

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**DESARROLLO Y REDACCIÓN DE PROTOCOLOS PARA LA
INFORMACIÓN OBTENIDA DESDE LOS ACTIVOS DE DESEMPEÑO E
INVENTARIO DE PAVIMENTOS, SISTEMAS DE PESAJE EN
MOVIMIENTO, ESTACIONES METEOROLÓGICAS E
INSTRUMENTACIÓN DE PUENTES. APLICABLE A BASES DE
LICITACIÓN PARA FUTURAS CONCESIONES**

ABEL LUCIANO NOVA PIZARRO

Ingeniero Civil

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Diciembre de 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

**DESARROLLO Y REDACCIÓN DE PROTOCOLOS PARA LA
INFORMACIÓN OBTENIDA DESDE LOS ACTIVOS DE DESEMPEÑO E
INVENTARIO DE PAVIMENTOS, SISTEMAS DE PESAJE EN
MOVIMIENTO, ESTACIONES METEOROLÓGICAS E
INSTRUMENTACIÓN DE PUENTES. APLICABLE A BASES DE
LICITACIÓN PARA FUTURAS CONCESIONES**

Memoria de Título y Tesis de Grado presentada por
ABEL LUCIANO NOVA PIZARRO

Como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil
y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
GABRIEL GARCIA SAA

Diciembre de 2021

TÍTULO DE LA TESIS

DESARROLLO Y REDACCIÓN DE PROTOCOLOS PARA LA INFORMACIÓN OBTENIDA DESDE LOS ACTIVOS DE DESEMPEÑO E INVENTARIO DE PAVIMENTOS, SISTEMAS DE PESAJE EN MOVIMIENTO, ESTACIONES METEOROLÓGICAS E INSTRUMENTACIÓN DE PUENTES. APLICABLES A BASES DE LICITACIÓN PARA FUTURAS CONCESIONES

AUTOR

ABEL LUCIANO NOVA PIZARRO

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de Ingeniero Civil y el grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Apellido Apellido _____

Nombre Apellido Apellido _____

Nombre Apellido Apellido _____

Valparaíso, Chile, diciembre de 2021.

Agradecimientos

Agradecimientos a la Dirección General de Investigación, Innovación y Postgrado de la Universidad Técnica Federico Santa María por el apoyo a través de la beca de arancel que hizo posible el desarrollo de esta tesis.

Agradecimientos a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por el apoyo a través de la beca de estudios de postgrado CONICYT-PFCHA/Magíster Nacional/2019-22131133.

Agradecimientos al equipo de trabajo que formó parte del proyecto FONDEF IT 16I10008, tanto compañeros como profesores por el apoyo y la retroalimentación de los últimos años.

Finalmente, le agradezco a toda mi familia y amigos por el apoyo incondicional durante todo mi proceso educativo

Resumen

En las carreteras del país, se ha detectado que la información recabada presenta problemas como dispersión en fuentes, ausencia de metadatos, formatos no siempre compatibles con registros similares y ausencia de verificaciones claras. Por lo anterior, la presente investigación buscó establecer requisitos y procedimientos que se reunan en la redacción de protocolos de gestión de información sobre el inventario y desempeño de pavimentos, sistemas de pesaje en movimiento, estaciones meteorológicas viarias y finalmente la instrumentación de puentes. Se decidió trabajar sobre estos activos por su importante relación a la gestión de pavimentos y en el caso de puentes, por su prometedora relevancia en la gestión de los puentes de carreteras concesionadas.

Así, se conceptualizó un proceso general que estableciera los pasos que debiese cumplir un grupo de datos, desde que son recolectados hasta ser dispuestos a un usuario interesado. Este proceso se formó en base a cuatro temáticas principales: recolección de datos, almacenamiento y procesamiento, validación de registros y la disposición de ellos.

Sobre la recolección de datos, en los casos de estaciones meteorológicas y WIM se propusieron procedimientos en función de la frecuencia de envío, establecimiento de formatos y acciones a tomar en caso de problemas de comunicación, mientras, en inventario y desempeño, se dispuso a mantener el estado actual de entrega, debido a su procedimiento manual.

En el caso del almacenamiento y procesamiento, se establecieron exigencias a cumplir por parte de la concesionaria que aseguren que los registros no se vean corrompidos ni perdidos, que se generen continuamente copias de seguridad en la información y que la capacidad de almacenamiento no se vea sobrepasada por el volumen de esta.

Para los procesos de validación, en el caso de información climática, se propuso seguir la norma española UNE 500540, mientras que para la información de WIM se proponen niveles de validación en función de una cantidad mínima, rangos y coherencia entre variables y finalmente, en el caso del inventario y desempeño se dispone la necesidad de que se establezcan controles de calidad y de aceptación por parte de la concesionaria y que con ellos puedan realizar un seguimiento a la información consiguiendo mayor confianza en los registros.

En lo relacionado a la disposición de información, los protocolos llegan a requerir que la concesionaria desarrolle un portal web que permita que esta información se encuentre disponible a cualquier usuario

interesado en ella.

Finalmente, para la instrumentación de puentes, se observó un estado nacional muy incipiente, asociado en general a proyectos independientes y no a procesos ya concretos. Lo anterior, no permite el desarrollo de los protocolos buscados. Frente a ello, se decidió desarrollar la guía Normas y Lineamientos de Evaluación y Monitoreo Estructural para Puentes Chilenos como una ayuda a generalizar el proceso de monitoreo e instrumentación de puentes nacionales, para que en un futuro se puedan redactar dichos protocolos.

Abstract

On the country's highways, it has been detected that the information collected presents problems such as dispersion in sources, absence of metadata, formats not always compatible with similar records, absence of clear verifications, and others.

Therefore, this research seeks to establish requirements and procedures that are based on the drafting of information management protocols on road assets: road inventory and performance, Weigh-in-motion systems (WIM), road weather stations and finally the instrumentation of bridges. It was decided to work on these assets because of their important relationship to pavement management and, in the case of bridges, because of their promising relevance in the management of concessioned highway bridges.

Thus, the first thing was to conceptualize a general process that would establish the steps that a group of data should follow, from when they are collected until they are made available to an interested user. This process was formed based on four main themes: data collection, storage and processing, validation of records and their disposition.

Regarding data collection, in the cases of meteorological stations and WIM, procedures were proposed depending on the frequency of dispatch, establishment of formats and actions to take in case of communication problems, while, in inventory and performance, it was prepared to maintain the current state of delivery, due to its manual procedure.

In the case of storage and processing, requirements were established by the concessionaire to be met to ensure that the records are not corrupted or lost, that backup copies of the information are continuously generated and that the storage capacity is not exceeded. by the volume of this.

For the validation processes, in the case of climate information, it was proposed to follow the Spanish standard UNE 500540, while for the WIM information, validation levels are proposed based on a minimum amount, ranges and coherence between variables and finally, in In the case of inventory and performance, there is a need to establish quality and acceptance controls by the concessionaire and that with them they can track the information, achieving greater confidence in the records.

And in relation to the provision of information, the protocols come to require that the concessionaire develop a web portal that allows this information to be available to any user interested in it.

Unfortunately, in the case of bridge instrumentation, a very incipient national state was observed, generally associated with independent projects and not with already concrete processes. The above does not allow the development of the sought protocols. Faced with this, it was decided to develop the guide Norms and Guidelines for Structural Evaluation and Monitoring for Chilean Bridges as an aid to generalize the process of monitoring and instrumentation of national bridges, so that in the future such protocols can be drawn up.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XII
Contenido	XX
Índice de figuras	XXIV
Índice de tablas	XXVIII
Hipótesis	29
Objetivos	30
1. Gestión de Información	31
2. Información sobre Inventario y Desempeño de Pavimentos	33
2.1. Definición de Información de Inventario y Desempeño de Pavimentos	34
2.1.1. Selección de información apropiada para la redacción de protocolos	34
2.2. Almacenamiento y Manejo de Datos	39
2.2.1. Casos acerca del almacenamiento y manejo de datos	39
2.2.2. Selección de requisitos para el manejo y almacenamiento para la redacción de protocolos	41
2.3. Procedimientos de Validación de Registros	43
2.3.1. Control de Calidad	44
2.3.2. Control de Aceptación	45
2.3.3. Casos de Validación sobre los registros	47
2.3.4. Selección de requisitos sobre validación de registros para la redacción de protocolos	50
2.4. Disponibilidad de la Información	52
2.4.1. Sistemas de Georreferenciación	52
2.4.2. Seguridad de la información	54
2.4.3. Sistemas de disponibilidad y plataformas	55

2.4.4.	Selección de requisitos de disponibilidad para la redacción de protocolos	61
2.5.	Protocolo Sobre la Información de Inventario y Desempeño de Pavimentos	63
2.5.1.	Proceso de generación de tramos, secciones sobre un tramo y la bitácora del tramo	63
2.5.2.	Sobre la seguridad de los datos y archivos	68
2.5.3.	Sobre el almacenamiento de los datos	69
2.5.4.	Sobre el Proceso de Validación	70
2.5.5.	Sobre la Disponibilidad de la Información	74
3.	Información de Sistemas de Pesaje en Movimiento	99
3.1.	Captura de Información de Pesaje en Movimiento	100
3.1.1.	Comparación Entre Tecnologías de equipos WIM	101
3.1.2.	Normativa de Requisitos para Sistemas WIM	103
3.1.3.	Redes de Sistemas WIM	109
3.1.4.	Selección de Especificaciones para la Instalación, Mantenimiento y obtención de información del Sistema WIM	110
3.2.	Almacenamiento y Procesamiento de Información de Sistemas de Pesaje en Movimiento	112
3.2.1.	Selección de Especificaciones para el Tratamiento de la Información	116
3.3.	Procedimientos de Validación para la Información de Pesaje en Movimiento	117
3.3.1.	Validación de registros vehículo a vehículo	117
3.3.2.	Sistemas de validación para grupos de datos	119
3.3.3.	Selección de especificaciones para procedimientos de Validación en información de Sistemas de Pesajes en Movimiento	121
3.4.	Disponibilidad de Información de Pesaje en Movimiento	123
3.4.1.	Long-Term Pavement Performance	123
3.4.2.	Balanzas Selectivas en Chile	124
3.4.3.	Definición de Disponibilidad de Información	125
3.5.	Protocolo Sobre la Información de Sistemas de Pesaje en Movimiento	126
3.5.1.	Bitácora y metadatos de la estación de pesaje en movimiento	128
3.5.2.	Recopilación de información	130
3.5.3.	Validación de los datos	134
3.5.4.	Seguridad de los datos y archivos	136
3.5.5.	Almacenamiento de los datos	137
3.5.6.	Publicación de la información	138
4.	Información de Estaciones Meteorológicas	141
4.1.	Captura de Información de Estaciones Meteorológicas	142
4.1.1.	Tipo de estaciones meteorológica	142
4.1.2.	Variables Meteorológicas y Sensores	142
4.1.3.	Metadatos	146
4.1.4.	Definición de Requisitos para una estación meteorológica viaria automática y la captura de información	148
4.2.	Transmisión y Almacenamiento de la Información de Estaciones Meteorológicas	151
4.2.1.	Transmisión de Información	151

4.2.2.	Almacenamiento de la Información	152
4.2.3.	Definición de Requisitos para la Transmisión y Almacenamiento de Información	155
4.3.	Validación de Registros Meteorológicos	156
4.3.1.	UNE (2004) Directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automática	156
4.3.2.	Zahumensky (2004) Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations	158
4.3.3.	Andresen et al, (2002) Quality Control of Meteorological Observations	159
4.3.4.	Definición de Requisitos para la Validación de Registros Meteorológicos	160
4.4.	Disponibilidad de la Información Meteorológica	162
4.4.1.	Dirección Meteorológica de Chile	162
4.4.2.	MERRA	163
4.4.3.	Definición de Requisitos de Información Climática	165
4.5.	Protocolo Sobre la Información de Estaciones Meteorológicas	166
4.5.1.	Sobre la recopilación de información	167
4.5.2.	Sobre la validación de los datos	172
4.5.3.	Metadatos y bitácora de la estación meteorológica	174
4.5.4.	Sobre la seguridad de los datos y archivos	182
4.5.5.	Sobre el almacenamiento de los datos	183
4.5.6.	Sobre la publicación de la información	184
5.	Recomendaciones para el Monitoreo de Salud Estructural de Puentes Chilenos	186
5.1.	Motivación y Objetivos de Monitoreo	188
5.2.	Inventario y Conocimiento de Estado de la Red	189
5.3.	Priorización y Elección de Puentes a Monitorear	196
5.3.1.	Criterios de Priorización Internacionales	197
5.3.2.	Propuestas de Priorización Nacionales	197
5.4.	Análisis de Condición Estructural	201
5.4.1.	Puentes Existentes	201
5.4.2.	Puentes Nuevos	207
5.5.	Estados Límites y Respuestas Críticas	208
5.6.	Definición de Variables Físicas	211
5.7.	Monitoreo de la Estructura	211
5.7.1.	Monitoreo Continuo	212
5.7.2.	Monitoreo Puntual	213
5.7.3.	Monitoreo de Salud Estructural	213
5.8.	Evaluación Económica	214
5.9.	Sensorización	216
5.9.1.	Selección de Sensores	216
5.10.	Procesamiento de Señales y Caracterización de Daño	222
5.10.1.	Gestión de la Información	222
5.10.2.	Caracterización del Daño	231
5.11.	Normas y Lineamientos de Evaluación y Monitoreo Estructural para Puentes Chilenos	236

5.11.1. Guía	236
5.11.2. Motivación y Objetivos de Instrumentación	236
5.11.3. Inventario y Conocimiento del Estado Presente de la Red	237
5.11.4. Priorización y elección de Puentes a Monitorear	239
5.11.5. Análisis de condición Estructural	240
5.11.6. Definición de respuestas críticas para el comportamiento	242
5.11.7. Monitoreo de la Estructura	243
5.11.8. Evaluación Técnica y Económica	243
5.11.9. Definición de Variables Físicas	243
5.11.10. Caracterización de daño	251
5.11.11. Publicación de Resultados	251
5.11.12. Obtención de Resultados y Toma de Decisiones	253
Conclusiones y Recomendaciones	255
Referencias	267
A. Información capturada por proyectos viales	268
A.1. Proyecto PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure)	268
A.2. Estados Unidos	270
A.2.1. Long-Term Pavement Performance	270
A.2.2. NCHRP Report 820 - Framework for a Pavement-Maintenance Database System	273
A.2.3. Plan for the developing a Materials Performance Database for the Texas Department of Transportation	274
A.3. LTPP-LanammeUCR	275
A.4. LTPP-Australia	277
A.5. Chile	279
A.5.1. Bases de Licitación de Obras Viales Concesionadas	279
A.5.2. Proposiciones de Acciones de Mantenimiento (PAM) y Estado de la Calzada y Bermas para Caminos Pavimentados de la Red Vial Nacional	279
A.5.3. FONDEF IT16I10008	281
B. Tecnología y redes de sistemas WIM	285
B.1. Culway	285
B.2. Plate-in-Road/ Bending Plate	286
B.3. Plate-in-Road/ Capacitance WIM	287
B.4. Single Load Cells	288
B.5. Sensores Piezoeléctricos	288
B.5.1. Sensores de película piezoeléctrica	289
B.5.2. Sensores de piezoeléctricos cerámicos	289
B.5.3. Sensores piezoeléctricos de cuarzo	289
B.5.4. Sensores de Fibra Óptica	290
B.6. Información generada en Europa	290

B.7.	Redes de pesaje en movimiento	291
B.7.1.	Red de Pesajes en Movimiento De Estados Unidos y Long-Term Pavement Performance	291
B.7.2.	Red de Pesajes en Movimiento para Control de Norma en Francia	292
B.7.3.	Red de Pesajes en Movimiento para Control de Norma en los Países Bajos	293
B.7.4.	Chile	295
C.	Variables climáticas y sensores	298
C.1.	Temperatura	298
C.1.1.	Equipos de medición	299
C.2.	Presión Atmosférica	301
C.2.1.	Definición y escalas	301
C.2.2.	Equipos de medición	301
C.3.	Humedad	302
C.3.1.	Definición y Escalas	302
C.3.2.	Equipos de Medición	303
C.4.	Viento de Superficie	305
C.4.1.	Definición y Escalas	305
C.4.2.	Equipo de Medición	305
C.5.	Precipitación	307
C.5.1.	Definición y Escalas	307
C.5.2.	Instrumentos de Medición	307
C.6.	Radiación	308
C.6.1.	Definición y Escalas	308
C.6.2.	Instrumentos de Medición	310
C.7.	Duración de la Insolación	311
C.7.1.	Definición y Escala	311
C.7.2.	Instrumentos de Medición	311
C.8.	Visibilidad	311
C.8.1.	Definición y Escala	311
C.8.2.	Instrumentos de Medición	312
D.	Cargas y sensores de medición para puentes	314
D.1.	Cargas y Acciones Ambientales	314
D.1.1.	Cargas de vehículos	314
D.1.2.	Carga de viento	315
D.1.3.	Movimientos sísmicos	315
D.1.4.	Temperatura y humedad	316
D.1.5.	Vibraciones	316
D.1.6.	Desplazamiento	319
D.1.7.	Deformación	321
D.2.	Socavación	322
D.2.1.	Componentes de la Socavación	323

D.2.2. Instrumentación mediante dispositivos de uso simple	325
D.2.3. Instrumentación mediante dispositivos de pulsos o radar.	326
D.2.4. Instrumentación mediante dispositivos de barras enterradas o conducidas	327
D.2.5. Instrumentación mediante dispositivos de ondas de sonido	328
D.2.6. Instrumentación mediante dispositivos de conductividad térmica	329
D.2.7. Costos de sistemas de monitoreo de socavación	330
D.2.8. Monitoreo de la socavación basado en vibraciones	331
D.2.9. Monitoreo de socavación general	332

Índice de figuras

1.0.1. Proceso de gestión de datos en retrospectiva. Basado de OMM (OMM, 2011)	31
2.3.1. Porcentaje de agencias que tienen un plan de gestión de calidad en función del tamaño de la red (Flintsch y McGhee, 2009)	43
2.3.2. Métodos más utilizados para un QC (Flintsch y McGhee, 2009)	44
2.3.3. Métodos más utilizados para un QA (Flintsch y McGhee, 2009)	46
2.3.4. Actividades durante el proceso de gestión de calidad de datos (FHWA, 2013)	47
2.3.5. Extracto requisitos nivel D (FHWA, 2013)	48
2.3.6. Revisión visual de desempeño de vías en el tiempo (IRI) (Sweere et al., 1998)	49
2.4.1. Claves para la denominación de una sección de la red TxDOT (Zhang et al., 1999b)	52
2.4.2. Definición de secciones usando el sistema TRM (Zhang et al., 1999b)	53
2.4.3. Integración del SIG con el sistema de gestión de pavimentos (Flintsch et al., 2004)	54
2.4.4. Número de agencias que usan y planean el uso de análisis espacial para el respaldo de las decisiones en la gestión de pavimentos (Flintsch et al., 2004)	54
2.4.5. Esquema modular de la base de datos como herramienta de búsqueda y despliegue de resultados (Camacho-Garita et al., 2016)	57
2.4.6. Plataforma de TxDOT desplegando el ancho de las vías (en pies)	58
2.4.7. despliegue de información de la red en Alaska	58
2.4.8. Medición de ruido en el MnRoad mediante método OBSI	60
2.4.9. Visualización de órdenes de trabajo en el sistema de mapas del MOP	61
2.5.1. Numeración de pistas	63
2.5.2. Sistema de codificación de los segmentos	64
2.5.3. Formato bitácora de tramo	66
2.5.4. Procedimiento para la tramificación y segmentación de la carretera	67
2.5.5. Procedimiento para validación información desempeño de carretera	73
3.1.1. Tipos de sistemas de pesaje de tránsito (IsWIM)	100
3.2.1. Arquitectura de parte de la red WIM francesa (Dolcemascolo et al, 2015)	112
3.2.2. Extracto del formato para el registro de descripción de la estación (FHWA, 2015)	115
3.4.1. Extracto de descarga de TMDA de sitios de estaciones WIM de LTPP (Infopave-LTPP)	124
3.5.1. Formato bitácora de estación de pesaje en movimiento (para una pista)	129
3.5.2. Proceso de recopilación de información para sistemas de pesaje en movimiento	133

3.5.3. Procedimiento para la validación de registros obtenidos de sistemas de pesaje en movimiento	135
4.1.1. Estación automática (Dirección Meteorológica de Chile)	142
4.1.2. Ubicación de la estación con respecto a la vía (Manfredi et al, 2008).	145
4.1.3. Ubicación de los sensores en la torre de la estación meteorológica (Manfredi et al, 2008)	146
4.1.4. Esquema de ubicación de sensores ubicados en el pavimento (Manfredi et al, 2008).	146
4.1.5. El programa informático STATPROT para la gestión de metadatos, del ZAMG (Instituto Central de Meteorología y Geodinámica, Austria) (Plummer et al, 2007)	147
4.1.6. Ubicación geográfica de cada clima en Chile según la clasificación de Köppen (Cartografía interactiva de los climas de Chile)	149
4.2.1. Registro modelo de información meteorológica en formato JSON (DMCH, 2015)	152
4.3.1. identificación de estaciones vecinas a la estación de referencia (Guajardo et al, 2017)	157
4.4.1. metadatos de la estación Chacalluto (DMCH)	162
4.4.2. Aviso datos desactualizados (DMCH)	163
4.4.3. Gráficos de comparación para Ahuellamiento total, Ahuellamiento de la capa asfáltica, fatiga e IRI según valores climáticos entregados por MERRA y las estaciones por defecto en MEPDG (Schwartz et al, 2015)	164
4.4.4. Selección de celdas Región de Valparaíso en Chile (Infopave LTPP)	164
4.5.1. Procedimiento para la toma de registros obtenidos de una estación meteorológica	171
4.5.2. Procedimiento para la validación de registros obtenidos de una estación meteorológica	173
5.2.1. Sistema de gestión de estructuras de EFE (Durán et al, 2017).	191
5.2.2. Datos generales de un activo (INES Ingenieros)	192
5.2.3. Documentación relativa a un activo (INES Ingenieros)	192
5.4.1. Cargas en ingeniería civil (Bachmann y Ammann, 1987)	203
5.4.2. Prueba de carga efectuada en el puente Cau Cau en la ciudad de Valdivia (DICTUC)	205
5.4.3. Esquema de monitoreo Ocasional con prueba dinámica (LanammeUCR).	205
5.7.1. Esquema de funcionamiento de un SHM (Instituto Mexicano de Transporte).	213
5.10.1. Procedimiento genérico para el tratamiento de datos (Mcneill, 2009)	223
5.10.2. Ejemplo de fenómeno mal capturado por mala elección de frecuencia a utilizar (Mcneill, 2009)	225
5.10.3. Módulo de monitoreo de los sensores (Furtner et al, 2013)	231
5.10.4. Módulo de representación de mediciones realizadas (Furtner et al, 2013)	231
5.11.1. Propuesta de guía para la instalación de sistemas de monitoreo de salud estructural en Chile	238
A.1.1. Pista de ensayo acelerado LCPC (izquierda) y CEDEX (derecha)	268
A.2.1. DOC sobre resistencia a la deformación permanente, resistencia ala fractura y módulo resiliente del asfalto (Zhang et al., 1999b).	275
A.3.1. Espesores sección LTPP Costa Rica (Camacho-Garita et al., 2016)	276
A.5.1. Cobertura de la Inspección Visual por Región (Dirección de Vialidad, 2015)	281
A.5.2. Propuesta de acciones de mantenimiento, región de Antofagasta (extracto) (Dirección de Vialidad, 2017)	281

A.5.3. Clasificación de grietas	283
B.1.1. Geometría para algoritmo de sistemas culway (MAIN ROADS WESTERN Australia) .	286
B.2.1. Plano de un sistema Bending Plate (Zhang, 2007)	287
B.3.1. Fotografía de un Capacitance WIM (Mikros)	287
B.4.1. Representación de funcionamiento de una celda de carga (Zhang, 2007)	288
B.5.1. Plano de un sistema de pesaje en movimiento con sensores piezoelectricos (Zhang, 2007)	289
B.7.1. Red de pesajes en movimiento para control de norma en Francia (Jacob y Van Loo, 2008)	293
B.7.2. Vista general sistema WIM-VID en Holanda (FHWA, 2007)	294
B.7.3. Proceso seguimiento a empresas transportistas en Holanda (FHWA 2007)	294
B.7.4. Red de WIM-VID en Países Bajos, se observan las estaciones en construcción (Jacob y Van Loo, 2008)	295
B.7.5. Ubicación del sistema WIM en la Autopista Vespucio Norte (Concesionaria AVN) . . .	296
B.7.6. Sistema WIM en Américo Vespucio Norte junto al pórtico TAG (Google Maps)	296
C.1.1. Temperatura media en función de la elevación para el norte, centro y sur de Chile (Zanoli, 2011)	299
C.1.2. Esquema de funcionamiento de un Termógrafo Bimetálico (EcuRed)	300
C.2.1. Barógrafo (Raig)	302
C.3.1. Psicrómetro (Raig)	304
C.4.1. Anemómetro de cazoleta (abajo) y veleta (arriba) (SENSOVANT)	306
C.4.2. anemómetro sónico (SENSOVANT)	306
C.5.1. Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de cubeta basculante (León et al, 2013)	308
C.6.1. Rango de Longitudes de Onda de las radiaciones solar y terrestre (UdeC)	309
C.6.2. Equilibrio radiativo de la tierra (NASA)	309
C.6.3. Pirheliometro (SENSOVANT)	310
C.6.4. pirradiometro (U. de Chile)	311
C.8.1. Retrodispersión, Dispersión frontal y dispersión en un ángulo de gran abertura (OMM, 2017)	313
D.1.1. Sismógrafo (SERNAGEOMIN)	316
D.1.2. Acelerómetro mecánico (U. de Sevilla)	317
D.1.3. Acelerómetro piezorresistivo (U. de Sevilla)	317
D.1.4. Explicación de funcionamiento de un acelerómetro capacitivo (Villaluenga, 2011) . . .	318
D.1.5. Esquema de funcionamiento de un sistema FS y GPS-RTK (Beem et al, 2013)	320
D.1.6. Celesco modelo PT510 (Celesco)	320
D.1.7. Ilustración funcionamiento rejilla de Bragg (Majumder et al, 2008)	321
D.1.8. Strain gauge inalámbrico instalado sobre una viga de acero (Resensys)	322
D.2.1. Causa de falla de puentes en los Estados Unidos (New York State DOT and Texas AM University).	323
D.2.2. Esquema de flujo durante la socavación en una cepa (Prendergast y Gavin, 2014) . . .	324
D.2.3. Funcionamiento de un dispositivo Float-out. (Hunt, 2009)	326
D.2.4. Time Domain Reflectometer (U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory)	327

D.2.5. Instalación de un magnetic sliding collar (Hunt, 2009)	328
D.2.6. Esquema de un sistema de monitoreo de socavación mediante un sonar (Hardesty and Hanover, LLP)	329
D.2.7. Principio de trabajo del sensor (Ding et al, 2016)	330
D.2.8. Perdida de rigidez debida a la socavación (Prendergast and Gavin 2014)	331
D.2.9. Respuesta de aceleración de un puente frente al paso de un vehículo con 0 y 10 metros de socavación (Prendergast et al, 2016)	332
D.2.10. Esquema de instalación de las cadenas de socavación (San Juan, 2013)	333

Índice de tablas

2.1.1.	Grupos de información sobre los registros solicitados por proyectos en el mundo	34
2.1.2.	Longitudes de tramo y criterios de tramificación (extracto) (Garach, 2013)	35
2.1.3.	Variables identificación tramo	36
2.1.4.	Información sobre la estructura y materiales del pavimento	36
2.1.5.	Información sobre la estructura y materiales del pavimento	37
2.1.6.	Información sobre la estructura y materiales del pavimento	37
2.1.7.	Información sobre la estructura y materiales del pavimento	37
2.1.8.	Información sobre la estructura y materiales del pavimento	38
2.2.1.	Tabla resumen sobre las características de las bases de datos utilizadas en experiencias internacionales.	40
2.2.2.	Tipos de deterioros (extracto) (Simpson y Copeland, 2006)	40
2.3.1.	Chequeo del sistema en tiempo real con respecto al retraso en el despliegue de datos (DOT NJ, 2019).	45
2.4.1.	roles de usuario definidos por requisito funcional (White et al., 2016)	55
2.4.2.	Extracto del Dimensionamiento y Características de la Red Vial Nacional 2019	60
2.5.1.	Variables identificación tramo	75
2.5.2.	Variables identificación tramo	75
2.5.3.	Variables identificación tramo (continuación)	76
2.5.4.	Codificación actividades de mantenimiento sobre pavimentos	77
2.5.5.	Variables de los detalles geométricos e información general del tramo	78
2.5.6.	Variables de los detalles geométricos e información general del tramo (continuación)	78
2.5.7.	Variables sobre la subrasante y capas granulares para pavimentos existentes	79
2.5.8.	Variables sobre pavimentos asfálticos existentes	80
2.5.9.	Tipos de pavimentos	80
2.5.10.	Variables sobre pavimentos rígidos existentes	81
2.5.11.	Variables sobre la subrasante y capas granulares para pavimentos nuevos	82
2.5.12.	Variables sobre pavimentos asfálticos nuevos	83
2.5.13.	Variables sobre pavimentos rígidos nuevos	83
2.5.14.	Módulo de deflectometría de impacto	85
2.5.15.	Módulo de deflectometría de impacto(continuación)	86
2.5.16.	Módulo de eficiencia de transferencia de carga	86
2.5.17.	Módulo de eficiencia de transferencia de carga (continuación)	87
2.5.18.	Módulo de agrietamiento en pavimentos	88

2.5.19. Módulo de agrietamiento en pavimentos (continuación)	89
2.5.20. Módulo de agrietamiento en pavimentos (continuación)	90
2.5.21. Módulo de agrietamiento en pavimentos (continuación)	91
2.5.22. Módulo de regularidad longitudinal	92
2.5.23. Módulo de regularidad transversal	93
2.5.24. Módulo de regularidad transversal (continuación)	94
2.5.25. Módulo de Escalonamiento en pavimentos rígidos	95
2.5.26. Módulo de ruido de rodadura	96
2.5.27. Módulo de ruido de rodadura (continuación)	97
2.5.28. Módulo de ruido de rodadura	97
3.1.1. Duración de sensores WIM	102
3.1.2. Costos estimados para sistemas WIM en miles de dólares (Eady et al, 2016)	103
3.1.3. Campos de información a generar por los sistemas WIM	104
3.1.4. Datos más relevantes a conocer de un sistema de pesajes en movimiento (Eady et al, 2016)	104
3.1.5. Campos de metadatos a registrar por los sistemas WIM según COST 323	105
3.1.6. Tabla comparativa entre niveles propuestos en normas para sus distintos fines	105
3.1.7. Resumen de los resultados sobre la información WIM en cada país (Enright and O'brien, 2011)	106
3.1.8. Radio de curvatura y pendiente transversal y longitudinal máxima	107
3.1.9. Radio de curvatura y pendiente transversal y longitudinal máxima	107
3.2.1. Resumen de la colección y disponibilidad de información (Eady et al, 2016)	113
3.3.1. Extracto de reglas para identificar datos erróneos (Žnidarič et al, 2015).	118
4.1.1. Variables y el sensor recomendado por la DMCH (2015)	144
4.2.1. Sistemas de gestión de bases de datos (Plummer et al, 2007)	153
4.3.1. Límites rígidos (UNE 500540, 2004)	156
4.3.2. Valores de primer código (UNE, 2004)	158
4.3.3. Valores de primer código (UNE, 2004)	160
4.5.1. Lista de variables o elementos meteorológicos del archivo, parte 1 de 2	168
4.5.2. Lista de variables o elementos meteorológicos del archivo, parte 2 de 2	169
5.2.1. Información Austroads (Dowling y Rummey, 2004)	190
5.2.2. Enfoques de obtención de índices de condición estructural por país	194
5.2.3. Estado de todos los puentes en cada estado (FHWA)	195
5.2.4. Estado de puentes en cada estado pertenecientes a la National Highway Systems (FHWA)	195
5.2.5. Número de puentes Estructuralmente Deficientes (SD) entre todos los puentes (FHWA)	196
5.2.6. Número de puentes Estructuralmente Deficientes (SD) cada estado pertenecientes a la National Highway Systems (FHWA)	196
5.3.1. Criterios de clasificación (Godart y Vassie, 1999)	197
5.4.1. Tipos de carga y la dependencia de dichas cargas (SAMCO, 2006)	202
5.4.2. Carácter de las Actions (SAMCO, 2006)	203
5.4.3. Objetivos y Metodología según el nivel elegido (SAMCO, 2006)	207

5.5.1. Desempeño de la estructura y eventos límites (Akan et al, 2002)	209
5.9.1. Requisitos de selección de sensores (Aktan et al, 2002)	217
5.9.2. Requisitos técnicos para la instalación de sensores en China (Moreu et al, 2018)	217
5.9.3. Sensores dinámicos y ambientales mínimos a instalar	218
5.9.4. Instrumentación para socavación	218
5.9.5. Instrumentación para socavación (Inaudi, 2009)	220
5.9.6. Sensores propuestos según riesgo o incerteza (Inaudi, 2009)	221
5.9.7. Sensores propuestos según riesgo o incerteza (continuación) (Inaudi, 2009)	222
5.10.1. Características por tecnología (Moreu et al, 2018)	224
5.10.2. Métodos para el análisis de señales (SAMCO, 2006)	227
5.10.3. Chequeos elementales y datos de procesamiento de datos (Aktan et al, 2002)	228
5.10.4. Chequeos secundarios y postprocesamiento de datos (Aktan et al, 2002)	228
5.10.5. Ventajas y desventajas de procedimientos de métodos globales para la detección de daño (Karbhari y Lee, 2009)	234
5.11.1. Sensores dinámicos y ambientales mínimos a instalar	244
5.11.2. Instrumentación para socavación	245
5.11.3. Instrumentación para socavación	246
5.11.4. ISensores propuestos según riesgo o incerteza	247
5.11.5. Sensores propuestos según riesgo o incerteza (continuación)	248
5.11.6. Validación primaria para los registros de los sensores	249
5.11.7. Validación primaria para los registros de los sensores (continuación)	250
5.11.8. Validación secundaria para los registros de los sensores	250
5.11.9. Requisitos de evaluación y seguridad de la nueva norma China sobre monitoreo de salud estructural	253
A.1.1. Campo de datos de Inventario (Sweere et al, 1998)	269
A.1.2. Campo de datos de construcción (Sweere et al, 1998)	269
A.1.3. Campos de datos de Rehabilitación (Sweere et al, 1998)	269
A.2.1. Identificación y detalles geométricos de la sección de estudio (Simpson y Copeland, 2006).	270
A.2.2. Propiedades de los materiales (Simpson y Copeland, 2006).	271
A.2.3. Materiales y costos asociados (Simpson y Copeland, 2006)	271
A.2.4. Módulos de datos para el monitoreo de desempeño de pavimentos (Simpson et al., 2006).	272
A.2.5. Datos generales de una sección para inventario (White et al., 2016)	273
A.2.6. Datos generales de actividades de mantenimiento sobre una sección (White et al., 2016)	274
A.2.7. Datos de condición de un pavimento (White et al., 2016).	274
A.3.1. Detalles sección LTPP Costa Rica (Camacho-Garita et al., 2016)	276
A.3.2. Ensayos realizados para una sección de prueba (Camacho-Garita et al., 2016)	276
A.4.1. Perfiles del pavimento y límites de Atterberg para una sección del LTPPM (Choumma- nivong y Martin, 2017)	277
A.4.2. Detalles de las secciones ubicadas en Queensland (Choummanivong y Martin, 2017)	278
A.4.3. Trabajos de mantenimiento y rehabilitación por sitio (extracto) (Choummanivong y Martin, 2017)	278

B.1.1. Tipo y número de pesaje en movimiento en cada región de Australia y Nueva Zelandia (Han et al., 2010).	285
B.6.1. Información generada en cada país en Europa (Žnidarič et al, 2015)	291
D.1.1. Características por tecnología (Villaluenga, 2011)	319
D.2.1. Costo estimado por tecnología (Hunt, 2009)	330

Hipótesis

En Chile, la gestión de información recolectada en carreteras concesionadas por sistemas de pesaje en movimiento, inventario y desempeño de los pavimentos, estaciones meteorológicas y el monitoreo estructural de puentes, requiere del desarrollo de protocolos de gestión de información que describan los procedimientos necesarios para estandarizar la gestión de esta información, considerado los tópicos de captura, transmisión, almacenamiento, validación y disposición de la información.

