



Caracterización y análisis de la estadística Chilena para el diseño de pavimentos empírico-mecanicista

Characterization and analysis of climate statistics for chilean mechanistic-empirical pavement design

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Luis Osorio L.¹, Rodrigo Delgadillo S.¹, Carlos Whar D.¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Obras Civiles
luis.osoriol@alumnos.usm.cl Tel + (56) 32-265-4380

Historial del
artículo:

Recibido
15-06-2015
Aceptado
19-11-2015
Publicado
09-12-2015

Palabras Claves:
Simulación de
tráfico
Calibración
Incidentes
Datos de
Sistemas
Inteligentes
de Transporte

Article history:

Received
15-06-2015
Accepted
19-11-2015
Available
09-12-2015

Keywords:
Traffic Simulation
Calibration
Incidents
Intelligent
Transportation

Resumen

El clima es una de las variables fundamentales que incide en el desempeño de los pavimentos. Los módulos de los materiales bituminosos cambian con la temperatura, la rigidez de los materiales no ligados varía con la humedad y los gradientes térmicos afectan las condiciones de apoyo de las losas de hormigón. A pesar de lo anterior, los métodos de diseño empíricos tradicionales consideran las variables climáticas de manera muy simplista. Investigaciones en las últimas décadas han avanzado hacia un diseño empírico-mecanicista, donde los factores climáticos y las características de los materiales se incorporan con más detalle y precisión. La Guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos AASHTO 2008 (MEPDG), incorpora al clima como una de sus entradas principales, requiriendo información horaria de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, exposición solar y precipitación. En Chile se trabajó en la implementación de la MEPDG para el diseño de pavimentos rígidos a través del proyecto InnovaCorfo 11BPC-10220. Una de las tareas contempló la caracterización, validación y análisis de 17 estaciones climáticas y su relación con los deterioros. El presente trabajo resume las labores de caracterización y análisis de las variables climáticas, presenta la distribución y comparación de los factores ambientales de los climas chilenos e identifica las variables más importantes para cada deterioro en nuevos pavimentos. Los resultados indican que la exposición solar y la oscilación diaria de temperatura, son las variables climáticas más importantes para pavimentos rígidos, para pavimentos flexibles, la temperatura del aire es la variable con mayor importancia, seguida por la precipitación.

Abstract

Weather is one of the main variables influencing in pavement performance. The parameters of bituminous materials change with temperature, the strength of unbounded materials varies with humidity and the thermal gradients affect the binding conditions of concrete slabs. However, traditional empiric design methods consider these climate variables in a very simplistic way. In the last decades researchers have advanced towards a more mechanistic-empirical design, considering the weather and the properties of the materials with more detail and precision. The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide AASHTO 2008 (MEPDG), adds the weather as a main input, requiring information on temperature, relative humidity, wind velocity, solar exposure and precipitations. Chile has been lately working on the MEPDG implementation through the InnovaCorfo 11BPC-10220 project. One of the tasks of the project was the characterization, validation and analysis of 17 climate stations and its relationship with the damages. This study summarizes the development of the characterization and analysis of climate variables, presents the distribution and comparison of the Chilean environmental factors and identifies the main variables for each damage type in new pavements. Results show that solar exposition and the daily temperature variation are the most important climate variables for rigid pavements, while, for flexible pavements, the air temperature affects the most, followed by precipitations.

2. Introducción

Existe consenso en que los factores climáticos afectan el desempeño de los pavimentos, incluso la prueba que genera los modelos empíricos usados en la actualidad ("AASHTO Road Test"), consideró que en algunas pistas no debían circular vehículos para observar el efecto particular del clima en el pavimento.

Los materiales y las estructuras reaccionan de diferente forma frente a distintas solicitaciones climáticas, los módulos de los materiales bituminosos cambian de forma drástica con la temperatura, así cambia también el módulo de los materiales no ligados con la humedad y aunque en pavimentos de hormigón la temperatura no afecta directamente la resistencia, los gradientes en las losas inducen esfuerzos adicionales, fallas prematuras en juntas y agrietamiento. Aunque este hecho es ampliamente aceptado, el procedimiento de diseño empírico utilizado en Chile, AASTHO 93, menciona solo 2 datos relacionados con el medio ambiente; el drenaje y la variación estacional del apoyo de la subrasante, por supuesto existe la limitación conocida de que esta ecuación empírica proviene de resultados de un solo camino y un solo tipo de subrasante (A-6).

Aunque los métodos tradicionales de diseño fueron útiles en el pasado entregando resultados satisfactorios sin una completa evaluación de los factores climáticos, la necesidad de aumentar la eficiencia y confiabilidad de los diseños y a los cambios en el volumen y tipo de circulación, hace necesaria la incorporación de otros enfoques que incluyan mayor nivel de detalle en el diseño. En las últimas décadas las investigaciones desarrolladas en ingeniería vial han avanzado hacia un diseño empírico-mecanicista, en donde los factores climáticos y las características de los materiales se incorporan con mucho más detalle, aumentando significativamente la precisión del diseño. La Guía Empírico Mecanicista de Diseño de Pavimentos (GEMDP) desarrollado por AASTHO (2008), incorpora al clima como una de sus entradas principales requiriendo información horaria de: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, exposición solar y precipitación. El proyecto INNOVA 11BPC-10220 "Adaptación y aplicación de la guía de diseño empírico mecanicista de pavimentos de hormigón AASTHO 2009 GEMPD de EEUU" desarrollado por la Universidad Técnica Federico Santa María, generó en distintos años una base de datos climática con información horaria de 17 estaciones chilenas, distribuidas de norte a sur y tratando de caracterizar la mayor cantidad de climas en ciudades con densidad de caminos considerable.

