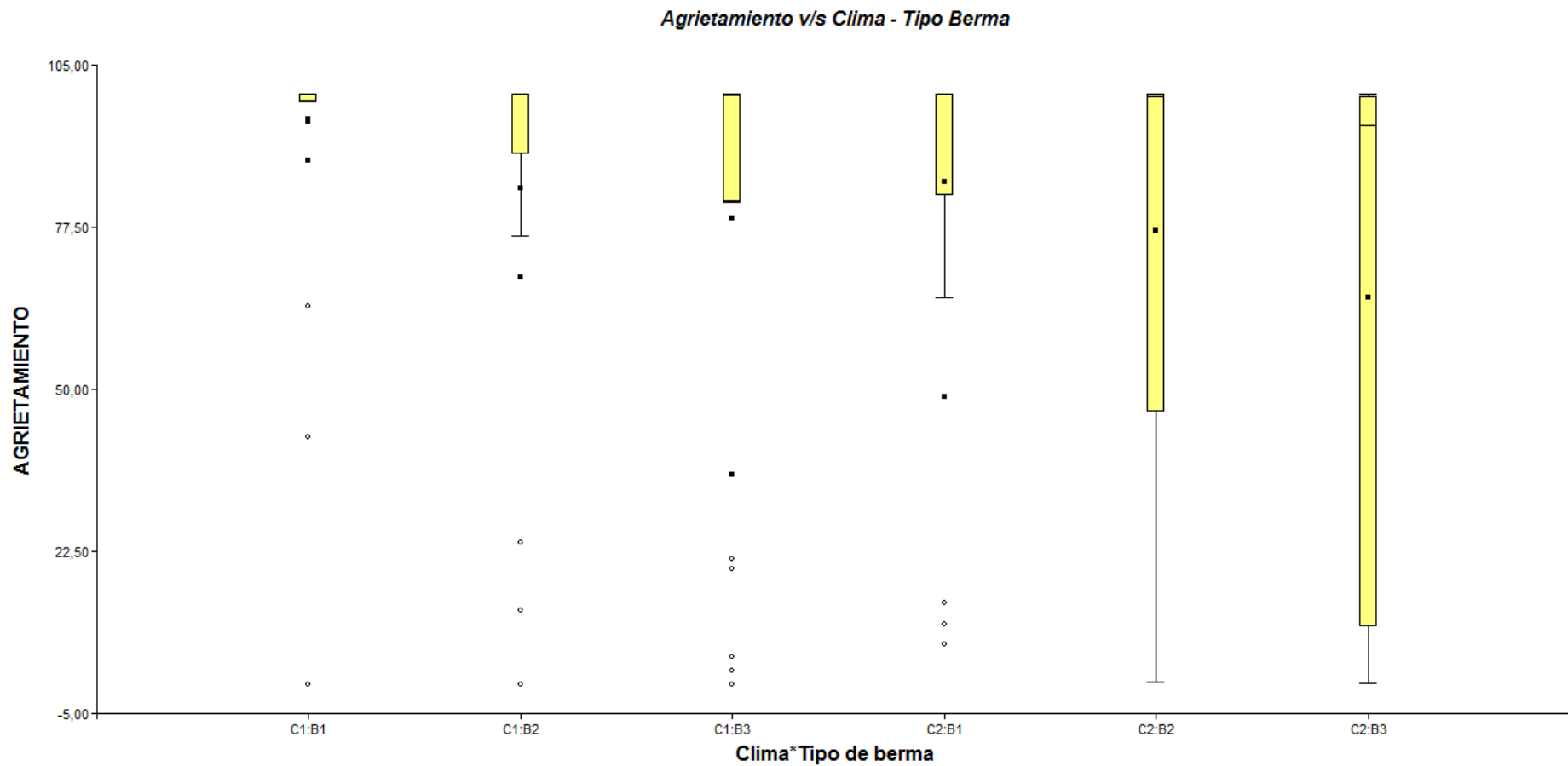


Figura E4 Gráfico de caja Agrietamiento v/s Base de datos climática – Tipo de berma