Objetivos

Objetivo general:

- Desarrollar protocolos de gestión de información para la gestión vial que se genera durante la explotación de una carretera concesionada. Aplicables en bases de licitación para futuras concesiones.

Objetivos específicos:

- Conceptualizar un proceso general de la gestión de información para los activos desempeño e inventario de pavimentos, sistemas de pesaje en movimiento, estaciones meteorológicas e instrumentación de puentes, basándose en prácticas internacionales y chilenas.
- Definir procedimientos para la toma de datos y su entrega al ente encargado de los activos, considerando formato, variables, frecuencia y otros elementos necesarios.
- Desarrollar procedimientos de validación de registros y etiqueta de estos según norma para los registros de los activos mencionados.
- Determinar exigencias para asegurar el almacenamiento, seguridad, disposición de información y metadatos de los registros conseguidos en cada activo vial revisado.
- Redactar los protocolos de gestión de información, recopilando aquellos procedimientos y exigencias definidas en el estudio, buscando asegurar una correcta gestión de la información revisada

Capítulo 1

Gestión de Información

La gestión de información, se puede comprender como el proceso que los registros deben realizar para ser utilizados en la toma de decisiones por una agencia vial. Dichas decisiones pueden estar enfocadas en dos áreas de uso principales, la primera orientada en usos sinópticos (corto plazo) y la segunda en un uso en retrospectiva (largo plazo). Dado que, la información utilizada principalmente en el área de la gestión y diseño de pavimentos es del tipo retrospectiva, esta tesis se enfoca en el proceso requerido para dicho uso. Así, un diagrama y una breve explicación de los hitos que la información debe sortear es la siguiente:

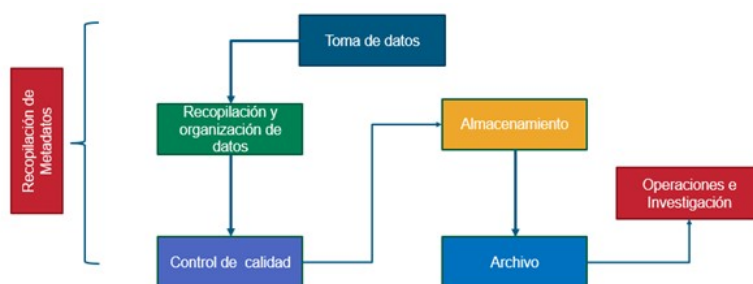


Figura 1.0.1: *Proceso de gestión de datos en retrospectiva. Basado de OMM (OMM, 2011)*

Recopilación y organización de datos

Este proceso, se basa en la duplicación de información entregadas por la fuente. Es decir, generar copias lo más exactas posible (con datos correctos, con errores, datos inexistentes). Luego la organización de estos es convertir los datos brutos en información ordenada por fecha, por variable u otros elementos.

Controles de calidad

El control de calidad, son técnicas, procedimientos y operaciones que buscan catalogar cada registro según el nivel de confianza y coherencia que el registro tenga. Estos controles de calidad, se pueden basar en rangos (por ejemplo, es extraño pensar que en Santiago de Chile la velocidad del viento supere los 90 Km/h, pero no así en Punta Arenas), coherencia entre variables (la radiación de onda corta debiera ser cercana a nula durante la noche) coherencia espacial (dos estaciones cercanas no debieran tener diferencias muy drásticas en las variables medidas) y otras potenciales comparaciones.

Almacenamiento

El almacenamiento, se refiere a que el ente encargado de gestionar los datos debe ser capaz de diseñar un espacio que soporte la cantidad de información que debe archivarse, entendiendo que el proceso de capturar los datos es continuo, y por lo tanto, siempre aumenta. Por otro lado, este espacio (digital) no solo puede contener registros, sino también, fotografías, calibraciones, sustitución de equipos, metadatos, avisos de pérdida de datos, falla en las comunicaciones o energía, etc.

Archivo

Este es el medio permanente para recuperar la información y los posibles metadatos de información. Dada la revolución tecnológica existente, cada vez estos archivos han aumentado su número en versiones digitales, lo cual mejora la capacidad de compartirla. El archivo, no solo debe cumplir con los requisitos de tamaño, sino también con todos los requisitos necesarios para asegurar que la información contenida no se vea corrompida, ni perdida.

Metadatos

Metadato es un concepto que atañe la información sobre los mismos datos. No son registros de variables en sí, sino:

- Tipo de sensores, marca, cambios realizados en ellos
- Mantención de los equipos
- Registro de fallas, bitácoras de operación, etc.

La importancia de los metadatos, es que permiten comprender los sesgos y pérdidas que una medición pueda tener, como ejemplo, se puede mencionar que por mucho tiempo las mediciones de temperatura se realizaron con termómetros de mercurio, al día de hoy han cambiado a termómetros resistivos, el nivel de precisión y la tasa de medición pueden generar diferencias entre las mediciones reportadas.

Mediante estos procesos, la información capturada puede llegar a un buen puerto y esto es, utilizarse en procesos de investigación y como complemento a la toma de decisiones de una agencia vial. Para todo lo anterior, parte de la solución es generar protocolos de gestión de información de información de tránsito, clima, materiales y desempeño de pavimentos.

Capítulo 2

Información sobre Inventario y Desempeño de Pavimentos

El presente capítulo tiene por objetivo hacer una revisión del estado del arte y la práctica con respecto al tratamiento de la información de inventario y desempeño de pavimentos, buscando desarrollar una propuesta para el tratamiento de dicha información. En base a esto, el capítulo se configura de la siguiente forma:

- En la sección 2.1, se revisan los diferentes campos de datos sobre el desempeño e inventario de pavimentos que diferentes proyectos y agencias solicitan.
- En la sección 2.2, se presentan las diferentes herramientas de gestión de información en agencias de carretera alrededor del mundo
- En la sección 2.3, se presenta el proceso de validación de registros de datos y los procesos ejecutados en diferentes partes del globo
- En la sección 2.4, se realiza una revisión sobre la diferencia de disponibilidad de información y las variadas plataformas para la información por parte de agencias de carretera
- En la sección 2.5, se encuentra redactado el protocolo de gestión de información para el inventario y desempeño de pavimentos

2.1. Definición de Información de Inventario y Desempeño de Pavimentos

Previo a cualquier actividad sobre un pavimento, siempre será necesario el conocimiento pleno de los pavimentos en que se pretende ejecutar cierta acción. Sin ello, no será posible decidir de forma correcta los procesos de rehabilitación y mantención, que permitan conseguir un desempeño óptimo de los mismos. Toda esa información, en esta tesis es denominada Inventario y Desempeño de pavimentos.

El Inventario de pavimentos, se asocia al registro de todos aquellos componentes y aspectos que conforman el pavimento durante su vida de servicio, esto es, su estructura, sus capas, materiales y las actividades de rehabilitación sobre este incluyendo rutinarias y especiales; además de aquellos elementos que permiten identificar un pavimento como su ubicación geográfica, clima, vía a la cual pertenece y otros.

Por otra parte, el Desempeño de Pavimentos, se encuentra asociado a las características que representan el comportamiento de un pavimento tanto de forma funcional como estructural. Algunos aspectos que relatan sobre el desempeño de un pavimento pueden ser el nivel de agrietamiento, la regularidad longitudinal, el ruido de rodadura, la capacidad estructurales, entre otros.

Debido a que el objetivo principal de esta tesis es el desarrollo de protocolos de gestión de información generada en las carreteras, es necesario iniciar el análisis sobre que información requiere estos protocolos, para ello, se exponen diversos proyectos alrededor del mundo y en Chile, donde a pesar de los múltiples objetivos que cada uno de ellos busca conseguir, tienen una matriz en común que es la recolección de información sobre el inventario y desempeño de pavimentos.

Debido a la amplitud de registros incluidos en los diferentes textos revisados, el detalle sobre lo que cada proyecto o agencia vial solicitan, se puede encontrar en el apéndice A.

2.1.1. Selección de información apropiada para la redacción de protocolos

Una vez revisados aquellos registros encargados por agencias y proyectos alrededor del mundo, es posible agrupar estos registros en cuatro grandes conglomerados:

Tabla 2.1.1: *Grupos de información sobre los registros solicitados por proyectos en el mundo*

Grupo	Nombre del grupo
1	información para la identificación del tramo
2	información sobre estructura del pavimento y características de sus materiales
3	información acerca de su historial de construcción y acciones de conservación
4	información acerca del desempeño mostrado por el pavimento a lo largo de su ciclo de vida

Posteriormente, comenzó el proceso de seleccionar el grupo donde cada registro debe incluirse, lo que implica establecer que registros se considerarán en las especificaciones de los protocolos. Este proceso

(para decidir si un registro se incluiría o no), se basó en su repetición como información incluida dentro de los estudios y a su relevancia como propiedad en los procesos de diseño y rehabilitación de pavimentos, además, se buscó darle prioridad a propiedades de los materiales que exijan el uso de normas más avanzadas y no solo a las propiedades comúnmente utilizadas. Un ejemplo, es la exigencia de que en los pavimentos asfálticos construidos durante la fase de explotación de una concesión, se especifique según su grado de desempeño utilizando el ensaye Multiple Stress Creep Recovery (MSCR).

Sobre el primer grupo, es necesario que primero se divida la carretera en tramos que cumplan con tener una estructura similar a lo largo de cada uno. Para conseguir esta tramificación se revisaron y compararon los principales procedimientos que permitan realizar esta división. Así, se pueden encontrar los siguientes métodos:

- Método Alemán: basado en la curvatura horizontal de la carretera, donde, a través de la suma acumulada de los cambios de dirección se encuentran tramos basado en el cambio de pendiente de la gráfica
- Método de las diferencias finitas: método estadístico propuesto por AASHTO que utiliza diferentes mediciones sobre el pavimento (IRI, FWD u otros). El producto es un gráfico de estas diferencias en función del kilometraje, en el cual los tramos se identifican en función de los cambios de pendiente
- Garach en su tesis doctoral (Garach, 2013) revisa los procedimientos para la tramificación de vías, si bien, se enfoca en el área de la seguridad vial, también revisó procedimientos con otros objetivos. En esta, se determinaron largos mínimos y máximos por cada procedimiento y además, factores que pueden producir un nuevo tramo. Aquello se puede ver en la tabla 2.1.2

Ya con los procedimientos revisados, se debe dividir la vía en base a tramos de largo de un kilómetro y a separar la vía en cada pista que la conforma. Así la información necesaria para identificar cada tramo en la vía es la que se encuentra en la tabla 2.1.3.

Tabla 2.1.2: Longitudes de tramo y criterios de tramificación (extracto) (Garach, 2013)

Estudio	Lmín (Km)	Lmedia (Km)	Lmáx (Km)	IMD	CCR	Ancho calzada	Tipo berma	Pend.	Caminos de acceso
Pardillo y Llamas (2003). Opción 1	1	1	1						
FHWA (2004)	6.4		32	x					
RACC (2008)	1		30	x					
Martinelli et al. (2009)	0.5	0.112		x		x	x		x
Rengarasu et al. (2009). Opción 1	1	1	1						
Cafiso et al. (2010)	0.5		4.29	x	x	x	x		
AASHTO (2010)	0.16			x		x	x	x	x

Tabla 2.1.3: *Variables identificación tramo*

Identificación de la sección	
Código de la ruta	Pista
Nombre “alias” de la ruta	Altitud
Región	Zona climática
Clasificación funcional	Transito medio diario anual
Kilómetro inicial	Sentido de circulación
Kilómetro final	Ancho de pistas
Coordenadas inicio del tramo	Tipo de pavimento
Coordenadas fin del tramo	Velocidad promedio de circulación

El segundo grupo, divide los tramos de un kilómetro en secciones de pista de longitudes entre los 50 y 1000 metros, siempre en múltiplos de 50. En este grupo, se hizo la distinción entre los pavimentos nuevos, que serían aquellos puestos en servicio durante la fase de explotación de la concesión y los pavimentos existentes, los cuales son producto de la concesión anterior.

Del párrafo anterior, nace la pregunta si la información a incorporar debiese ser información obtenida en la construcción o la información de diseño. Frente a esto (Zhang et al., 1999b), llega a la conclusión que es deseable la información de construcción, aunque ante la falta de dicha información, la de diseño puede ser importante para el buen entendimiento del desempeño. Frente a esto, se decide que lo ideal es la información de construcción o aquella que se obtiene en laboratorio, pero es aceptable información de diseño, especialmente en pavimentos ya existentes.

Otro problema, es el hecho que los materiales tienen una amplia gama de nomenclaturas que varían en el tiempo y país. Por esto, la definición de cada registro debe estar asociada a alguna norma o ente que permita que su significado no varíe en el tiempo. Es por ello, que se buscará que toda propiedad incluida en estos protocolos, se encuentre definida en función de lo expresado en el Manual de Carreteras. Ya con esto definido, la información para cada sección que conforma un tramo es la que se menciona en las siguientes tablas:

Tabla 2.1.4: *Información sobre la estructura y materiales del pavimento*

Información de la estructura	
Tipo de pavimentos	Material superficial de la berma
Tipo de drenaje	Espesor capas de la berma
Posición de las capas	Material de la base de la berma
Tipo de cada granular	Espaciamiento entre juntas transversales
Espesor de cada capa	Tipo de transferencia de carga
Ancho de berma	Existencia de sello en grietas

Tabla 2.1.5: *Información sobre la estructura y materiales del pavimento*

Información para Pavimentos Existentes		
Granulometría	Grado de asfalto	Resistencia cilíndrica
Límite líquido	contenido de asfalto original	Método de curado
Límite plástico	Tipo de asfalto	Módulo elástico
Proctor modificado	Gradación de agregados	Tipo de cemento
CBR	Porcentaje de vacíos de diseño	
Tipo de mezcla	Tipo, cantidad, esfuerzo de fluencia y ubicación del acero de refuerzo	

Tabla 2.1.6: *Información sobre la estructura y materiales del pavimento*

Información para Pavimentos Nuevos		
Granulometría	Grado de asfalto	Resistencia a la flexotracción
Límite líquido	Tipo de mezcla	Método de curado
Límite plástico	Contenido de asfalto original	Módulo elástico
Proctor modificado	Gradación de agregados	Tipo de cemento
CBR	Porcentaje de vacíos de diseño	Coefficiente de expansión térmica
Tipo de ligante	Tipo, cantidad, esfuerzo de fluencia y ubicación del acero de refuerzo	

Dentro del tercer grupo, se establece la consulta sobre considerar los costos asociados a estas actividades. Si bien los costos también son parte de los materiales, estos ya se pueden encontrar en los anexos de bases de licitación (MOP, 2015), no así los costos sobre las actividades de mantención, siendo estas actividades claves en la gestión de pavimentos. Sobre esta disyuntiva, (Solminihaç, 1998), menciona la posibilidad de considerar costos de usuarios, costos de mantención y construcción y tipo del contrato para realizar la acción, mientras que el NCHRP 820 (White et al., 2016), establece que basta el tipo de contrato y el costo total unitario de la actividad. Finalmente, se ha decidido incluir solo el costo unitario y el tipo de contrato de la actividad total:

Tabla 2.1.7: *Información sobre la estructura y materiales del pavimento*

Información de Actividades de Construcción y Preservación	
Fecha de las actividades	Costos
Tipo de actividad	Tipo de contrato
Razón de la actividad	

Finalmente sobre el grupo de las mediciones de desempeño de los pavimentos de la concesión, se ha decidido registrar las siguientes mediciones, ya que representan aquellos aspectos más relevantes para un buen entendimiento del comportamiento funcional y estructural del pavimento:

Tabla 2.1.8: *Información sobre la estructura y materiales del pavimento*

Información de Mediciones de Desempeño de Pavimentos	
Fecha de las mediciones	Deflectometría de impacto
Tramos medidos	Ruido de rodadura
Regularidad Longitudinal	Escalonamiento
Agrietamiento	Transferencia de carga
Ahuellamiento	

2.2. Almacenamiento y Manejo de Datos

Uno de los elementos centrales dentro de un proyecto o una entidad encargada de pavimentos es su sistema de almacenamiento de información. Este sistema es el encargado de administrar los procesos de entrada y salida de información, es decir, es el intermediario entre el proceso de captura y la elaboración de productos como modelos de deterioro, toma de decisiones, etc.

En general, dada la diferencias de objetivos de las agencias o proyectos, la capacidad económica, el nivel de especialización de los encargados o de las empresas disponibles, la alta variabilidad en el tiempo en los recursos informáticos, es que la infraestructura de almacenamiento de manejo de datos varía en tiempo y lugar. Sin embargo, existen aspectos que todo sistema de almacenamiento debe intentar cumplir para mejorar su eficiencia de trabajo y la minimización de errores (Solminihac, 1998).

- Contar con protocolos de adquisición y registros de datos, que incluyan aspectos como codificación, geocolocalización, valores del dato y metadatos
- Contar con arquitectura de bases de datos que permitan almacenar de forma eficiente los volúmenes de datos
- Contar con la capacidad de despliegue de información tanto en planillas de información como el SIG
- Disponer de un entorno computacional que permita la interoperabilidad entre los sistemas de captura, transmisión y el acceso remoto a los datos
- Separar los procesos de adquisición en lineal y los fuera de línea

2.2.1. Casos acerca del almacenamiento y manejo de datos

En general, las agencias viales y proyectos de investigación, optan por medios para el almacenamiento dependiendo del volumen y costo que significa estas. Esto se puede ver en la tabla 2.2.1, la cual resume los elementos principales de los sistemas de almacenamiento utilizados por el proyecto PARIS (Sweere et al, 1998), el LTPP norteamericano (Elkins et al, 2012) y el Departamento de Transportes de Texas (Zhang et al, 1999). De forma separada se menciona el SIC-NS, el cual es una herramienta que en Chile pronto se espera utilizar y que si bien su función no es similar a los anteriores, puede ser un buen puerto inicial.

Tabla 2.2.1: *Tabla resumen sobre las características de las bases de datos utilizadas en experiencias internacionales.*

PARIS (Sweere et al, 1998)	LTPP- USA (Elkins et al, 2012)	TXDOT (Zhang et al, 1999)
Base de datos relacional gestionada en Microsoft Access	Al menos PPDB (que s la más grande) es una base de datos relacional implementada en Oracle 12	Bases de datos relacional
Conformada por cuatro partes que son tablas, consultas (queries), formas y macros	Se conforma en tres partes principales: Products, encargado de resultados generados por LTPP; PPDB, es la base de datos encargada de almacenar la información de desempeño; AIMS, es la información complementaria como perfiles longitudinales, fotos, videos, etc.	Se divide en 4 partes: PMIS encargada de los registros de deterioro; TRM, encargada de las marcas de referencia en las carreteras; RL, encargada de información de construcción MMSIS que se encarga de las actividades de mantención.
La información se dividió en 14 elementos que incluyen: Clima, materiales de construcción, deflexión agrietamiento, historial de actividades, ahuellamiento, tránsito, etc.		

Es importante mencionar, que estos proyectos y agencias, debido a la necesidad que la base de datos sea autodescriptiva, tienen un proceso de codificación en su información. Esta codificación, también busca la disminución en la cantidad de información, por ejemplo, en el caso de la codificación del estado al cual pertenece la sección, es más barato en la base de datos ingresar “01” que “Alabama” o en el caso de los tipos de pavimentos ingresar “28” que “AC Overlay on JPCP Pavement”. Todos estos códigos se pueden encontrar en las guías de colección de datos de LTPP, una muestra más de este proceso de codificación es la tabla 2.2.2 obtenida de (Simpson y Copeland, 2006):

Tabla 2.2.2: *Tipos de deterioros (extracto) (Simpson y Copeland, 2006)*

Distress Type	Code
AC Pavement	
Alligator Cracking	01
Block Cracking	02
Edge Cracking	03
Longitudinal Cracking	04
Reflection Cracking	05
Transverse Cracking	06
Patch Deterioration	07
Potholes	08
Rutting	09
Shoving	10
Bleeding	11

Sistema Informático para la Constatación del Nivel de Servicio (SIC-NS)

Las mediciones de desempeño de pavimentos en las carreteras concesionadas A.5.1, deberán ser ingresadas al SIC-NS. Esta es una herramienta informática solicitada en las bases de licitación más modernas (MOP, 2015) la cual tiene por finalidad, habilitar una comunicación con control centralizado entre los sistemas de soporte a la operación de la Sociedad Concesionaria y el Inspector Fiscal.

Dentro de las principales funciones, el SIC-NS debe operar tanto como un sistema de control de gestión de la concesión, como también un DataMart de las actividades realizadas en la concesión, por lo que también puede ser un buen puerto inicial para conocer el historial de actividades de mantenimiento sobre la carretera. A continuación, se presenta un resumen de las principales funciones del SIC-NS:

1. SIC-NS como sistema de control de gestión: el objetivo es calcular los Niveles de Servicio (NS) prestados por la concesionaria en tiempo real. Gatilla alarmas por incumplimiento de actividades
2. SIC-NS como DataMart: el objetivo de esta función es permitir el acceso de los usuarios a una base de datos que contiene todas las actividades realizadas, además de entregar información que permita conocer dicha actividad de forma más detallada
3. SIC-NS como mecanismo de verificación de Nivel de Servicio: esta función busca generar constantemente un sistema de respaldo definido por el Inspector Fiscal. En caso que la concesión tenga dispositivos que capturen información necesaria para el cálculo de los NS, estos dispositivos deben poder almacenar dichos registros para luego enviarlos a la bitácora del SIC-NS
4. Registro de datos en tiempo real y no real
5. Auditabilidad de los sistemas informáticos y sus datos: el MOP deberá poder auditar todos los registros que se encuentren dentro del SIC-NS
6. Registro de actividades unitarias en el sistema SIC-NS: este sistema debe estar integrado con los sistemas que controlan y apoyan la ejecución de los procesos de iluminación, cámaras, gestión de tránsito, facturación, citofonía, etc.

Claramente la existencia del SIC-NS es un avance, ya que, permitirá realizar procedimiento más eficientes con la información (validarla, compararla), además al ser una herramienta informática tiene el potencial de aumentar los posibles usuarios y no que solo se mantenga dentro de la relación Inspector Fiscal-Concesionaria.

2.2.2. Selección de requisitos para el manejo y almacenamiento para la redacción de protocolos

Luego de revisar los diferentes manejos de información, se demuestra que el manejo depende del objetivo que cada proyecto busque conseguir. Por ejemplo, LTPP tiene por objetivo almacenar y disponer de información sobre el desempeño de miles de secciones, para ello basa su manejo en un sistema de bases de datos relacionales que tienen muy buen desempeño en ello (trabajar con grandes cantidades), a diferencia

de los que se establece en el desarrollo del SIC-NS, el cual debe formarse mediante un sistema de gestión de bases de datos orientada a objetos, ya que, su principal objetivo es el control del cumplimiento del nivel de servicio prestado por la concesionaria.

Otra consideración, es que el manejo informático va a depender de la cantidad de información incluida, ya que, al revisar a LTPP que contiene la mayor cantidad información de los elementos revisados, este utiliza de bases de datos comerciales, mientras que en el proyecto PARIS, se utilizó Microsoft Access, que es un sistema de gestión de bases de datos que podría operar con computadores de casa.

Así con el paso del tiempo, el crecimiento tanto de la tecnología y de la colección de datos, se vislumbra que el establecer requisitos técnicos, pueda en un futuro ser un obstáculo en un eficiente manejo de datos. Por lo tanto, deben establecerse requisitos que aseguren seguridad y capacidad de almacenamiento en las bases de datos que contengan los registros.

2.3. Procedimientos de Validación de Registros

Como ya se ha mencionado antes, las carreteras al ser fuente de información mediante la constante medición de su desempeño, las actividades de mantención y rehabilitación y su inventario, requieren un proceso que asegure que cada registro adquirido cumpla con el grado de fiabilidad que la agencia encargada necesita. Este grado de fiabilidad dependerá de la realidad de la agencia, el número de kilómetros de la red (en la figura 2.3.1 se observa el porcentaje de agencias en los Estados Unidos que los tienen en función del tamaño), las tecnologías disponibles y otras razones. Para conseguir esta confianza en los registros, es necesario que la agencia desarrolle un plan de gestión de calidad de los datos.

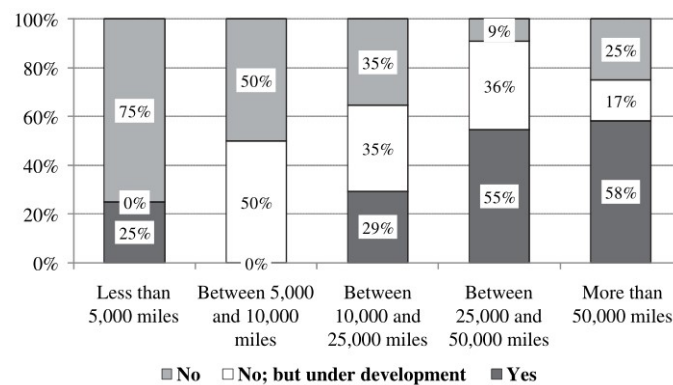


Figura 2.3.1: Porcentaje de agencias que tienen un plan de gestión de calidad en función del tamaño de la red (Flintsch y McGhee, 2009)

Un plan de gestión de calidad de los datos, consiste en actividades que aseguren que los datos cumplen con estándares y requisitos impuestos por la agencia, los procesos de trabajo se realizan según lo documentado y los datos que no cumplen los estándares son identificados y frente a ello, se realicen acciones correctivas como, el rechazo de la información o la repetición de la medición (Pierce et al., 2013). La existencia e implementación correcta de un plan de gestión de calidad, tiene resultados importantes para la gestión de una vía, pudiéndose mencionar los resultados obtenidos por el Departamento de Transito de Virginia, donde dicha implementación consiguió (Shekarah et al., 2006):

- Incrementar exactitud en los índices de condición existente, demostrado mediante cambios en la categoría de condición de hasta un 60 %
- Aumentó la exactitud en el reporte de pavimentos deficientes hasta en un 30 %
- Incrementó la exactitud de las decisiones de presupuesto, como corrección de más de 18 millones de dólares en las recomendaciones de mantención de pavimentos interestatales.

Un plan de gestión de calidad de los datos, descansa en dos bases principales, el control de calidad (QC por su sigla en inglés) y el control de aceptación (QA también por su sigla en inglés). Por un lado, el control de calidad se refiere a los procedimientos y consideraciones necesarias para conseguir el nivel de calidad deseado en los datos, mientras que el QA, se refiere a las actividades necesarias para aceptar los registros obtenidos por una agencia o un proveedor externo. Por lo tanto, se podría establecer que

solicitada la captura de información a un proveedor por parte de una agencia, este proveedor lleva a cabo un QC para otorgar el nivel de calidad que espera la agencia, luego al recibir la información, la agencia, realiza un QA determinando los requisitos de volver a medir por errores cometidos, la información faltante, etc. y la información que cumple los estándares y que es aceptada. A continuación, un análisis más detallado de ambos procesos es llevado a cabo

2.3.1. Control de Calidad

Los controles de calidad se pueden dividir en tres grandes grupos según el momento respecto a la medición. El primero de ellos son las actividades previas a la toma de mediciones, luego el segundo durante la medición y el tercer grupo son las actividades posteriores a la toma de datos.. La figura 2.3.4, muestra los hitos que debe realizar una agencia o empresa encargada de la obtención de registros.

2.3.1.1. Controles de Calidad previo a la toma de datos

Tal como se observa en la figura 2.3.4, se componen de actividades donde la atención se centra en la certificación y calibración de los equipos, además del entrenamiento del personal encargado de la toma de datos. Este control de calidad, es el sistema más utilizado por las agencias viales cuando deben capturar información sobre el desempeño de los pavimentos en los Estados Unidos (Figura 2.3.2)

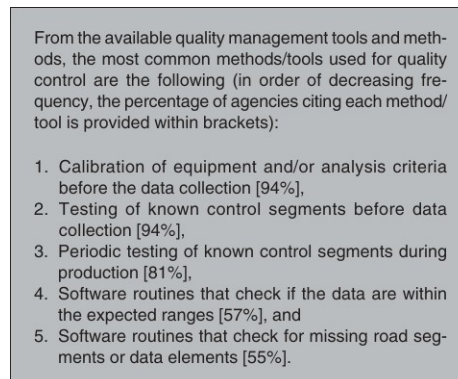


Figura 2.3.2: Métodos más utilizados para un QC (Flintsch y McGhee, 2009)

2.3.1.2. Controles de Calidad durante la toma de datos

Este segundo grupo, se encuentra relacionado a pruebas de verificación del equipo, pruebas en zonas con valores previamente conocidos y chequeo en tiempo real (buscando que los registros se encuentren en un rango aceptable). Se puede sumar a lo referido a este segundo grupo, lo mencionado en (DOT NJ, 2019) donde se establece como una forma de validar los datos, se considera la demora en el despliegue de los resultados como un signo de error y por lo tanto, se puede estar frente a una falla de funcionamiento y a una falta de fiabilidad en los datos. Como ejemplo, (DOT NJ, 2019) entrega los siguientes retrasos como valores aceptables:

Tabla 2.3.1: *Chequeo del sistema en tiempo real con respecto al retraso en el despliegue de datos (DOT NJ, 2019).*

System	Checks	Stop \ Pause Collection Conditions
LCMS	<ul style="list-style-type: none"> • Images are in focus, clear with minimal 'Out of Range' data. • Good GPS data stream 	<ul style="list-style-type: none"> • > 30 second delay in images appearing on screen • 5 consecutive bad images • GPS loss > 1 minute • Acquisition application or computer crash
Profiler	<ul style="list-style-type: none"> • Continuous live profiler data stream 	<ul style="list-style-type: none"> • > 15 second delay of profiler data stream • Profiler application or computer crash
Applanix	<ul style="list-style-type: none"> • Good GPS data stream 	<ul style="list-style-type: none"> • GPS signal loss > 1 minute • Applanix application or computer crash
Imagery	<ul style="list-style-type: none"> • Images are in focus, clear with good contrast and coloring 	<ul style="list-style-type: none"> • > 30 second of bad image stream • Ladybug application or computer crash

2.3.1.3. Controles de Calidad después de la toma de datos

El último grupo, tiene procedimientos similares al segundo, pero más refinados, buscando zonas donde las mediciones se hayan perdido, la comparación de los registros con rangos admisibles y la contrastación de los datos con valores obtenidos en jornadas de medición previas. Tal como se observa en la figura 2.3.2, este tipo de control es el menos utilizado, ya que, necesita el desarrollo de rutinas y de equipos de personal capaces de revisar todos los registros generados.