3. Consideración del Clima en la GDPEM

El comportamiento de todas las capas en la estructura de pavimento es afectada por los factores climáticos [1]. Las propiedades del asfalto dependen de la temperatura, ya que, a bajas temperaturas el asfalto es duro y frágil, mientras que a altas temperaturas se vuelve blando y dúctil, a estas altas temperaturas la carpeta asfáltica es susceptible al ahuellamiento y a bajas temperaturas al agrietamiento térmico. Los pavimentos de hormigón no cambian su resistencia con la temperatura, pero los gradientes de temperatura y humedad inducen esfuerzos y deformaciones adicionales en las losas.

La fluctuación de humedad y temperatura en las capas no ligadas como base, subbase y subrasante, afectan significativamente su desempeño cuando la humedad aumenta superando el valor óptimo, el módulo disminuye y se pierde resistencia cuando la temperatura en estas capas baja los 0°C, se forman cristales de hielo que aumentan su resistencia y rigidez, pero cuando comienza el deshielo la humedad satura a estos materiales, debilitando las capas no ligadas y como consecuencia debilita la estructura completa.

Los cambios en los perfiles de temperatura y humedad en la estructura del pavimento y subrasante, durante toda la vida de diseño son considerados en la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista con el uso de una herramienta de modelamiento climático llamada "El Modelo Climático Integrado Mejorado" o EICM por sus siglas en inglés.

3.1. El Modelo Climático Integrado Mejorado

El modelo EICM es un modelo unidimensional que estima el flujo de calor y humedad en la estructura del pavimento, y con esta información simula los cambios en el comportamiento y características las capas ligadas y subrasante en relación a las condiciones climáticas durante los años de operación. El EICM es constituido por tres componentes [2]:

- El Modelo de Clima, Materiales y Estructura o (CMS model) por sus siglas en inglés, desarrollado por la Universidad de Illinois.
- El Modelo CRREL, capaz entre otras cosas de prever el levantamiento por congelamiento y asentamiento por deshielo, desarrollado por el Ejército de los Estados Unidos sección de Investigación en Regiones Frías y Laboratorio de Ingeniería.
- Modelo de Infiltración y drenaje, (ID Model), desarrollado por la Universidad de Texas A&M.

Las temperaturas en la estructura del pavimento están dominadas por las condiciones atmosféricas en la superficie de este y a pesar

de que es fácil medir la temperatura del aire, no existe una relación directa entre esta temperatura y la del pavimento, para estimar la temperatura de toda la estructura, el modelo CMS emplea un balance de energía donde se incluyen las variables climáticas y características de los materiales. Las ecuaciones utilizadas en este balance energético que determina las temperaturas y humedades en las capas ligadas y no ligadas, son invisibles al usuario y no pueden ser calibradas. En términos generales el balance energético utilizado se describe a continuación:

Dónde: $Q_i - Q_r + Q_a - Q_e \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0$

- Q_i : Radiación de onda corta incidente.
- Q_r : Radiación de onda corta reflejada.
- Q_a : Radiación de onda larga entrante.
- Q_e : Radiación de onda larga emitida.
- Q_c : Transferencia de calor por convección.
- Q_h : Efectos de transpiración, condensación, evaporación y sublimación.
- Q_g : Energía absorbida por el suelo.

Las variables de la ecuación anterior se ilustran en la siguiente figura:

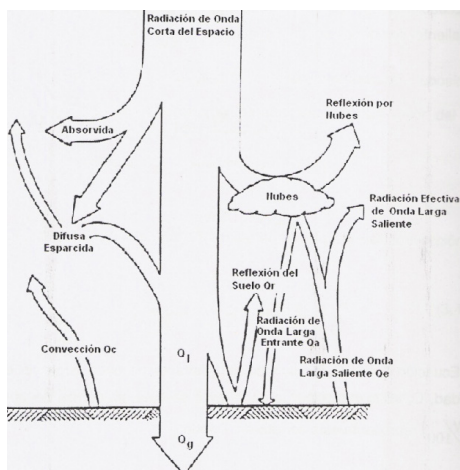


Figura 1: Diagrama del balance de energía considerado por EICM. [2].

Para llevar a cabo el análisis climático requerido para el cálculo del daño y deterioros, la Guía de Diseño requiere de la información de cinco variables relacionadas con el clima con mediciones que deben ser realizadas cada hora para todo el periodo de análisis del proyecto. Las variables consideradas son las siguientes:

- Temperatura del aire. (horaria)
- Precipitación. (diaria)
- Velocidad del viento. (horaria)
- Porcentaje de exposición al sol. (horaria)
- Humedad relativa del aire. (horaria)

