

CAPITULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

Los caminos no pavimentados constituyen la mayor proporción de la red de carreteras en Chile y en muchos otros países en vías de desarrollo. La asignación de recursos en los caminos sin pavimentar ha sido realizada históricamente en base a la experiencia de las autoridades de carreteras.

La red vial existente en la actualidad en Chile, está compuesta por aproximadamente un tercio de caminos con carpetas pavimentadas, ya sea en hormigón o asfalto. Constituyendo éstas la red que nos permite satisfacer las demandas de transporte para los viajes interregionales e internacionales, e incluso da respuesta a la generación de viajes, que en el día a día, se materializan en las grandes ciudades. Los dos tercios restante de la red, permanecen con carpetas de ripio, o simplemente de tierra, las que se distribuyen en su mayoría en la red primaria y secundaria, que abarca a un sector un tanto más postergado por su lejanía a la ciudad, y que, dado su emplazamiento, tiene a estos caminos como arteria principal que permite su abastecimiento, desarrollo comercial, y la posibilidad cierta de optar a los centros educacionales y de libre esparcimiento.

Actualmente en Chile está en desarrollo el programa “Caminos Básicos 5.000”, iniciativa con la cual se espera contribuir al desarrollo del país, a la superación de la pobreza y apoyar la economía productiva rural. Este gran desafío, que fue dado a conocer públicamente en agosto 2003 y se estima que concluya el presente año, para luego iniciar nuevos programas viales en dicha dirección. El programa ha sido calificado por el Director Nacional de Vialidad, como la “Segunda Revolución Vial en Chile”, ya que la primera sería la desarrollada por el sistema de concesiones. El mejoramiento de caminos rurales no pavimentados, mediante soluciones básicas y una eficiente gestión de los recursos, es una forma de acercar el progreso en infraestructura del país a aquellas zonas rurales más apartadas.

El hecho de habilitar de mejor forma los caminos de zonas rurales implica un

alto impacto social, ya que permite potenciar la conectividad en lugares aislados, como asimismo, elevar la calidad de vida de sus habitantes.

La alta inversión requerida no permite mejorar la conectividad de las comunidades que dependen de estos caminos mediante proyectos de alto estándar debido a su baja rentabilidad, por tanto la consigna es poder "hacer más con menos".

En los últimos veinte años, los sistemas de gestión de carreteras han mejorado significativamente debido al avance logrado en el campo de la informática. Hoy los administradores de carreteras disponen de una serie de herramientas o mecanismos que le permiten hacer un mejor uso de los recursos disponibles para el mantenimiento y la rehabilitación de las carreteras.

El HDM-4 fue desarrollado como parte del "International Study of Highway Development and Management Tools" (ISOHDM), proyecto internacional para desarrollar nuevos mecanismos de análisis de inversión, que contó con el patrocinio del Banco Mundial, la AIPCR, el Departamento de Desarrollo Internacional del Reino Unido, El Banco de Desarrollo Asiático y la Administración Nacional de Caminos Sueca entre otros¹.

En la actualidad la Dirección de Vialidad de Chile utiliza, para la asignación de los limitados recursos de la red vial, los modelos computacionales Highway Development and Management Model (HDM-4) y Expenditure Budgeting Model (EBM), los cuales permiten evaluar económicamente los proyectos viales y asignar recursos en forma óptima. Los modelos de deterioro que se aplican en Chile se basan en el análisis del estudio de Brasil².

El programa desarrollado por el Banco Mundial HDM-4, contempla modelos de Deterioro y Conservación de Caminos; tanto para caminos con pavimentos flexibles, rígidos y aquellos no pavimentados. Respecto a los caminos no

¹ PIARC. (2005). Página Web oficial de la "World Road Association" (Asociación Mundial de Carreteras). <http://www.piarc.org/es>.

² William Paterson D.O. (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. Highway Design and Maintenance Standards Series", World Bank Transportation department, Washington D.C.

pavimentados, el programa hace uso de los modelos de rugosidad y de pérdida de material.