2.3.2. Control de Aceptación

Los procedimientos de aceptación de calidad (QA), son los procedimientos llevados a cabo por la agencia carretera, una vez que los registros son entregados por el proveedor (que puede ser la misma agencia o un proveedor externo). estos procedimientos son similares a los procedimientos para un QC, pero llevados a cabo por la misma agencia o por otro proveedor, pero a un tamaño más reducido. Por ejemplo, se puede contrastar la medición de agrietamiento de un pavimento de forma manual (llevada a cabo por la agencia) con las mediciones realizadas por el proveedor externo, se puede exigir los certificado de calibración y certificación de los equipos, o llevar a cabo chequeo de validación de un porcentaje de los registros entregados que puede variar del 2% hasta el 10% (Flintsch y McGhee, 2009). Las principales actividades realizadas para un QA son las que se pueden ver en la figura 2.3.3 :

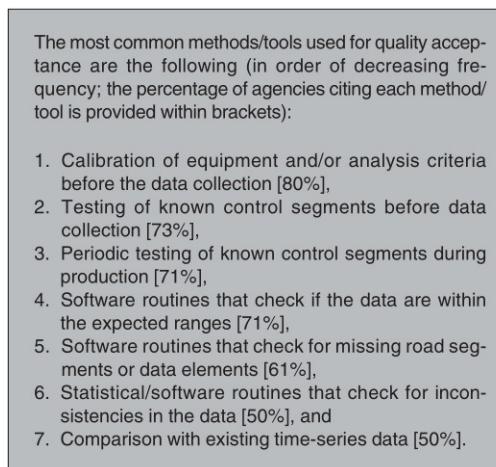


Figura 2.3.3: *Métodos más utilizados para un QA (Flintsch y McGhee, 2009)*

Al compararse las figuras 2.3.2 y 2.3.3, es evidente el parecido entre las herramientas utilizadas, sin embargo, el hecho de ser realizadas por actores con diferentes objetivos genera que la calidad de los registros deba ser mayor, es más, en ocasiones el proceso de aceptación es entregado a una empresa externa, que bien puede ser competencia del proveedor para aumentar la independencia del QA. En la siguiente figura, se ejemplifica un plan de gestión de datos:

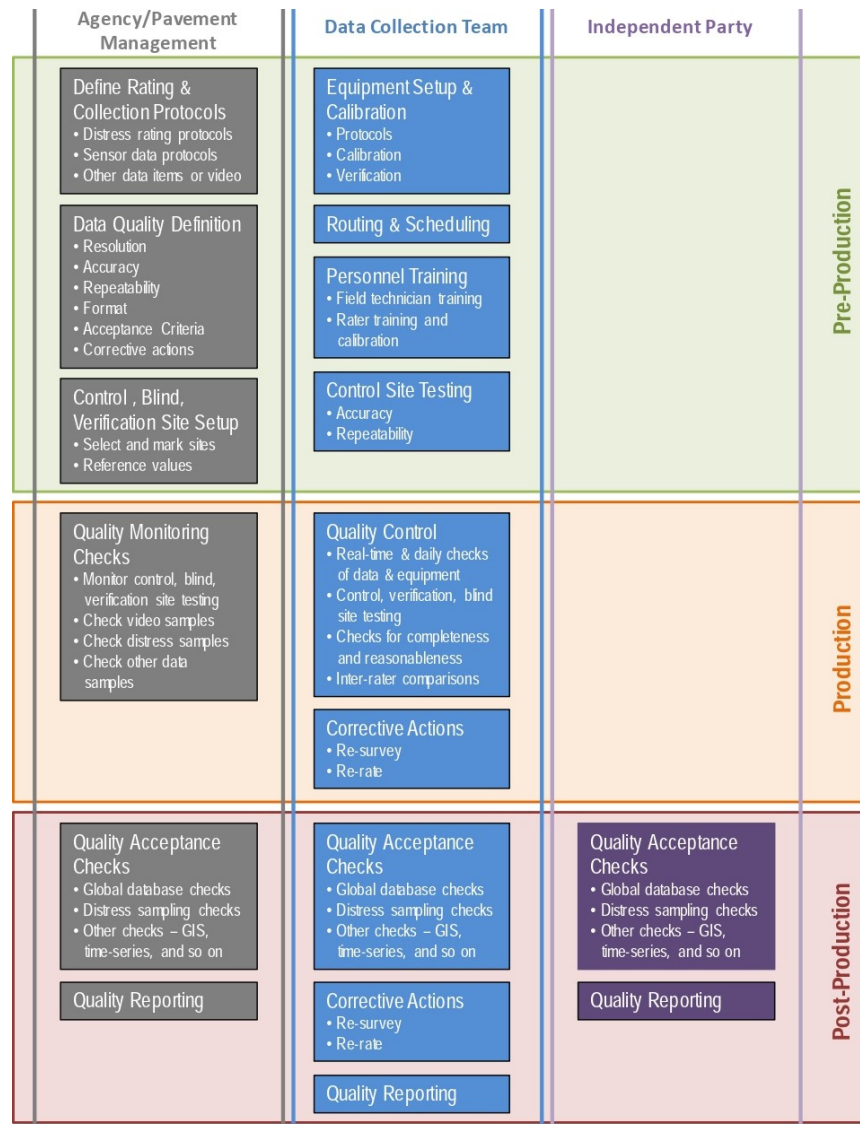


Figura 2.3.4: Actividades durante el proceso de gestión de calidad de datos (FHWA, 2013)

2.3.3. Casos de Validación sobre los registros

2.3.3.1. LTPP -Estados Unidos

En el caso del proyecto LTPP de Estados Unidos, los procedimientos de validación de registros adquieren una gran relevancia, dado el carácter retrospectivo en el uso de la información capturada. En el caso del LTPP norteamericano, tiene un programa de QC/QA que se basa en 4 pasos principales (FHWA, 2013):

1. Colección de datos, donde se enfocan en la calibración de los equipos, revisión de los registros durante su medición y chequeo de datos previos a su envío.
2. Revisión inicial de datos, con la cual se busca encontrar errores obvios cometidos en la toma de

datos mediante uso de softwares que permiten su revisión. Se pueden mencionar ProQual para los datos del perfil, FWSCAN para la deflectometría y el PADIAS para los registros de agrietamiento.

3. Chequeos de carga, que se aplican cuando los registros son cargados en la base de datos del LTPP. Entre ellos están los chequeos obligatorios, que revisan la existencia de información no nula; chequeos de rango y chequeos lógicos, los cuales buscan la compatibilidad entre las tablas de registros.
4. Chequeos automáticos, generados dentro de la base de datos de LTPP, los cuales buscan establecer el grado de confiabilidad de los registros. En este caso, se etiqueta los datos en función del grado conseguido. Una breve explicación de los grados, es la siguiente:
 - A y B en desuso salvo marcadas excepciones
 - C: Búsqueda de datos mínimos para elementos críticos (ej: coordenadas de la sección, trabajo de rehabilitación debe contener los códigos asociados).
 - D: Chequeo de rango, se compara el registro si cumple con valores mínimos y máximos
 - E: Usado para confirmar la consistencia de la información. (ej: examinar la relación entre la gravedad específica mínima, media y máxima de un material)

Un ejemplo del nivel D, puede verse en la siguiente figura:

D. Expanded Range Checks

Expanded range checks are applied to certain fields to identify data element values that fall outside an expected range. Field names are listed below the bolded table name.

<u>Table</u>	<u>Units</u>	<u>Range</u>
MON_RUT_DEPTH_POINT		
LEFT_RUT_DEPTH	mm	0 - 76
RIGHT_RUT_DEPTH	mm	0 - 76

Figura 2.3.5: Extracto requisitos nivel D (FHWA, 2013)

2.3.3.2. New Jersey

El departamento de tránsito de New Jersey, establece controles de calidad a los registros entregados para la base de datos que alimenta su sistema de gestión de pavimentos. Estos controles son (DOT NJ, 2019):

- Registros duplicados de secciones de 160 metros
- Revisión del año, mes y día de inspección
- Valores inválidos de regiones, condados, códigos de autopistas y otros lugares
- secciones con pavimentos de hormigón que no registren juntas
- Segmentos perdidos (160 metros de carretera). Debe quedar registrado que puede ocurrir por mejoras en vía, existencia de puentes, cierre de pistas permanentes o momentáneas como un accidente) entre otras.

- IRI entre 0.47 m/Km hasta 6.3 m/Km
- Ahuellamiento entre 0 y 13 mm
- Porcentaje de área de agrietamiento menor a 0 % o mayor a 100 %
- Deterioros duplicados, es decir, dos secciones consecutivas con los mismos niveles de deterioro incluyendo IRI
- Si una sección no marca algún deterioro, debe revisarse el video que permita asegurarlo
- Deterioros no pertenecientes al tipo de pavimento (Ej: ahuellamiento en pavimentos de hormigón)

2.3.3.3. Proyecto PARIS

Para que la medición entregada al proyecto sea utilizada en los modelos finales, esta debió sobrepasar tres fases de controles de calidad.

1. El primer control se realiza fuera de la base de datos y es una revisión que verifica si los datos cumplen con un rango establecido, es decir, si están dentro de los valores mínimos y máximos. Para esto se formó un programa computacional que revisara automáticamente los registros.
2. El segundo control se basó en la revisión de la coherencia de los registros comparando unos con otros. En caso que alguno no cumpla, se envía un mensaje alertando a la organización que los envió para que explique la razón del error.
3. El tercer y último control consistió en un chequeo visual de gráficos en el tiempo de diversos deterioros.

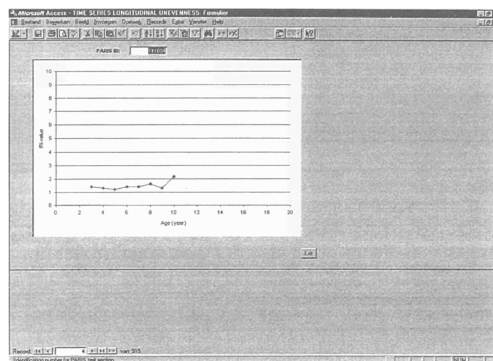


Figura 2.3.6: Revisión visual de desempeño de vías en el tiempo (IRI) (Sweere et al., 1998)

En el caso que alguno de los registros no cumplió con los rangos o fue encontrado inconsistente, no fue utilizado para la obtención de los modelos.

2.3.4. Selección de requisitos sobre validación de registros para la redacción de protocolos

Para conseguir un completo proceso de validación de los registros de inventario y desempeño de pavimentos, es recomendable que la agencia vial, se enfoque en generar un proceso de control de calidad y control de aceptación, que se divida en procedimientos antes, durante y después de la toma de datos.

Sobre los requisitos para antes de la toma de datos, estos comienzan con la exigencia por parte de la agencia de que toda jornada de inspección de pavimentos, sea realizada con equipos certificados y calibrados, al igual que del énfasis en que los operarios que realizan estas tareas se encuentren debidamente capacitados. Lo anterior, que se enmarca dentro de la fase de obtención de datos en la gestión de información, ha sido exhaustivamente revisado en los trabajos de titulación (Burgos, 2019; Muñoz, 2020, Ebensperger, 2020), en donde quedan de manifiesto los equipos, normas y procesos necesarios para una correcta toma de datos sobre el desempeño de los pavimentos.

En el caso de los procesos durante la toma de medición, es importante que la empresa encargada de la medición realice chequeos en tiempo real, verificaciones de tiempo de despliegue de información, chequeo de algunos valores procesados como IRI o porcentajes de agrietamiento y a la vez, la agencia vial solicite muestras de esta información para conocer el estado de estos registros. Es importante, que en caso que se detecten errores o valores sospechosos la agencia vial pueda solicitar una explicación o la reinspección de los tramos, con el fin de asegurar la confianza sobre los registros obtenidos.

Finalmente, posterior a la toma de datos, es importante que la agencia encargada de recolectar los datos, realice pruebas a todos los valores conseguidos incluyendo valores procesados como en bruto. Se recomienda, que la agencia vial realice pruebas de comparación en series de tiempo, búsqueda de segmentos perdidos, revisión de muestras de clasificación (estado del pavimento), etc. De forma similar, Es importante, que en caso que se detecten errores o valores sospechosos la agencia vial pueda solicitar una explicación o la reinspección de los tramos.

Como una referencia para rangos de valores, es posible utilizar lo establecido en los controles de calidad generados por LTPP (FHWA, 2013) en especial en las áreas de regularidad longitudinal, regularidad transversal y capacidad estructural obtenida mediante el uso del deflectómetro de impacto. Dado que la guía está basada en las mediciones realizadas de secciones norteamericanas, será necesario establecer rangos que consideren la realidad nacional de los pavimentos. Para estos rangos iniciales, se pueden utilizar mediciones realizadas previamente, aunque es importante mencionar que estos requisitos son dinámicos y que se deben ajustar periódicamente.

Diferente es la situación encontrada en la medición de ruido de rodadura, ya que, al no encontrarse guías o proyectos donde se validen estos registros de forma continua, será necesario que mientras se genera un grupo de datos sobre ruido de rodadura, las mediciones se validen por lo declarado en la norma AASHTO T 360-16 (AASHTO, 2016), donde se establecen requisitos sobre la dirección de intensidad del sonido, índices de presión intensidad y coherencia de la presión sonora.

Finalmente sobre los procesos de validación en las mediciones de agrietamiento en los pavimentos, se ha decidido, que dada lo novedoso de las mediciones automáticas y que aun sus mediciones tienen cierta variabilidad, sus mediciones deben ser contrastadas con inspecciones visuales en sitios de validación, tal como se expresa en (Muñoz, 2020), se aproveche esta situación que contrasta valores “reales” (medición visual) con los valores adquiridos.

2.4. Disponibilidad de la Información

La última de las etapas sobre la gestión de información en cualquier área, es la disponibilidad de la información capturada. Cuando se habla de disponibilidad se circunscribe a la entrega de los registros en bruto sobre las propiedades del pavimento, su desempeño obtenido en las jornadas de medición y los productos generados a partir de dichas mediciones. Estos productos pueden ser modelos de deterioro, calibraciones de modelos, decisiones sobre la generación de acciones mantenimiento y otros.

Este apartado, se centrará en la disponibilidad de información sobre el inventario y el desempeño de los pavimentos, así como la información que pueda aportar al completo entendimiento de los registros de desempeño e inventario, además de revisar los conceptos y la práctica acerca de los sistemas de georreferenciación y seguridad de los registros.

2.4.1. Sistemas de Georreferenciación

La carretera al ser un elemento con una dimensión muy superior a las otras, requiere ser dividida para conseguir un correcto reconocimiento de cada tramo o sección que la compone. Dado que pueden cientos o miles de tramos o secciones que componen la carretera, es necesario establecer un sistema de referencia sobre esta. Para ello, existen dos alternativas, la primera y más utilizada es el sistema de referencia lineal, donde a partir de un kilómetro cero comienza el desarrollo de un kilometraje que se referencia mediante balizas, puentes u otros elementos.

Un ejemplo de este sistema de referencia, se puede encontrar en la Reference Marker Database (TRM) de TxDOT, en donde se ha establecido una exactitud en la ubicación de 1.61 metros (0.001 millas). Con este sistema de referencia, se alimenta esta base de datos otorgando un código en función de la ruta, kilometraje, clase funcional y otras características (Zhang et al., 1999b).

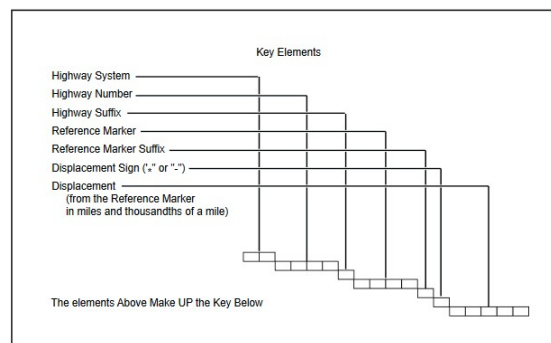


Figura 2.4.1: Claves para la denominación de una sección de la red TxDOT (Zhang et al., 1999b)

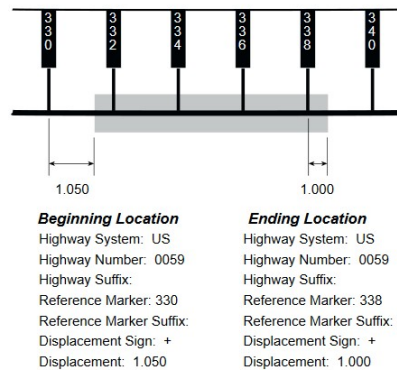


Figura 2.4.2: Definición de secciones usando el sistema TRM (Zhang et al., 1999b)

El segundo sistema, es el sistema de coordenadas geográficas, el cual ha tenido un importante aumento conforme ha avanzado la tecnología. Este se basa en las coordenadas geográficas de latitud, longitud y altitud de la carretera, y tiene como ventaja principal que permite representar de forma sencilla y directa, mapas digitales mediante un sistema de información geográfica (Solminihaç, 1998).

Otra de las ventajas que tienen estos sistemas de coordenadas geográficas, es que al ingresarse información en estos sistemas es posible detectar de forma inmediata cualquier situación de solapamiento. Por ejemplo, en casos de determinar acciones de mantenimiento, si dos acciones actúan sobre el mismo lugar es posible que exista un error (Mensah et al., 2017), además otra de las ventajas es la facilidad de la interacción del usuario con la plataforma de información al estar esta georreferenciada, la posibilidad de integrar la información de pavimentos en un GIS con tecnologías de minería de datos, desplegando gráficamente las decisiones con respecto a la decisión de tratamiento a realizar (Zhou et al., 2010), la posibilidad de observar el estado de los pavimentos conforme pasa el tiempo, incorporar fotografías del estado y/o deterioros de los pavimentos aprovechando la ubicación georreferenciada (Fendi, et al., 2014).

Sobre su uso en agencias, el NCHRP 335 (Flintsch et al., 2004) mediante encuestas a las direcciones de tránsito a los Estados Unidos, ha advertido que gran parte (un 60%) de sus agencias han incorporado el uso de SIG para mejorar sus sistemas de gestión de pavimentos. Si bien, el porcentaje es alto, hasta el año 2004 aquellas agencias que utilizaban un SIG como herramienta en su sistema de gestión de pavimentos, la gran mayoría lo utilizaba para la generación de mapas (figura 2.4.3). Sin embargo, ya en ese entonces, una importante cantidad de departamentos de tránsito planeaban incorporar a sus sistemas de gestión de pavimentos herramientas de análisis espacial (por ejemplo un SIG) como respaldo a la toma de decisiones en sus pavimentos (figura 2.4.4)

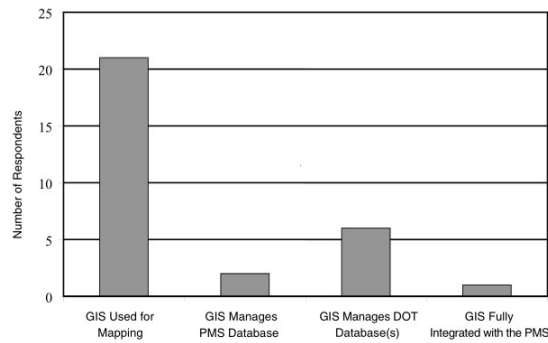


Figura 2.4.3: Integración del SIG con el sistema de gestión de pavimentos (Flintsch et al., 2004)

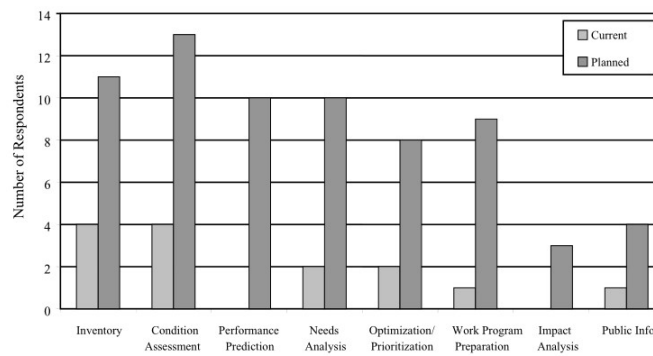


Figura 2.4.4: Número de agencias que usan y planean el uso de análisis espacial para el respaldo de las decisiones en la gestión de pavimentos (Flintsch et al., 2004)

2.4.2. Seguridad de la información

Un punto relevante dentro de una base de datos es la seguridad que acompaña a los registros ingresados en esta. Esta seguridad se puede enfocar desde el nivel de acceso de cualquier usuario que ingrese a una plataforma, hasta la necesidad de producir respaldos físicos de la información capturada. Sobre el primero de los tópicos, es decir, el nivel de acceso, el NCHRP 820 (White et al., 2016), en su objetivo de establecer un marco para una base de datos que permita conocer el desempeño de materiales y acciones de mantenimiento, desarrolló un esquema de seguridad basado en cuatro roles de usuario:

1. Todos los usuario: se considera a cualquier interesado, registrado o no
2. Usuario registrado: aquellos que han creado una cuenta en el sistema y que han sido aprobados por el proceso de validación o el administrador
3. Usuario colaborador: aquel usuario que puede enviar datos a la base de datos
4. Usuario administrador: aquel que es capaz de gestionar los datos dentro de la base de datos y que son responsables de manejar el acceso de los otros usuarios

Como forma representativa, el NCHRP 820 propone una matriz que muestra el nivel de acceso según el tipo de usuario:

Tabla 2.4.1: roles de usuario definidos por requisito funcional (White et al., 2016)

Functional Requirement	User Roles			
	All Users	Registered Users	Contributor Users	Administrator Users
View resources/references	✓	✓	✓	✓
View glossary	✓	✓	✓	✓
View data dictionary	✓	✓	✓	✓
View system statistics	✓	✓	✓	✓
Register for access	✓	✓	✓	✓
Browse and view pavement sections		✓	✓	✓
Query for pavement section datasets		✓	✓	✓
Download pavement section datasets		✓	✓	✓
Perform user account functions		✓	✓	✓
Submit new data			✓	✓
Append data			✓	✓
Publish data			✓	✓
Append new data terms and elements			✓	✓
Perform user management functions				✓
Modify and remove data				✓

Un elemento distinto dentro del área de la seguridad, pero muy relevante es la necesidad de generar continuamente respaldos de la información almacenada. En la actualidad, parte de los respaldos están siendo a través de plataformas digitales de servidores externos dedicados a esta labor (nubes), sin embargo, siempre es necesario establecer respaldos físicos, tal como se estipula en las bases de licitación, sobre el desarrollo del sistema informático para la constatación del nivel de servicio (SIC-NS), donde se establece la necesidad de una copia en las oficinas del Ministerio de Obras Públicas y la entrega en todos los trimestres de respaldos de la base de datos del SIC-NS (MOP, 2015)

Otro aspecto que es relevante dentro de la seguridad de la información, aunque también puede incorporarse dentro de las herramientas de validación de datos, es la ejecución de auditorías a la información almacenada. Es necesario que continuamente el ente a cargo realice inspecciones que permitan determinar si ha existido pérdida de información y en el de caso de encontrar que esto ha ocurrido, investigar si ha sucedido de forma correcta (por ejemplo, con solicitudes de eliminación de datos por duplicidad de información) o han existido problemas al manejar la información y ha desencadenado la supresión de registros. Por lo tanto, es necesario establecer una bitácora que permita conocer cada actividad realizada sobre la base de datos, incluyendo el personal que la realizó.

2.4.3. Sistemas de disponibilidad y plataformas

Sobre la práctica en la disponibilidad de información, esto depende de cada proyecto y agencia. Por un lado, existen agencias de transportes que pueden estar recelosas sobre la distribución de información con usuarios no relacionados directamente con ellos por motivos legales y/o económicos, y por otro lado,

existen proyectos como el LTPP norteamericano que siempre está en la búsqueda sobre como distribuir la información ya recolectada por ellos.

Entendiendo que cada gestor tiene su propia forma, a continuación se revisará una serie prácticas llevadas a cabo por agencias y proyectos dentro y fuera de Chile, mostrando la forma en que comparten su información sobre el inventario y el desempeño de los pavimentos.

2.4.3.1. LTPP - Estados Unidos

En cuanto a información disponible sobre pavimentos este LTPP es el banco de datos público más importante. Como ya se ha mencionado antes, la información sobre cada una de las secciones sin importar la clase de estudio realizado en ella, se encuentra disponible a cualquier usuario interesado.

Al ingresar a la plataforma <https://infopave.fhwa.dot.gov/>, los usuarios podrán descargar reportes técnicos generados por el proyecto, investigaciones, información sobre el desempeño de las secciones, información general sobre ellas, la materialidad de cada capa, historial de mantenciones y rehabilitaciones, información sobre los registros meteorológicos circundantes a las secciones e información de tránsito (conteos, ejes equivalentes o factores atingentes al diseño basado en MPDEG) que circula por cada sección de estudio.

Debido a la ingente cantidad de información disponible en la plataforma, LTPP ha establecido que dependiendo de la descarga de información que un usuario estima necesaria, esta se le entregará ya sea en Microsoft Excel, Access o SQL. Se entregará en formato Excel siempre que la cantidad de registros descargados sea menor a quinientos mil registros, mientras que las descargas con más de cinco millones de registros, deberán ser extraídas en formato Microsoft SQL.

2.4.3.2. LTPP - Lanamme UCR

La base de datos de este proyecto, se enfoca en facilitar datos de cada uno de los tramos que van desde sus elementos generales como fotografías, ubicación, detalles geométricos hasta resultados de IRI, PCI, deflectometría y otros elementos que aporten al buen entendimiento del desempeño de la sección. Además de la base de datos, en este proyecto se ha buscado que dicha base de datos pueda catalogarse como un programa funcional que no solo reúne los datos de diversos tramos, sino que además los despliega y muestra de una forma amigable con el usuario en términos de tablas, gráficos y reportes (Camacho-Garita et al., 2016).

Sobre el acceso a esta base de datos, está se encuentra abierta a funcionarios del Lanamme y, especialmente tiene mayores libertades a aquellos encargados de la Unidad de Materiales y Pavimentos, aunque se menciona que también puede ser funcional a otros investigadores externos que deseen contar con la información contenida en ella.

La información contenida en esta base de datos son los registros de:

- Características generales de los tramos

- Detalles de las capas que conforman el pavimento
- Ensayos de granulometría, contenido de asfalto, ensayo próctor, CBR y consistencia
- PCI
- IRI
- Deflectometría

Además los elementos pertenecientes a esta base de datos pueden ser exportados en formato Excel lo cual da cuenta de la amigabilidad de esta información. La base de datos, se divide en funcionalidades principales

1. Búsqueda Simple: Muestra de una forma más sencilla y amigable, todas las opciones a ver en la base de datos de LTPP
2. Búsqueda avanzada: Esta búsqueda le permite ir a un parámetro en específico y ver el resultado, sin necesidad de pasar por ventanas extras
3. Reporte de un tramo: Permite crear un reporte resumen de resultados de un tramo escogido que luego es exportado a formato PDF
4. Agregar resultados: permite agregar resultado desde un nuevo tramo hasta resultados de pruebas de laboratorio o mediciones de desempeño.

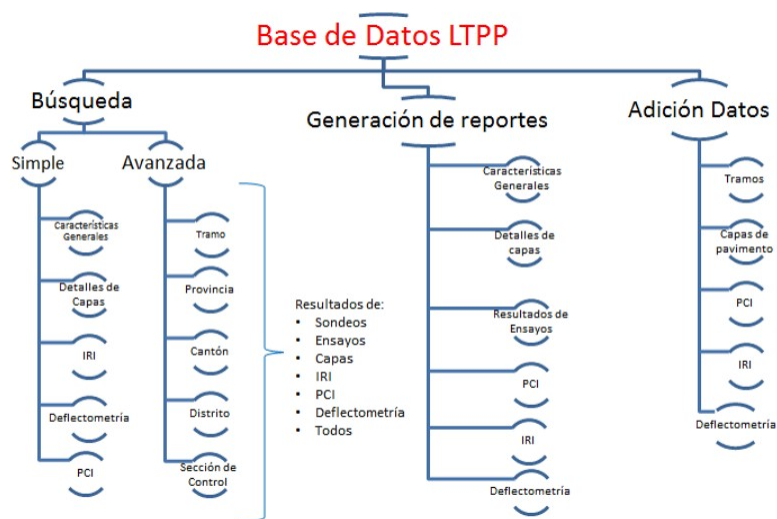


Figura 2.4.5: Esquema modular de la base de datos como herramienta de búsqueda y despliegue de resultados (Camacho-Garita et al., 2016)

2.4.3.3. Texas

El departamento de tránsito de Texas (TxDOT), ha desarrollado una plataforma digital que permite conocer los datos abiertos al público de una forma georreferenciada. Esta plataforma muestra una capa de polilíneas, donde cada una contiene las características de cada calzada, a la cual se puede ingresar través del link <https://gis-txdot.opendata.arcgis.com/datasets/-txdot-roadway-inventory-2016->

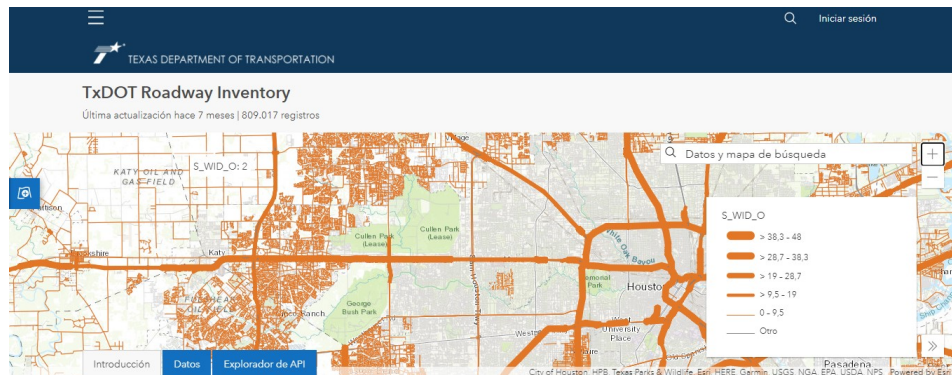


Figura 2.4.6: Plataforma de TxDOT desplegando el ancho de las vías (en pies)

Estas polilíneas entregan información general de la vía como volúmenes horarios de camiones en las vías, ejes equivalentes, ancho de las pistas, clase funcional, velocidades promedios y máximas de circulación, materialidad superficial de las calzadas, ancho de bermas y otros elementos, aunque aun falta por incorporar otras informaciones como el caso de los espesores de las capas de pavimento.