La temperatura del aire es requerida en la ecuación del balance de calor que utiliza el EICM, se utiliza en los cálculos de radiación de onda larga emitida por el aire y para el cálculo de transferencia de calor por convección entre la superficie del pavimento y el aire. Adicionalmente a los cálculos de balance y transferencia de calor, la estadística de temperatura es usada para definir los periodos de congelamiento-deshielo dentro del periodo de análisis y determinar el número de ciclos de hielo-deshielo. Los flujos de calor que resultan de la precipitación e infiltración en la estructura de pavimento no son considerados en el balance de energía del EICM, el rol de la precipitación en estas circunstancias no es del todo claro y los métodos para incorporarla en estos balances energéticos no han sido considerados, sin embargo la precipitación es necesaria para calcular la infiltración en la rehabilitación de pavimentos y en el proceso de envejecimiento. La velocidad del viento es requerida en el cálculo del coeficiente de convección entre el aire y la superficie de pavimento. La cantidad (porcentaje) de exposición al sol es utilizada directamente en el balance de energía en el pavimento y corrige la cantidad de radiación que efectivamente alcanza la superficie del pavimento. La radiación incidente solo depende de la información de latitud que es ingresada por el usuario en cada diseño. En el periodo de curado, la humedad relativa del aire tiene un gran impacto en las retracciones superficiales por secado que sufren las losas de hormigón (simple y reforzado) y tiene especial importancia en el espaciamiento inicial de grietas en pavimentos de hormigón reforzados, sin embargo la guía de diseño solo utiliza esta información para cuantificar los cambios de humedad mensual en pavimentos rígidos mediante la incorporación de un gradiente de temperatura equivalente.

4. Base de Datos Climática Desarrollada

El territorio continental de Chile tiene una forma particular, de norte a sur tiene 4.270 km de largo con un ancho promedio de 177 km de este a oeste, es por ello que posee grandes contrastes climáticos, en el norte del país y hasta los 29° de latitud se encuentran climas desérticos, en el sector del centro predominan los climas templados hasta los 38° de latitud Sur, finalmente en el sector austral se cuenta con la presencia de climas lluviosos y fríos[3]. Dentro del proyecto se plantea generar una base de datos climáticos inicial[4] que caracterice algunos de los climas predominantes a lo largo de nuestro país, la selección de las estaciones se realizó considerando dos criterios, en primer lugar se procuró caracterizar la mayor cantidad de climas posibles donde la densidad de caminos sea relevante, en segundo lugar, la elección debió considerar la restricción de la información realmente disponible y qué tan completa se encuentra, de acuerdo a esto, se seleccionaron las siguientes 17 estaciones climáticas que componen la base de datos final del proyecto.

Ciudad	Estación	Lat. Sur Decimal	Long. Oeste Decimal	Elevación
Arica	Chacalluta	18.3514	70.336	63
Calama	El Loa	22.4953	69.9044	2293
Antofagasta	Cerro Moreno	23.4503	70.4411	113
Caldera	D. de Atacama	27.2636	70.7742	204
La Serena	La Florida	19.9172	71.2003	142
Valparaíso	UTFSM	33.0830	71.3500	350
Santiago	Pudahuel	33.5419	70.7944	480
Curicó	General Freire	34.9664	71.2167	225
Chillan	B. O'Higgins	36.5872	72.0400	151
Concepción	Carriel Sur	36.7792	73.0622	12
Los Ángeles	María Dolores	37.4028	72.4225	120
Temuco	Maquehue	38.7700	72.6369	92
Valdivia	Pichoy	39.6511	73.0817	18
Osorno	Cañal Bajo	40.6050	73.0608	61
Puerto Montt	El Tepual	41.4350	73.0975	85
Coyhaique	Teniente Vidal	45.5939	72.1086	310
Punta Arenas	Carlos Ibáñez	53.0050	70.8439	39

Tabla 1: Estaciones climáticas consideradas en el estudio.

La distribución de temperaturas anuales para los climas seleccionados es diversa, en el caso de los climas costeros se observa una clara tendencia según la latitud de la estación, disminuyendo la temperatura media anual hacia el sur, en el caso de los climas continentales, la distribución anual de temperaturas medias no resulta tan clara y las curvas de temperatura media mensual se acoplan en varias ciudades de la zona central, aunque igualmente las temperaturas medias anuales disminuyen con el aumento de la latitud.

4.1. Caracterización del Clima Chileno

Con el fin de caracterizar el clima disponible en la base de datos actual y aunque el programa solo necesita los datos horarios de 5 variables climáticas, existen otros parámetros íntimamente relacionados con el clima que necesitan ser analizados, en este estudio se consideró además de las variables ya mencionadas, la diferencia de temperatura diaria, el índice de congelamiento, los ciclos de hielo/deshielo y los días húmedos¹, estos parámetros son calculados automáticamente por el programa DARWin-ME v1.1 (2009) cuando se carga un nuevo clima al diseño de prueba, la humedad relativa del aire, resulta la variable menos significativa en pavimentos rígidos y su participación es nula en pavimentos flexibles, lo que se ha informado en publicaciones recientes [5], por lo que la variable humedad se omite en el análisis. Las medias anuales de las variables en estudio se resumen en la tabla 2 y 3.

Ciudad	Temp. Med [C°]	Precip [mm].	Días Húmedos [n°]	Índice de Cong. [C- Días]
Arica	18.9	18.6 [*]	6.8	0
Calama	13.5	17.3 [**]	6.6	176.7
Antofagasta	16.6	20.2 [***]	8.3	0
Caldera	14.7	15	7.7	0
La Serena	13.8	77.6	14.1	0
Valparaíso	15.8	291.1	34	0
Santiago	14.6	298.8	37.9	22.2
Curicó	13.9	591.5	47.6	27.6
Chillan	13.2	923.8	76.3	25.6
Concepción	12.6	1127.1	62.2	1.4
Los Ángeles	13.2	934.1	81.3	57.6
Temuco	11.3	1218.9	152.4	44
Valdivia	11.4	1803.4	162.8	37.3
Osorno	10.8	1220.5	159.5	61.2
Puerto Montt	10.2	1625.3	215.5	37.7
Coyhaique	8.4	1026.4	161.4	207
Punta Arenas	6.5	360.2	127.6	146.2

Tabla 2: Resumen de Variables Climáticas (1).