Modelo de Rugosidad

El modelo de rugosidad se fundamenta en el perfil del camino por donde transita la rueda, puesto que este ***incide en los costos de operación del vehículo***. La ubicación de la huella tiende a variar cuando la rugosidad alcanza niveles altos, ya que los vehículos buscan minimizar el impacto dinámico; la predicción de la progresión de la rugosidad debe tener en cuenta esta tendencia autorreguladora. A causa de la alta variabilidad de las propiedades de los materiales, drenaje, erosión de la superficie y los altos niveles de rugosidad de los caminos no pavimentados, los errores de la predicción tienden a ser grandes, el error estándar del estudio brasileño es del orden de 1,5 a 2,5 m/km IRI, para un nivel de confianza del 95%.

Como se ha enunciado, los modelos de rugosidad, corresponden por un lado al de Progresión de la Rugosidad (variación de rugosidad en el tiempo) y al Efecto de Reperfilado (mejoramiento de la condición superficial luego de las acciones de conservación).

Los submodelos de la rugosidad son:

- Rugosidad máxima
- Progresión de la rugosidad
- Rugosidad mínima
- Efecto de la compactación en la progresión de la rugosidad.
- Efecto del reperfilado (graduación)
- Rugosidad media durante el año de análisis
- Ciclo de la rugosidad – estado estable –

El modelo adoptado por el HDM circunscribe a la rugosidad a un límite superior

o rugosidad máxima (RI_{max}) desde la cual una función convexa decreciente con tasa exponencial inversa desciende hasta el valor esperado. En el estudio de Brasil³, la rugosidad máxima (RI_{max}) se encontró en función de las propiedades de los materiales y la geometría del camino, mientras que la proporción de progresión de rugosidad está en función de la rugosidad en un tiempo determinado, la rugosidad máxima, el tiempo, el tránsito (vehículos livianos y pesados) y las propiedades de los materiales.

Respecto a las actividades de mantenimiento en caminos sin pavimentar, generalmente se realiza varias veces al año, cada una tendiente a reducir los niveles de rugosidad. En el estudio se encontró que la magnitud de reducción de la rugosidad, depende de la rugosidad antes de las actividades de mejoramiento, de las propiedades de los materiales y de la rugosidad mínima. El modelo del efecto de Reperfilado, nace de la condición de rugosidad más baja que puede alcanzar el camino (RI_{min}) y sobre la cual las actividades de mantenimiento no tienen mayor efecto.

La relación para predecir la rugosidad después del reperfilado se expresa como una función lineal de la rugosidad antes de las actividades de mantenimiento, de la relación de polvo y la rugosidad mínima.

Modelo de Pérdida de Material

Regravillado es la acción de mantenimiento mayor (principal) en los caminos no pavimentados, análogo en importancia a la acción de recubrir un camino pavimentado, así, la frecuencia requerida es una importante decisión de la planificación. La pérdida de material se define durante un período de tiempo como el cambio en el espesor de la capa granular y se usa para estimar cuando el espesor de esta capa, por desgaste, ha disminuido su espesor a un nivel dónde el regravillado es necesario. Paterson identificó tres factores que afectan la capa granular, incidiendo en la pérdida de material: desgaste, tráfico y la influencia de la graduación del material. Las propiedades del materiales, la

³ William Paterson D.O. (1987). "Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. Highway Desing and Maintenance Standards Series", World Bank Transportation department, Washington D.C.

alineación del camino y el ancho del camino, influyen directamente en la pérdida de material de la capa granular de rodado. La relación para predecir la pérdida del material anual de la capa de rodadura, se desarrollo en función de la lluvia mensual, del volumen de tráfico, la geometría del camino y de las características del material granular.

En definitiva, los modelos de deterioro de los caminos no pavimentados, estiman el deterioro de la superficie en función del tipo de pavimento, tránsito, clima, geometría, tipo de material y de las políticas de conservación que se apliquen a los mismos.

Los modelos HDM son usados en más de 60 países en diferentes tipos de estudios de inversión. Predice la actuación del pavimento en el tiempo, bajo el efecto del tráfico y de las acciones de mantenimiento.

El programa desarrollado por el Banco Mundial para apoyar a los profesionales que se desempeñan en el ámbito de la administración de carreteras, incorpora modelos de comportamiento de estructuras de pavimentos que deben ser ajustados a las condiciones particulares de cada país o región donde serán utilizados.