Si bien este apartado se ha mostrado la plataforma de Texas, el departamento de tránsito de Florida y el de Virginia, también se encuentran mejorando una plataforma similar a la recientemente mostrada y el Departamento de Tránsito de Alaska tiene dentro de sus particularidades la descarga de porcentaje de agrietamiento, ahuellamiento e IRI de sus pavimentos en formato KMZ (para su apertura mediante Google Earth)

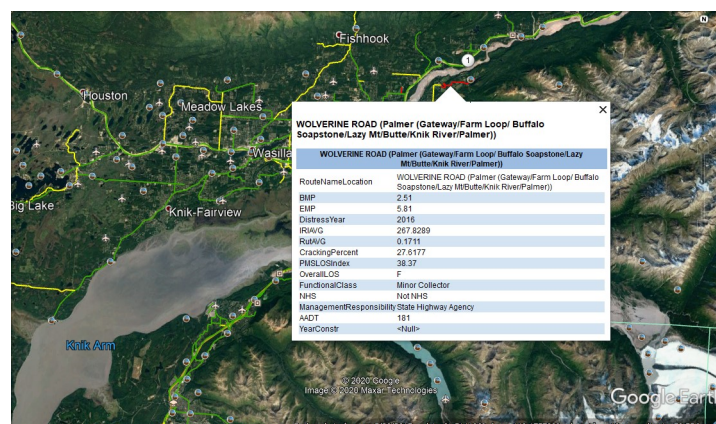


Figura 2.4.7: despliegue de información de la red en Alaska

2.4.3.4. MnRoad

En los década de los ochenta, surgió en Estados Unidos la idea de formar un lugar de prueba para pavimentos que envueltos en un clima frío, sin embargo, no fue hasta el año 1990 en que se comienza la construcción de MnRoad. Su construcción termina el año 1993 y costó alrededor de US\$25 millones. El MnRoad se compone de más de 50 secciones de prueba entre pavimentos rígidos y flexibles divididos en 3 secciones, la primera de 3.5 millas de la vía principal perteneciente a la autopista I-94, la segunda de 3.5 millas de la I-94 Original Westbound y a tercera que representa una vía de bajo tránsito son 2.5 millas y se destaca por tener su clásico loop.

El MnRoad, se caracteriza por tener una gran base de datos sobre el desempeño de pavimentos, se diferencia del LTPP en que este último es más abundante en tamaño de información, mientras que el Mn Road se diferencia por contener información mucho más especializada. Ejemplo de esto, es el uso de instrumentación en sus pistas, esta contiene más de 4500 sensores dispuestos en sus tres partes, teniendo en la mayoría de sus pavimentos flexibles strain gauges en forma de H tanto en dirección transversal como longitudinal, Linear Variable Differential Transformer (LVDT) que obtienen los valores de deformación vertical de las capas que componen el pavimento y celdas de presión, las cuales consiguen obtener los esfuerzos que sufren las capas del pavimento. En el caso de pavimentos rígidos los instrumentos de respuestas dinámicas se componen de sensores de apertura de juntas, vibrating wire strain gauge y strain gauges dinámicos.

Otra diferencia es que los tipos de desempeño que registran en el MnRoad también son más especializados, en este caso se puede mencionar la medición de ruido y absorción de ruido en cada una de las celdas que componen este proyecto. Las mediciones en el MnRoad son mediante el sistema OBSI y presentan la siguiente información:

- Celda donde se mide
- Fecha y hora
- Operador
- frecuencia
- Niveles de intensidad, coherencia y presión sonora de ambos micrófonos para cada sonda
- Nivel de intensidad promedio de ambos micrófonos para cada sonda

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	CELL	LANE	DAY	TIME	OPERATOR	TEST_TIRE	FREQ_HZ	LEADING_INTENSITY_LEVEL	LEADING_PI	LEADING_COH	TRAILING_INTENSITY_LEVEL	TRAILING_PI	TRAILING_COH	AVG_INTENSITY
2		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	250 85.1	1.0	0.4				0.5	
3		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	315 83.7	1.7	0.6	83.9		4.4	0.5	83.8
4		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	400 83.0	2.4	0.8				0.6	
5		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	500 82.3	3.2	0.9	81.8		4.5	0.7	82.1
6		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	630 85.4	2.2	1.0	82.9		3.5	0.9	84.3
7		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	800 91.3	1.0	1.0	89.4		0.9	1.0	90.5
8		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	1000 92.5	1.1	1.0	91.5		0.8	1.0	92.0
9		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	1250 87.5	1.6	1.0	87.7		1.3	1.0	87.6
10		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	1600 89.3	1.1	1.0	88.4		0.8	1.0	88.8
11		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	2000 88.9	1.1	1.0	87.9		0.7	1.0	88.4
12		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	2500 84.5	1.4	1.0	84.5		1.0	0.9	84.5
13		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	3150 80.1	1.3	0.9	80.6		1.0	0.9	80.3
14		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	4000 76.9	1.7	0.8	76.2		2.0	0.8	76.5
15		1 Driving	11-09-2007	10:06:21:780	Steve Olson	SRTT	5000 73.8	2.0	0.7	71.5		3.3	0.6	72.8
16		1 Driving	11-09-2007	10:15:35:405	Steve Olson	SRTT	250 86.9	-1.6	0.3				0.4	

Figura 2.4.8: Medición de ruido en el MnRoad mediante método OBSI

2.4.3.5. Chile

En Chile, al existir caminos que se encuentran bajo la supervisión del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y algunas carreteras bajo el régimen de concesiones, se ha generado una mezcla en disponibilidad de la información sobre su desempeño.

En el caso de los caminos bajo la dirección del MOP, existen diversas fuentes sobre su estado y la composición de su red. Con respecto a la red, esta se dimensiona y actualiza todos los años a través del trabajo realizado por el Departamento de Gestión Vial, entregando estadísticas sobre la magnitud de los caminos de la red vial nacional, además se entregan datos sobre la longitud de caminos por región y el tipo de carpeta, incluyendo información sobre obras anexas, tales como puentes, pasarelas, túneles y ciclovías.

Tabla 2.4.2: Extracto del Dimensionamiento y Características de la Red Vial Nacional 2019

CAMINOS PAVIMENTADOS, DETALLE DEL TIPO DE CAPA DE RODADURA Y SU LONGITUD
REGION METROPOLITANA DE SANTIAGO - DIC. 2019

Camino	K.inicial	K.final	Long.(km)	Capa de Rodadura
Código: 73D20141 Rol: G-141 Nombre: Cruce G-17 (Av. General San Martín - Peldehue) - Termas de Collina	0,000	0,950	0,950	A
Código: 73D20151 Rol: G-151 Nombre: Cruce G-149 (Santa Marta de Liray) - San Miguel - Collina	0,000	6,978	6,978	A
Código: 73D20159 Rol: G-159 Nombre: Cruce G-151 (San Miguel) - Cruce Diagonal Santa Elena	0,000	1,897	1,897	A
Código: 73D20172 Rol: G-172 Nombre: Cruce G-16 (Chorrillos) - La Primavera - Cruce G-18	0,000	5,174	5,174	A
Código: 73D30345 Rol: G-345 Nombre: Cruce G-25 - Los Maltenes - El Alfalfal	0,000	22,620	22,620	A
Código: 73D30405 Rol: G-405 Nombre: Cruce G-27 - El Principal - Cruce G-403	0,000	8,070	8,070	A

Sumado a lo anterior, el MOP ha establecido un visor digital de la red vial nacional mediante un sistema georreferenciado. A este visor, se puede ingresar mediante el siguiente link <http://www.mapas.mop.cl/>. Esta forma de visualización, permite informar acerca de la misma información que se encuentra en el documento de Dimensionamiento y Características de la Red Vial Nacional, sumándole la posibilidad

de conocer las ordenes de trabajo a realizar, esto es conocer el lugar, costo, persona responsable, cantidad a realizarse y otros campos.

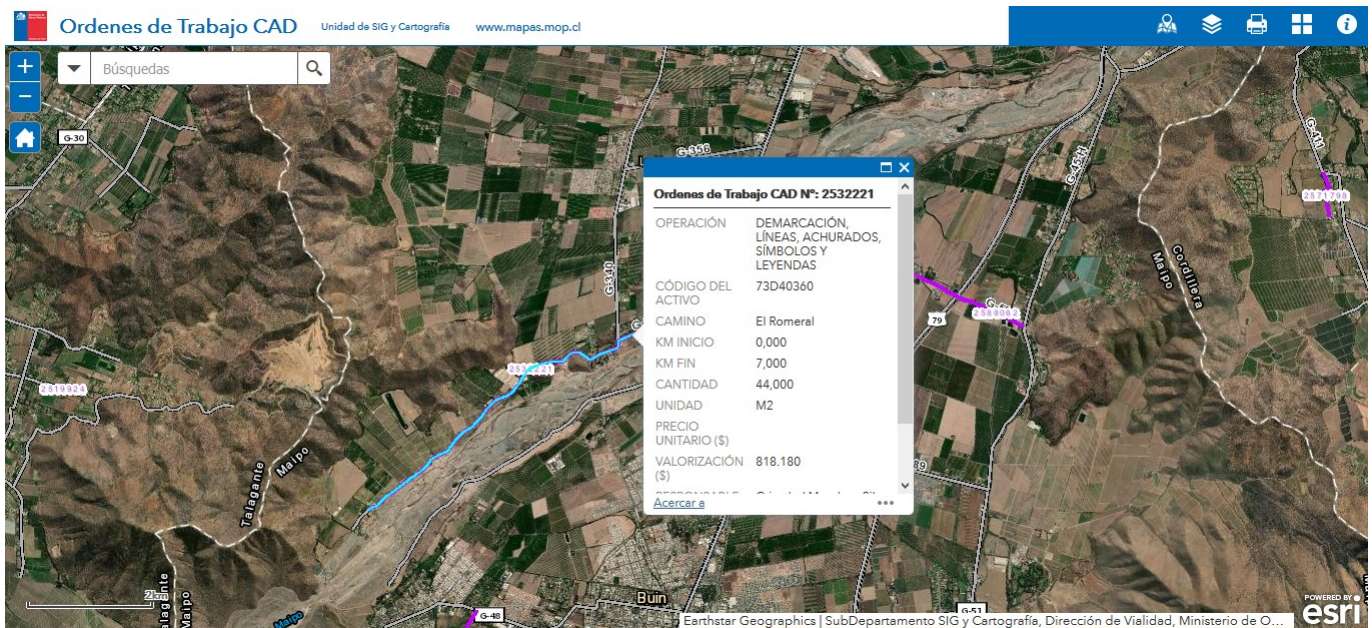


Figura 2.4.9: Visualización de órdenes de trabajo en el sistema de mapas del MOP

En la otra vereda, en el caso de los caminos concesionados, su información se encuentra disponible dentro del SIC-NS y para obtener acceso a ella, es necesario que los encargados de esta herramienta computacional le otorguen al interesado los permisos correspondientes, así esa información en general solo se mantiene entre el inspector fiscal y la concesionaria más aquellos usuarios permitidos.

2.4.4. Selección de requisitos de disponibilidad para la redacción de protocolos

De los casos analizados, es claro que existen agencias y proyectos que permiten un gran acceso público a la información de su red de pavimentos, mientras existen otras más herméticas donde la información entregada está disponible de forma segmentada y con una mayor dificultad de manejar como en el caso chileno, donde en los caminos bajo la tuición del MOP existe información en una plataforma sobre las actividades de preservación, medidas de desempeño y decisiones de trabajos en el PAM y en el caso de concesiones, solo tienen acceso aquellos a los que la concesionaria ha entregado el mismo.

Lo anterior es un problema, ya que, las carreteras concesionadas del país son las vías de comunicación y abastecimiento más importantes del país, y en la medida que la información de su estado sea pública genera la obligación de una mayor responsabilidad por parte de las agencias a sostener un mejor estado de su infraestructura. Yendo en esa dirección, se considera pertinente mejorar el acceso a la información para cualquier usuario interesado en conocer el estado de los pavimentos, elementos conexos en la carretera y actividades de preservación que se ejecuten en ella.

Sobre como disponerla al usuario interesado, es evidente que lo mejor son los sistemas georreferenciados, ya que, su facilidad de entendimiento y operación es por lejos superior al uso de planillas de información, en este aspecto se puede destacar el visor digital de la red nacional , ya que además de su completa disponibilidad a este se le podría aumentar el nivel de información que ya se encuentra disponible en él, de forma similar a lo que se encuentra en los sistemas de Texas, Florida y Alaska, en especial este último, donde se permite conocer los valores de agrietamiento, regularidad longitudinal y ahuellamiento promedios de la red estatal.

Además se considera apropiado que la información no solo se encuentre de forma online sino, que también se pueda descargar en forma de planilla según le interese al usuario. La información a descargar debiera estar más detallada que aquella mostrada de forma online y en formatos que sean accesibles al usuario común, como planillas en Microsoft Excel o Microsoft Access. Por otro lado, frente al hecho que la información de estructuras, mantenciones, materiales y desempeño de los pavimentos, se genera a medida que pasan los años, es imprescindible que cada concepto, variable o registro considerado se encuentre debidamente definido y dicha definición se mantenga en el tiempo y es por esto, que es necesario que se encuentre disponible el diccionario que detalle el significado de cada elemento.

Para finalizar, si bien el objetivo es que la información se encuentre disponible a cualquier usuario interesado, se recomienda un proceso de registro por parte de la agencia hacia los usuarios, pero que no pueda negar el registro a los usuario, para no permitir malas prácticas y que dentro de este proceso se pueda conocer mejor a los usuarios interesados en la información, sus áreas de interés y que estos a la vez puedan comentar sobre la disponibilidad de la información en el sitio web, sobre la información que falta y las posibles críticas a la página.

2.5. Protocolo Sobre la Información de Inventario y Desempeño de Pavimentos

El presente protocolo, busca entregar los requisitos y procedimientos necesarios para la gestión de información conseguida sobre el inventario y desempeño de pavimentos. Este, tiene por objetivo, cubrir los puntos necesarios para asegurar una correcta gestión de esta información, comenzando desde el proceso de tramificación de la vía hasta la disposición de información del desempeño e inventario. En general, las partes se enfocan en apuntar una serie de requisitos que el ente encargado deberá cumplir sumados a procedimientos que indican las acciones a tomar dependiendo la situación.

2.5.1. Proceso de generación de tramos, secciones sobre un tramo y la bitácora del tramo

Este apartado busca tramificar y luego segmentar la carretera concesionada. Estos procesos, se enfoca en que las partes en la cual sea dividida pueda ser representativa de una estructura o geometría del pavimento

1. La carretera deberá ser tramificada dividiéndose primero por pistas y luego en tramos de un kilómetro según lo dispuesto en 2.5.4:
2. Cada tramo deberá identificarse según punto 1 de .

La forma de identificar el tramo será mediante la siguiente codificación:

$$XXXXYYYY - SS - P$$

Nota 1: XXXX, código de la ruta nacional, justificado a la derecha y sin guiones, Ej: la ruta G-405 será G405 .

Nota 2: YYYY, kilómetro de inicio del tramo. El primer tramo tendrá YYYY igual a “0000”. En caso que por un puente u otro elemento en la carretera por ejemplo, el inicio del tramo sea en el kilómetro 454,7, el YYYY de este tramo será 454

Nota 2: SS, sentido de la pista, puede ser NN (norte), NE (noreste), EE (este), SE (sureste), SS (sur), SO (suroeste), OO (oeste) o NO (noroeste).

Nota 3: P, número de la pista según el siguiente diagrama

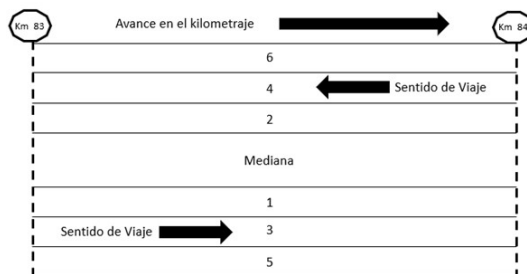


Figura 2.5.1: Numeración de pistas

3. Una vez tramificada cada pista, se debe seccionar la carretera según los siguientes elementos. Es importante que el largo de cada sección deberá encontrarse entre 50 metros hasta los 1000 metros. El largo de todas las secciones deberá ser múltiplo de 50 metros (Ejemplo: 150, 300, 350, ..., 1000 metros)
 - a) Cambios en la estructura del pavimento que conforma la pista de la carretera.
 - b) Presencia de elementos puntuales como: puentes, túneles, plazas de peaje, cuestas.
 - c) Tipo de berma
 - d) Ancho de pista
 - e) Tipo de drenaje
 - f) Enlaces
 - g) Elementos climáticos tales como cuerpos de agua
4. El código del segmento será el siguiente:

$$XXXXYYYY - SS - P - UVW$$

Nota 1: XXXX-SS-P, código del tramo según 2.5.3

Nota 2: U, número de segmento en orden del kilometraje

Nota 2: V, número del segmento dividido en segunda instancia

Nota 3: P, número del segmento dividido en tercera instancia

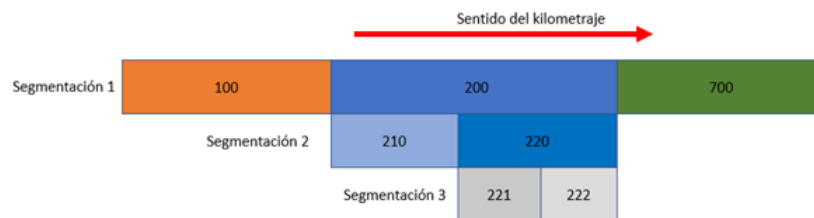


Figura 2.5.2: Sistema de codificación de los segmentos

5. Conforme pasa el tiempo, si es necesario necesario, se deberá segmentar alguna sección inicial en los siguientes casos:
 - a) Actividades de conservación que signifiquen un cambio en la estructura de pavimento
 - b) Reconstrucción
 - c) Diferencias notorias en los desempeños de segmentos del propio tramo
 - d) En caso que un elemento de la carretera en particular, genere un problema con el desempeño de esta, segmentar entre antes y después del elemento. Como ejemplo, si producto de una alcantarilla se genera un profundo agrietamiento, se segmenta antes y después de la alcantarilla.

6. Cada tramo de la carretera deberá tener una bitácora con el formato dispuesto en 2.5.3:
7. Cuando se divide un sección inicial, deberá quedar registrado en la bitácora del tramo la fecha, la razón y cualquier elemento que mejore el entendimiento del proceso.
8. La bitácora de cada tramo deberá ser actualizada en el portal web del punto 2.5.5 hasta en un máximo de 30 días.

Bitácora Estación tramo de carretera					
Ruta	Código tramo	Km inicio	TMDA	Latitud	longitud
según punto 2 de 2.5.1	según punto 2 de 2.5.1	según punto 2 de 2.5.1	Según tabla 2.5.2	Según tabla 2.5.3	Según tabla 2.5.3
Largo tramo	sentido	Pista	N° secciones	Fecha de construcción	última fecha de mantenimiento
Según tabla 2.5.3	Según tabla 2.5.3	según punto 2 de 2.5.1	según punto 3 de 2.5.1	dd-mm-aa	dd-mm-aa
Registro de mediciones de desempeño					
En este apartado mencionar de forma cronológica situaciones donde se realicen mediciones de desempeño sobre el pavimento tales como, medición de regularidad transversal, regularidad longitudinal, agrietamiento, capacidad estructural, etc.					
<i>Fecha / Hora de medición/ Nombre empresa que realiza la acción/Descripción Técnica del trabajo realizado como fotografías, planos o diagramas que faciliten el entendimiento del proceso</i>					
Registro de actividades de mantención					
En este apartado mencionar de forma cronológica situaciones de mantención sobre el pavimento. De cada una debe quedar registrado lo siguiente					
<i>Fecha/ Nombre de la empresa/fecha término de Mantención/ Descripción Técnica del trabajo realizado/ Fotografías/Informes</i>					
Registro de segmentación					
En este apartado mencionar de forma cronológica los procesos de segmentación posteriores a la inicial					
<i>Fecha/ Razón de la segmentación/ código de los nuevos segmentos/Descripción en kilómetros de los nuevos límites entre secciones</i>					

Figura 2.5.3: Formato bitácora de tramo

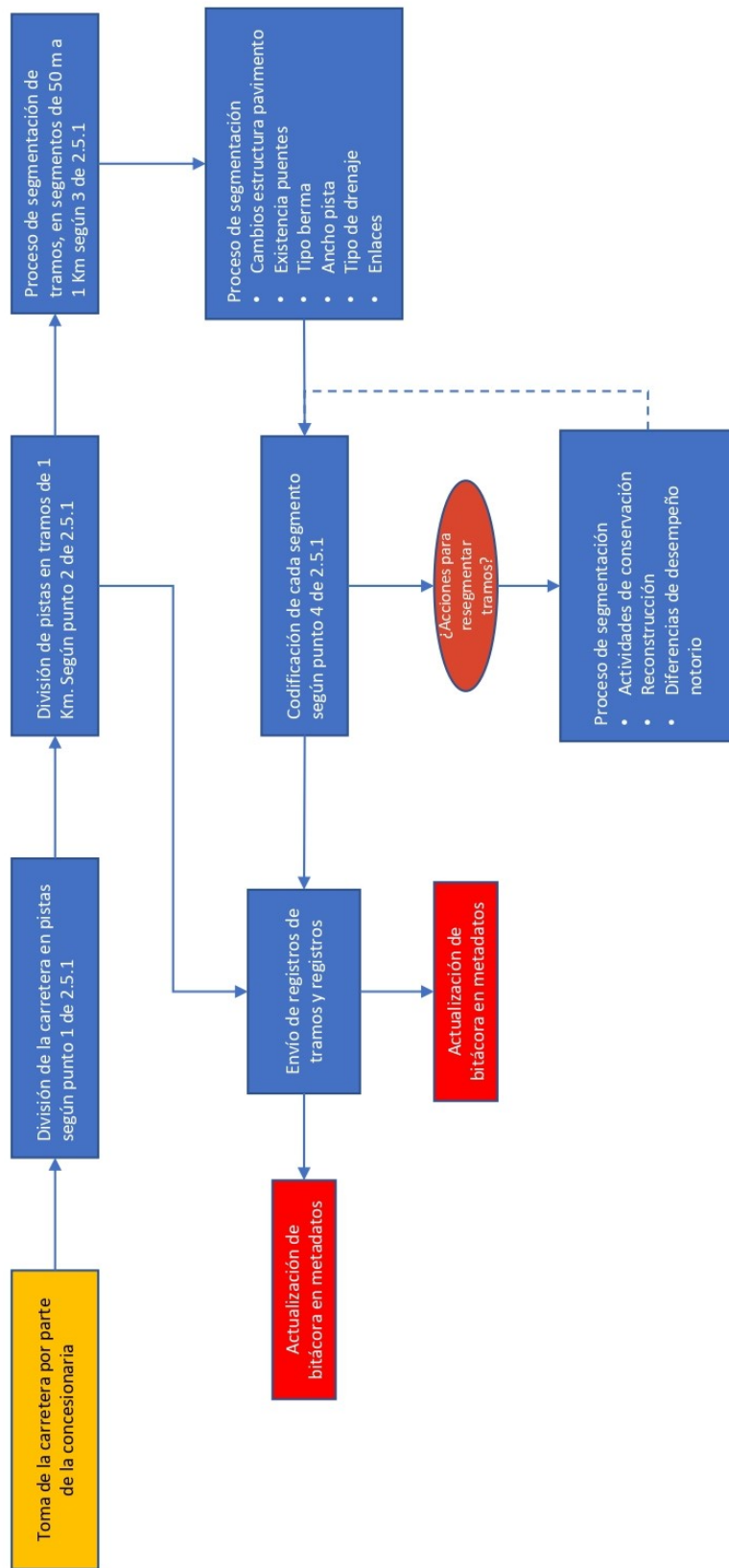


Figura 2.5.4: Procedimiento para la tramificación y segmentación de la carretera

2.5.2. Sobre la seguridad de los datos y archivos

En este punto se enumeran requisitos que el ente a cargo deberá cumplir con el fin de evitar cualquier corrupción o pérdida de los registros

1. Todo el personal del sistema de gestión de datos de información de desempeño e inventario, deberá ser consciente de sus responsabilidades profesionales.
2. Como medio contra el deterioro, los archivos y el entorno de base de datos deben ser seguros y estar seguros de riesgos materiales, como incendios y exceso de humedad.
3. En relación con los datos digitales, los usuarios deberán respetar las normas de seguridad relativas a la base de datos y sus componentes. Solo un número reducido de personas tendrá permitida la manipulación de datos, su inserción, actualización y eliminación.
4. En ningún caso se permitirá el cambio de registros, es decir, no se deberá alterar el valor adquirido en los laboratorios u enviada por los proveedores
5. El personal autorizado para manipular una base de datos debe comprometerse a no efectuar ninguna transacción aparte de las operaciones y prácticas aprobadas por el gestor de datos.
6. Cualquier modificación que se introduzca en las tablas de datos debe ser objeto de un registro de auditoría, que debe ser accesible y ser sometido a un control.
7. Deberán aplicarse principios relativos a la seguridad de las contraseñas, como los que suponen no desvelarlas ni anotarlas en un papel, cambiarlas regularmente, usar contraseñas muy seguras compuestas por letras, números y caracteres aparentemente no relacionados.
8. Deberán desactivarse todos los servicios innecesarios que estén presentes en la base de datos del ordenador.
9. La base de datos también deberá estar protegida contra virus y ataques de piratas informáticos.
10. Deberán hacerse copias de seguridad frecuentemente, puesto que es probable que el trabajo realizado con posterioridad a la copia de seguridad más reciente se pierda y sea necesario repetirla por si se produce un fallo informático. Por lo general, debería hacerse una copia de seguridad acumulativa diaria y una copia completa semanal.
11. De vez en cuando, por lo general, una vez al mes, deberá guardarse una copia de seguridad completa de las tablas de datos en un lugar seguro, protegido contra incendios y distante de la ubicación física de la base de datos. Es común conservar tres copias del mismo archivo en diferentes lugares seguros y, de ser posible, en diferentes pueblos o ciudades.

2.5.3. Sobre el almacenamiento de los datos

Con el fin de ordenar y gestionar todos los registros conseguidos sobre el desempeño e inventario de pavimentos, se deberá generar una base de datos la cual deberá estar ordenada en función de cada variable medida.

1. Como parte del proceso de creación de la base de datos y sus objetos, la institución a cargo deberá realizar un análisis del volumen y crecimiento de los datos, para realizar un dimensionamiento adecuado de la infraestructura, configuración y tamaño de la base de datos a crear. De la misma manera es relevante conocer el número de transacciones esperadas, niveles de concurrencia, número de usuarios potenciales, entre otros puntos que puedan favorecer la realización de un dimensionamiento correcto e informado.
2. Al momento de generar una base de datos debe definirse un responsable técnico o administrador de la base de datos y un responsable o propietario de la información contenida.
3. Utilizar una nomenclatura estándar para las bases de datos y sus objetos, para todos los proyectos y sea que constante durante todo su diseño.
4. Se sugiere mantener nombres cortos y descriptivos, sin utilizar espacios en blanco o caracteres especiales.
5. Se debe confirmar la longitud máxima permitida para los nombres por el Sistema Manejador de Bases de Datos Relacional (RDBMS por sus siglas en inglés) a emplear.

2.5.4. Sobre el Proceso de Validación

Este apartado busca establecer un proceso general de control de calidad y control de aceptación, que permita detectar, etiquetar y suprimir registros que puedan no ser correctas. En este caso, el objetivo principal allanar el camino para en un futuro realizar procedimientos mejor adaptados a la concesión.

1. Siguiendo el proceso de validación del diagrama 2.5.5, se busca que en cada etapa del proceso de toma de datos (antes, durante y después) exista tanto verificaciones por parte de la agencia encargada como de la concesionaria.
2. Deberá establecerse por parte de la concesionaria un proceso de control de aceptación de los registros generados por el tercero encargado, donde se realice lo siguiente:
 - a) Para previo a la medición:
 - 1) Requisitos para la solicitud y exigencia por parte de la concesionaria, de que la empresa encargada cumpla con tener operadores capacitados para el trabajo requerido
 - 2) Exigencia de los resultados conseguidos en sitios de prueba, previos a la toma de datos
 - 3) Se recomienda que la concesionaria utilice la propuesta para medición de desempeño de pavimentos encontradas en (Ebensperger, 2020; Muñoz, 2019; Bustamante, 2019)
 - b) Durante la toma de datos
 - 1) Retroalimentación de la concesionaria con los operadores encargados, buscando conocer problemas, posibles fallas, etc.
 - 2) Revisión de muestras de datos en bruto constantemente
 - 3) Revisión de datos procesados (Ej: IRI) periódicamente
 - c) Posterior a la toma de datos
 - 1) Revisión exhaustiva de los registros obtenidos
 - 2) Revisión de muestras con algoritmos de rangos y completitud
 - 3) Comparación en series de tiempo y de forma visual
3. Junto al proceso de medición deberá establecerse que la agencia encargada de la medición considere el uso de procesos de control de calidad que realicen lo siguiente:
 - a) Previo a la medición
 - 1) La agencia encargada deberá cumplir con cumplir con sitios de prueba apropiados y la contratación de trabajadores capacitados
 - b) Durante la medición
 - 1) La agencia deberá realizar chequeos de valor en tiempo real y verificaciones de coherencia entre variables
 - 2) Realizar procedimientos de validación sobre los valores procesados como IRI
 - c) Finalmente luego de la medición
 - 1) realizar chequeos de calidad por rango para todos los valores

4. En caso que en cualquiera de las etapas de medición, sea detectado algún incumplimiento en los procesos de validación, se deberán realizar acciones correctivas como volver a registrar los datos, cambio de equipos, cambio de proveedor, etc.

Los siguientes puntos, buscando entregar ayudas a los procesos de validación arriba mencionados

1. Para la validación de los datos obtenidos durante la medición para el módulo de Capacidad Estructural y para el módulo de Eficiencia de Transferencia de Carga en Pavimentos Rígidos, se puede considerar como guía el documento LTPP Information Management Systems IMS Quality Control Checks del año 2016, en específico su capítulo número 5. Con esta guía, se busca que toda medición y dato proporcionado lleven al menos una etiqueta asociada al grado de calidad de la medición.
2. Para la validación de los datos obtenidos durante la medición para el módulo de Agrietamiento de Pavimentos, se puede considerar verificar el desempeño del proceso de recopilación, detección y análisis de agrietamiento a través, del procesamiento anual de datos obtenidos a partir de 5 sitios de validación de 100 metros de longitud. Dichos sitios de validación, deben presentar variables representativas de los datos que se espera encontrar durante una medición rutinaria. El nivel de validación deberá ser entregado en forma de reporte en el cual se deben incluir:
 - a) Los verdaderos valores de terreno determinados por técnicos capacitados en auscultación de grietas pertenecientes a una institución independiente de la concesionaria.
 - b) Los valores de agrietamiento derivados del sistema automático de medición para cada categoría y severidad circulando a altas velocidades, con el porcentaje de éxito respectivo.
 - c) Número de grietas falsas detectadas cada 50 metros cuadrados de pavimento.
3. Para la validación de los datos obtenidos durante la medición para el módulo de Regularidad Longitudinal se puede considerar como guía el documento LTPP Information Management Systems IMS Quality Control Checks del año 2016, en específico su capítulo número 4. Con esta guía se busca que toda medición y dato proporcionado, lleven una etiqueta asociada al grado de calidad de la medición.
4. Para la validación de los datos obtenidos durante la medición para el módulo de Regularidad Transversal, se puede considerar como guía el documento LTPP Information Management Systems IMS Quality Control Checks del año 2016, en específico su capítulo número 6. Con esta guía se busca que toda medición y dato proporcionado, lleven una etiqueta asociada al grado de calidad de la medición.
5. Para la validación de los registros obtenidos sobre la medición de ruido en carreteras, se recomiendan los siguientes elementos para validación.
 - a) La dirección de la intensidad del sonido para cada banda de frecuencia de tercios de octava debe estar en la dirección del neumático, es decir, el vector de intensidad de sonido debe ser positivo

- b) El índice de presión-intensidad (PI) para cada banda de frecuencia de tercios de octava entre los 400-5000 Hz debe estar dentro del rango especificado por la Tabla 1 en la norma AASHTO T 360-16
- c) La coherencia de la presión sonora entre los dos micrófonos para cada sonda de intensidad debe ser igual o mayor a 0,8 para cada banda de frecuencia de tercios de octava.