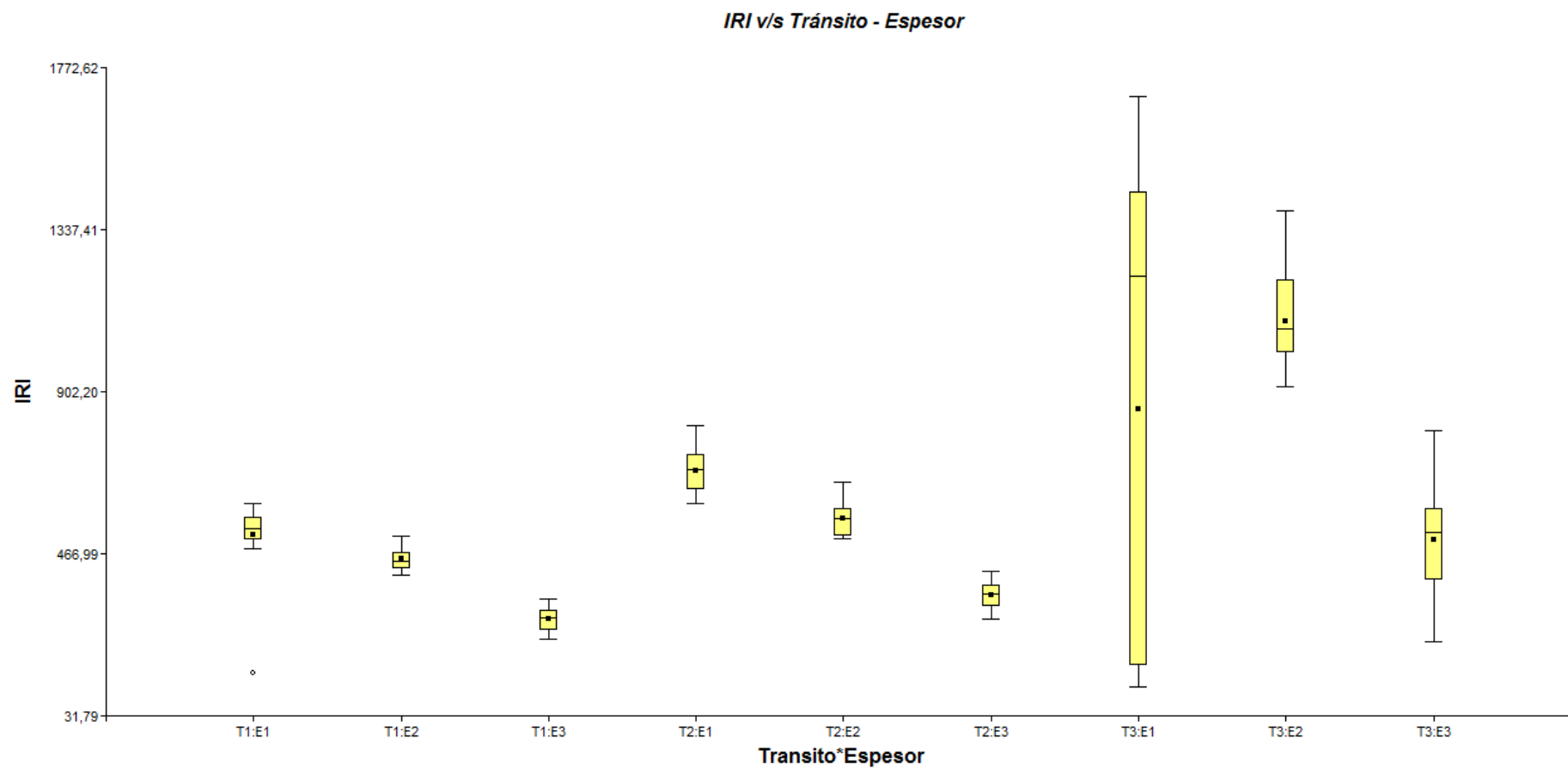


Figura E5 Gráfico de caja IRI v/s Tránsito – Espesor

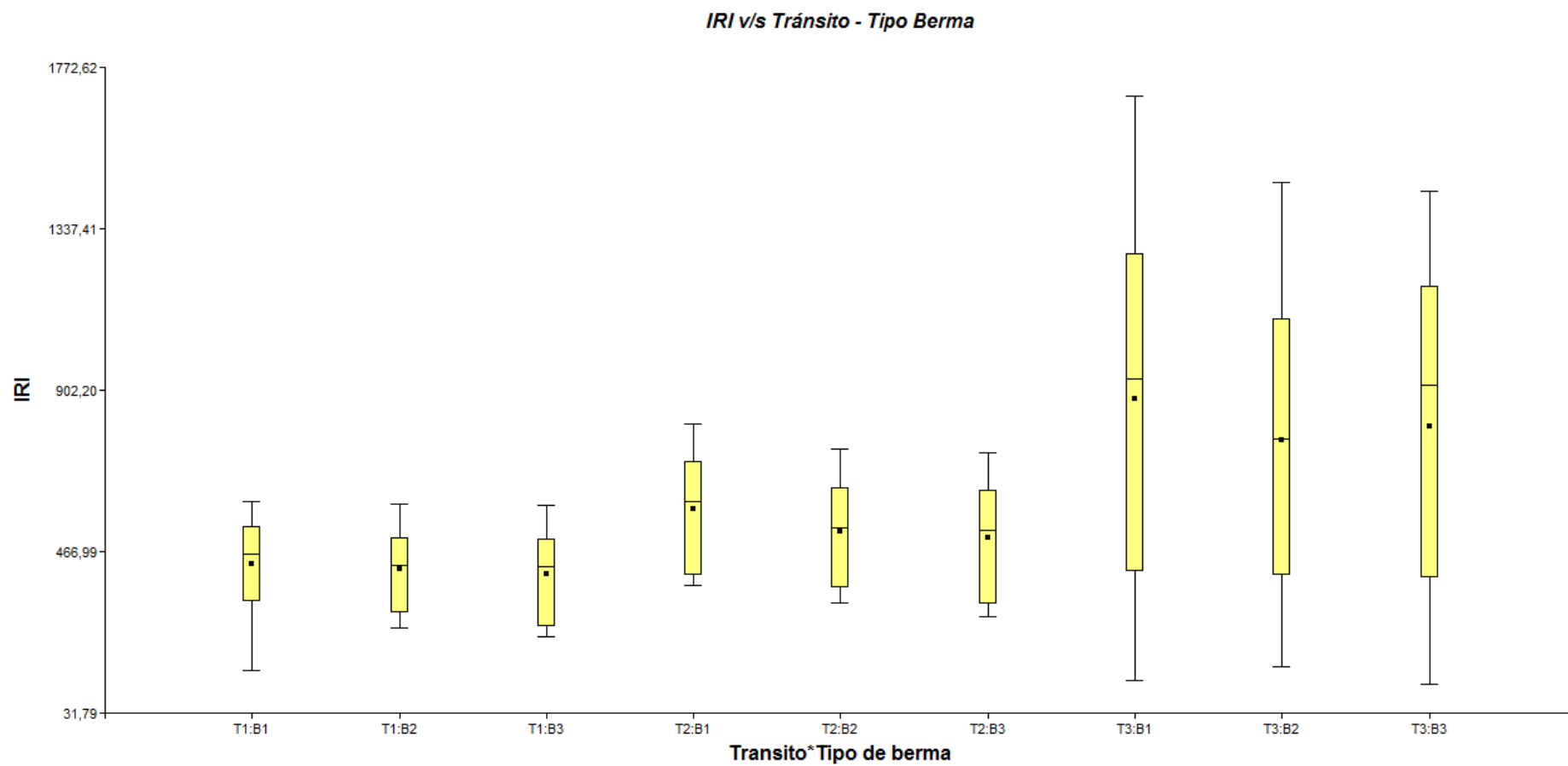


Figura E6 Gráfico de caja IRI v/s Tránsito – Tipo de berma

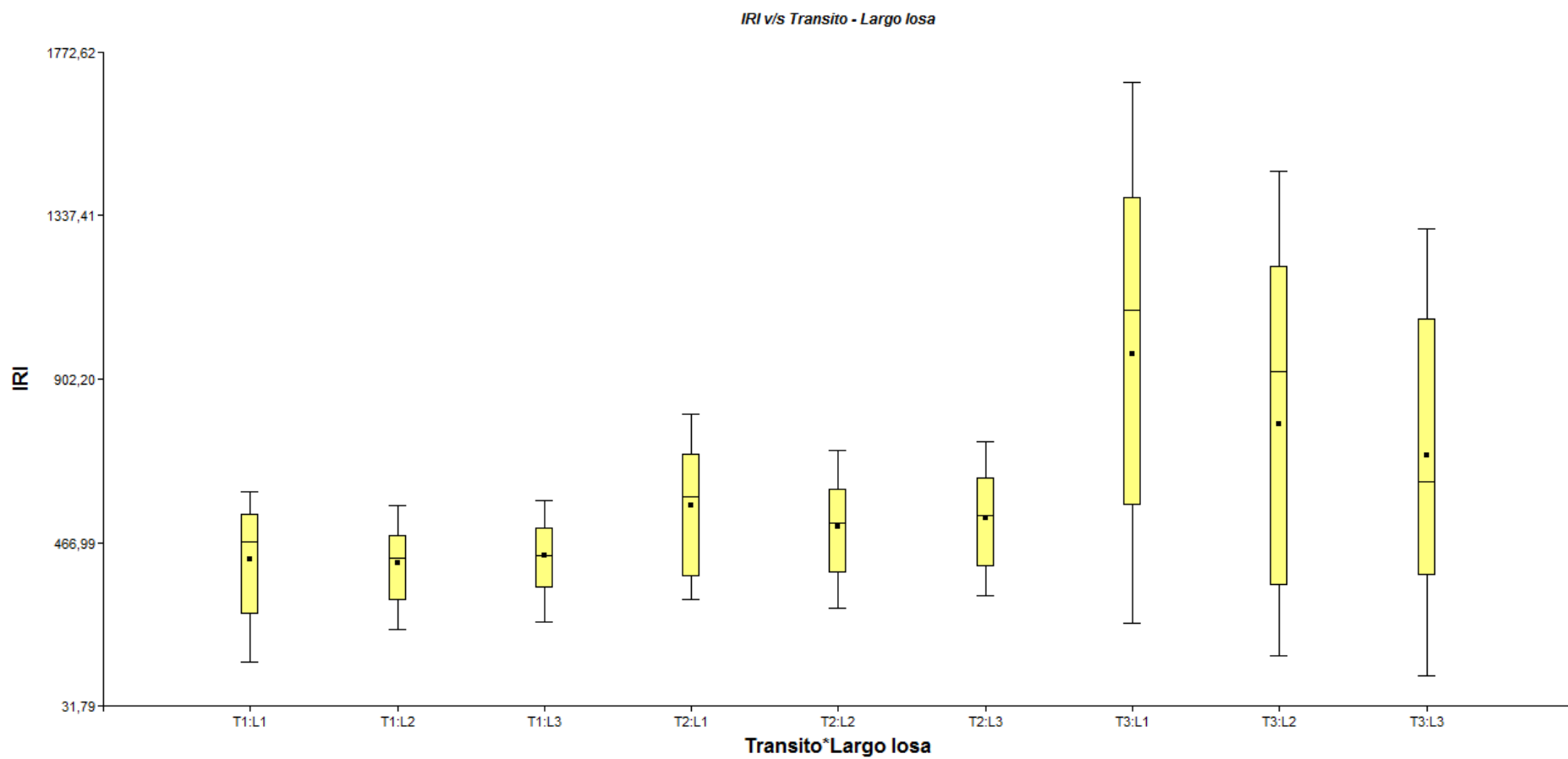