La importancia del proceso de ajustar los modelos de comportamiento está en el impacto económico, ya que debido a la influencia directa en el inicio y progresión de los deterioros del camino, se hace necesaria una adecuada adaptación de ellos, de modo que se pueda efectuar una evaluación económica certera de los proyectos viales.

Este trabajo de Tesis tendrá como objetivo ajustar los modelos de deterioro utilizados en la actualidad por la Dirección de Vialidad de Chile en los caminos no pavimentados de la región de Antofagasta, específicamente los estabilizados con bischofita, los cuales están presente en el programa “Caminos Básico 5000”. Los modelos que se ajustarán son los siguientes:

- Rugosidad máxima - RI_{max}
- Progresión de la rugosidad - RI_{TG2}

- Rugosidad máxima - RI_{\min}
- Pérdida de material - MLA

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En atención a que la investigación se realizará sobre caminos chilenos, es importante describir en general el inventario de la red de carreteras de Chile y en particular la red de caminos de la Región de Antofagasta.

La tabla 1.1 entrega un resumen con información de las características más relevantes de la red vial de responsabilidad del Ministerio de Obras Públicas - MOP, a diciembre del 2004, cuyo detalle está contenido en el documento “Red Vial Nacional, Dimensionamiento y Características – Dic. 2004”, que edita el Departamento de Gestión Vial de la Subdirección de Desarrollo de la Dirección de Vialidad⁴.

Tabla 1.1: Resumen de la Red Vial de Chile

Ítem	Detalle	Longitud en kilómetros	Distribución Porcentual (%)
1	Longitud Total Red Vial	80.672,33	100
2	Longitud Red Pavimentada	16.785,85	20.8
3	Red Vial Solución Básica	5.163,68	6,4
4	Longitud Red Vial No Pavimentada	58.722,80	72.8
5	Longitud de la Red Vial con Doble Calzada	2.285,13	2,8
6	Longitud de la Red Vial Concesionada	2.138,16	2,7
7	Longitud total de 22 Túneles	26,33	
8	Longitud total de 416 Pasarelas (luz libre)	18,14	
9	Longitud total de 47 Ciclovías	179,18	

Como se observa, la Red Vial Chilena tiene 80.672 kilómetros de caminos, de los cuales 63.886 kilómetros corresponden a caminos no pavimentados, y de

⁴ MOP. (Ministerio de Obras Públicas) (abril 2005). Dirección de Vialidad. Subdirección de Planificación y Estudios. Informe anual “Red Vial Nacional Dimensionamiento y Características”.

estos, 4.670 kilómetros han recibido alguna de las soluciones del programa Caminos Básico 5000. Lo que significa que el 79% de la red total son caminos no pavimentados. De aquí la importancia de realizar una buena conservación de ellos y de continuar con el programa de gobierno Caminos Básicos 5000.

El deterioro de los caminos no pavimentados se caracteriza principalmente por su rugosidad y por la pérdida de material de la superficie. Las relaciones de predicción para estos dos parámetros se basan en el análisis del estudio del HDM-4 de Brasil.

Tabla 1.2: Caminos no pavimentados por Regiones

Región	Red Vial No Pavimentada (en km.)			Total (en km.)
	Sol. Básica (asfalto, sal, bischofita, otras)	Ripio	Tierra	
I	246,05	417,07	2.842,56	3.505,68
II	328,03	997,84	3.353,60	4.679,47
III	1.436,08	826,10	3.543,83	5.806,01
IV	240,21	2.884,46	1.327,76	4.452,43
V	822,14	686,30	425,45	1.933,89
VI	307,42	1.563,49	1.204,57	3.075,48
VII	494,70	3.764,85	1.993,93	6.253,48
VIII	142,40	5.186,18	1.948,08	7.276,66
IX	282,50	7.706,85	2.544,31	10.533,66
X	206,90	8.271,25	834,70	9.312,85
XI	62,70	2.605,48	227,76	2.895,94
XII	172,72	2.318,08	362,71	2.853,51
R.M.	421,83	885,59	393,53	1.307,42
Total	5.163,68	38.113,54	20.609,26	63.886,48

En tanto, la tabla 1.2 corresponde a un extracto de la red de caminos no pavimentados por regiones, de responsabilidad del MOP y que se encuentra contenida en el documento “Red Vial Nacional, Dimensionamiento y Características – Dic. 2004”. En lo importante, se detallan los caminos de tierra, ripio y aquellos caminos no pavimentados insertos en el programa Caminos

Básicos 5000, que han recibido soluciones básicas de estabilización, como es el caso de las carpetas granulares estabilizadas con bischofita en la región de Antofagasta.