[*]La precipitación media anual real para Arica, corresponde a 0.47 [mm], la cual fue modificada para asegurar la estabilidad del software.

[**]La precipitación media anual para real Calama, corresponde a 2.9 [mm], la cual fue modificada para asegurar la estabilidad del software.

[***] La precipitación media anual para real Antofagasta, corresponde a 2.12 [mm], la cual fue modificada para asegurar la estabilidad del software.

Ciudad	Nº Ciclos de Hielo Deshielo	Velocidad del Viento [km/h]	Exposición al Sol [%]	Delta T° [C°]	Latitud Sur [decimal]
Arica	0	10.3	58	4.16	18.35
Calama	78.7	26.8	85.9	20.78	22.5
Antofagasta	0	12.9	36.9	4.97	23.45
Caldera	0	12.8	48.7	8.46	27.26
La Serena	0	9.3	52.8	6.69	29.92
Valparaíso	0	7.7	58.8	8.48	33.08
Santiago	14.2	8.7	59.7	14.12	33.54
Curicó	18.6	10.2	50	13.59	34.97
Chillan	15.9	9.5	55.5	13.29	36.59
Concepción	1.1	12.8	58.1	9.16	36.78
Los Ángeles	24.8	13.4	51.9	13.44	37.4
Temuco	24	7.8	42.9	11.66	38.77
Valdivia	24.5	9.5	35	11.22	39.65
Osorno	30.4	9.7	30.7	11.35	40.61
Puerto Montt	33.6	10.5	32.7	8.55	41.44
Coyhaique	56.7	9.4	33	9.48	45.59
Punta Arenas	50.3	23.1	35.1	6.54	53.01

Tabla 3: Resumen de variables climáticas (2).

¹ Días húmedos, días en la que precipitación diaria supera los 0.1 [pulg] o 2.54 [mm].

Para cuantificar la dispersión de las variables climáticas se grafica la media de estas variables (más/menos) la desviación estándar que se obtiene del grupo de datos, se presentan en la misma grafica todos los climas a fin de facilitar la comparación, en forma adicional se fabrican histogramas normalizados de frecuencia, para las 5 variables en estudio, más la oscilación térmica diaria, el detalle de estos histogramas se presentan en el Anexo N°1.

Grafico 1: Temperatura media anual, según estación climática.

Grafico 2: Humedad relativa del aire, según estación climática.

Grafico 3: Velocidad media del viento, según estación.

Grafico 4: Exposición al sol, media anual, según estación.

Grafico 5: Precipitación media anual, según estación.

5. Análisis de la Influencia Climática en el Diseño de Pavimentos

la información que es procesada para considerar los factores medioambientales en la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista proviene de datos ingresados directamente por el usuario, desde las características de los materiales (absorción de onda corta, conductividad térmica), hasta la información climática a utilizar (estación según latitud y longitud). En el caso estadounidense, la calidad de la información climática ingresada es a veces de mala calidad, y en estaciones que se encuentran cerca geográficamente, la Guía predice deterioros completamente distintos, lo que no es realista [6], se ha recomendado incluso que esas estaciones con información incompleta o de mala calidad sean eliminadas de la base de datos [7]. Paralelamente al estudio de la calidad de la información se han realizado estudios de la influencia de cada una de las variables climáticas en la predicción de desempeño en pavimentos flexibles, resultando ser la temperatura la variable más importante para los deterioros en pavimentos flexibles [8] y se ha demostrado que un cambio en la estadística de cada variable climática se ve reflejado en los deterioros pronosticados [9]. Es por ello que se requiere un análisis de la estadística disponible para el caso chileno a fin de conocer que variables tienen mayor incidencia en los deterioros pronosticados.

La siguiente sección busca identificar las variables climáticas claves para cada deterioro considerado en el diseño de pavimentos nuevos, rígidos y flexibles, para una estructura tipo y cuantificar el aporte de las variables que resulten significativas para cada deterioro.

Cuatro estructuras de pavimento son utilizadas en el análisis, dos de asfalto y dos de hormigón, con las siguientes características:

Estructura débil de asfalto: 5 cm de carpeta asfáltica de rodadura, 8 cm de carpeta intermedia, 15 cm de base granular (CBR 80) y 15

cm de subbase granular (CBR 40).

Estructura fuerte de asfalto: 5 cm de carpeta asfáltica de rodadura, 12 cm de carpeta intermedia, 15 cm de base granular (CBR 80) y 15 cm de subbase granular (CBR 40).

Estructura débil de hormigón: Losa de 18 cm sobre subbase granular (CBR 50) de 15 cm.

Estructura fuerte de hormigón: Losa de 23 cm sobre subbase granular (CBR 50) de 15 cm.