Figura E7 Gráfico de caja IRI v/s Tránsito – Largo losa

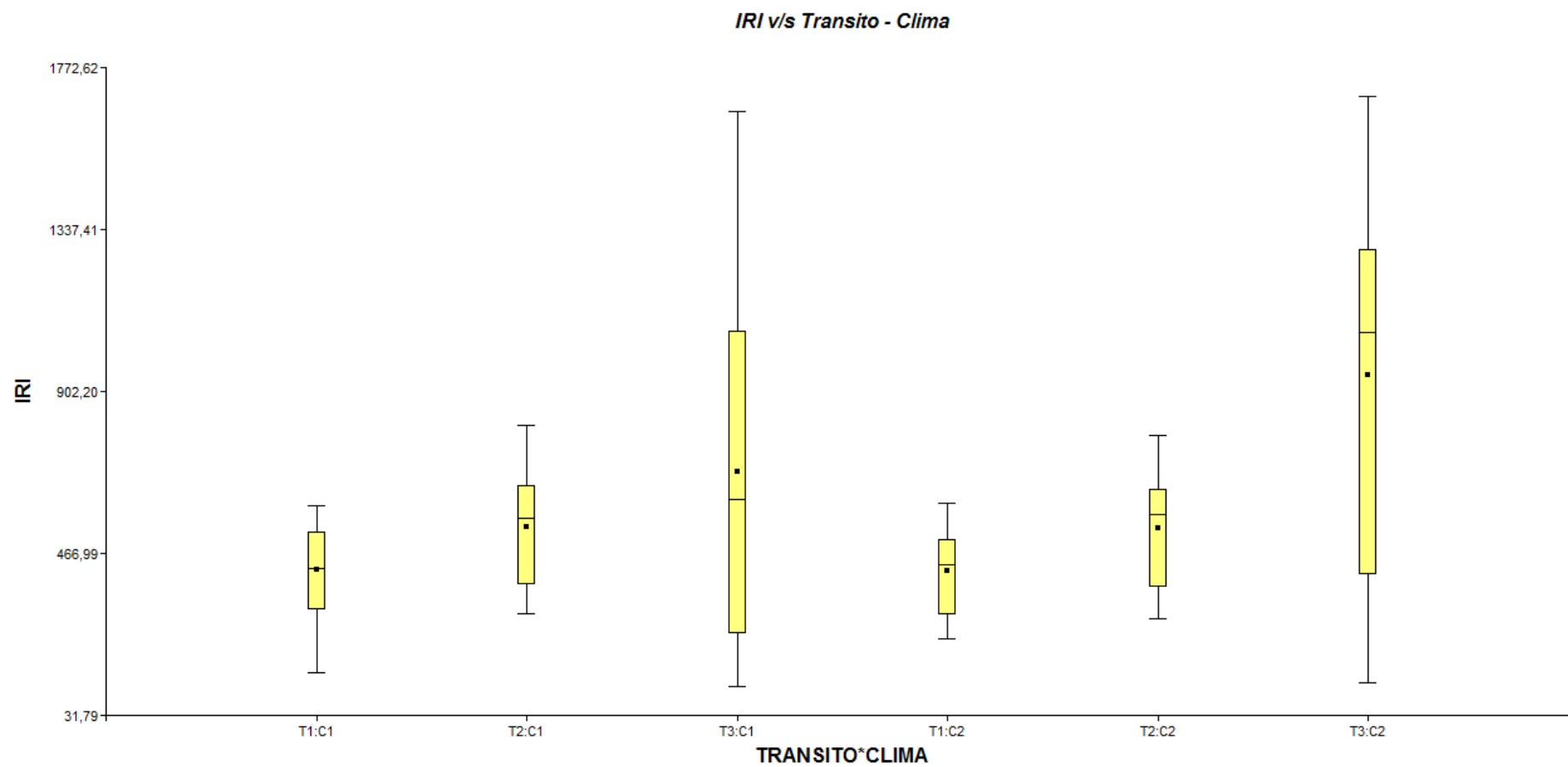


Figura E8 Gráfico de caja IRI v/s Tránsito – Base de datos climática

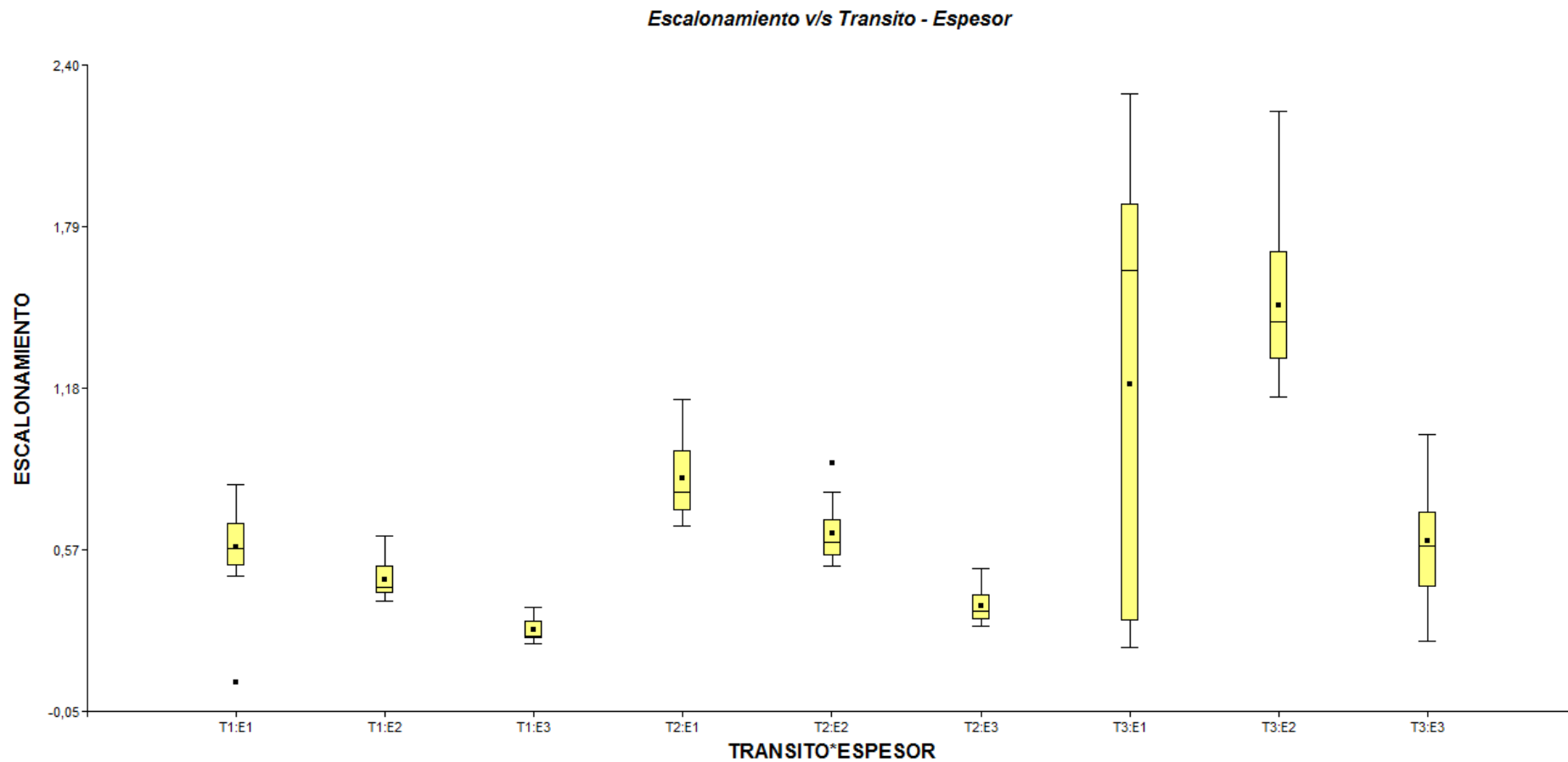