1.3 OBJETIVOS

Asumiendo que la aplicación directa de las expresiones encontradas para el caso brasileño, no representan fielmente lo que acontece en la realidad chilena y sus regiones, por ser un territorio muy disímil al brasileño, además de presentar en toda su extensión diferentes zonas climáticas, tipos de suelos, topografía, tránsito, etc., es que se plantea la necesidad de ajustar el modelo HDM-4 a la realidad chilena, en particular para los caminos estabilizados con bischofita de la Región de Antofagasta.

1.3.1 Objetivo General

El objetivo principal de la investigación es ajustar los modelos de comportamiento de caminos no pavimentados en HDM-4, específicamente los modelos de rugosidad y pérdida de material.

Con respecto a la progresión de la rugosidad, el modelo existente predice esta variable con valores que escapan de los resultados empíricos existentes, siendo necesario efectuar un ajuste de los actuales modelos. Para tal efecto, se utilizarán mediciones existentes de rugosidad y pérdida de material, las consideraciones y recomendaciones efectuadas a los modelos brasileños expuestos en los estudios hasta hoy realizados, y las actividades de conservación de la Dirección Regional de Vialidad de Chile.

1.3.2 Objetivos Particulares

En tanto que los objetivos particulares que se persiguen en este estudio son los siguientes:

- Comprender los fenómenos que determinan el comportamiento de un camino no pavimentado en el tiempo y la sensibilidad de la condición del camino que se observa ante la incidencia de determinados factores en el

inicio y progresión de los deterioros que se presentan típicamente en este tipo de estructuras.

- Entender la influencia de cada uno de los componentes de las ecuaciones que conforman los modelos de comportamiento de caminos no pavimentados y la sensibilidad de cada una de las variables que actúan en los deterioros estudiados.
- Determinar las variables y parámetros de mayor influencia en la obtención de factores óptimos de ajuste.

1.4 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados, se propuso la siguiente metodología:

- Recopilación de antecedentes bibliográficos (desarrollo de los modelos de comportamiento del HDM en el mundo) y de la base de datos de la Dirección de Vialidad de Chile información referida a la región de Antofagasta, respecto de la estructura de los caminos no pavimentados, tránsito, clima, índice de estado, conservación, etc.
- Con los instrumentos que posee Vialidad se desarrolló una metodología similar a la realizada en Brasil para medir tanto la rugosidad como la pérdida de material.
- Se definió como zona de testigo a los caminos de la Región de Antofagasta.
- Se midió la evolución de rugosidad y pérdida de material.
- Con los resultados obtenidos se calibraron los modelos de deterioro dados por el HDM-4
- Se analizaron los resultados obtenidos con los modelos originales y los propuestos.
- Finalmente, se plantean las conclusiones generales a las que se arribó en el estudio.

1.5 RESUMEN DE LOS CAPÍTULOS

El Capítulo I corresponde a la presente introducción, que contiene el planteamiento del problema, los objetivos, la metodología y el resumen de los capítulos.

El Capítulo II entrega una recopilación de los últimos estudios referente al deterioro de caminos no pavimentados realizados en Chile y el experimento brasileño.

En el Capítulo III se detalla el presente estudio, explicando el diseño y la ejecución de la experiencia.

El Capítulo IV corresponde al análisis de las variables y a la calibración de los modelos de deterioro que incluye el HDM-4. En este punto, considerando los resultados encontrados en la etapa anterior, y los datos con que se dispone en la actualidad, se procederá a ajustar el modelo de rugosidad existente, comparándose los resultados de la nueva modelación con la propuesta por el modelo brasileño.

Finalmente, en el Capítulo V se plantean las conclusiones generales a la que se arribó en el estudio, así como también recomendaciones pertinentes para futuras investigaciones.