El espectro de carga considerado en todas las corridas es el que se obtiene de Curacaví y fue revisado en trabajos anteriores [10]. Se utiliza un tráfico inicial tal que, pasado 20 años de vida útil el volumen de tráfico sea igual a 10 y 40 mill de EE, para la estructura débil y fuerte respectivamente. El suelo utilizado en todos los casos corresponde a uno con clasificación AASHTO A-6 con CBR 10%, se considera una mezcla densa de asfalto con betún PG 64-22 para la capa de rodadura e intermedia. En el pavimento rígido, el módulo de ruptura a los 28 días es de 4.7 Mpa y el largo de losa es de 3.5 mts, se utilizan valores por defecto para el resto de los valores de entrada.

Los deterioros pronosticados por la Guía de Diseño de presentan en la tabla 4 y 5, estos deterioros serán las variables dependientes para los dos análisis siguientes, en el primer análisis se identificarán las variables que presentan mayor correlación de Pearson con los deterioros, estas variables serán en el segundo análisis candidatas a un modelo de regresión lineal para cada deterioro y para cada nivel de tráfico. Las correlaciones se calculan con el programa de análisis estadístico, IBM SPSS Statistics 19.0 (2010). Y se resumen en la tabla 6.

Estación Climática	Estructura	Pavimento Rígido		
		Agriet. [%]	Escal. [mm]	IRI [m/km]
Arica	10 Mill EE	31.11	7.15	5.47
	40 Mill EE	0.07	9.54	6.08
Calama	10 Mill EE	87.63	10.81	7.81
	40 Mill EE	0.48	13.8	7.94
Antofagasta	10 Mill EE	11.14	6.37	4.88
	40 Mill EE	0.01	7.83	5.35
Caldera	10 Mill EE	28.21	6.42	5.12
	40 Mill EE	0.03	6.69	4.98
La Serena	10 Mill EE	14.85	6.1	4.81
	40 Mill EE	0.01	6.23	4.67
Valparaíso	10 Mill EE	60.02	7.97	6.19
	40 Mill EE	0.25	8.78	5.76
Santiago	10 Mill EE	61.8	7.07	5.83
	40 Mill EE	0.17	6.13	4.63
Curicó	10 Mill EE	48.86	6.78	5.55
	40 Mill EE	0.02	5.81	4.5
Chillan	10 Mill EE	53.85	6.92	5.67
	40 Mill EE	0.16	5.73	4.46
Concepción	10 Mill EE	28.69	6.67	5.23
	40 Mill EE	0.03	6.36	4.72
Los Ángeles	10 Mill EE	36.91	7.03	5.5
	40 Mill EE	0.08	5.48	4.36
Temuco	10 Mill EE	33.05	6.87	5.38
	40 Mill EE	0.07	6.24	4.68
Valdivia	10 Mill EE	33.23	7.05	5.46
	40 Mill EE	0.08	5.23	4.25
Osorno	10 Mill EE	8.05	6.88	5.07
	40 Mill EE	0.01	5.07	4.18
Puerto Montt	10 Mill EE	4.95	5.88	4.6
	40 Mill EE	0.01	4.24	3.83
Coyhaique	10 Mill EE	15.38	6.37	4.96
	40 Mill EE	0.02	4.58	3.99
Punta Arenas	10 Mill EE	0.11	6.23	4.7
	40 Mill EE	0	4.6	3.99

Tabla 4: Deterioros pronosticados según estación climática, pavimento rígido.

Estación Climática	Estructura	Pavimento Flexible.				
		Def. AC [mm]	Def. Total [mm]	Agriet. Long. [m/km]	Agriet. [%]	IRI [m/k m]
Arica	10 Mill EE	11.59	20.31	234.85	22.8	2.93
	40 Mill EE	21.46	30.58	346.59	31.5	3.24
Calama	10 Mill EE	7.99	16.48	185.04	19.8	2.89
	40 Mill EE	15.33	24.13	225.38	26.7	3.13
Antofagasta	10 Mill EE	8.05	16.52	200.76	20.6	2.82
	40 Mill EE	14.98	23.81	231.06	28	3.05
Caldera	10 Mill EE	7.47	15.81	176.7	19.2	2.78
	40 Mill EE	13.98	22.66	193.18	26	2.99
La Serena	10 Mill EE	6.74	15.41	164.77	20	2.82
	40 Mill EE	12.63	21.56	160.98	27.1	3.02
Valparaíso	10 Mill EE	10.8	20.56	280.3	26.9	3.05
	40 Mill EE	19.89	19.97	335.23	35.8	3.34
Santiago	10 Mill EE	11.19	20.9	240.53	25.3	3.08
	40 Mill EE	20.71	30.76	310.61	33.9	3.38
Curicó	10 Mill EE	10.27	20.46	308.71	28.4	3.14
	40 Mill EE	18.92	29.46	342.8	36.6	3.41
Chillan	10 Mill EE	10.32	20.85	393.94	31.9	3.19
	40 Mill EE	19.04	19.95	435.61	39.9	3.47
Concepción	10 Mill EE	6.52	16.75	361.74	31.3	3.04
	40 Mill EE	12.14	22.64	268.94	37.7	3.22
Los Ángeles	10 Mill EE	8.71	19.04	350.38	30.4	3.15
	40 Mill EE	16.01	26.67	344.7	38	3.39
Temuco	10 Mill EE	7.24	17.03	244.32	25.9	3.04
	40 Mill EE	13.16	23.74	212.12	33.6	3.26
Valdivia	10 Mill EE	7.42	17.97	452.65	34.2	3.17
	40 Mill EE	13.69	24.51	395.83	40.3	3.37
Osorno	10 Mill EE	5.54	15.68	331.44	29.9	3.08
	40 Mill EE	10.33	20.74	214.02	36	3.24
Puerto Montt	10 Mill EE	4.71	14.77	312.5	29.4	3.04
	40 Mill EE	8.81	19.1	165.72	34.7	3.18
Coyhaique	10 Mill EE	5.32	15.47	299.24	29.5	3.09
	40 Mill EE	9.89	20.25	167.99	34.1	3.23
Punta Arenas	10 Mill EE	2.24	11.15	75.57	18.6	2.85
	40 Mill EE	4.24	13.21	10.06	21.2	2.91