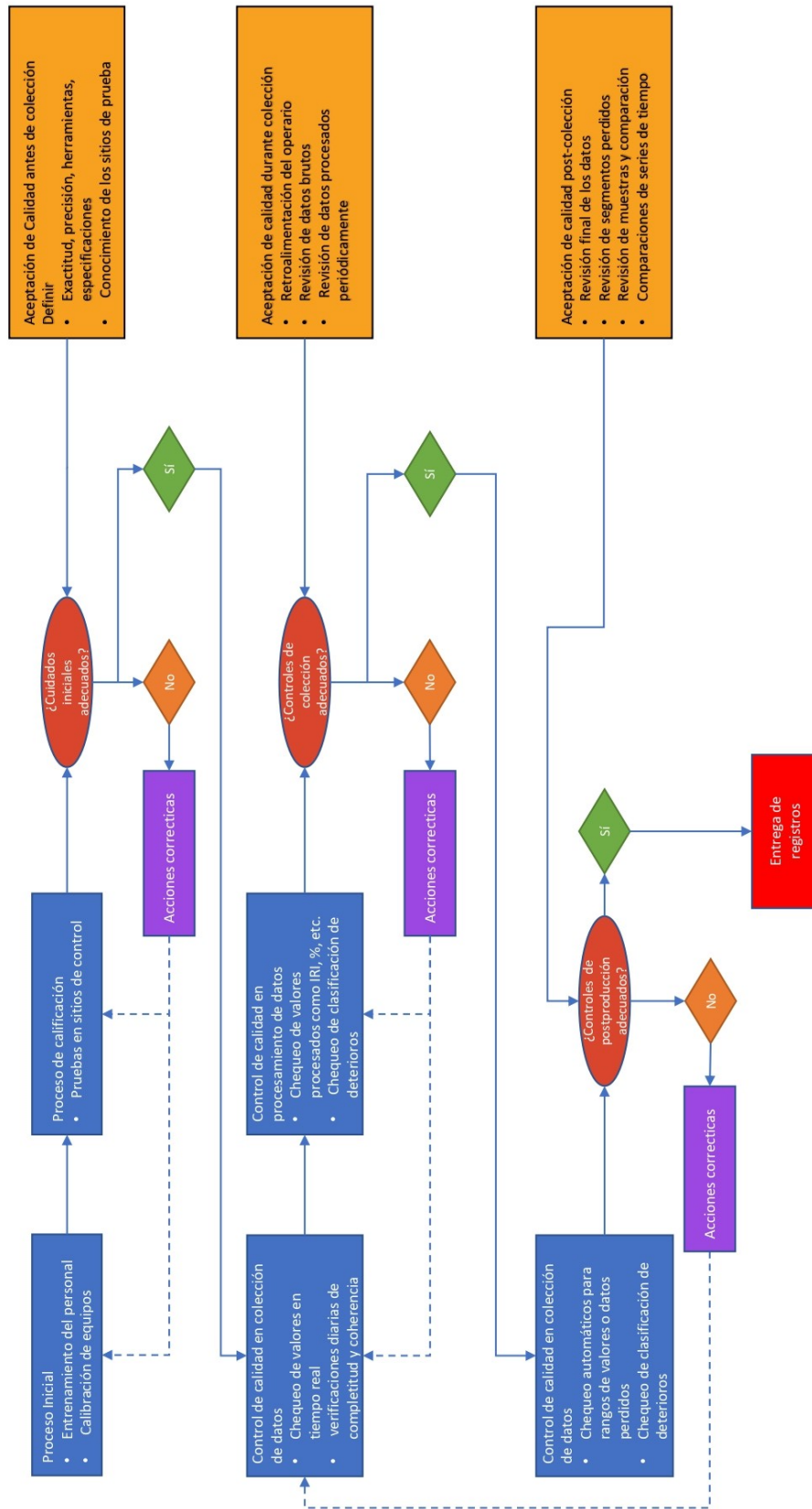


Figura 2.5.5: Procedimiento para validación información desempeño de carretera

2.5.5. Sobre la Disponibilidad de la Información

Para garantizar el acceso público de la información, la concesionaria deberá generar un portal web el cual responda a ciertos requisitos. En este caso, el medio utilizado para cumplir estos requisitos no es parte del alcance de este punto, siempre que se cumplan las exigencias:

1. El usuario podrá seleccionar el tramo de la carretera en que él se interese. Para ello, se podrá seleccionar cada tramo de forma georreferenciada en un mapa de la carretera.
2. Al seleccionarse el tramo, el usuario deberá poder revisar la información general del tramo y los valores promedios de desempeño de forma online, además el usuario podrá revisar como estos valores han variado en el tiempo hasta diez años atrás.
3. En este portal el usuario podrá elegir la información que este desee:
 - a) Inventario de la carretera
 - b) Bitácora de cada tramo
 - c) Deflectometría y Eficiencia de transferencia de carga
 - d) Agrietamiento en pavimentos
 - e) Regularidad longitudinal
 - f) Regularidad transversal
 - g) Escalonamiento
 - h) Ruido de rodadura
4. Para simplificar y guiar la lectura de los siguientes puntos, se presenta un cuadro resumen con el tema y la numeración de las siguientes tablas. También es importante mencionar que los nombres de las variables se encuentran influenciados en la definición de los campos de información utilizados en el proyecto LTPP

Tabla 2.5.1: Variables identificación tramo

Temática	Nombre tablas	Numeración
Inventario	Variables para la identificación del tramo	2.5.2 2.5.3 2.5.4
	Variables sobre los detalles geométricos	2.5.5 2.5.6
	Variables sobre la subrasante y capas granulares en pavimentos existentes	2.5.7
	Variables sobre pavimentos asfálticos existentes	2.5.8 2.5.9
	Variables sobre pavimentos rígidos existentes	2.5.10
	Variables sobre la subrasante y capas granulares para pavimentos nuevos	2.5.11
	Variables sobre pavimentos asfálticos nuevos	2.5.12
	Variables sobre pavimentos rígidos nuevos	2.5.13
Capacidad estructural	Registros para deflectometría de impacto	2.5.14 2.5.15
	Registros para eficiencia de transferencia de carga	2.5.16 2.5.17
Desempeño	Registros sobre el agrietamiento en pavimentos	2.5.18 2.5.19 2.5.20 2.5.21
	Registros sobre regularidad longitudinal	2.5.22
	Registros sobre regularidad transversal	2.5.23 2.5.24
	Registros sobre escalonamiento	2.5.25
	Registros sobre ruido de rodadura	2.5.26 2.5.27 2.5.28

5. Al descargar la información con respecto al Inventario de la Carretera, el formato deberá ser el expuesto en las siguientes tablas, comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:

a) Lista de variables para identificar el tramo:

Tabla 2.5.2: Variables identificación tramo

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
NUM_RUTA	Numeración de la ruta a la que pertenece el tramo	Alfanumérico, ej: A-27. Según leyes chilena
ALIAS_RUTA	Nombre común o de pila de la carretera	Alfanumérico, ej: de la fruta
REGION	Nombre de la región donde se ubica el tramo	Alfanumérico, ej: del Maule
PISTA	número de pista	Según vialidad

Tabla 2.5.3: Variables identificación tramo (continuación)

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
COORDENADAS	Ubicación geográfica en latitud y longitud del punto medio del tramo	N Numérico, en grados. Ej: -33.44500, -7068278
ALTITUD	Cota del punto medio del tramo	N Numérico en m.s.n.m
TMDA	Transito medio diario anual que circula sobre el tramo	N Numérico en veh/día
VEL_PROM_CIRC	Velocidad promedio de circulación por el tramo	N Numérico en Km/h
ZONA_CLIMA	Zona climática en la que se ubica el tramo	Alfanumérico, código según clasificación climática de Köppen
CLASE_FUNC	Clase funcional	Alfanumérico, según manual de carreteras
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de la pista.	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
LARGO	Largo del tramo	N Numérico en metros. Ejemplo: 535 m
NUM_SECCIO	Número de secciones presentes en que se ha dividido el tramo	N Numérico, en números enteros. Ejemplo: 1, 2,..., 20
FECHA_ACTIVI	fecha de la última actividad de preservación (sin considerar actividades rutinarias)	En formato dd-mm-aaaa
TIPO_ACTIVI	Tipo de la última actividad de preservación sobre el tramo sin considerar actividades rutinarias	Ingresar valor numérico en función de la tabla 2.5.4

Tabla 2.5.4: *Codificación actividades de mantenimiento sobre pavimentos*

Tipo actividad	Código	Tipo de Actividad	Código
Sellado de grietas	A1	Reparación en todo el espesor para puesta en servicio acelerada	H3
Bacheo superficial	A2	Reparación de espesor parcial	H4
Bacheo profundo	A3	Cepillado en la superficie	H7
Sellos bituminosos	A4	Nivelación de bermas no revestidas en pavimentos de hormigón	H8
Nivelación de bermas granulares no revestidas en pavimentos asfálticos	A5	Nivelación de bermas revestidas en pavimentos de hormigón	H9
Nivelación de revestidas en pavimentos asfálticos	A6	Reemplazo de losas por mezclas asfálticas	H10
Imprimación reforzada	A7	Bacheo superficial asfáltico en frío en pavimentos de hormigón	H11
Reposición de capa de rodadura de concreto asfáltico	A8	Reposición de losas de hormigón	H12
Reperfilado de bermas en caminos con pavimento asfáltico	A9	Reperfilado de bermas en caminos con pavimentos de hormigón	H13
Sellado de juntas y grietas	H1	Colocación de barra de traspaso de carga en pavimentos de hormigón existente	H14
Reparación en todo el espesor	H2		

- b) Lista de variables sobre los detalles geométricos e información general de cada sección del tramo

Tabla 2.5.5: Variables de los detalles geométricos e información general del tramo

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
ANCHO_PISTA	Ancho de la pista	Numérico, en metros hasta dos decimales
TIPO_PAVIM	Tipo de pavimento y/o revestimiento	Nombre según capítulo 5.4 Manual de Carreteras.
TIPO_DRENAJE	Tipo de drenaje presente en el tramo	Nombre según capítulo 5.6 de Manual de carreteras
NUM_CAPA	Número de la capa.	Numérico, la subrasante toma el valor 1, subbase número 2, base número 3 y cada capa sobre ella se contabiliza una por una. Por lo tanto la capa superficial siempre tendrá el mayor valor.
TIPO_CAPA_GRANULAR	Tipo de capa granular	Nombre según capítulo 5.3 del Manual de Carreteras
ESPESOR_CAPA	Espesor de cada capa del pavimento	Numérico en centímetros hasta un decimal
ANCHO_BERMA	Ancho de la berma	Numérico en metros
MAT_SUP_BERMA	Materialidad de la capa superficial de la berma	Asfáltica, hormigón, tratamiento superficial, ninguna, granular
ESPES_SUP_BERMA	Espesor de la capa superficial de la berma	Numérico en centímetros

Tabla 2.5.6: Variables de los detalles geométricos e información general del tramo (continuación)

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
MAT_BASE_BERMA	Materialidad de la base de la berma	Nombre según capítulo 5.3 del Manual de Carreteras
ESP_BASE_BERMA	Espesor de la capa base de la berma	Numérico en centímetros
ESPA_JUNTA_TRANS	Espaciamiento de junta transversal	Numérico en metros
JUNTA_SELLADA	Si la junta se encuentra o no sellada	Sí o no
TIPO_TRANS_CARGA	Tipo de transferencia de carga	Barras, trabazón de los agregados

- c) La información a entregar sobre el pavimento de cada sección del tramo son las siguientes, dependiendo si la información proviene de pavimentos existentes o nuevos

- 1) Para pavimentos existentes, la información de la subrasante y capas granulares es la siguiente :

Tabla 2.5.7: Variables sobre la subrasante y capas granulares para pavimentos existentes

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
CLAS_USCS_SUBR	Clasificación USCS del suelo de subrasante	Alfanumérico. Puede ingresarse hasta dos clasificaciones. Por ejemplo SM-SP
LIM_LIQUI_SUBR	Límite líquido de la subrasante	Campo numérico, según 8.102.3 del volumen 8 del Manual de Carreteras
LIM_PLAST_SUBR	Límite plástico de la subrasante	Campo numérico, según 8.102.4 del volumen 8 del Manual de Carreteras
DENS_NATU_SUBR	Densidad natural del suelo de subrasante	Numérico en Kg/m ³
PROC_DENS_SUBR	Valor de la densidad máxima obtenida con Proctor modificado	Campo numérico, según 8.102.7 del volumen 8 del Manual de Carreteras
HUM_DENS_SUBR	Valor de humedad para conseguir densidad máxima con Proctor modificado	Campo numérico, según 8.102.7 del volumen 8 del Manual de Carreteras
CBR_SUBR	Valor de CBR alcanzado por la subrasante	Campo numérico, según 8.102.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras
CBR_SUBBASE	Valor de CBR alcanzado por la subbase	Campo numérico, según 8.102.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras
GRAN_SUBBASE	Tipo de banda granulométrica de la subbase	Alfanumérico, según tabla 8.101.1B de Manual de Carreteras
CBR_BASE	Valor de CBR alcanzado por la base	Campo numérico, según 8.102.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras
GRAN_BASE	Tipo de banda granulométrica de la base granular	Alfanumérico, según tabla 8.101.1B de Manual de Carreteras

- 2) En el caso de pavimentos asfálticos existentes, se requiere que se incluya la siguiente información de la capa asfáltica:

Tabla 2.5.8: Variables sobre pavimentos asfálticos existentes

Código variable	Explicación	Tipo y unidades
TIPO_MEZCLA	Tipo de mezcla de asfalto	Ingresar valor según tabla 2.5.9
GRAD_ASFAL	Grado asfáltico	Ingresar código del asfalto según 8.301 del volumen 8 del Manual de Carreteras
TIPO_ASFAL	Si el asfalto es convencional o con polímeros	Ingresar CONV si es convencional, ingresar POL, si se le han agregado polímeros
TIPO_MODIFI	Valor de la densidad máxima obtenida con Proctor modificado	Alfanumérico, ingresa nombre del agente modificador
PORC_VACIO_DISE	Porcentaje de vacíos de diseño	Campo numérico, según 8.302.47 del volumen 8 del Manual de Carreteras

Tabla 2.5.9: Tipos de pavimentos

Nombre	Código	Nombre	Código
Imprimación	1	Mezcla asfáltica reciclada y estabilizada con asfalto espumado	13
Riego de liga	2	Mezcla asfáltica-drenante	14
Riego neblina	3	SMA	15
Cape seal	4	Microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente	16
Sello bituminoso	5	Microaglomerados en frío	19
Lechada asfáltica	6	Mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho	20
Tratamientos superficial	7	Sello bituminoso premezclado	21
Mezcla asfáltica en caliente	8	Sellos de alta fricción certificado	22
Mezcla asfáltica en frío	9	Mezcla asfáltica en caliente con rap	23
Pavimentos de hormigón	10		

- 3) En el caso de pavimentos rígidos existentes, se requiere que se incluya la siguiente información de la losa:

Tabla 2.5.10: Variables sobre pavimentos rígidos existentes

Código variable	Explicación	Tipo y unidades
BARRAS_TRASP	Uso de barras de traspaso de carga en juntas transversales	Sí o No
TIPO_BARRA	Tipo de acero utilizado en la barra de traspaso de carga	Alfanumérico
BARRA_AMARRE	Uso de barras de amarre	Sí o No
TIPO_BARRA_AMA	Tipo de acero utilizado en las barras de amarre	Alfanumérico
RESIS_CILIND	Resistencia cilíndrica del hormigón	Según NCh 170
METODO_CURADO	Ingresar clase de vehículo y tipo de compuesto para la membrana de curado	alfanumérico. Ingresar primero la clase de vehículo y luego el tipo de compuesto. Ejemplo: A-1D
MODULO_ELAST	Módulo elástico del hormigón	Numérico, en Kg/cm^2
TIPO_CEMENT	Tipo de cemento utilizado en el hormigón	según lo establecido en NCh 148

- 4) Para pavimentos nuevos, la información de la subrasante y capas granulares es la siguiente :

Tabla 2.5.11: Variables sobre la subrasante y capas granulares para pavimentos nuevos

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
CLAS_USCS_SUBR	Clasificación USCS del suelo de subrasante	Alfanumérico. Puede ingresarse hasta dos clasificaciones. Por ejemplo SM-SP
LIM_LIQUI_SUBR	Límite líquido de la subrasante	Campo numérico, según 8.102.3 del volumen 8 del Manual de Carreteras
LIM_PLAST_SUBR	Límite plástico de la subrasante	Campo numérico, según 8.102.4 del volumen 8 del Manual de Carreteras
DENS_NATU_SUBR	Densidad natural del suelo de subrasante	Numérico en Kg/m^3
PROC_DENS_SUBR	Valor de la densidad máxima obtenida con Proctor modificado	Campo numérico, según 8.102.7 del volumen 8 del Manual de Carreteras
HUM_DENS_SUBR	Valor de humedad para conseguir densidad máxima con Proctor modificado	Campo numérico, según 8.102.7 del volumen 8 del Manual de Carreteras
CBR_SUBR	Valor de CBR alcanzado por la subrasante	Campo numérico, según 8.102.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras
CBR_SUBBASE	Valor de CBR alcanzado por la subbase	Campo numérico, según 8.102.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras
GRAN_SUBBASE	Tipo de banda granulométrica de la subbase	Alfanumérico, según tabla 8.101.1B de Manual de Carreteras
CBR_BASE	Valor de CBR alcanzado por la base	Campo numérico, según 8.102.11 del volumen 8 del Manual de Carreteras
GRAN_BASE	Tipo de banda granulométrica de la base granular	Alfanumérico, según tabla 8.101.1B de Manual de Carreteras

- 5) En el caso de pavimentos asfálticos construidos durante la concesión, se requiere que se incluya la siguiente información de la capa asfáltica:

Tabla 2.5.12: Variables sobre pavimentos asfálticos nuevos

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
TIPO_MEZCLA	Tipo de mezcla de asfalto	Ingresar valor según tabla 2.5.9
GRAD_ASFAL	Grado asfáltico	Ingresar código del asfalto según 8.301.10 del volumen 8 del Manual de Carreteras
TIPO_ASFAL	Si el asfalto es convencional o con polímeros	Ingresar CONV si es convencional, ingresar POL, si se le han agregado polímeros
TIPO_MODIFI	Valor de la densidad máxima obtenida con Proctor modificado	Alfanumérico, ingresa nombre del agente modificador
PORC_VACIO_DISE	Porcentaje de vacíos de diseño	Campo numérico, según 8.302.47 del volumen 8 del Manual de Carreteras

6) En el caso de pavimentos rígidos construidos durante la concesión, se requiere que, se incluya la siguiente información de la losa:

Tabla 2.5.13: Variables sobre pavimentos rígidos nuevos

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
BARRAS_TRASP	Uso de barras de traspaso de carga en juntas transversales	Sí o No
TIPO_BARRA	Tipo de acero utilizado en la barra de traspaso de carga	Alfanumérico
BARRA_AMARRE	Uso de barras de amarre	Sí o No
TIPO_BARRA_AMA	Tipo de acero utilizado en las barras de amarre	Alfanumérico
RESIS_FLEXOTR	Resistencia a la flexotracción	en Megapascuales, según NCh 170
METODO_CURADO	Ingresar clase de vehículo y tipo de compuesto para la membrana de curado	alfafunumérico. Ingresar primero la clase de vehículo y luego el tipo de compuesto. Ejemplo: A-1D
MODULO_ELAST	Módulo elástico del hormigón	Numérico, en Kg/cm^2
COEF_EXP_TERM	Coefficiente de expansión térmica	Numérico, en $1/^\circ C$
TIPO_CEMENT	Tipo de cemento utilizado en el hormigón	según lo establecido en NCh 148

- 7) Se permite el ingreso de parámetros sobre los materiales de los pavimentos flexibles y rígidos, obtenidos mediante correlación, información de diseño, bibliografía. Cada vez que se ingrese un valor de esta manera, deberá explicarse detalladamente los supuestos y las fuentes de información.
 - d) En próximas etapas se deberá generar tablas con entradas únicas para cada información de los materiales que forman el pavimento de la concesión.
6. Al descargar la información con respecto a la Deflectometría y Eficiencia de transferencia de carga, el formato deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:
 - a) La información que debe estar contenida dentro del módulo de deflectometría de impacto, deberá ser la contenida en la siguiente tabla:

Tabla 2.5.14: *Módulo de deflectometría de impacto*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
KM_FINAL	kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
PISTA	número de pista	Según 2.5.1
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
NUM_CONS	Número de construcción. Usado para relacionar cambios en la estructura del pavimento con otros elementos tiempo dependientes.	Numérico y su valor es 1 cuando se comienza con el proceso de inventario y cambia cuando la estructura del pavimento cambia (ej: recapado, reconstrucción, etc.)
CARGA	Fuerza máxima aplicada por la masa en el impacto	Numérico, en KN
RADIO	Radio del plato de carga utilizado	Numérico, en milímetros
	Debe ser registrada la distancia de cada geófono con la cual se realizará la medición	Numérico, en milímetros
D1	Deflexión máxima en el primer geófono	Numérico, en micrómetros
D2	Deflexión máxima en el segundo geófono	Numérico, en micrómetros
D3	Deflexión máxima en el tercer geófono	Numérico, en micrómetros

Tabla 2.5.15: *Módulo de deflectometría de impacto(continuación)*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
D4	Deflexión máxima en el cuarto geófono	Numérico, en micrómetros
D5	Deflexión máxima en el quinto geófono	Numérico, en micrómetros
D6	Deflexión máxima en el sexto geófono	Numérico, en micrómetros
D7	Deflexión máxima en el séptimo geófono	Numérico, en micrómetros
D8	Deflexión máxima en el octavo geófono	Numérico, en micrómetros
D9	Deflexión máxima en el noveno geófono (para aquel ubicado delante del primero)	Numérico, en micrómetros
DY1	Deflexión máxima en el geófono transversal a la altura del primero geófono (izq/der)	Numérico, en micrómetros
DY2	Deflexión máxima en el geófono transversal a la altura del primero geófono (izq/der)	Numérico, en micrómetros
TEMP_PAVIM	Temperatura del pavimento durante la medición	Numérico y en grados Celsius
TEMP_AIRE	Temperatura del aire durante la medición	Numérico y en grados Celsius

- b) La información que debe estar contenida dentro del módulo de eficiencia de transferencia de carga en pavimento rígidos, deberá ser la contenida en la siguiente tabla

Tabla 2.5.16: *Módulo de eficiencia de transferencia de carga*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA

Tabla 2.5.17: *Módulo de eficiencia de transferencia de carga (continuacin)*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
KM_FINAL	kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
PISTA	Número de pista	Según 2.5.1
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
NUM_CONS	Número de construcción. Usado para relacionar cambios en la estructura del pavimento con otros elementos tiempo dependientes.	Numérico y su valor es 1 cuando se comienza con el proceso de inventario y cambia cuando la estructura del pavimento cambia (ej: recapado, reconstrucción, etc.)
JUNTA_GRIETA	Declarar si el lugar de medición es una grieta o una junta entre losas	En caso de ser junta ingresar “J”, en caso de grieta ingresar “G”
CARGA	Fuerza máxima aplicada por la masa en el impacto	Numérico, en KN
RADIO	Radio del plato de carga utilizado	Numérico, en milímetros
	Debe ser registrada la distancia de cada geófono con la cual se realizará la medición	Numérico, en milímetros
%_TRANS_CARGA	Medición del porcentaje de transferencia de carga en cada junta requerida	En porcentaje
TEMP_PAVIM	Temperatura del pavimento durante la medición	Numérico y en grados Celsius
TEMP_AIRE	Temperatura del aire durante la medición	Numérico y en grados Celsius

7. Al descargar la información con respecto al Agrietamiento en Pavimentos, el formato deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:

- a) La información que debe estar contenida dentro del módulo de agrietamiento en pavimentos, deberá ser la contenida en la siguiente tabla:

Tabla 2.5.18: *Módulo de agrietamiento en pavimentos*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
KM_FINAL	kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
PISTA	Número de pista	Según 2.5.1
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
NUM_CONS	Número de construcción. Usado para relacionar cambios en la estructura del pavimento con otros elementos tiempo dependientes.	Numérico y su valor es 1 cuando se comienza con el proceso de inventario y cambia cuando la estructura del pavimento cambia (ej: recapado, reconstrucción, etc.)
VEL_PROM_MED	velocidad promedio durante la medición	Numérico y en unidades Km/h
EXT_LONG_50_A	Extensión de grietas longitudinales en la zona más exterior de la pista (zona A) del segmento de 50 metros	Numérico en metros
SEV_LONG_50_A	Severidad de grietas longitudinales en la zona más exterior de la pista (zona A) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta.

Tabla 2.5.19: *Módulo de agrietamiento en pavimentos (continuación)*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
EXT_LONG_50_B	Extensión de grietas longitudinales en la segunda zona más exterior de la pista (zona B) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros
SEV_LONG_50_B	Severidad de grietas longitudinales en la segunda zona más exterior de la pista (zona B) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta.
EXT_LONG_50_C	Extensión de grietas longitudinales en la zona media de la pista (zona C) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros
SEV_LONG_50_C	Severidad de grietas longitudinales en la zona media de la pista (zona C) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta.
EXT_LONG_50_D	Extensión de grietas longitudinales en la segunda zona más interior de la pista (zona D) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros
SEV_LONG_50_D	Severidad de grietas longitudinales en la segunda zona más interior de la pista (zona D) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta.
EXT_LONG_50_E	Extensión de grietas longitudinales en la zona más interior de la pista (zona E) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros
SEV_LONG_50_E	Severidad de grietas longitudinales en la zona más interior de la pista (zona E) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta.
EXT_PATRON_50_A	Extensión de patrón de grietas en la zona más exterior de la pista (zona A) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_PATRON_50_A	Severidad de patrón de grietas en la zona más exterior de la pista (zona A) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_PATRON_50_B	Extensión de patrón de grietas en la segunda zona más exterior de la pista (zona B) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados

Tabla 2.5.20: *Módulo de agrietamiento en pavimentos (continuación)*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
SEV_PATRON_50_B	Severidad de patrón de grietas en la segunda zona más exterior de la pista (zona B) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_PATRON_50_C	Extensión de patrón de grietas en la zona media de la pista (zona C) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_PATRON_50_C	Severidad de patrón de grietas en la zona media de la pista (zona C) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_PATRON_50_D	Extensión de patrón de grietas en la segunda zona más interior de la pista (zona D) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_PATRON_50_D	Severidad de patrón de grietas en la segunda zona más interior de la pista (zona D) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_PATRON_50_E	Extensión de patrón de grietas en la zona más interior de la pista (zona E) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_PATRON_50_E	Severidad de patrón de grietas en la zona más interior de la pista (zona E) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_OTRAS_50_A	Extensión de otras grietas en la zona más exterior de la pista (zona A) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_OTRAS_50_A	Severidad de otras grietas en la zona más exterior de la pista (zona A) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_OTRAS_50_B	Extensión de otras grietas en la segunda zona más exterior de la pista (zona B) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_OTRAS_50_B	Severidad de otras grietas en la segunda zona más exterior de la pista (zona B) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_OTRAS_50_C	Extensión de otras grietas en la zona media de la pista (zona C) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_OTRAS_50_C	Severidad de otras grietas en la zona media de la pista (zona C) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta

Tabla 2.5.21: *Módulo de agrietamiento en pavimentos (continuación)*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
EXT_OTRAS_50_D	Extensión de otras grietas en la segunda zona más interior de la pista (zona D) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_OTRAS_50_D	Severidad de otras grietas en la segunda zona más interior de la pista (zona D) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_OTRAS_50_E	Extensión de otras grietas en la zona más interior de la pista (zona E) del segmento de 50 metros.	Numérico en metros cuadrados
SEV_OTRAS_50_E	Severidad de otras grietas en la zona más interior de la pista (zona E) del segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
EXT_TRANS_50	Extensión de grietas transversales en el segmento de 50 metros	Numérico en metros
SEV_TRANS_50	Severidad de grietas transversales en el segmento de 50 metros	Alfanumérico y puede ser baja, moderada o alta
NUM_LOSAS_AGRIE_JPCC	Número de losas agrietadas en el segmento de 50 metros	Numérico, debe ser número entero
EST_VERIFI	Estado de verificación. Refleja el nivel de verificación de calidad que ha pasado el valor.	Alfanumérico y debe ingresarse el último nivel de chequeo que ha cumplido el registro

8. Al descargar la información con respecto a la Regularidad Longitudinal, el formato deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:

- a) La información que debe estar contenida dentro del módulo de regularidad longitudinal, deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:

Tabla 2.5.22: Módulo de regularidad longitudinal

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
KM_FINAL	kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
PISTA	Número de pista	Según 2.5.1
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
NUM_CONS	Número de construcción. Usado para relacionar cambios en la estructura del pavimento con otros elementos tiempo dependientes.	Numérico y su valor es 1 cuando se comienza con el proceso de inventario y cambia cuando la estructura del pavimento cambia (ej: recapado, reconstrucción, etc.)
VEL_PROM_MED	velocidad promedio durante la medición	Numérico y en unidades Km/h
IRI_HUELLA_DER_50	reporte de IRI cada 50 metros en la huella derecha	Numérico y en unidades m/Km
IRI_HUELLA_IZQ_50	reporte de IRI cada 50 metros en la huella izquierda	Numérico y en unidades m/Km
IRI_HUELLA_DER_1KM	reporte de IRI cada un kilómetro en la huella derecha	Numérico y en unidades m/Km
IRI_HUELLA_IZQ_1KM	reporte de IRI cada un kilómetro en la huella izquierda	Numérico y en unidades m/Km
EST_VERIFI	Estado de verificación. Refleja el nivel de verificación de calidad que ha pasado el valor.	Alfanumérico y debe ingresarse el último nivel de chequeo que ha cumplido el registro

b) Además de la información reportada en la tabla anterior, deberá ser entregado el archivo que contenga la medición de cada perfil longitudinal. Estos archivos deben tener la característica de ser compatibles con el software ProVal de FHWA.

9. Al descargar la información con respecto a la Regularidad Transversal, el formato deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:

a) La información que debe estar contenida dentro del módulo de regularidad Transversal, deberá ser la contenida en la siguiente tabla:

Tabla 2.5.23: Módulo de regularidad transversal

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
KM_FINAL	kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
PISTA	Número de pista	Según 2.5.1
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
NUM_CONS	Número de construcción. Usado para relacionar cambios en la estructura del pavimento con otros elementos tiempo dependientes.	Numérico y su valor es 1 cuando se comienza con el proceso de inventario y cambia cuando la estructura del pavimento cambia (ej: recapado, reconstrucción, etc.)
VEL_PROM_MED	velocidad promedio durante la medición	Numérico y en unidades Km/h
ANCHO_PERFIL_TRANS	Ancho del perfil transversal medido	Numérico y en milímetros
NUM_PERFIL_TRANS	Número de perfiles transversales en la sección de 50 metros	Numérico y en milímetros
ESPA_C_PUNTOS_MED	Espaciamiento entre puntos de medición del perfil transversal	Numérico y en milímetros
AHUE_PROM_DER_50	Ahuellamiento promedio en la huella derecha de la sección de 50 metros	Numérico y en milímetros
AHUE_PROM_IZQ_50	Ahuellamiento promedio en la huella izquierda de la sección de 50 metros	Numérico y en milímetros

Tabla 2.5.24: *Módulo de regularidad transversal (continuación)*

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
DESV_EST_HUELLA_DER	Desviación estándar del promedio de ahuellamiento obtenido en cada sección de 50 metros en la huella derecha	Numérico y en milímetros
DESV_EST_HUELLA_IZQ	Desviación estándar del promedio de ahuellamiento obtenido en cada sección de 50 metros en la huella izquierda	Numérico y en milímetros
PROM_PEND_TRANS	Promedio de la pendiente transversal obtenida en cada perfil transversal, para la sección de 50 metros	En porcentaje
AREA_AHUELLA_PROM	Promedio de área de ahuellamiento total obtenida de cada perfil transversal, para la sección de 50 metros	Numérico y en milímetros cuadrados
EST_VERIFI	Estado de verificación. Refleja el nivel de verificación de calidad que ha pasado el valor.	Alfanumérico y debe ingresarse el último nivel de chequeo que ha cumplido el registro

10. Al descargar la información con respecto al Escalonamiento, el formato deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:
- a) La información que debe estar contenida dentro del módulo Escalonamiento en Pavimentos Rígidos, deberá ser la contenida en la siguiente tabla:

Tabla 2.5.25: Módulo de Escalonamiento en pavimentos rígidos

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
KM_FINAL	kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 3 decimales (ej: 1045,376 Km)
PISTA	Número de pista	Según 2.5.1
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
NUM_CONS	Número de construcción. Usado para relacionar cambios en la estructura del pavimento con otros elementos tiempo dependientes.	Numérico y su valor es 1 cuando se comienza con el proceso de inventario y cambia cuando la estructura del pavimento cambia (ej: recapado, reconstrucción, etc.)
VEL_PROM_MED	velocidad promedio durante la medición	Numérico y en unidades Km/h
ESC_PROM_50	Escalonamiento promedio en el segmento de 50 metros	Numérico y en milímetros
ESC_MAX_50	Escalonamiento máximo en el segmento de 50 metros	Numérico y en milímetros

11. Al descargar la información con respecto al ruido de rodadura, el formato deberá ser comprendiendo que en cada fila de la tabla descargada se expone cada variable. Estas tablas entregan el nombre de la variable en su forma acortada, su nombre largo y el tipo de unidades que deben ser:

- a) La información que deberá contenerse dentro del módulo de ruido de rodadura, deberá ser la siguiente:

Tabla 2.5.26: Módulo de ruido de rodadura

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
COD_TRAMO	Código del tramo de carretera	Según protocolo en punto 2
SENTIDO	Sentido predominante de circulación de las pistas en el tramo	Alfanumérico y puede ser N, NE, E, SE, S, SO, O o NO
KM_INICIAL	Kilometraje donde comienza la sección de 50 metros	En kilómetros, con 2 decimales (ej: 1045,37 Km)
KM_FINAL	Kilometraje donde acaba la sección de 50 metros	En kilómetros, con 2 decimales (ej: 1045,37Km)
PISTA	Número de pista	Según 2.5.1
FECHA_MED	Fecha en que se realiza la medición	En formato DD-MM-AAAA
HORA_MED	Hora en que se realiza la medición	En formato hora:minutos:segundos:milésimas de segundos (Ej: 19:38:54:780)
TIPO_PAVI	Tipo de pavimento en que se mide	Según punto 3 de este ítem
OPERADOR	Nombre y apellido del operador	Alfanumérico
NEUMATICO	Tipo de neumático	Debe ser SRTT, en caso de no utilizarse establecer marca y modelo
NUM_SONDA	Número de sondas utilizadas durante el procedimiento	1 si se utiliza una sonda, 2 en caso de usarse ambas
FREC	Banda de frecuencia de tercios de octava	Numérico y debe estar en Hertz
NIV_INTE_DELA	Intensidad del sonido registrado por el micrófono delantero	Numérico, hasta dos decimales. En decibeles
NIV_PI_DEL	Índice Presión-Intensidad del micrófono delantero	Numérico, hasta un decimal. Puede ser negativo o positivo
COH_DEL	Nivel de coherencia de la presión sonora del micrófono delantero	Numérico, hasta un decimal

Tabla 2.5.27: Módulo de ruido de rodadura (continuación)

Código variable	Nombre largo	Tipo y unidades
NIV_INTE_TRAS	Intensidad del sonido registrado por el micrófono trasero	Numérico, hasta dos decimales. En decibeles
NIV_PI_TRAS	Índice Presión-Intensidad del micrófono trasero	Numérico, hasta un decimal. Puede ser negativo o positivo
COH_TRAS	Nivel de coherencia de la presión sonora del micrófono trasero	Numérico, hasta un decimal
PROM_INTE	Nivel de intensidad sonora promedio	Numérico, hasta dos decimales. En decibeles
NIV_VAL	Nivel al cual los registros estén validados	Letra según punto 7 del ítem 2.5.4
COMEN_1	Nombre de pavimento no incluido en punto 2 del presente ítem	Nombre según Manual de Carreteras en su Volumen 5, en su ítem 5.4

b) Para la codificación del tipo de pavimento superficial se utilizará las siguiente tabla:

Tabla 2.5.28: Módulo de ruido de rodadura

Pavimentos	Nomenclatura
Dense Graded Asphalt TMA =9,5 mm	DGA 9,5
Dense Graded Asphalt TMA =12,5 mm	DGA 12,5
Dense Graded Asphalt TMA =19 mm	DGA 19
Tratamiento superficial	SD
Stone Mastic Asphalt TMA=3 mm	SMA 3
Stone Mastic Asphalt TMA=5 mm	SMA 5
Stone Mastic Asphalt TMA=8 mm	SMA 8
Stone Mastic Asphalt TMA=11 mm	SMA 11
PCC Longitudinally Tined	PCC LT
PCC Transverse Tined	PCC TT
PCC Diamond Gridding	PCC DG
PCC Diamond Ground	PCC Gr
PCC Burlap Drag (arpillera)	PCC BD
PCC Longitudinally Broomed (escoba)	PCC LB
Double Layer Pavement Asphalt	DLPA
Open Graded Asphalt Concrete TMA= 9,5 mm	OGAC 9,5
Open Graded Asphalt Concrete TMA= 12,5 mm	OGAC 12,5
Otro Pavimento	OTRO

12. Los usuarios del portal podrán descargar de forma inmediata todos los archivos históricos de las

mediciones realizadas. El usuario podrá descargar la variable que él estime necesaria estableciendo un periodo determinado, además el usuario podrá elegir si descargar los archivos con o sin la etiqueta por la validación de los datos.