Figura E9 Gráfico de caja Escalonamiento v/s Tránsito – Espesor

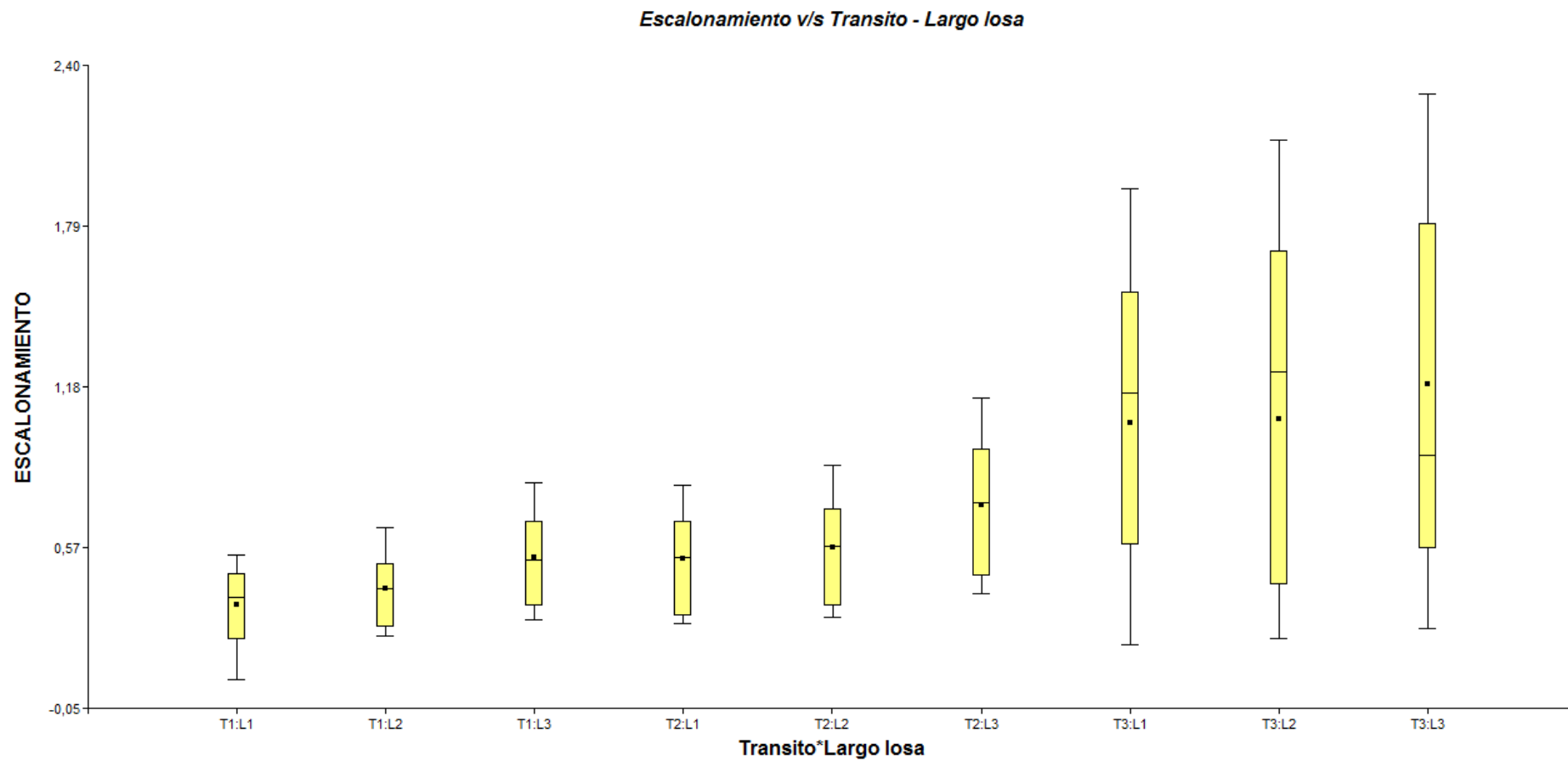


Figura E10 Gráfico de caja Escalonamiento v/s Tránsito – Largo losa

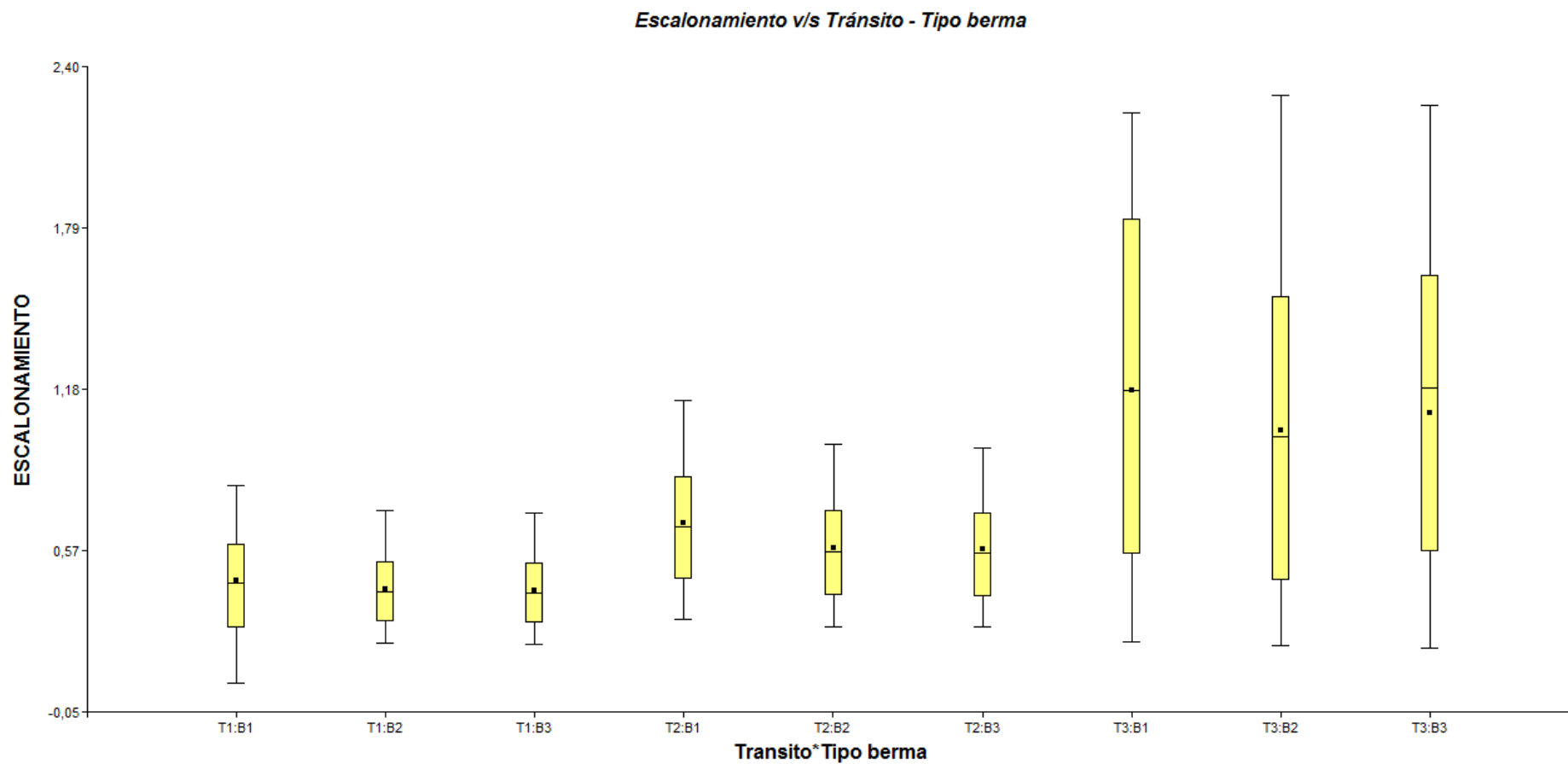