Tabla 5: Deterioros pronosticados según estación climática, pavimento flexible.

	Trafico	Deterioro	Temp. Media [°C]	Exposición al Sol [%]	Vel. del Viento [km/h]	Delta T° [°C]	Latitud Sur [decimal]	Precip. [mm]	Días Húmedos [Días]	Índice de Congelamiento [°C-Días]	Ciclos de Hielo Deshielo [n°]
Hormigón	10 Mill EE	Agrietamiento [%]	0.428	0.847	0.166	0.738	-0.434	-0.268	-0.479	0.025	0.133
		Escalonamiento [mm]	0.245	0.774	0.533	0.697	-0.424	-0.278	-0.355	0.344	0.464
		IRI [mts/km]	0.321	0.839	0.418	0.752	-0.442	-0.286	-0.417	0.244	0.365
	40 Mill EE	Agrietamiento [%]	0.259	0.808	0.434	0.689	-0.388	-0.29	-0.361	0.272	0.392
		Escalonamiento [mm]	0.574	0.804	0.476	0.314	-0.762	-0.599	-0.658	0.076	0.136
		IRI [mts/km]	0.571	0.804	0.482	0.317	-0.763	-0.605	-0.66	0.081	0.139
Asfalto	10 Mill EE	Deformación AC [mm]	0.834	0.566	-0.366	0.207	-0.65	-0.342	-0.605	-0.495	-0.467
		Deformación Total [mm]	0.679	0.448	-0.486	0.281	-0.441	-0.077	-0.387	-0.465	-0.421
		Agriet. Long. [mts/km]	-0.02	-0.151	-0.504	0.258	0.186	0.754	0.401	-0.195	-0.109
		Agriet	-0.218	-0.263	-0.512	0.235	0.411	0.84	0.561	-0.081	-0.018
		Fatiga [%]	-0.193	-0.12	-0.454	0.423	0.411	0.708	0.482	0.022	0.098
		IRI	-0.193	-0.12	-0.454	0.423	0.411	0.708	0.482	0.022	0.098
	40 Mill EE	Deformación AC [mm]	0.841	0.586	-0.344	0.218	-0.668	-0.359	-0.621	-0.485	-0.454
		Deformación Total [mm]	0.674	0.395	-0.27	0.247	-0.6	-0.191	-0.438	-0.355	-0.299
		Agriet. Long. [mts/km]	0.566	0.333	-0.436	0.298	-0.357	0.16	-0.234	-0.45	-0.372
		Agriet	0.054	-0.085	-0.611	0.273	0.176	0.691	0.347	-0.262	-0.185
		Fatiga [%]	0.192	0.151	-0.514	0.45	0.05	0.438	0.143	-0.188	-0.104
		IRI	0.192	0.151	-0.514	0.45	0.05	0.438	0.143	-0.188	-0.104

Negrita + cursiva, la correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral). Cursiva, la correlación es significante al nivel 0.05 (bilateral).

La segunda parte del análisis se concentra en identificar que variables relacionadas con el clima, son significativas para los deterioros considerados en la Guía de Diseño, para ello se propone la creación de modelos de regresión multivariable utilizando el método de pasos sucesivos o "Stepwise", en donde los deterioros serán la variable dependiente y cada una de las variables relacionadas con el clima se considera independiente, esta última consideración no es completamente cierta pues existen variables climáticas relacionadas entre sí, en estos casos es necesario identificar estas variables y utilizar (cuando sea posible) variables sin correlaciones fuertes entre ellas en un mismo modelo. Las variables que el algoritmo de regresión selecciona como significativas se resumen en la tabla 7, adicionalmente la última columna informa el coeficiente de determinación R2 corregido, como indicador de la variabilidad de la aproximación.

Finalmente se cuantifica el aporte de cada variable al modelo, con ello se es capaz de ordenar las variables y es posible identificar, que variable es la más importante en cada modelo. Los modelos, y el aporte de cada variable se calculan utilizando el programa IBM SPSS Statistics 19.0 (2010).