13. Al descargar la información con respecto al inventario de los tramos el archivo de descarga deberá contener los siguientes aspectos:
14. El usuario podrá descargar los archivos de los registros históricos en formato XLS o Access. Aunque se permite el uso de archivos comprimidos, dentro de los cuales se encuentren archivos XLS. En caso que el número de registros en un archivo supere los 500000 datos se podrá descargar en formato SQL.
15. El portal web deberá tener un apartado con información sobre cada variable medida, su definición, su importancia, las formas de medirlas, los distintos instrumentos para generar registros y los instrumentos utilizados.
16. El portal deberá permitir revisar y descargar un manual en formato PDF que explique el funcionamiento del portal web y los pasos necesarios para descargar los registros, mediciones y cualquier otra información.
17. En el portal web deberá encontrarse un apartado donde se permitan generar comentarios por parte de los usuarios
18. En el portal web se deberá poder revisar la bitácora de cada tramo. En cada bitácora se deben poder aplicar filtros que permitan revisar ítems aislados (Ejemplo: solo rehabilitaciones), además se podrá descargar cualquier imagen, informe o comentario sobre cada suceso.

Capítulo 3

Información de Sistemas de Pesaje en Movimiento

El presente capítulo tiene por objetivo hacer una revisión del estado del arte y la práctica con respecto a los sistemas de pesaje en movimiento, buscando desarrollar una propuesta para su instalación, operación y tratamiento de la información generada en ellos. En base a esto, el capítulo se configura de la siguiente forma:

- En la sección 3.1, se revisan los diferentes campos de datos generados a partir de los sistemas de pesaje en movimiento incluyendo los metadatos de cada estación de pesaje
- En la sección 3.2, se presentan las diferentes prácticas sobre la transmisión, almacenamiento y formato de la información de pesaje en movimiento
- En la sección 3.3, se presenta el proceso de validación de registros de datos y los procesos ejecutados en diferentes estudios y agencias
- En la sección 3.4, se realiza una revisión sobre la diferencia de disponibilidad de información de pesaje en movimiento en diferentes proyectos y agencias
- En la sección 3.5, se encuentra redactado el protocolo para la gestión de información obtenida de los sistemas de pesaje en movimiento

3.1. Captura de Información de Pesaje en Movimiento

Capturar la información de dimensiones y carga de los vehículos no solo es importante para controlar el daño sobre los pavimentos, también es un elemento de seguridad al controlar vehículos que circulan con mayor carga a la que su diseño permite. Además, conocer el peso de los vehículos es clave para mejorar los métodos de diseño y rehabilitación de los puentes y pavimentos, tal como es el caso de la MEPDG que comienza la utilización de espectros de carga.

Por lo tanto, es necesario establecer infraestructura capaz de controlar y conocer las dimensiones y cargas de los vehículos que circulan por las carreteras. Así, diferentes tecnologías abordan este problema de control y estadísticas. Algunas de estas, son capaces de cumplir con exactitudes muy altas consiguiendo una capacidad de control inmediato pero ineficiente, mientras otras, apoyan este proceso mejorando la eficiencia mediante preselección de vehículos y entregando información de carácter estadístico.

En general, estas tecnologías se pueden dividir según se observa en la figura 3.1.1, donde el pesaje estático, corresponde a instalaciones que controlan vehículos sobre en normas de peso y dimensiones. Dado que funcionan en forma estática o muy lenta, son idóneas para generar multas a los conductores que infrinjan las normas. Por otro lado, el sistema de pesaje a bordo, funciona mediante la instalación de medidores de deformación y presión en el mismo camión, lo que permite conocer su carga en todo momento y trasladar el gasto en infraestructura para el control de peso, de la carretera a los conductores. Si bien, ha conseguido que la exactitud de esta tecnología consiga hasta un 10 % de exactitud con respecto al peso completo del vehículo, esta aún se encuentra en fase de pruebas (Oehry et al., 2013).

El grupo de los sistemas de pesaje en movimiento o WIM por su sigla en inglés, tiene la particularidad de ser capaz de generar aproximaciones al peso estático de un vehículo sin la necesidad de que baje su velocidad o se desvíe, solo requiere de la circulación de los ejes de un vehículo sobre estos equipos instalados en el pavimento. Estos, no son capaces de producir una exactitud similar a los sistemas estáticos, sin embargo, debido a su capacidad de reflejar el verdadero comportamiento del tránsito, son parte importante de las redes de control de tránsito en alrededor del mundo.

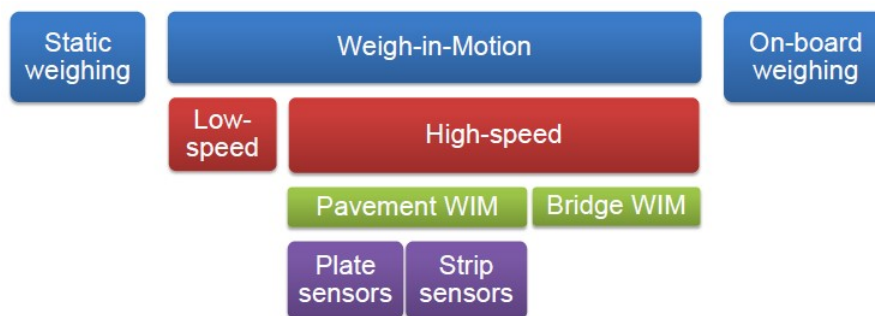


Figura 3.1.1: Tipos de sistemas de pesaje de tránsito (IsWIM)

3.1.1. Comparación Entre Tecnologías de equipos WIM

El corazón de los sistemas WIM es su sensor de pesaje, de los cuales existen muchos en el mercado, diferenciándose por costo, funcionamiento, duración, etc. (Zhang, 2007; Jacob, 2010; Jacob y Feypell-de la Beaumelle, 2010; Basyoni, et al, 2012; Eady et al, 2016; LTBP; 2016; FHWA, 2018; Van Loo y Žnidarič, 2019) realizan comparaciones de las tecnologías, por lo tanto, a continuación, se realiza una breve revisión de los sistemas según son del tipo línea, placa o BWIM. Más detalle se puede encontrar en el apéndice B.

3.1.1.1. Tipo Línea

Estos, tienen una forma delgada que en general no supera los 5 cm de ancho y los 2 cm de alto. Su mayor ventaja es la facilidad de instalación y reemplazo donde solo se requiere realizar un corte en el pavimento para su ubicación. Sumado a lo anterior, estos dispositivos pueden venir en largos de 1,5 m a 2 m con el fin de obtener cargas de las ruedas y no solo los ejes. Sus desventajas, son una mayor sensibilidad al factor dinámico del vehículo, a la temperatura y rigidez del pavimento. Sin embargo, estas influencias dependen del tipo de sensor de línea. Existen sensores como el de cuarzo que tiene una larga durabilidad, poca influencia de la temperatura y de la aplicación del punto de carga (Jacob y Cottineau, 2016) y que ha demostrado su buen desempeño en el programa LTPP (LTBP, 2016). Otros como el piezoeléctrico o el cerámico, tienen una menor vida útil y mayor dependencia a la temperatura. Mientras, otro muy prometedor es la fibra óptica que es insensible a la temperatura, tampoco requiere un suministro eléctrico y tiene la capacidad de procesar datos en tiempo real. Ha obtenidos buenos resultados en su uso, sin embargo, no existen equipos comerciales que tengan esta tecnología (Al-Qady et al, 2016), debido principalmente a problemas con la durabilidad obtenida (Van Loo y Žnidarič, 2019).

3.1.1.2. Tipo Placa

Los tipos placa tienen forma de tapete y se debe a que su ancho es al menos una huella de rueda, lo cual es una ventaja porque se asegura de recibir la carga completa del eje. Dentro de sus desventajas está que debe construirse una bóveda para la instalación y por lo tanto, puede ser demoroso. De forma similar a los de línea existen tecnologías con diferentes desempeños, por ejemplo las Single Loads Cells pueden ser aquellos dispositivos de mejor exactitud entre todas las tecnologías pero su costo puede ser prohibitivo, mientras que las placas de flexión (Bending Plate) o de capacitancia han demostrado buenos desempeños, en especial las primeras que son muy utilizadas en numerosos programas de monitoreo de largo plazo tanto de tránsito como de pavimentos (Bennett y Luk, 2010).

3.1.1.3. Culway

Estos utilizan sensores en las alcantarillas de la carretera. Entre sus ventajas, está que dado el hecho que su medidor de deformación se encuentra en la alcantarilla, se encuentra protegido del tránsito proporcionando un ciclo de vida más largo (hasta 25 años), además, su costo de mantenimiento e instalación es relativamente bajo y que es capaz de alcanzar niveles de exactitud de tipo I según ASTM E 1318. Sin embargo, dentro de sus limitaciones está que no se encuentra disponible para pavimentos de hormigón

y solo para algunos pavimentos de asfalto, su ubicación dependerá de la existencia previa de una alcantarilla y finalmente, dada la superposición de otros ejes en la medición se deben establecer restricciones sobre la estructura del pavimento sobre la alcantarilla.

3.1.1.4. MS-WIM

Los MS-WIM no son una nueva tecnología, sino más bien el uso combinado de más de un sensor de pesaje distanciados entre 4 y 5 metros en una misma pista (Selesneva, 2017). El hecho de utilizar más sensores se basa en que estos pueden promediar los valores arrojados, disminuyendo los errores. Esta práctica, se puede ver en Francia o República Checa, donde en esta última, se está aconsejando que las instalaciones punitivas utilicen tres sensores piezoeléctricos de cuarzo y no dos como algunas estaciones tenían (Fucik et al, 2015). Esto induce a pensar que utilizar más sensores para compensar de mejor forma los errores, sin embargo, (Sroka et al., 2015; Gajda et al., 2018), establece que el máximo de sensores a utilizar debiese ser ocho, siempre que las incertezas del sensor sean similares, aunque, una cantidad como esta puede verse limitada por los costos de instalación y mantención. Además, es importante la secuencia de medición, donde es importante considerar que, si la secuencia es de menor a mayor incerteza, el número de sensores óptimo disminuye.

3.1.1.5. Comparación entre tecnologías

Comparar las tecnologías de sistemas WIM es un proceso difícil y no existe aquella que sea mejor que otra, ya que, todas tienen ventajas y desventajas dependiendo de su objetivo. Comprendiendo ello, (FHWA, 2018) realizó una comparación de las diferentes tecnologías donde menciona las debilidades, fortalezas y el uso recomendado para cada tipo de tecnología. De esta comparación, se observa que aquellas tecnologías con valores de costo inicial y mantenimiento más costoso tienden a tener una mayor cantidad de aplicaciones posibles (ejemplo piezo-cuarzo y celdas de carga), mientras, otras como los piezopolímeros que son de costos más bajos y más simples en configuración e instalación, se recomienda su aplicación en estudios de planeación, incluso hoy en día, estos dispositivos se están utilizando como elementos de apoyo para la medición de peso de otros sensores. Otro elemento para considerar en el análisis es el tiempo de vida que cada tecnología pueda llegar a demostrar. En este sentido (Zhang, 2007) y (Eady et al., 2016) dan luces sobre el tiempo de vida de algunas tecnologías. De todas formas, esto va a depender del trato recibido por cada equipo en su ciclo de vida.

Tabla 3.1.1: Duración de sensores WIM

Tecnología	(Eady et al., 2016)	(Zhang, 2009)
Strain gauges	10	
bending Plate	10 ~ 15	6
Piezocuarzo	> 10	> 15
Priezoelectrico	4 ~ 6	4
Celdas de carga	> 25	12

Finalmente, el elemento a siempre considerar en cualquier análisis es el precio para la instalación y operación de los equipos. (Eady et al., 2016), publica los costos que se incurren para la instalación y

operación de los equipos WIM. De esta tabla se observa que estos equipos son costosos, en especial en lo asociado a su instalación inicial y los requisitos para instalar en otras pistas, así, es indispensable que la decisión sobre que sensor instalar y donde instalar sea tomada con mucha información, tomando en cuenta todas las variables como la necesidad de información, estado del pavimento, disponibilidad de repuestos, energía y comunicaciones, etc. En este sentido, (FHWA, 2018) llevan a cabo todos los elementos que se deben considerar a la hora de analizar la instalación, hasta la selección y sitio, tecnología y operación a realizar.

Tabla 3.1.2: Costos estimados para sistemas WIM en miles de dólares (Eady et al, 2016)

Tipo de sistema WIM	Costo	Costo pista inicial	Costo específico por pista adicional	Mantenimiento anual y costo continuo por pista
Strain gauges	\$32 a \$38	\$65 a \$75	\$35 a \$40	\$6 a \$10
Piezocuarzo	\$45	\$60	\$40 a \$60	\$10
Piezoelectrico	\$20 a \$25	\$5 a \$10	\$5 a \$10	\$7 a \$10
Bending Plate	\$57 a \$62	\$60	\$4	\$10
Capacitance Pad	\$57 a \$62	\$45 a \$60	\$30 a \$40	\$10

3.1.2. Normativa de Requisitos para Sistemas WIM

Para asegurar el desempeño de los sistemas WIM, se han desarrollado normas que establecen requisitos a cumplir sobre estas instalaciones. En general, dos normas son las más relevantes por su impacto en los proveedores, la primera es la norma *ASTM E1318 Standard Specification for Highway Weigh-In-Motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods* (ASTM, 2017), y la segunda, aunque técnicamente no es una norma sino, recomendaciones, es el *COST 323 Weigh-in-Motion for Road Vehicles* (Jacob et al, 2002). Ambas normas debido a su relevancia han impactado y han tenido como consecuencia el desarrollo de otras especificaciones anexas a estas, para la regularidad del pavimento, especificaciones locales para los procedimientos de calibración, desarrollo de normas que diferencian casos estadísticos y de preselección.

Hacer una revisión de las diferentes especificaciones utilizadas en el mundo, nos permite asegurar que el proceso de toma de datos sea correcto y completo, correcto en el sentido de asegurar que las mediciones se hagan acorde a estas especificaciones, asegurando situaciones donde las diferentes influencias del ambiente sobre el sistema WIM puedan estar consideradas y, completa, en que por cada pasada de vehículo por los sensores, se capture toda la información necesaria para caracterizar totalmente el vehículo que circula por la vía.

3.1.2.1. Normativa para la toma de Información

Sobre la información que debe emanar por cada pasada de un vehículo sobre un sistema WIM, las tres normativas, ASTM E1318, COST 323 y la norma neerlandesa *NMi International WIM Standard* (NMi,

2016), teniendo esta última la característica de tener dos enfoques (estadística o punitiva), en este aspecto son bastante similares, ya que, en general la información a generar es:

Tabla 3.1.3: Campos de información a generar por los sistemas WIM

Carga de rueda	Carga vehículo completo	Clasificación del vehículo
Carga por eje	Velocidad	Identificación del sitio
Carga por grupo de eje	Distancia entre ejes	Pista y sentido
Fecha y hora de pasada	Número secuencial del vehículo	wheelbase
Ejes de equivalentes	Alertas de violación norma	

Lo anterior se puede evidenciar en los encontrado en un estudio donde se compara la información generada en Europa (Žnidarič et al, 2015). En esta comparación, se observa en la figura B.6.1 y muestra la similitud de información generada, con ciertas diferencias especialmente en si se toman fotografías o no de los vehículos que pasan sobre los sistemas WIM

Sobre los metadatos, en el reporte técnico formulado por Austroads sobre la formación de una red nacional de pesaje en movimiento (Eady et al, 2016), se detalla la necesidad de incorporar metadatos, llegando al acuerdo de siempre registrar los siguientes campos de información:

Tabla 3.1.4: Datos más relevantes a conocer de un sistema de pesajes en movimiento (Eady et al, 2016)

Datos más relevantes		
Marca del dispositivo	Latitud y longitud	Método de obtención de datos
Modelo	Nombre de la ruta	Frecuencia de recolección de datos
Tipo	Territorio/estado	Formato de los datos
Identificación del sitio	Descripción de la vía	Número de pistas cubiertas
Disponibilidad de datos en vivo	Razón de ubicación	Uso primario
Número de pistas total	Tipo de pavimento	Fecha de subsecuentes calibraciones y sus resultados
Próxima calibración programada	Configuración del marco temporal y formato de los datos disponibles del sistema	Mapeo de canales del Datalogger
Extensión	códigos de errores de violación	¿Los datos han sido corregidos (ajustados por temperatura y otra forma)?
¿Cómo ha sido etiquetados o codificados los datos por error? (garantía)	Fecha de calibración inicial y sus resultados	Comentarios adicionales
Indicadores de desempeño	¿WIM en ambas direcciones?	

Otro caso respecto a los metadatos necesarios de la estación. COST 323 especifica que es necesario que se registren los siguientes elementos:

Tabla 3.1.5: Campos de metadatos a registrar por los sistemas WIM según COST 323

Identificación de ruta	Periodo de medición	Reportes de funcionamiento
Ubicación exacta	Ente encargado	Coefficientes para calibración
Tipo de sensor	Condiciones ambientales	Fecha de calibración
Fecha de elaboración		

3.1.2.2. Normativa por requisitos de Exactitud

En este apartado se comparan tres normativas, la norma ASTM E 1318 (ASTM, 2017), la norma COST 323 (Jacob et al, 1998) y la norma neerlandesa NMi International WIM Standard (NMi, 2016). Las tres normas dividen en clases los dispositivos en función de la exactitud del peso total del vehículo. Si bien utilizan diferentes notaciones, las tres lo hacen en función del peso total, peso por ejes, velocidad y espaciamentos. En general, mientras mayor su exactitud, más apropiado el equipo para fines punitivos, mientras que si esta disminuye su uso se enfoca más usos estadísticos.

Tabla 3.1.6: Tabla comparativa entre niveles propuestos en normas para sus distintos fines

Norma	Punitivo	Diseño y preselección	Estadísticos
ASTM E 1314	IV	I-II-III	I y II
COST 323	A (5) y B+(7)	B (10) y C (15)	D+(20) y D(25)
NMi	L(3 , 5, 7, 10)		S(5, 7, 10, 15, 20)

Punto aparte y diferente al elemento de exactitud, pero que juega un papel relevante en ella, es el nivel de precisión en el tiempo al cual debe trabajar un sistema WIM. Existen redes que trabajan en el rango de los segundos, décimas y centésimas. Este punto es muy importante, porque este tiene incidencia directa dentro de los cálculos del algoritmo para obtener la velocidad y la distancia entre ejes, lo que afecta la clasificación de vehículos. La norma NMi y la norma ASTM, detallan que los registros deben ser al menos al segundo, pero la primera menciona que los procesos de puesta en marcha del sistema, debe estar a la milésima de segundo. En caso de la práctica, se puede observar la tabla 3.1.7 que detalla lo anterior. Se puede sumar a ello que en lo mostrado por el NCHRP 683 en su anexo C (Evacumar et al, 2016), muestra que en general los dispositivos utilizan hasta las centésimas de segundo. En este mismo sentido, Enright & O’Brien (Enright y O’Brien, 2011) mencionan que para fines de validación, siempre será deseable que la resolución en el tiempo sea de al menos 0.01 segundos.

Tabla 3.1.7: Resumen de los resultados sobre la información WIM en cada país (Enright and O'brien, 2011)

	Formato vehículo a vehículo	Precisión del tiempo [s]	Fotografías de camiones medidos	Vehículos livianos	Máximo número de ejes	Chequeos de calidad
Eslovenia	Sí	0.002	Sí, pero no para todos los sitios	No, pero podría ser	No limitado	Sí
Irlanda	Sí	Cercano a 0.01	Sí, pero no todos los vehículos	Sí	No limitado	Sí
Reino Unido*	Sí	Cercano a 1	No	Sí	10	No
Holanda	Sí	Cercano a 0.01	Sí	-	No limitado	Sí
Francia	Sí	0.01	Sí	Si	10	Sí
Dinamarca	Sí	1**	No	posiblemente	9	Sí
Alemania	Sí	Cercano a 0.01	No	No	No limitado	Sí

*En sitios seleccionados solo peso bruto, largo y velocidad son registrados

** El sistema es capaz de producir una mayor precisión (0.01 segundos) pero debe ser actualizado el software (no libre de cargo)

3.1.2.3. Normativa para requisitos de ubicación

Al hablar de los requisitos de ubicación para un WIM, tres elementos son primordiales. El más importante, la regularidad longitudinal tanto aguas arriba como aguas abajo, luego los requisitos para el estado del pavimento y finalmente la geometría del camino.

1. Regularidad longitudinal

Todas las normas tienen apartados sobre la regularidad longitudinal. Es más, AASHTO en la necesidad de mejorar los requisitos de ASTM para WIM, desarrolló la norma AASHTO M331 (AASHTO, 2017) para conseguir métricas objetivas. En general, todas las normas especifican requisitos asociados a IRI tanto para antes como después del arreglo de sensores, esto, con el fin de conseguir la eliminación del efecto “rebote” que afecta a las mediciones dinámicas.

Tabla 3.1.8: *Radio de curvatura y pendiente transversal y longitudinal máxima*

Norma	IRI [m/Km]	metros antes	metros después
ASTM E 1318	Disco de 3 mm no puede pasar bajo regla de 5 metros	60	30
AASHTO M 331	1.34 (Tipo I y límite de 2.7, 40 metros antes del sensor) y 2.7 (Tipo II y límite de 3.75, 40 metros antes del sensor)	122	61
COST 323	1.3 (excelente), 2.6 (bueno) o 4(Aceptable)	50	25
NMi	1.3	200	50

2. Estado del Pavimento

La norma COST 323 establece tres tipos de pavimentos para un sistema WIM. Estos son excelente, Bueno y Aceptable buscando siempre, que exista una concordancia entre el estado del pavimento y el objetivo que busca cumplir el equipo. Así para casos de uso legal, el estado del pavimento siempre deberá ser “excelente”, mientras, la norma NMi, adopta lo expuesto en COST, pero solo permite el uso de pavimentos de tipo excelente, mientras que ASTM menciona la importancia del estado del pavimento, agregando que los pavimentos de hormigón han sostenido un mejor desempeño de estos equipos por sobre los pavimentos flexibles.

3. Geometría del camino

Los requisitos sobre la geometría del camino son bastante similares entre sí, se busca proponer un máximo para la pendiente transversal y longitudinal del camino, ya que, si estas aumentan demasiado, la distribución de carga entre los ejes y las ruedas de un mismo eje variarán y también pudieran producir cambios en el comportamiento del conductor, aumentando los posibles errores, así en la siguiente tabla se resumen los requisitos:

Tabla 3.1.9: *Radio de curvatura y pendiente transversal y longitudinal máxima*

	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Radio Curvatura
ASTM E1318	< 2 % para tipo I, II y III (60m antes y 30m después)	< 3 % para tipo I, II y III (60m antes y 30m después)	> 1.7 Km
COST 323	< 1 % para pavimento tipo excelente y < 2 % para los otros	< 3 % (50m antes y 25m después)	> 1.0 Km

3.1.2.4. Normativas para requisitos de Calibración y Prueba de Funcionamiento

La calibración de un WIM es necesaria para sostener la exactitud de los equipos que se encuentran operando, disminuyendo los errores que el dispositivo entrega. Estos errores que pueden ser diferenciados entre errores “random” y sistemáticos (Haider et al., 2010). Los primeros, aparecen por fluctuaciones

estocásticas de una medición en torno al verdadero valor y son inherentes a la medición, mientras, los errores sistemáticos, son reflejo de inadecuadas calibraciones y se caracterizan por emitir errores en una sola dirección, generando sesgos en el tiempo (Haider et al., 2012). En el caso de los errores “random”, estos no generan efecto en las posibles predicciones de desempeño de pavimentos (Haider et al., 2010) y al fluctuar en torno al valor correcto, su efecto puede aminorarse con más mediciones. En cambio, los errores sistemáticos, si influyen fuertemente. Por ejemplo, en un estudio (FHWA, 1998) se demostró que un sesgo negativo o positivo de un 1 % en la obtención de Ejes Equivalentes, podía repercutir en la subestimación o sobreestimación de vida de un pavimento de entre 2 % a 4,5 %. Es más, en este mismo sentido, LTPP ha fijado como máximo un 5 % en el sesgo de los valores WIM si se utilizan para propósitos de diseño.

Para impedir lo anterior, existe la calibración de los equipos WIM. Estas, son el procedimiento mediante el cual se ajustan los parámetros de los algoritmos de clasificación, velocidad y pesaje para acercar los pesos desplegados por el equipo al peso estático del vehículo. Esta calibración, en general, se lleva a cabo de tres formas:

1. Calibración en el sitio

Es el sistema más antiguo y que se puede encontrar en las diferentes normas alrededor del mundo (LTPP, 2001; Jacob et al, 2002 FHWA, 2016; NMI, 2016; ASTM, 2017). Estas requieren que al menos dos vehículos prepesados y a diferentes velocidades circulen una cierta cantidad de veces sobre los sensores y de allí encontrar los diferentes factores de calibración. Si bien, esta metodología es la que se encuentra mejor desarrollada, y es la que se utiliza para aprobar el funcionamiento de una estación WIM, tiene la desventaja de ser costosa (Hernandez et al., 2019). En algunos lugares, se utilizan vehículos que hayan circulado sobre las estaciones WIM y también por estaciones de pesaje estático, pudiendo así comparar ambos pesos, lo cual tiene la ventaja de utilizar una mayor cantidad de vehículos para realizar la calibración. Todas las normas confluyen en indicar que en situaciones de mantención mayor o frente al cambio de algún sensor, debe ser llevado a cabo una calibración y aunque nada novedoso ocurra se debe calibrar según ASTM al menos una vez al año, según NMI para fines legales dos veces al año y según LTPP que también incorpora información de tránsito, aunque con nivel de investigación, dos veces al año (Kentucky, 2012).

En la práctica y tal como lo menciona el NCHRP 386 (papagiannakis y Quinley, 2008), no todos los estados de Estados Unidos siguen las normas mencionadas, la gran mayoría de estos, para la calibración solo utilizan un vehículo y la realizan cada uno o dos años. Aunque, otros estados como California han establecido mejoras a los procedimientos. En este estado la calibración se realiza por rangos de velocidades, permitiendo una calibración “por partes”, lo que permite menores errores que con un solo factor de calibración (NCHRP, 509).

2. Calibración fuera del sitio utilizando Controles de Calidad

Este sistema utiliza controles de calidad para gatillar procedimientos de calibración en los sitios. Esto porque existen algunos parámetros que en el flujo normal de tránsito tienden a mantenerse estables. Dos de los más clásicos son el FAW (peso eje de dirección) y el GVW (peso total

del vehículo) en los vehículos clase 09 de la FHWA. Estos parámetros tienen valores muy estables, tal que, al descubrirse un corrimiento de los valores, se declara la necesidad de una calibración o el ajuste de factores para eliminar dicho corrimiento. De allí, de este corrimiento desde un valor muy estable puede generarse una calibración. Los factores más utilizados son resumidos por (Hernandez et al., 2019) tomados desde la TMG y el NCHRP 509 y son FAW (front axle weight), GVW (gross vehicle weight), conteos de clasificación, distribución de vehículos cargados y descargados, cambios en patrones de tránsito, cambios en los volúmenes horarios, etc.

3. Autocalibración

Este proceso se basa en que el mismo sistema WIM tiene la capacidad de ajustar factores de los algoritmos, mediante la supervisión de algunos parámetros establecidos. De forma similar a los controles de calidad, los factores más típicos son el FAW y el GVW de los vehículos clase 09. Por ejemplo, los departamentos de tránsito de Florida, Texas y California promedian el GVW, mientras Indiana y Minesota monitorean tanto el FAW y GVW (papagiannakis y Quinley, 2008). Otro ejemplo, es la red francesa, donde sus más de 170 equipos WIM utilizan sistemas de autocalibración. Además, del ajuste por estos factores, otro tipo de autocalibración se enfoca en la compensación del cambio de rigidez del pavimento producto de las variaciones de temperatura durante el día. Para esto, se utilizan curvas que relacionan el cambio de temperatura con factores de calibración, las cuales son alimentadas de termocuplas instaladas en el pavimento, las cuales en algunos casos no consiguen desempeñarse de manera correcta (Hernandez et al., 2019). De todas formas, la autocalibración más que ser una alternativa a las formas de calibración en el sitio, son complementos que permiten sostener la buena exactitud de los sistemas WIM en el tiempo

3.1.3. Redes de Sistemas WIM

En el mundo existen diferentes redes WIM con diferentes objetivos buscados. Por ejemplo, en Europa (Países bajos y Francia), las redes WIM se han enfocado principalmente en apoyar las medidas de control de peso, buscando quitar aquellos vehículos y empresas que violen las normativas. Por otro lado, en los Estados Unidos, que tiene la red más grande del mundo, tiene diversas particularidades en cada uno de sus estados. Así, es posible encontrar estados con cientos de equipos y otros con menos de una decena y cada uno con tecnologías distintas. En general, es posible considerar en los Estados Unidos, el objetivo está más orientado a la parte estadística como apoyo a la toma de decisiones, aunque, también tiene una red WIM asociada al programa LTPP, la cual goza de producir información a nivel de investigación.