Figura E11 Gráfico de caja Escalonamiento v/s Tránsito – Tipo berma

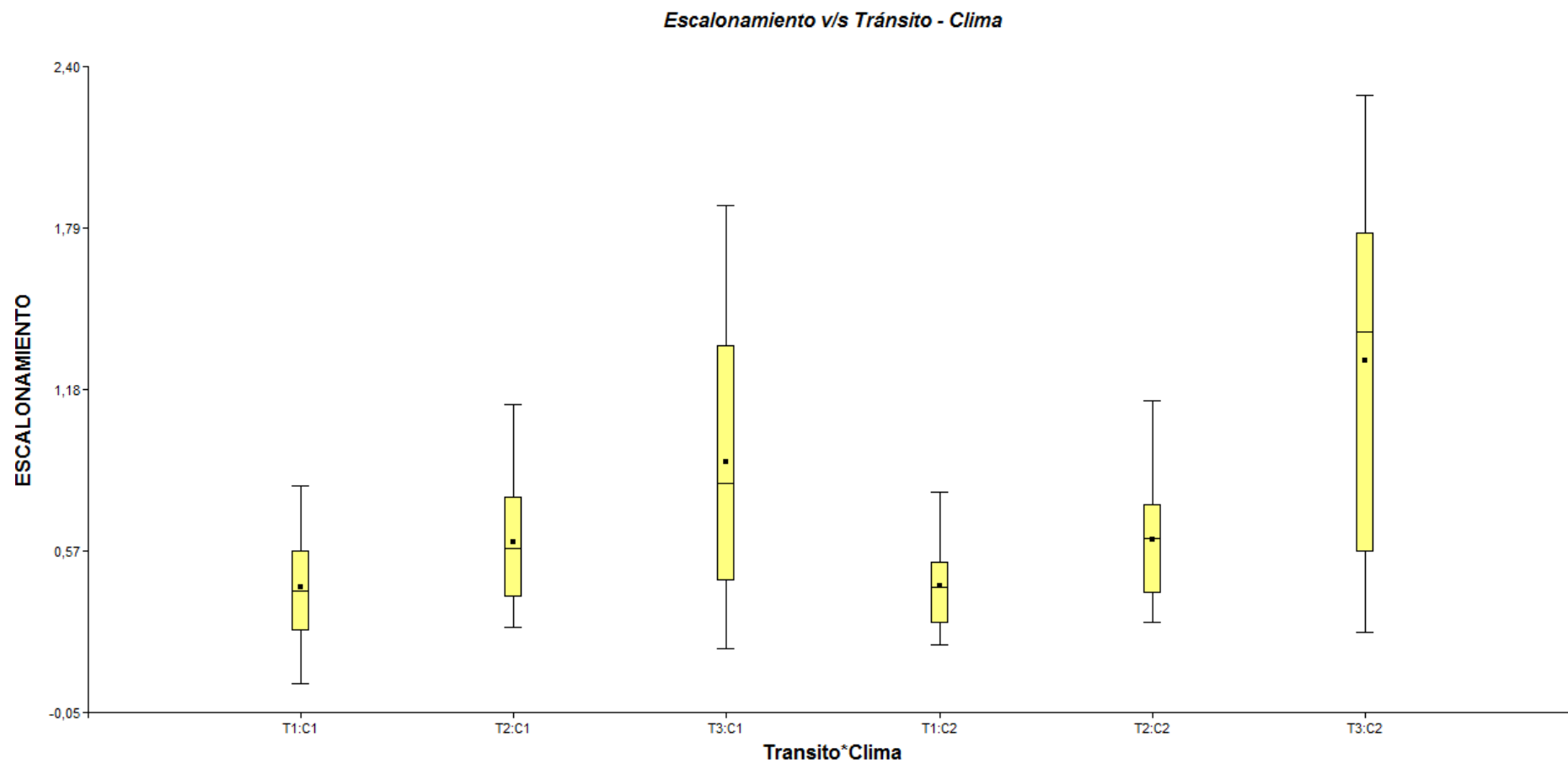


Figura E12 Gráfico de caja Escalonamiento v/s Tránsito – Base de datos climática

**ANEXO E: RANKING DE VARIABLES A PARTIR DE DIFERENCIAS
PORCENTUALES**

Tabla E1 Diferencia porcentual de los modelos de desempeño ante cambio de variables para distintos niveles de tránsito

Transito	Bajo-Medio			Alto		
	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento	IRI	Escalonamiento	Agrietamiento
Clima	7%	7%	175%	39%	43%	2617%
Espesor de la losa	79%	421%	277%	83%	109%	6010%
Largo de la losa	16%	16%	23%	94%	26%	27%
Tipo de berma	33%	10%	116%	23%	34%	495%