Modelos Pavimento Rígido		Variable 1	Variable 2	Variable 3	R ²
10 Mil I EE	Agrietamiento [%]	Exp al Sol	Delta °T	V. del Viento	0.85 8
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	Ciclos de H/Dh	T° Media	0.80 6
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	Delta °T	-	0.81 6
40 Mil I EE	Agrietamiento [%]*	Exp al Sol	Ciclos de H/Dh	-	0.75
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	Latitud	Ciclos de H/Dh	0.84 2
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	Latitud	Ciclos de H/Dh	0.84 6
Modelos Pavimento Flexible		Variable 1	Variable 2	Variable 3	R ²
10 Mil I EE	Ahuellamiento AC [mm]**	T°Med.	Delta °T	V. del Viento	0.84 7
	Ahuellamiento Total [mm]**	T°Med.	Delta °T	V. del Viento	0.76 7
	Agriet. Long. [mts/km]***	Precipitación	T° Media	-	0.77 9
	Agriet. Fatiga [%]***	Precipitación	T° Media	-	0.77
	IRI [mts/km]	T°Med.	-	-	0.46 8
40 Mil I EE	Ahuellamiento AC [mm]**	T°Med.	Delta °T	V. del Viento	0.84 9
	Ahuellamiento Total [mm]	T°Med.	-	-	0.41 8
	Agriet. Long. [mts/km]	T°Med.	Precipitación	Delta °T	0.69 9
	Agriet. Fatiga [%]	Precipitación	T° Media	-	0.72 6
	IRI [mts/km]	V. del Viento	Delta °T	-	0.63 6

Tabla 6: Variables significativas, en el modelo de regresión lineal multivariable seleccionado

[*] El agrietamiento calculado para 40 mill. de EE, es muy bajo (todos menores a 0.5%), el modelo no resulta confiable.

[**] El modelo con mayor R², considera la variable Latitud, la cual es eliminada del modelo por tener una alta correlación (0.910) con la variable Temperatura Media, que es la de mayor aporte del modelo.

[***] El modelo con mayor R², considera la variable días húmedos, la cual es eliminada por tener una alta correlación (0.873) con la variable Precipitación que es la de mayor aporte del modelo.

Para cuantificar el aporte de cada variable al modelo considerado se utiliza la correlación semi-parcial. La correlación semi-parcial se refiere a la correlación entre una variable dependiente (Y) y un conjunto de variables explicativas (xi), el cuadrado de la correlación semi-parcial de cada variable en el modelo es la proporción de la variabilidad de Y, debida exclusivamente al aporte de la variable en análisis, estos resultados se muestran en la tabla 8.

Modelos Pavimento Rígido		Variable	% Aporte	Variable	% Aporte
10 Mill EE	Agrietamiento [%]	Exp al Sol	33.41%	Delta °T	14.14%
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	12.67%	Ciclos de H/Dh	20.79%
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	27.35%	Delta °T	13.54%
40 Mill EE	Agrietamiento [%]*	Exp al Sol	62.73%	Ciclos de H/Dh	12.82%
	Escalonamiento [mm]	Exp al Sol	7.56%	Latitud	21.34%
	IRI [mts/km]	Exp al Sol	7.40%	Latitud	21.72%
Modelos Pavimento Flexible		Variable	% Aporte	Variable	% Aporte
10 Mill EE	Ahuellamiento AC [mm]	T°Med.	61.94%	Delta °T	14.36%
	Ahuellamiento Total [mm]	T°Med.	64.00%	Delta °T	14.75%
	Agriet. Long. [mts/km]	Precipitación	80.64%	T° Media	23.81%
	Piel de cocodrilo [%]	Precipitación	75.17%	T° Media	9.42%
	IRI [mts/km]	T°Med.	50.13%	-	-
40 Mill EE	Ahuellamiento AC [mm]	T°Med.	64.00%	Delta °T	14.75%
	Ahuellamiento Total [mm]	T°Med.	45.43%	-	-
	Agriet. Long. [mts/km]	T°Med.	65.29%	Precipitación	29.92%
	Piel de cocodrilo [%]	Precipitación	76.04%	T° Media	28.62%
	IRI [mts/km]	V. del Viento	47.89%	Delta °T	41.73%

Tabla 7: Aporte de cada variable significativa al modelo lineal generado.

6. Conclusiones

El presente estudio, donde se analizan las características del clima chileno y su relación con el diseño de pavimentos Empírico-Mecanicista, es posible concluir:

El clima nacional presenta una variabilidad que resulta sorprendente en relación al área continental que se abarca en el estudio, la base de datos actual caracteriza gran parte de ellos y se considera adecuada para la implementación de la Guía de Diseño en el territorio nacional.

La imposibilidad de calibrar los modelos climáticos de la Guía de Diseño, exige que la información climática que se ingresa al programa sea de la mejor calidad, la exactitud, cantidad de datos faltantes y extensión de la base de datos resulta clave en los deterioros pronosticados, bases de datos con mediciones horarias, sin datos faltantes y de larga extensión generaran deterioros más realistas y con menos incertidumbre, por el contrario, bases de da-

tos incompletas y de corta duración generaran deterioros acordes al clima, pero con incertidumbre sobre si la ventana de tiempo utilizada caracteriza de buena forma o no al clima en cuestión.

El clima es un factor fundamental entre los parámetros de entrada para el diseño de pavimentos nuevos, se observa que los deterioros pronosticados al cambiar solo esta variable resultan muy diferentes, en pavimentos rígidos se observan para la misma estructura y tráfico, agrietamientos que van desde 87 % (Calama) hasta 0.11 % (Punta Arenas), el escalonamiento en las losas de hormigón varía de 13.8 mm (Calama) a 4.2 mm (Puerto Montt), en pavimentos flexibles, para un tráfico de 40 mill. de EE existen deformaciones permanentes en la carpeta de rodadura, entre 21.46 mm (Arica) y 4,24 mm (Punta Arenas), el agrietamiento por Fatiga presenta variaciones entre un 40.3% (Valdivia) y 21.2 % (Punta Arenas), lo que confirma la gran influencia e importancia de los efectos climáticos en la Guía de Diseño.