En Chile, por otro lado los sistemas WIM se utilizan como balanzas selectivas en las plazas de pesaje y en algunas carreteras concesionadas que de forma independiente han instalado estos equipos. Así, se puede decir que en Chile los equipos WIM se encuentran en una etapa incipiente pero un uso relativamente normalizado. Es posible encontrar más detalles en el apéndice B.7 y en otras publicaciones como (Jacob y Feypell-de La Beaumelle, 2010; Eady et al, 2016)

3.1.4. Selección de Especificaciones para la Instalación, Mantenimiento y obtención de información del Sistema WIM

Dada la importancia de caracterizar correctamente el tránsito que circula por las carreteras del país, es evidente la necesidad de dotarlas de sistemas que permitan recolectar esta información. Para ello, se vuelve imperiosa la necesidad de instalar sistemas de pesaje en movimiento, aunque la sola instalación no suplirá correctamente esta necesidad. Con el objetivo de que el desempeño de estos sistemas sea el correcto, se debe establecer requisitos sobre la información a recolectar y especificaciones sobre la instalación, operación y mantenimiento de los sistemas.

- Con respecto a la información a recolectar, es importante que por cada pasada de vehículo sobre el sistema WIM se obtenga los siguientes campos de información
 - Carga por rueda
 - Carga por eje
 - Carga por grupo de ejes
 - Peso completo del vehículo
 - Velocidad
 - Distancia entre centros de eje
 - Clasificación del vehículo (en función del MOP)
 - Identificación del sitio de pesaje
 - Pista y dirección de pasada
 - Fecha y hora de pasada
 - Número secuencial de pasada
 - wheelbase (distancia entre el eje delante y el último)
 - Ejes Equivalentes
 - Códigos de alerta u error
- Sobre que metadatos incluir por cada sitio WIM, lo encontrado en la tabla 3.1.4 es imprescindible, ya que proviene de una discusión generada por una red que busca la homologación entre sus partes, un problema que cualquier red inicial puede sufrir. En Chile, este problema se puede dar si de forma independiente cada concesionaria llevara a cabo la instalación y operación de sus equipos.
- Sobre el nivel de exactitud que debe cumplir un sistema WIM, existen diversas opciones según la norma que se elija. En este campo se ha decidido seleccionar el tipo I según ASTM E1318. Esta razón se enmarca en el hecho que esta normativa constantemente se ha revisado y renovado, lo que otorga confianza en seguirla. Por otro lado, al ver que en Chile, hace ya más de siete años se ha instalado de forma independiente sistemas clase II, nos permite asegurar que la selección de sistemas tipo I es correcta.

- Sobre los requisitos para la instalación de un sistema WIM, se deben adoptar los requisitos establecidos en COST 323 para condiciones excelentes, lo cual incluye la geometría del camino. Sin embargo, en el caso de la regularidad longitudinal, se exigirá lo dispuesto en la norma AASHTO M331-17. Así, se conseguirá que el pavimento que aloje el sistema de pesaje en movimiento, se conseguirá sostener durante una mayor cantidad de tiempo su buen desempeño.
- En el caso de la calibración, se recomienda el sistema de calibración y puesta en servicio establecido por la norma ASTM E1318 y se recomienda llevar a cabo este proceso dos veces al año, aunque en forma de exigencia se debe establecer al menos una vez al año y/o cada vez que se realice algún tipo de mantenimiento especial sobre el sistema WIM

3.2. Almacenamiento y Procesamiento de Información de Sistemas de Pesaje en Movimiento

Con la información de tránsito, debe tener cuidado en su tratamiento. Este , que va desde que el sistema WIM genera todos los campos de información (pesos, dimensiones, velocidad, etc.) hasta el momento en que la agencia guarda esta información en sus archivos. Este proceso por lo general, tiene un intermediario que tiende a ser un servidor central, que hace el trabajo de gestor de base de datos, es decir, recibe la información producida por los WIM y entrega la información que los usuarios soliciten. Aunque, entre ellos también se tiene a permitir el acceso a la información generada inmediatamente de forma directa, por ejemplo, ver fotografías de los últimos vehículos que circularon sobre el sistema WIM, tal como se observa en la figura 3.2.1 que muestra las relaciones entre dispositivos en la red WIM francesa (Dolcemascolo et al, 2015).

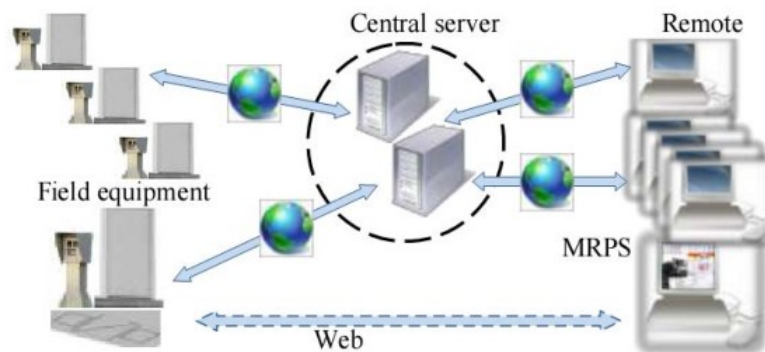


Figura 3.2.1: Arquitectura de parte de la red WIM francesa (Dolcemascolo et al, 2015)

El primer paso en el tratamiento, es la transmisión de información del sitio WIM hasta las dependencias de la agencia. Este proceso, que podría entenderse como un proceso constante (en tiempo real) para poder controlar los vehículos que infringen las normas, no siempre lo es. Esto se debe a que muchas agencias no utilizan sus dispositivos con el fin punitivo, sino que, utilizan sus sistemas WIM con fines netamente estadísticos. Un ejemplo de lo anterior, lo podemos observar en la tabla 3.2.1, donde se observa que ciertas agencias de carretera de Australia reciben la información incluso de forma manual, es decir, un encargado viaja al sitio WIM, descarga la información en un computador y lo entrega a la agencia, mientras que otras agencias lo reciben de forma automática.

Tabla 3.2.1: Resumen de la colección y disponibilidad de información (Eady et al, 2016)

Jurisdicción	Número de estaciones WIM	Método de obtención de datos	Frecuencia de colección de datos	Disponibilidad de datos en vivo
NSW	48	Recuperación Manual/transferencia electrónica	Semanal (manual)/diaria (transferencia electrónica)	Dependiente de la tecnología
VIC	14	Descarga vía modem y carga a WIMNet	-	sí
QLD	58	Subida automática a la base de datos	Descarga diaria	sí
WA	11*	-	-	-
SA	8	Descarga manual vía modem	Semanal	sí
TAS	5	Subida automática a servidor de documentos	semanal	posiblemente sí
ACT	1	Descarga manual de datos	Semanal durante la noche	no
NT	6*	-	-	-
NZ	6	-	-	-

*Estos responsables de la autopista no respondieron la encuesta y la información provino de (Han et al, 2010)

Luego el siguiente paso en el tratamiento de la información se enfoca en que todos los registros provengan con similares formatos permitiendo la interrelación entre registros de diferentes sitios. Para conseguir ello, es necesario que las agencias encargadas de obtener esta información utilicen formatos similares en los registros vehículos a vehículos. Sobre este punto, Austroads, en su búsqueda de conseguir una red nacional WIM (Eady et al, 2016) estableció la discusión acerca de como procesar su información, ya que, se descubrió que la información se encontraba diseminada en diferentes bases de datos con diferentes formatos, lo que dificultaba la interacción entre de bases de datos. Entonces, luego de discutir el curso de acción, ellos determinaron que existían tres opciones a seguir:

1. Establecer una entidad externa a las agencias y solventada por ellas, la cual se encargaría de organizar, almacenar y disponer de la información WIM de cada agencia. Esta se ve como la mejor opción porque asegura procesos de gestión correctos y facilita la interacción de información, sin embargo, se debe evaluar su costo y el tiempo para que esta entidad externa se encuentre operativa
2. Entregar a cada agencia “macros” y programas que organicen los registros de la forma estándar. Esto facilitaría el procedimiento de ordenamiento y los costos caerían dentro de las agencias. Su desventaja es que se deben fabricar estos programas y la realidad de cada agencia es diferente, pudiendo generarse diferencias entre agencias en la frecuencia de manejo.
3. Mantener la situación actual, con bases de datos diferentes y formatos diferentes, pero mejorando las comunicaciones entre agencias.

Sobre estas tres opciones, se estableció que la mejor es la primera. Sin embargo, faltan estudios técnicos y económicos que permitan establecer que es la opción óptima. Sin embargo, con esto queda de manifiesto la necesidad de conseguir que los registros de pesaje en movimiento sostengan un formato similar, aunque los encargados de cada sitio sean entes diferentes.

Cuando la información llega a las agencias interesadas en dicha información, el almacenamiento tiende a ser en bases de carácter relacional que se llevan muy bien con información muy abundante y donde sus campos tienden a ser alfanuméricos (pesos, dimensiones, clasificación y velocidad). Dado el tipo relacional, los registros de los pesajes en movimiento tienden siempre a ser generados en archivos de textos y/o binarios en formato ASCII. Esto puede ser visto en Chile (Iturriaga, 2013), en los Estados Unidos (anexo C del NCHRP 683 (Sivakamur et al, 2011)) y en la información entregada para realizar estudios sobre la información de pesaje en Europa en el estudio de Enright & O'brien (2011). Es más, en el Manual para el Analista de Datos WIM de la FHWA, se evidencia esta práctica generalizada, en el hecho que se enseñe el proceso de transformar archivos de texto con información WIM a hojas de cálculo de Microsoft Excel para realizar análisis más detallados.

Un punto aparte requiere el hecho que la información WIM al producirse constantemente, puede generar grandes masas de información. Es por ello que es necesario que la agencia sea cuidadosa a la hora de organizar el formato de la información y como puede ahorrar espacio a través de la codificación de campos de información. Un ejemplo de esto, es lo llevado a cabo por la FHWA en su Guía de Monitoreo de Tránsito (FHWA, 2015) donde se establece el formato de como registrar la información de tránsito por cada estado de los Estados Unidos. Como se mencionó recientemente, toda la información que la dirección de tránsito del estado recopile, es necesario que provenga en el mismo formato. En uno de los capítulos de esta guía, esta proporciona el formato con el cual se debe ordenar la información, en este caso mediante un archivo de texto en formato ASCII, es generado para:

- Descripción de la estación
- Volumen del tránsito
- Datos de velocidad
- Clasificación de vehículos
- Pesaje de vehículos
- Datos detallados por vehículo
- Frecuencia de envío de datos
- datos de descripción de estación de recuento no motorizada
- Datos de conteo no motorizado

De cada uno de los puntos anteriores, se generan una serie de campos a entregar por la dirección de tránsito, sin embargo, no todos estos campos son obligatorios, existen algunos Críticos (C) u Opcionales (O), además se permite un cierto largo a la información a entregar y el orden de dicha información:

TABLE 7-1 STATION DESCRIPTION RECORD

Field	Columns	Width	Description	Type
1	1	1	Record Type	C
2	2-3	2	FIPS State Code	C
3	4-9	6	Station ID	C
4	10	1	Direction of Travel Code	C
5	11	1	Lane of Travel	C
6	12-15	4	Year of Data	C
7	16-17	2	Functional Classification Code	C
8	18	1	Number of Lanes in Direction Indicated	C
9	19	1	Sample Type for TMAS	C
10	20	1	Number of Lanes Monitored for Traffic Volume	C
11	21	1	Method of Traffic Volume Counting	C
12	22	1	Number of Lanes Monitored for Vehicle Class	C

Figura 3.2.2: Extracto del formato para el registro de descripción de la estación (FHWA, 2015)

3.2.1. Selección de Especificaciones para el Tratamiento de la Información

Como se observó en esta sección, la formas de tratamiento de información no varían en demasía si se comparan las redes de pesaje en movimiento. Sin embargo, es necesario establecer ciertas especificaciones sobre este tratamiento.

Se establece la necesidad que la información una vez capturada pueda ser revisada en tiempo real. Esto tiene dos finalidades principales, la primera es permitir la preselección de vehículos que infrinjan las normas (si es que se llegara a utilizar estos dispositivos con dicha función) y la segunda, guarda relación con lo incluido en la siguiente sección, sobre los procesos de validación. Es necesario que pueda revisarse de forma inmediata los registros de vehículos para generar ciertos procedimientos de validación, como la comparación entre la clasificación del vehículo con lo observado por el personal.

En el caso del formato, es necesario que toda la información generada por algún sistema de pesaje en movimiento en el país, utilice el mismo formato. Esto facilitará el intercambio de información, en especial si se toma el hecho que en Chile existen diversos agentes que pudieran estar encargados de estos equipos, como el Ministerio de Obras Públicas y las distintas concesionarias en el país. Por otro lado, facilitaría la generación de una sola base de datos que contenga la información emanada de cada sistema WIM. Esta sería la mejor opción, ya que una entidad externa podría organizar la información y solicitarla a las concesionarias de forma totalmente independiente. Sin embargo, ello requiere mayor análisis y establecer comunicaciones entre las concesionarias y el gobierno, por lo tanto, por el momento la opción más óptima es que cada concesionaria realice los procedimientos de tratamiento, es decir, su codificación y almacenamiento, cumpliendo con protocolos establecidos, hasta que surja la posibilidad de establecer una base de datos de carácter nacional.

3.3. Procedimientos de Validación para la Información de Pesaje en Movimiento

Por diversos motivos los sistemas WIM pueden ver afectada su capacidad de estimar el peso estático de un vehículo. Estos motivos son muy diversos y pueden ser repartidos en tres grandes grupos, los primeros, los que pueden ser controlados como condiciones del sitio, calidad del equipo, instalación y mantenimiento y mantenimiento del pavimento; los que en parte pueden ser controlados como cambios de pista de los vehículos, paso de ruedas por las bermas, aceleración de los vehículos; y aquellos que no pueden ser controlados como presión de los neumáticos, suspensión del vehículo, viento, tipo de carga (líquida o sólida), etc.(FHWA, 2010). Por lo tanto, los datos que surjan de estas instalaciones, por muy alta que sea a exactitud del dispositivo, puede que no sea capaz de entregar información confiable.

Es por lo anterior, que debe existir una preocupación por los registros arrojados por estos sistemas. Un ejemplo de esto es lo que ocurre en LTPP, donde a pesar de utilizar dos contratistas para la instalación y puesta en marcha de un equipo WIM (donde ambos se fiscalizan) (Walker, 2011), todos los registros deben cursar un proceso de control de calidad (LTPP, 2016). Estos procedimientos de control de calidad sobre los registros no son nada nuevo, diferentes agencias alrededor del mundo tienen sus propias metodologías. Algunos ejemplos pueden encontrarse en (FHWA, 2010; Enright y O'brien, 2011; Mai et al., 2013; Ramachandran et al, 2014; Žnidarič et al, 2015; Van Loo y Hees, 2015).

Sobre estos procesos de validación de registros, por lo general, se pueden encontrar de dos tipos, aquellos enfocados en la detección de registros vehículo a vehículo y en aquellos que se basan en el análisis de registros acumulados. Una revisión de casos se muestra a continuación.

3.3.1. Validación de registros vehículo a vehículo

Estos se basan en la revisión de cada resultado entregado por el sistema WIM. En este caso se revisa la velocidad, clasificación, peso por eje, distancia entre ejes de cada vehículo. Por lo general, estos tipos de validaciones se basan en:

- Existencia de una mínima cantidad de información, es decir, si un vehículo es clasificado como 09 según la clasificación de FHWA, es necesario, que los valores desplegados incluyan 5 ejes, 4 distancias entre ejes, el peso total, la velocidad y todos aquellos elementos que el equipo debiese entregar.
- Existencia de rangos de validez, en este caso cada elemento desplegado debe contenerse dentro de un rango de confianza, donde el valor sea creíble.
- Requisito de consistencia, en estos casos, se busca que variables relacionadas concuerden. Por ejemplo, que la suma de las cargas por eje sea igual al peso bruto desplegado o que ningún eje supere el 80 % del peso total.

A continuación, se muestran algunos procesos de validación vehículo a vehículo

3.3.1.1. Sistema de puntuación

En este sistema, todos los registros vehículo a vehículo, comienzan con un puntaje de cero. Cuando se revisa cada registro, si este cae en alguna causal, se le agrega un puntaje. En caso que, un registro iguale o supere el valor de +7, el registro se considera erróneo y se recomienda su eliminación; si está entre 0 y +6, se considera sospechoso y en caso de 0, el registro es confiable. Este sistema está expuesto en (Enright y O’Brien, 2011) y se basa principalmente en un sistema de rangos y la consistencia entre variables.

Tabla 3.3.1: Extracto de reglas para identificar datos erróneos (Žnidarič et al, 2015).

Criterios	Cambios en la puntuación
Cualquier carga de eje > 15 Toneladas y >85 % del peso total	+7
Camiones con peso total <= 0 Toneladas	+7
Primer espaciamiento de ejes > 10 metros y <= 15 metros	+4
Cada espaciamiento en el rango de 0.4 a 0.7 metros	+2
Cada espaciamiento en el rango de 0.7 a 1 metro	+1
Cada carga de eje < 0.5 Toneladas	+2

3.3.1.2. Revisión de datos en vivo

Una de las formas más simples de realizar un proceso de validación de datos, es la observación de cada registro y detectar los errores visualmente. El máximo exponente de estos procedimientos puede encontrarse en el WIM Data Analyst’s Manual (FHWA, 2010), en el cual se detallan procedimientos y ejemplos para la detección de estos errores. Es importante mencionar que este procedimiento varía en el nivel de expertiz que el analista puede tener. Aún más, el manual se divide según el nivel del analista.

3.3.1.3. Procedimientos de validación en los Países bajos

Enright y O’Brien, para llevar a cabo un procedimiento de validación de los registros de vehículos de los WIM de Países Bajos, utilizan los procedimientos del Rijkswaterstaat, siendo el sistema más completo para validar registros vehículo a vehículo. Estos procedimientos buscan solucionar los problemas de espacios de tiempo entre vehículos, vehículos cortados y análisis del wheelbase (distancia entre el primer y último eje):

1. Limpieza inicial, búsqueda de datos que no cumplan con los rangos establecidos
2. Estudio de Gaps (espacio temporal entre el último eje de un vehículo y el primer eje del siguiente). Para un gap entre los 0 y 0.1 segundos, es muy probable que estos casos sean vehículos con remolque y no dos vehículos independientes.
3. Largo del vehículo vs wheelbase. En general la diferencia entre ambos (“overhang”) se mantiene pequeña, no mayor a 4 metros, sin embargo, un valor mayor a 4 metros es indicio de ejes fantasmas, los cuales son ejes no reales detectados por el sistema WIM.

4. Aspectos inusuales y valores extremos, son valores que se distancian en demasía de la cotidianidad y se vuelven sospechosos.
5. Uso de evidencia fotográfica, dado que en Holanda se utiliza el sistema de fotografías más sistemas WIM, es posible contrastar las imágenes con lo entregado por el sistema (clasificación, vehículos divididos, ejes fantasmas)

3.3.1.4. Valores por defecto

La norma NMi, ha fijado rangos de operación, en los cuales se puede esperar una operación óptima del sistema, que incluyen aspectos como velocidad del vehículo, temperatura ambiente, humedad, interferencia de campos magnéticos y variaciones de voltaje. Así, si un registro es adquirido y el vehículo circula a 30 Km/h pero se ha fijado un rango de operación entre 50 a 110 Km/h, este registro debe ser eliminado o etiquetado. Esto es muy oportuno porque evita situaciones donde los algoritmos pueden verse sobrepasados como en situaciones de embotellamiento, tormentas eléctricas o situaciones en que la temperatura afecte a los sensores o al pavimento.

3.3.2. Sistemas de validación para grupos de datos

Estos procedimientos a diferencia de los anteriores utilizan grupos de datos provenientes de una serie de registros vehículos a vehículos, y por lo general, buscando aquellas variables, en las cuales alguna variación pueda ser signo de una alguna deficiencia en el sistema WIM.

Estas operaciones, debido a que tienen un nivel de desarrollo superior a los anteriores, tienden a ser realizadas cuando existe un objetivo concreto. Ejemplos del producto final pueden ser gatilladores de calibración, generación de espectros de carga, valores de entrada para diseño de pavimentos, gatillar actividades de mantención, cálculo de emisiones (Van Loo y Lees, 2015), etc.

3.3.2.1. Tamaño de los archivos

Este es un procedimiento bastante simple, el cual se basa en la comparación del tamaño de un archivo en un cierto periodo de tiempo (bajo el supuesto de una relación lineal entre la cantidad de vehículos y el tamaño del archivo) (FHWA, 2010), y el tamaño promedio, por lo general un día. Así, si un día el archivo tiene un tamaño pequeño, lo más probable es que existan problemas en la operación del equipo, problemas en la circulación de vehículos u otras razones, que hacen que el día medido sea anormal.

3.3.2.2. Vehículos duplicados

Proceso que busca la eliminación o constatación de aquellos registros duplicados. El problema es que con los diferentes procedimientos de validación es difícil detectarlos porque el vehículo repetido puede estar correctamente registrado y por lo tanto, superar cualquier sistema validación generando errores en los productos que utilizan estos registros.

3.3.2.3. Uso sesgos y corrimientos en gráficas

El uso de gráficas para detección de problemas en los equipos WIM es un proceso de revisión bastante recurrente y el argumento tras estos sistemas es el mismo que en los sistemas de calibración. El hecho que algunos fenómenos del tránsito deben ser constantes en un cierto periodo de tiempo, por ejemplo, los espectros de carga, los cuales tienen una forma bastante definida, en especial en algunos tipos de ejes, los que pueden ser utilizados con el fin de revisar si la operación del sistema WIM puede ser coherente. En (Mai et al, 2013), se utiliza esta forma, encontrando que el desplazamiento de los peaks y la forma de ciertos espectros es un claro indicador de un mal funcionamiento, encontrando meses de toma de datos, que debiesen ser quitados para solo utilizar registros correctos.

3.3.2.4. Long-term Pavement Performance (LTPP)

El LTPP ha sido capaz de generar 9 puntos donde se examinan los valores diarios del flujo, en especial se revisan las estadísticas de la clase número 9 (camión de 5 ejes según FHWA) para determinar si las mediciones necesitan o no un control de calidad. Los nueve puntos a considerar son los siguientes:

1. Conteo total de vehículos por día
2. Ninguna pista puede tener valor 0 en su flujo en una hora específica
3. Ninguna pista puede contar un flujo de tránsito de 2500 o más en una hora específica
4. Porcentaje de vehículos con un error por día
5. Porcentaje de vehículos con estado correcto en un día
6. Conteo total de vehículos de clase 9 en el día
7. Porcentaje de vehículos de clase 9 por día
8. Porcentaje de conteo con advertencias de vehículos clase 9 por día
9. Promedio de peso bruto de vehículos tipo 9 por día

Para que los registros tomados por las distintas direcciones de tránsito que aportan información al LTPP, entren a la base de datos, no solo deben cumplir con los nueve puntos anteriores, sino que también deben cumplir con lo establecido en *LTPP Information Management Systems* (FHWA, 2013). En este documento se contienen los campos de validación para los registros de cada vehículo y para todos aquellos factores obtenidos como ejes equivalentes, factores de distribución de ejes, horarios, mensuales, etc. De forma similar a los otros campos de información, se generan procedimientos para validar información mínima (nivel C), cumplir con rangos (nivel D) y coherencia entre variables (nivel D).

3.3.3. Selección de especificaciones para procedimientos de Validación en información de Sistemas de Pesajes en Movimiento

Es evidente la necesidad que frente a la existencia de un sistema de pesaje en movimiento, a los registros generados se les imponga un proceso de validación. Se debe comprender que muchos de los errores que se generan no provienen de un mal funcionamiento permanente, sino que muchas veces se asocian a errores en voltajes, a vehículos que cambian de pista en el sitio WIM, vehículos muy cercanos entre si o con carros u otros procesos normales en una carretera. Entendiendo esto, es necesario que los registros vehículos a vehículos sean procesados y se hagan las siguientes revisiones:

1. Revisión de contenido de información mínima en cada registro de vehículo. Esto es que se incluyan las 14 variables medidas
2. Revisión de rangos para todas las variables. Los rangos pueden obtenidos de la medición de un gran número de vehículos, en especial, en las dos semanas posteriores a la calibración
3. Revisión de coherencia entre variables. En este caso, buscar relaciones entre algunos campos como peso por eje con peso total, distancia entre ejes y distancia total, que algún eje no sobrepase el 80% del peso total, diferencia entre ruedas, etc.
4. Además a lo anterior, se puede sumar la revisión fotografías con lo dispuesto por el sistema. Esta revisión humana, puede ser de gran ayuda, ya que, si lo entregado y lo corroborado distancian mucho, puede elevarse una recomendación de mantención especial sobre el sistema WIM.

Conforme al paso del tiempo, la prueba de tecnologías es posible que los sistemas de validación puedan ser mejorados agregando alguno de los siguientes puntos:

- Revisión del tamaño de los archivos. Se debe establecer rangos de tamaño de archivos diarios para días de semana y días de fin de semana.
- Revisión de existencia de valores dentro de cada campo de información
- revisión que los registros se encuentren dentro de los rangos de funcionamiento de la norma ASTM E1318, como la velocidad y carga total de vehículos
- Revisión de registros vehículos duplicados (registros similares sucesivos)
- Revisión de horas de cada día en que ningún vehículo circule por alguna pista
- Revisión y establecimiento de patrones y rangos diarios, horarios y clases de vehículos pesado para:
 - Peso bruto del vehículo
 - Peso por ejes
 - Espaciamiento entre ejes
 - Carga por rueda

- Revisión y búsqueda de vehículos representativos en cada sitio WIM
- Detección de ejes fantasmas mediante el gap medido

Si bien, siempre es deseable que se generen mayores y más refinados procesos de validación, es difícil establecer requisitos muy altos en situación que en Chile no existe una red de sistemas de pesajes en movimiento y lo que existe, son iniciativas independientes de las concesionarias. Por otro lado, debido a la constante evolución del tránsito, donde aumenta el número de vehículos y su carga, será necesario que los procesos de validación establecidos sean revisados continuamente y se actualicen los procedimientos, incluyendo rangos y la inclusión de nuevas variables.

3.4. Disponibilidad de Información de Pesaje en Movimiento

La disponibilidad de información es el último paso del tratamiento de información que una agencia puede realizar. En este caso, cuando hablamos de información de pesaje en movimiento, se habla de los registros vehículo a vehículo emanados de cada sistema WIM.

A modo general, se puede mencionar que la información de pesaje en movimiento, a nivel muy detallado es muy difícil de encontrar, sin embargo, es posible encontrar estadísticas en LTPP y otros portales con información algo más detallada, aunque en su mayoría la información de pesaje y tránsito se tiende a resumir en función del TMDA u otros parámetros que intenten caracterizar el tránsito sobre una vía.

3.4.1. Long-Term Pavement Performance

Hasta ahora la información de tránsito ha sido en versión vehículo a vehículo, lo cual si bien es muy relevante porque es la base de todos frutos obtenidos con esta información, no siempre es necesario conocer a ese nivel de detalle. En ese mismo sentido, LTPP ha almacenado esta información en niveles de agregación, yendo de niveles muy grandes (anuales) hasta niveles donde pueden encontrarse registros vehículos a vehículos. Los siguientes niveles son en los cuales se encuentra jerarquizada esta información en cinco niveles (FHWA, 2001):

1. Nivel 1: Este set de registros incluye información de carga resumen del año. Esto ha sido renombrado como “Annual Load/Count Summary Records”. Esto incluye tanto el total de vehículos en la pista de prueba de LTPP, y la distribución de cargas de ejes estimadas a ocurrir en la pista de prueba durante el año dado. Las distribuciones de carga de ejes son por rango de peso y tipo de eje.
2. Nivel 2: este tipo de registro provee distribuciones de cargas de ejes anuales por tipo de vehículo. Este nivel de la base de datos ha sido renombrado como “Annual Loads by Vehicle Class”. Este está en similar estructura a los registros del nivel 1, excepto que un grupo de distribuciones de cargas de ejes se presenta para cada uno de los diez tipos de camiones de FHWA (de tipo 4 al 13).
3. Nivel 3: Este tipo de registro ahora llamado “Daily Summary Traffic Records” contiene resúmenes diarios de información de carga. Nivel 3 consiste en tres diferentes tipos de registros; volúmenes totales diarios, volúmenes totales diarios por clase de vehículo, y distribuciones por carga de eje por clase de vehículo.
4. Nivel 4: este grupo de registros ahora llamados “Submitted Traffic Loading Records” contienen los datos en bruto enviados por las agencias, pero guardados en un formato común. Estos son tres diferentes tipos de registros en este nivel de agregación; registros de peso vehículo individual, registros volúmenes horarios, y registros de volúmenes horarios por clase de vehículo.
5. Nivel 5: este nivel incluye toda la información enviada por la agencia, pero que no está en el nivel 4. Esto incluye todos los datos incorporados en las hojas transmitidas. Ahora es llamado “Additional traffic loading Information”.

Se puede mencionar que la base de datos de LTPP, es la base de datos de pavimentos más importante en el mundo, no solo por su tamaño, sino también por la alta cantidad de investigación que se ha sustentado en ella. Esto porque la base de datos es de libre acceso y permite la descarga de todos los ítems insertos en ella desde el link de Infopave (<https://infopave.fhwa.dot.gov/>).

Claro está que no toda la información puede ser descargada en el mismo formato, en el caso de archivos simples (de tamaño pequeño) el sistema permite descargar en formato XLS, mientras que si es más grande en formato ACCESS. En el último caso y es cuando la solicitud de descarga supera los 500000 registros, se descarga un archivo en lenguaje SQL y este es enviado en menos de dos días.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	STATE	STATE	SHRP	CONSTRUCTION_NO	YEAR	AADTT_VEH_CLASS_4_TREN	AADTT_VEH_CLASS	AADTT_VEH_CLASS_6_TREND	AADTT_VE
2	26	Michigan	0224		1	2005	66	375	80
3	26	Michigan	0224		1	2006	54	379	78
4	26	Michigan	0224		1	2007	36	439	79
5	26	Michigan	0224		1	2008	33	425	71
6	26	Michigan	0224		1	2009	33	325	61
7	26	Michigan	0224		1	2010	36	280	66
8	26	Michigan	0224		1	2011	31	267	61
9	26	Michigan	0224		1	2012	32	285	65
10	26	Michigan	0224		1	2013	33	269	70
11	1	Alabama	0101		1	1991	0	0	0
12	1	Alabama	0101		1	1992	0	0	0
13	1	Alabama	0101		1	1993	30	83	45
14	1	Alabama	0101		1	1994	31	86	46
15	1	Alabama	0101		1	1995	32	88	48
16	1	Alabama	0101		1	1996	33	91	49
17	1	Alabama	0101		1	1997	34	93	51
18	1	Alabama	0101		1	1998	35	96	52
19	1	Alabama	0101		1	1999	36	99	54
20	1	Alabama	0101		1	2000	37	102	55
21	1	Alabama	0101		1	2001	38	105	57
22	1	Alabama	0101		1	2002	39	108	59
23	1	Alabama	0101		1	2003	40	112	60
24	1	Alabama	0101		1	2004	41	115	62
25	1	Alabama	0101		1	2005	43	118	64

Figura 3.4.1: Extracto de descarga de TMDA de sitios de estaciones WIM de LTPP (Infopave-LTPP)

3.4.2. Balanzas Selectivas en Chile

En el mundo y no solo en Chile por muchos años la información del peso de los vehículos de carga se han obtenido de las balanzas punitivas. Al día de hoy en Chile estas siguen siendo una fuente muy importante de información, es por ello que en el Plan de Mantenimiento y Modernización de Estaciones de Pesaje Fijas-Automáticas, se destaca que las estaciones de pesaje de su balanza selectiva deberán tomar y procesar la siguiente información. Si bien esta información no se encuentra disponible al público, si representa un banco de información relevante:

- Estadística diaria de vehículos controlados, con y sin sobrepeso, total vehículos y cantidad de toneladas separadas por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipos de vehículos controlados con y sin sobrepeso, total vehículos y cantidad de toneladas, separadas por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipo de vehículos, separadas por región, plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráficos por tipo de vehículo, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráficos por toneladas, separados por plazas de pesaje, estación, mes y año.

- Los puntos anteriores, deberán ser entregadas separados para buses, camiones y total general.

En el caso de las balanzas punitivas, la información procesada a entregar debe ser la siguiente:

- Estadística diaria de vehículos controlados, con y sin sobrepeso, total de vehículos y cantidad de toneladas, separados por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipo de vehículos controlados, con y sin sobrepeso, total de vehículos y cantidad de toneladas, separados por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipo de vehículos, separados por región, plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Listado de vehículos infraccionados, separados por estación y plaza de pesaje.
- Gráfico de vehículos controlados, con sobrepeso e infraccionados, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráfico de vehículos controlados, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráfico de vehículos con sobrepeso, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráfico de vehículos infraccionados, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.