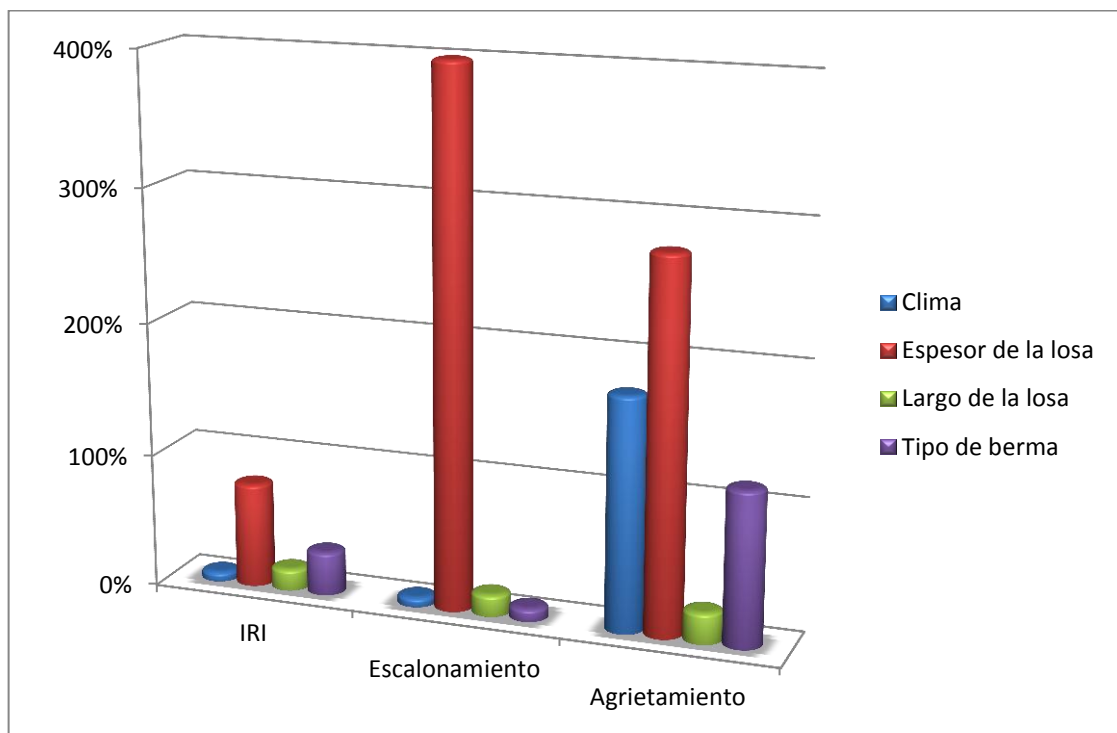


Figura E1 Ranking de variables para niveles de tránsito bajo – medio

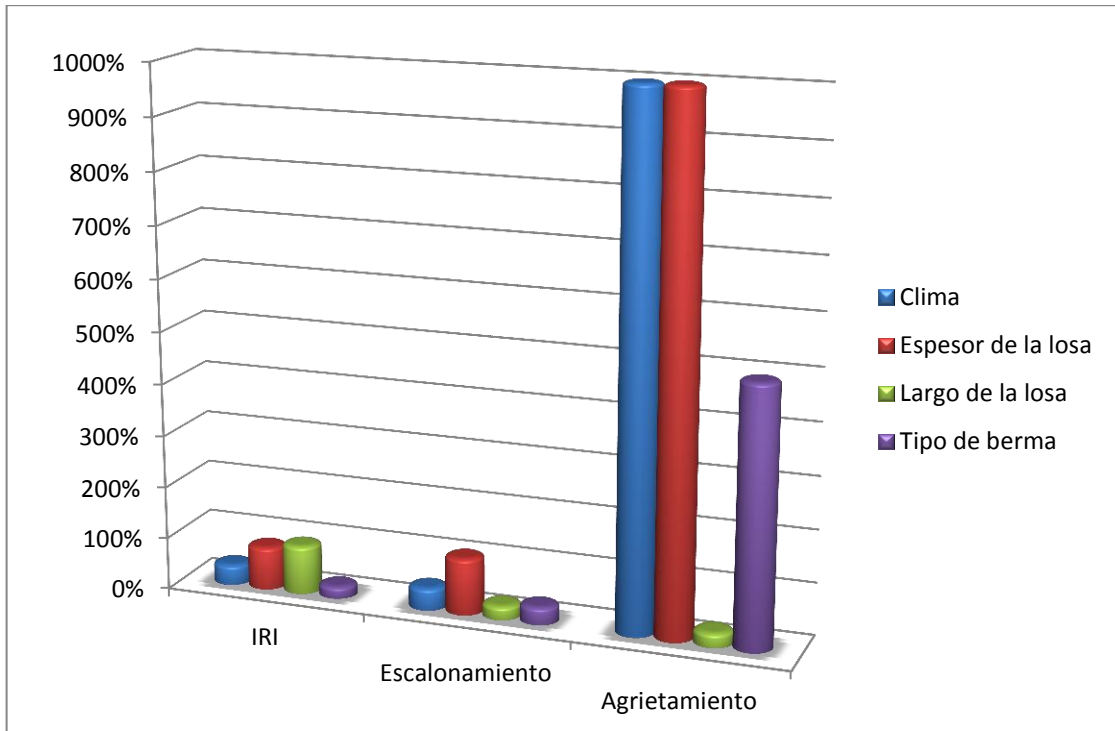


Figura E2 Ranking de variables para niveles de tránsito alto

**ANEXO F: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA NIVEL DE TRÁNSITO
MUY ALTO**

Tabla F1 Resultados de la simulación para nivel de tránsito muy alto, en base de datos climática Chillán

Espesor de la losa	E1 (23 cm)									E2 (28 cm)									E3 (33 cm)											
Largo de la losa	J1 (3m)			J2 (4m)			J3 (5m)			J1 (3m)			J2 (4m)			J3 (5m)			J1 (3m)			J2 (4m)			J3 (5m)					
Tipo de berma	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
IRI FINAL (m/km)	26	22	21	22	19	19	24	20	19	14	12	12	13	11	11	15	13	12	7,5	6,8	6,7	7,5	6,4	6,3	9,8	8,5	8,1			
Escalonamiento (mm)	39	33	32	42	35	35	56	46	45	20	17	17	22	19	19	32	26	25	9,8	8,7	8,5	12	10	10	18	15	15			
Agrietamiento (%)	100	95	55	100	100	98	100	100	100	54	27	7,7	91	71	37	100	100	94	3,9	1,3	0,3	28	11	3	94	81	58			

Tabla F2 Resultados de la simulación para nivel de tránsito muy alto, en base de datos climática Cañete

Espesor de la losa	E1 (23 cm)									E2 (28 cm)									E3 (33 cm)											
Largo de la losa	J1 (3m)			J2 (4m)			J3 (5m)			J1 (3m)			J2 (4m)			J3 (5m)			J1 (3m)			J2 (4m)			J3 (5m)					
Tipo de berma	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3	B1	B2	B3
IRI FINAL (m/km)	32	27	26	28	23	22	29	24	23	17	15	15	15	13	12	18	15	14	9,9	8,7	8,6	9	7,7	7,6	11	8,8	8,4			
Escalonamiento (mm)	50	42	41	55	45	44	71	56	55	27	23	22	30	24	24	41	32	32	14	12	12	16	13	13	23	18	18			
Agrietamiento (%)	84	37	3,7	100	97	59	100	100	97	4,5	1,1	0,2	34	8,3	1,5	98	81	33	0,6	0,2	0	4,6	1,3	0,3	55	26	9,7			