El comportamiento de las variables climáticas es fundamental en la predicción de los deterioros y si bien las medias anuales nos sirven para caracterizar inicialmente los climas, la forma de la distribución en los histogramas ayuda a identificar fenómenos que tienen directa implicancia en los deterioros, (máximos dobles y/o características de distribución: curtosis y asimetría). Los climas donde los histogramas de temperatura tienden a acoplarse (Curicó y Chillan; Valdivia y Temuco) presentan agrietamientos y escalonamientos similares en pavimentos rígidos y ahuellamientos casi idénticos en pavimentos flexibles, lo que comprueba la dependencia del deterioro con la temperatura. El agrietamiento transversal en las losas de hormigón está directamente relacionado con la diferencia de temperatura diaria, los valores máximos de agrietamiento 87.63 % y 61.80 % coinciden con los climas que presentan frecuentemente diferencias entre la temperatura máxima y mínima del día por sobre los 18 C°.

La exposición al sol, es la variable más importante, en el diseño de pavimentos rígidos, seguido de la oscilación térmica diaria, la cantidad de radiación incidente definida por la latitud de la estación climática y corregida por la nubosidad, controla el régimen térmico en las losas y los esfuerzos asociados al alabeo y agrietamiento, climas despejados y con latitudes norte mostrarán mayor deterioro, la diferencia de temperatura diaria es un buen indicador de la magnitud del cambio en los gradientes térmicos de las losas y se relaciona directamente con los deterioros, climas con mayor oscilación térmica mostrarán mayor y más temprano agrietamiento. La temperatura del aire, directamente relacionada con la radiación solar incidente, resulta la variable que posee mayor correlación y es la más importante en los deterioros en pavimentos flexibles, lo que coincide con estudios anteriores, la precipitación es clave en los agrietamientos relacionados a fatiga de los materiales ligados con asfalto, los climas con precipitación anual promedio > 600 mm presentan por lo general mayor agrietamiento longitudinal y piel de cocodrilo.

7. Agradecimientos

Este trabajo está parcialmente financiado por CONICYT, bajo el proyecto FONDECYT 11110255, los datos para la ampliación de la base climática, fueron proporcionados por Guillermo Navarro S. y Jorge Carrasco C. de la Dirección Meteorológica de Chile, su apoyo se agradece. Agradecimientos especiales a la Dirección Nacional de Vialidad y al Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile.

8. Referencias

- [1] Zapata, Claudia Elena, et al. Incorporation of environmental effects in pavement design. Road Materials and Pavement Design, 2007, vol. 8, no 4, p. 667-693.
- [2] Ara, Inc, ERES Consultants Division. Part 2 Design Inputs, Chapter 3, Environmental Effects. Guide for Mechanistic- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavements Structures. Final Report. Champaign, Illinois. 2004
- [3] DMC, Dirección Meteorológica de Chile. Guía Climática Práctica. Santiago, Dirección Meteorológica de Chile, 2008.
- [4] Úbeda, N. et al. "Desarrollo de Bases de Datos Climáticas Chilenas para Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos". Anales del 10º Congreso Internacional PROVIAL, Santiago, Chile, 8 al 11 de Octubre de 2012.
- [5] Delgadillo, Rodrigo, et al. Generating Hourly Climatic Data from Available Weather Information for Pavement Design. En Annual Meeting of the Transportation Research Board. 2014.
- [6] Zaghoul, Sameh, et al. Investigations of environmental and traffic impacts on mechanistic-empirical pavement design guide predictions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2006, vol. 1967, no 1, p. 148-159.
- [7] Johanneck, Luke; Khazanovich, Lev. Comprehensive evaluation of effect of climate in mechanistic-empirical pavement design guide predictions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2010, vol. 2170, no 1, p. 45-55.
- [8] Byram, Daniel, et al. Sensitivity Analysis of Climatic Influence on MEPDG Flexible Pavement Performance Predictions. En Transportation Research Board 91st Annual Meeting. 2012.
- [9] Qiao, Yaning, et al. Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life. En Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. 2013.

[10] Delgadillo, R., C. Wahr and J.P. Alarcon. "Towards the Implementation of the MEPDG in Latin America, Preliminary Work Carried Out in Chile". Transportation Research Record, No. 2226, p. 142-148, 2011.

8. Anexos

En el siguiente anexo se presentan los histogramas de las variables en estudio, para todas las estaciones climáticas comprometidas en el presente trabajo, por comodidad se han separado las 17 estaciones climáticas en 2 grupos. El grupo 1 contiene a los climas con estadísticas completas y el grupo 2 a los climas en donde la estadística fue rellenada [5], según esto los grupos quedan conformados como sigue:

Grupo 1 – Climas completos.

Arica
Antofagasta
La Serena
Valparaíso

Santiago
Concepción
Temuco
Puerto Montt
Punta Arenas
Grupo 2 – Climas rellenados.
Calama
Caldera
Curicó
Chillan
Los Ángeles
Valdivia
Osorno
Coyhaique

Los histogramas que se presentan en esta sección son los siguientes:

Temperatura horaria [°C].

Diferencia de temperatura diaria [°C] (T Max – T Min).

Velocidad del viento, media diaria [km/h].

Exposición al sol, media Diaria [%].

Humedad relativa del aire, media diaria [%].