Claro está, que para verificar si un vehículo cumple o no con la normativa de pesos y dimensiones, por cada camión que entre en la estación de pesaje se genera una medición de su peso bruto, el peso por cada eje, sus dimensiones, la distancia entre ejes, su altura, largo y todo otro requisito exigido por norma.

3.4.3. Definición de Disponibilidad de Información

De la revisión llevada a cabo, queda claro que la información disponible al público es muy escasa. En general y a excepción de lo visto en LTPP, se observó en el capítulo asociado a inventario y desempeño de carreteras, la información de tránsito disponible tiende a concentrarse en factores como el TMDA, conteos, porcentaje de vehículos pesados y en algunos casos la suma de Ejes Equivalentes.

Lo anterior, es muy reducido para el verdadero potencial que contienen los sistemas de pesaje en movimiento. Entender que introducir una tecnología que requiere un importante desembolso humano y económico para que su información no se encuentra ampliamente compartida, no es lo apropiado. Así se ha decidido proponer, que los registros vehículos a vehículos se encuentren disponibles a cualquier persona interesada.

Se pretende con esto ampliar el número de usuarios disponibles y aprovechar la oportunidad para que una tecnología tan importante se incorpore definitivamente en la red nacional de carreteras, disponiendo de todos los posibles resultados que de estos sistemas puedan ser obtenidos.

3.5. Protocolo Sobre la Información de Sistemas de Pesaje en Movimiento

El presente protocolo, busca entregar los requisitos y procedimientos necesarios para la gestión de información conseguida mediante el uso de sistemas de pesaje en movimiento. Este, se divide en 8 partes que tienen por objetivo, cubrir los puntos necesarios para asegurar una correcta gestión de esta información, comenzando desde el momento de la obtención de los registros, hasta su posterior disposición.

En general, las partes se enfocan en apuntar una serie de requisitos que el ente encargado deberá cumplir sumados a procedimientos que indican las acciones a tomar dependiendo la situación.

Definiciones

A efectos del presente protocolo, se entregan las siguientes definiciones para un mejor entendimiento:

1. Por “centro de procesamiento de datos” se entiende el lugar donde se reúnen los elementos, infraestructuras y recursos necesarios para el procesamiento de la información registrada por una entidad u organización.
2. Por “datos en tiempo real” se entiende por aquellas observaciones recuperadas por métodos de procesamiento de datos automáticos desde el sitio en tiempo real o prácticamente en tiempo real y transmitidos al centro de procesamiento de datos instantáneamente enviada a los usuarios.
3. Por “estación de pesaje en movimiento” o “WIM” se entiende como una estación en que, mediante el paso de vehículos por un sensor, se puede estimar la carga del vehículo estática.
4. Por “FHWA”, se entiende la Federal Highway Administration, la cual es una rama del Departamento de Transportes de Estados Unidos, encargada del transporte por carreteras.
5. Por “Gap”, se entiende la distancia temporal entre el último eje del vehículo que pasa por el sistema de pesaje en movimiento y la llegada del eje frontal del siguiente vehículo.
6. Por “metadatos” se entiende que son distintos tipos de información sobre las estaciones de pesaje en movimiento como: información general (coordenadas geográficas, dirección, personal), historial de la estación, historial de los instrumentos (reparaciones y calibración), descripción del ambiente que rodea la estación, tipo de la estación, servicio de información, versiones del software y referencias a documentación.
7. Por “MOP”, se entiende el Ministerio de Obras públicas de Chile
8. Por “validación de datos” se entiende el proceso que un conjunto de técnicas, procedimientos, algoritmos y pruebas que sirven como herramientas para la identificación y detección de errores y aportan un indicativo del nivel de calidad de cada uno de los datos registrados, asegurando la fiabilidad de dichas observaciones.

9. Por “wheelbase” se entiende la distancia entre el centro del eje frontal del vehículo y el centro del último eje de este vehículo que esté en contacto con el suelo.

3.5.1. Bitácora y metadatos de la estación de pesaje en movimiento

La bitácora y metadatos de la estación de pesaje en movimiento, tiene el fin de ser el elemento que albergue todos los sucesos que influyan en la normal operación de la estación. Se busca con esto, que en caso de dudas sobre los datos, un registro ordenado cronológicamente permita conocer lapsos de tiempo en que la estación tener desempeños diferentes, que expliquen errores, sesgos, etc.

1. consideran sucesos que influyan en la operación normal de la estación situaciones como::
 - a) Fallas en el software de la estación
 - b) Fallas en los componentes técnicos de la estación.
 - c) Fallas en los sensores
 - d) Falla en elementos suministradores de energía (baterías, paneles solares, etc.)
 - e) Falla en los sistemas de comunicación
 - f) Pérdida de datos
 - g) Reemplazo o arreglo de sensores, equipos o cualquier elemento dentro de la estación
 - h) Mantenimiento rutinarias
 - i) Mantenimiento semestrales
 - j) Mantenimiento correctivas
 - k) Calibraciones
 - l) Pruebas de funcionamiento
 - m) Reubicaciones a las que se someta la estación de pesaje en movimiento o sus sensores
 - n) Acciones correctivas para todas las fallas
2. Todas las situaciones o sucesos que influyan en la operación normal de la estación deberán quedar registradas y ordenadas cronológicamente, incluyendo todo lo apuntado en 3.5.1.
3. Todas las situaciones o sucesos que influyan en la operación normal de la estación deberán contener comentarios, fotografías y/o informes generados que aporten a un mejor entendimiento del suceso
4. La bitácora de cada estación deberá ser actualizada en el portal web del punto 3.5.6 cada 15 días. En este portal web deberá registrarse la ubicación de la estación en decimales hasta el sexto decimal. También deberá informarse la zona horaria UTC en que se ubica la estación. Para facilitar esto su ubicación deberá estar georreferenciada por aplicaciones o páginas como Google Earth, Google Maps, Apple Maps, etc.
5. El formato de la bitácora es el que se encuentra a continuación. Esta bitácora es por cada pista, es decir, si en un punto existen 3 pistas con sistemas WIM, para cada una de ellas debe seguirse el uso de la bitácora.

Bitácora de estación de pesaje en movimiento						
Estación	Ruta	Km	Sentido	Pista	Latitud	longitud
			Según tabla 2.5.3	según punto 2 de 2.5.1		
Orden de sensores		Tipo de sensor			Modelo de sensor	
Ej: L-S-L (loop-sensor-loop)		Ej: bending plate, piezocuarzo, celda de carga				
Fabricante de sensor		Fecha de instalación			última fecha actualización bitácora	
		dd-mm-aa			dd-mm-aa	
Registro de fallas						
<p>En este apartado mencionar de forma cronológica situaciones de falla en software, componentes técnicos, fallas en sensores, energía, comunicaciones. En cada falla debe quedar registrado:</p> <p><i>Fecha / Hora de Falla/ Hora de Aviso / Hora de Detención de la Estación/ Nombre del funcionario que comunica y recibe la falla/ Descripción de la Falla/ Hora de llegada de Empresa a Estación/Hora de Término de Mantenimiento/ Descripción Técnica del trabajo realizado (incluyendo sensores intercambiados o arreglados) / Fotografías, planos o diagramas que faciliten el entendimiento del proceso/ Hora de inicio actividades Estación.</i></p>						
Registro de mantenimientos						
<p>En este apartado mencionar de forma cronológica situaciones de mantenimiento y calibración de los sistemas WIM. De cada una debe quedar registrado lo siguiente</p> <p><i>Fecha / Hora de Falla/ Hora de Aviso / Hora de Detención de la Estación/ Nombre del funcionario que comunica y recibe la falla/ Descripción de la Falla/ Hora de llegada de Empresa a Estación/Hora de Término de Mantenimiento/ Descripción Técnica del trabajo realizado/ Fotografías, planos o diagramas que faciliten el entendimiento del proceso/ Informes técnicos/ Hora de inicio actividades Estación.</i></p>						
Registro de actividades sobre el pavimento						
<p>En este apartado mencionar de forma cronológica, aquellas situaciones donde se vea generen cambios en el pavimento circundante a la estación WIM, incluyendo mediciones de su desempeño.</p> <p><i>Fecha/ Hora de medición/ descripción de trabajo sobre el pavimento/ Fecha de término de actividades/ Hora de término de actividad/ Descripción técnica del trabajo realizado/ fotografías o diagramas que faciliten el entendimiento del proceso</i></p>						

Figura 3.5.1: Formato bitácora de estación de pesaje en movimiento (para una pista)

3.5.2. Recopilación de información

El proceso mediante se recopilan los registros en un sistema de pesaje en movimiento, se deben guiar según lo dispuesto en el diagrama 3.5.2. Dicho diagrama, expone el proceso que debe realizar el ente encargado, desde el paso de un vehículo sobre el equipo WIM, hasta su envío a los procesos de validación. Los siguientes puntos buscan dar más detalle de los expuesto en el diagrama mencionado

1. Sobre los archivos de datos enviados desde la estación de pesaje en movimiento al centro de procesamiento de datos, estos deberán cumplir con lo siguiente
 - a) Frecuencia de Envío: luego del paso de un vehículo con peso mayor a 3,5 toneladas
 - b) La información enviada deberá ser en formato vehículo a vehículo, donde cada vehículo utilizará una fila del documento.
 - c) La información provista por el sistema de pesaje en movimiento por cada pasada de vehículo deberá ser la siguiente:
 - 1) Carga de rueda
 - 2) Carga de eje
 - 3) Carga de grupo de ejes
 - 4) Peso bruto del vehículo
 - 5) Velocidad
 - 6) Espaciamiento entre los centros de los ejes
 - 7) Clasificación del vehículo según arreglo de ejes
 - 8) Código del sitio
 - 9) Pista y dirección de viaje
 - 10) Fecha y hora de pasada del vehículo
 - 11) Número secuencial del vehículo
 - 12) Wheelbase
 - 13) Carga de ejes equivalentes a un eje simple
 - 14) Código de violación
 - d) En caso de violación de alguna norma, el código de violación serán los siguientes según cada caso
 - 1) Carga por rueda: WL
 - 2) Carga por eje: AL
 - 3) Carga por grupo de ejes: AG
 - 4) Peso bruto del vehículo: GV
 - 5) Exceso de velocidad: OS
 - 6) Velocidad mínima: US
 - e) En caso de violación de alguna norma, se recomienda que se utilicen cámaras para el registro fotográfico del vehículo infractor. Así también se recomienda agregar la placa patente en la fila de información del vehículo, junto al código de violación.

- f) Se recomienda que el ingreso de la placa patente no a través de observación humana, sino utilizando tecnologías de reconocimiento automático de placas patentes.
2. En caso que el problema de comunicación se extienda más de una semana, se debe gatillar la recuperación manual de todos aquellos registros obtenidos mientras se generara una falla en la comunicación.
 3. El orden de la información deberá regirse en función de lo que se presenta en la siguiente tabla:

Código estación	fecha	Hora	Pista	N° secuencial del vehículo	Velocidad
<i>Nota 1</i>	En formato año- mes-día	En formato hora: Minuto: segundo	Según figura 2.5.1	Numeración ordinal del vehículo en el día.	En Km/h y número entero
005SE075	2033-11-27	18:45:37	2	125	65

Nota 1: Se compone de 8 caracteres, los tres primeros evidencian la ruta en que se encuentra la estación (justificado a la derecha y rellena de ceros), los dos del medio hacen referencia al sentido de viaje (NN: Norte, NE: noreste, EE: este, SE: sureste, SS: sur, SO: suroeste, OO: oeste y NO: noreste), mientras que los tres últimos hacen referencia al kilómetro donde se ubica la estación de pesaje en movimiento.

Wheelbase	Clasificación	Peso bruto	Peso eje 1	...	Peso eje 10
Hasta la décima de metros	Clasificación del vehículo según MOP	En toneladas. Con precisión de 50 Kg	En toneladas. Con precisión de 50 Kg	...	En toneladas. Con precisión de 50 Kg
15.3	9 o 531	36.350	5450	...	0

Peso rueda izquierda eje 1	Peso rueda derecha eje 1	Peso rueda izquierda eje 2	....	Peso rueda izquierda eje 10	Peso rueda derecha eje 10
En toneladas. Con precisión de 50 Kg	En toneladas. Con precisión de 50 Kg	En toneladas. Con precisión de 50 Kg	...	En toneladas. Con precisión de 50 Kg	En toneladas. Con precisión de 50 Kg
2.550	2.900	4.250	...	0	0

Espaciamiento ejes 1-2	Espaciamiento ejes 1-2	...	Espaciamiento Ejes 9 -10	Factor de ejes equivalentes	Código de violación	Placa patente
Hasta la décima de metro	Hasta la décima de metro	...	Hasta la décima de metro	Según volumen 3 M.C.	ver 1, letra d	
2.550	2.900	...	1.5	3.4	-	JBCD84

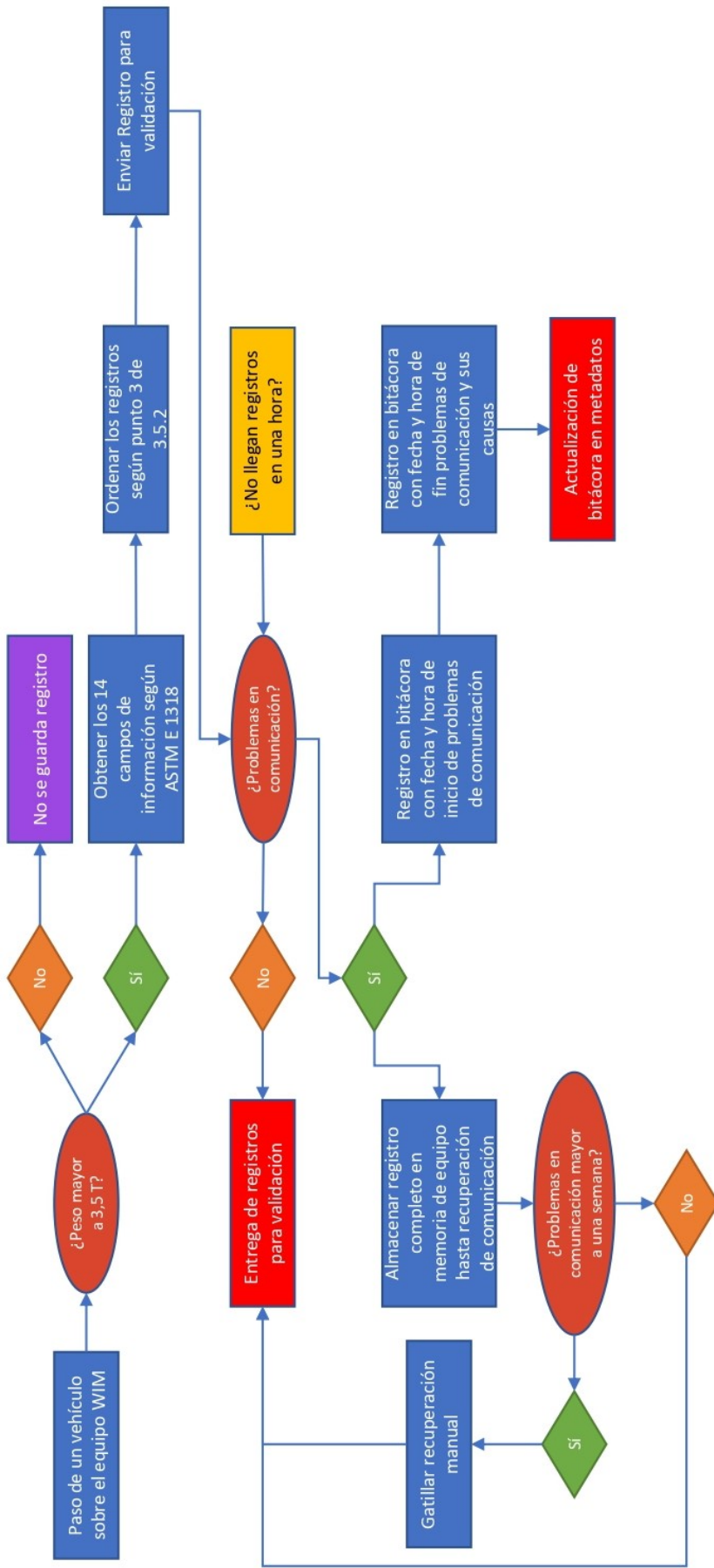


Figura 3.5.2: Proceso de recopilación de información de sistemas de pesaje en movimiento

3.5.3. Validación de los datos

Este apartado busca establecer procedimientos de validación que puedan detectar, etiquetar y suprimir registros de tránsito que puedan no ser correctas. En este caso, el objetivo principal es detectar errores groseros y allanar el camino para un futuro realizar procedimientos más elaborados.

1. Para el proceso de validación de datos, se propone el procedimiento 3.5.3 para la validación y etiqueta de los registros. En este procedimiento se basa en el siguiente orden
 - a) Revisar si el último registro es idéntico a algún registro anterior (dentro de la misma hora)
 - b) verificar si el registro contiene la información mínima
 - c) Revisar si los campos del registro se contiene dentro de rangos
 - d) Realizar pruebas de coherencia dentro del registro
 - e) Si corresponde, realizar el procedimiento de verificación de placa patente registrada y la observada por el personal encargado
 - f) agregar la variable de validación en el registro
 - g) Enviar el registro al proceso de archivo
2. Se recomienda en un futuro, una vez que puedan ser generados ciertos parámetros y la tecnología haya sido probada, utilizar los siguientes aspectos para una revisión más exhaustiva de los datos generados por el sistema
 - a) Revisión de los tamaños de archivo generados día a día
 - b) Comparación flujo de vehículos pesados dentro de días hábiles y fines de semana o feriados.
 - c) Detección de ejes fantasmas mediante análisis de gap medido
 - d) Establecimiento de patrones diarios, horarios y clase de vehículos para los siguientes criterios: peso bruto, peso por ejes, wheelbase, espaciamiento entre ejes y carga por ruedas
 - e) Comparación de porcentaje de vehículos pesados por pista
 - f) Búsqueda de clase de vehículo que sea representativa y ante su comparación con otras clases, pueda arrojar indicios de error.
 - g) Uso de técnicas como el enfoque de puntuación o el enfoque de la densidad del Kernel
3. En caso en que los procesos de validación no se estén llevando a cabo en el centro de procesamiento de datos, los registros no podrán ser guardados en la base de datos. Por lo tanto, es obligación del ente encargado velar que los registros que no hayan sido validado no sean corrompidos, adulterados u otra acción que reste fiabilidad al contenido.
4. Cada vez que en el centro de procesamiento de datos existan problemas con el proceso de validación, estos deberán quedar registrados en la bitácora de la estación, mencionando el problema, la duración de la falla y la solución ejercida.

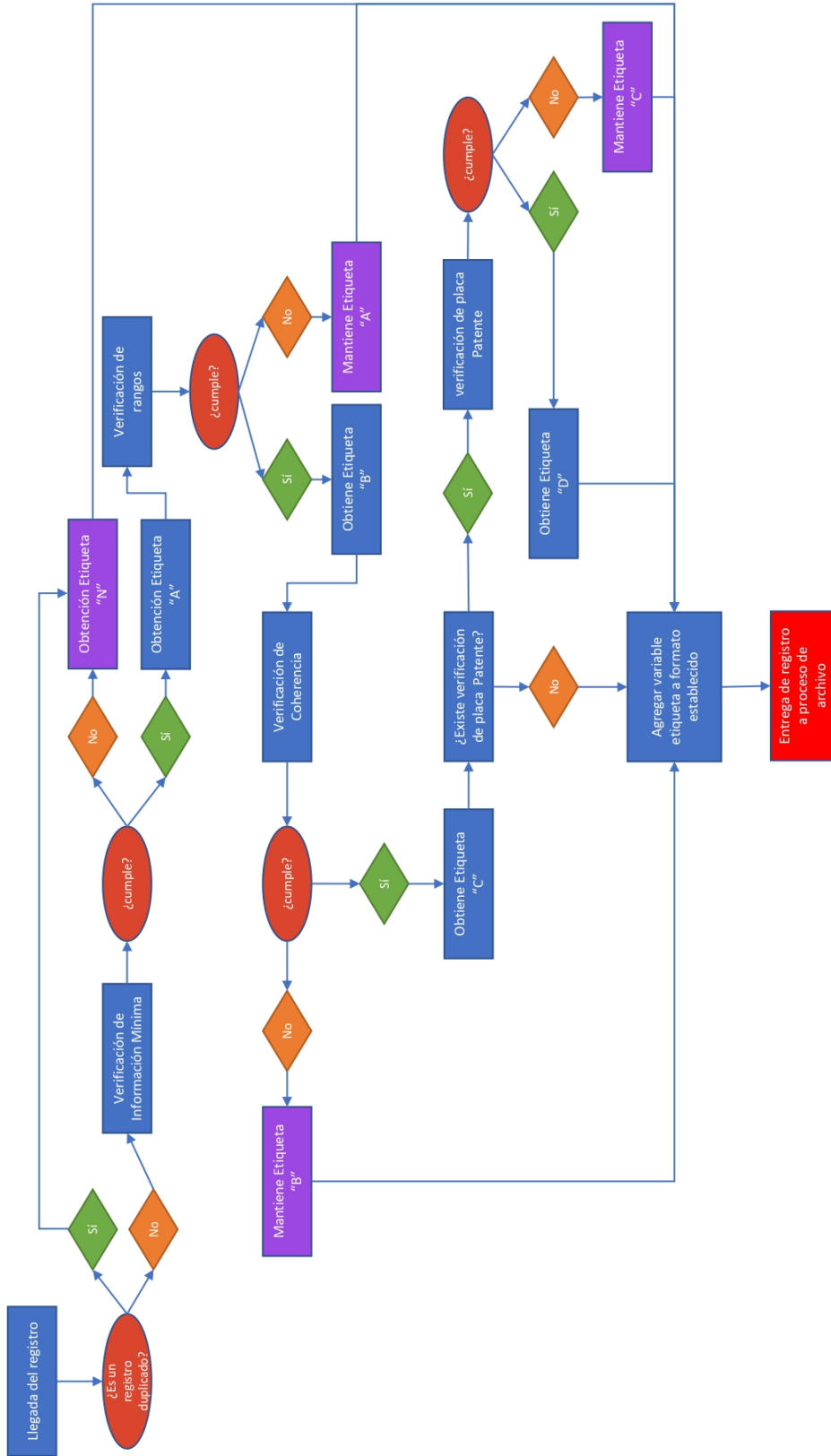


Figura 3.5.3: Procedimiento para la validación de registros obtenidos de sistemas de pesaje en movimiento

3.5.4. Seguridad de los datos y archivos

En este punto se enumeran requisitos que el ente a cargo deberá cumplir con el fin de evitar cualquier corrupción o pérdida de los registros.

1. Todo el personal del sistema de gestión de datos de pesaje, deberá ser consciente de sus responsabilidades profesionales.
2. Como medio contra el deterioro, los archivos y el entorno de base de datos deben ser seguros y estar seguros de riesgos materiales, como incendios y exceso de humedad.
3. En relación con los datos digitales, los usuarios deberán respetar las normas de seguridad relativas a la base de datos y sus componentes. Solo un número reducido de personas tendrá permitida la manipulación de datos, su inserción, actualización y eliminación.
4. En ningún caso se permitirá el cambio de registros, es decir, no se deberá alterar el valor adquirido por la estación de pesaje en movimiento
5. El personal autorizado para manipular una base de datos debe comprometerse a no efectuar ninguna transacción aparte de las operaciones y prácticas aprobadas por el gestor de datos.
6. Cualquier modificación que se introduzca en las tablas de datos debe ser objeto de un registro de auditoría, que debe ser accesible y ser sometido a un control.
7. Deberán aplicarse principios relativos a la seguridad de las contraseñas, como los que suponen no desvelarlas ni anotarlas en un papel, cambiarlas regularmente, usar contraseñas muy seguras compuestas por letras, números y caracteres aparentemente no relacionados.
8. Deberán desactivarse todos los servicios innecesarios que estén presentes en la base de datos del ordenador.
9. La base de datos también deberá estar protegida contra virus y ataques de piratas informáticos.
10. Deberán hacerse copias de seguridad frecuentemente, puesto que es probable que el trabajo realizado con posterioridad a la copia de seguridad más reciente se pierda y sea necesario repetirla por si se produce un fallo informático. Por lo general, debería hacerse una copia de seguridad acumulativa diaria y una copia completa semanal.
11. De vez en cuando, por lo general, una vez al mes, deberá guardarse una copia de seguridad completa de las tablas de datos en un lugar seguro, protegido contra incendios y distante de la ubicación física de la base de datos de pesaje. Es común conservar tres copias del mismo archivo en diferentes lugares seguros y, de ser posible, en diferentes pueblos o ciudades.

3.5.5. Almacenamiento de los datos

Con el fin de ordenar y gestionar todos los registros efectuados por las estaciones de pesaje en movimiento, se deberá generar una base de datos la cual deberá estar ordenada en función de cada variable medida.

1. Como parte del proceso de creación de la base de datos y sus objetos, la institución a cargo deberá realizar un análisis del volumen y crecimiento de los datos, para realizar un dimensionamiento adecuado de la infraestructura, configuración y tamaño de la base de datos a crear. De la misma manera es relevante conocer el número de transacciones esperadas, niveles de concurrencia, número de usuarios potenciales, entre otros puntos que puedan favorecer la realización de un dimensionamiento correcto e informado.
2. Al momento de generar una base de datos debe definirse un responsable técnico o administrador de la base de datos y un responsable o propietario de la información contenida.
3. Utilizar una nomenclatura estándar para las bases de datos y sus objetos, para todos los proyectos y sea que constante durante todo su diseño.
4. Se sugiere mantener nombres cortos y descriptivos, sin utilizar espacios en blanco o caracteres especiales.
5. Se debe confirmar la longitud máxima permitida para los nombres por el Sistema Manejador de Bases de Datos Relacional (RDBMS por sus siglas en inglés) a emplear. Se recomienda un uso máximo de 30 caracteres para el nombre de tablas o campos.
6. Para aquella información que no correspondan a registros de pesaje en movimiento como: la bitácora de la estación, sus metadatos u otros, el ente encargado deberá digitalizar dichos elementos ser ingresados a la base de datos.

3.5.6. Publicación de la información

Se deberá generar un portal web con acceso totalmente público, el cual deberá responder a los siguientes requerimientos: En este caso, el medio utilizado para cumplir estos requisitos no es parte del alcance de este punto, pero deberá cumplirse con los requisitos expuestos.

1. En este portal se podrá elegir la estación de pesaje en movimiento que al usuario interese. Las estaciones deberán estar georreferenciadas y nombradas en una mapa de la concesión.
2. En este portal la información obtenida de las estaciones WIM, deberá actualizarse en tiempo real, es decir, con una frecuencia de al menos 15 minutos.
3. Los usuarios del portal podrán descargar de forma inmediata los archivos históricos de las mediciones hasta los últimos cinco años. El usuario podrá descargar la variable que él estime necesaria estableciendo un periodo determinado, además el usuario podrá elegir si descargar los datos con o sin los procesos de validación (etiqueta en los datos).
4. Al descargar la información con respecto a la estación de pesaje en movimiento, el formato deberá ser el que se encuentra en la tabla 7-1 de la Traffic Monitoring Guide de Federal Highway Administration (2016). Sin embargo, los siguientes campos deberán sustituirse:
 - a) Campo N° 2: cambiar por código de la ruta según normativa chilena de numeración de vías
 - b) Campo N°3: cambiar por lo expuesto en 3.5.2
 - c) Campo N° 7: cambiar por clase funcional del apartado 3.103 de volumen 3 Manual de Carreteras
 - d) Los siguientes campos no deben incluirse: 9, 11, 13, 22, 23, 27, 28, 31 hasta 36.
5. Al descargar la información con respecto al registro de volumen de tránsito horario, el formato deberá ser el que se encuentra en la tabla 7-9 de la Traffic Monitoring Guide de Federal Highway Administration (2016). Sin embargo, los siguientes campos deberán sustituirse:
 - a) Campo N° 2: cambiar por código de la ruta según normativa chilena de numeración de vías
 - b) Campo N° 3: cambiar por clase funcional del apartado 3.103 de volumen 3 Manual de Carreteras
 - c) Campo N°3: cambiar por lo expuesto en 3.5.2
6. Al descargar la información con respecto a los Registros de velocidad de los vehículos, el formato deberá ser el que se encuentra en la tabla 7-12 de la Traffic Monitoring Guide de Federal Highway Administration (2016). Sin embargo, los siguientes campos deberán sustituirse:
 - a) Campo N° 2: cambiar por código de la ruta según normativa chilena de numeración de vías
 - b) Campo N°6: cambiar por lo expuesto en 3.5.2
 - c) Campo N° 10: dejar en blanco
 - d) Campo N°11: dejar en blanco

7. Al descargar la información con respecto a los Registros de clasificación de los vehículos, el formato deberá ser el que se encuentra en la tabla 7-15 de la Traffic Monitoring Guide de Federal Highway Administration (2016). Sin embargo, los siguientes campos deberán sustituirse:
 - a) Campo N° 2: cambiar por código de la ruta según normativa chilena de numeración de vías
 - b) Campo N° 3: cambiar por lo expuesto en 3.5.2
 - c) Campo N° 10: en blanco
 - d) Campo N° 11 debe quitarse
8. Dado que los 3 puntos anteriores, cambian los largos y la posición de las columnas, estas deberán ajustarse produciendo que los largos finales se vean afectados.
9. En el portal web se deberá poder descargar los registros vehículos a vehículos tal como se explica en el punto número 4 del apartado 3.5.2. El usuario podrá elegir el periodo en que está interesado (eligiendo día, mes y año). En este caso si el volumen de información es muy grande (por ejemplo, más de un millón de registros), la concesionaria tendrá un plazo de 3 días para proporcionar la información en formato digital.
10. En caso que el usuario desee registros en formato vehículo a vehículo de una o más estaciones de pesaje en movimiento, la concesionaria tendrá hasta cinco días para hacer entrega de esta información en formato digital.
11. La concesionaria deberá permitir la revisión online y la descarga de los siguientes parámetros según lo expuesto en la MEPDG de AASHTO
 - a) Tránsito Medio Diario Anual de Camiones
 - b) Factor de Distribución por pista por cada dirección. Este deberá estar calculado por cada clase de vehículo según FHWA, de forma mensual, estacional y anual
 - c) Factor de Distribución Direccional en forma anual
 - d) Velocidad Operacional calculado por cada clase de vehículo según FHWA, de forma mensual, estacional y anual
 - e) Distribución por Clase Vehicular de forma mensual, estacional y anual
 - f) Número de Ejes por tipo de camión calculado por cada clase de vehículo según FHWA, de forma mensual, estacional y anual, para ejes simples, dobles y triples.
 - g) Factor de Ajuste Mensual calculado por cada clase de vehículo según FHWA de forma mensual.
 - h) Factor de Distribución Horaria para cada dirección de forma mensual, estacional y anual
 - i) Tasa de Crecimiento del Volumen de Camiones calculado por cada clase de vehículo según FHWA de forma anual
 - j) Espectros de carga, para los ejes simples, dobles y triples, por cada tipo de vehículo según FHWA y de forma mensual, estacional, anual y por cada sentido. En cada gráfico, se deberá señalar la carga máxima permitida para cada eje.

- k) Ejes equivalentes que han circulado sobre el sistema de pesaje en movimiento. Este deberá encontrarse por tipo de eje (simples de rueda doble, ejes doble de rueda doble y triple de rueda doble), por pista y el total anual en cada caso.
12. El usuario podrá descargar los archivos de los registros históricos en formato XLS o Access. Aunque se permite el uso de archivos comprimidos, dentro de los cuales se encuentren archivos en XLS. En caso que el número de registros de un archivo supere los 500000 datos, se podrá descargar en formato SQL.
 13. Una vez elegida la estación de pesaje en movimiento, el usuario podrá revisar todos aquellos registros que hayan sido etiquetados con algún nivel de error. Esto deberá estar en un apartado llamado “Informe de Control de Validación de Datos” y debe estar el porcentaje de registros erróneos y sospechosos, además de una explicación sobre cada error.
 14. El portal web deberá tener un apartado con información sobre cada variable medida, su definición, su importancia, las formas de medirlas, los distintos instrumentos para generar registros y los instrumentos utilizados en las estaciones.
 15. El portal deberá permitir revisar y descargar un manual que explique el funcionamiento del portal web y los pasos necesarios para descargar los registros históricos, los metadatos, la bitácora de la estación elegida.
 16. En el portal web deberá encontrarse un apartado donde se permitan los comentarios de los usuarios.
 17. En el portal web se deberá poder revisar la bitácora de la estación donde esta deberá contener filtros sobre cada ítem (Ejemplo: revisar solo las calibraciones) y se podrá descargar cualquier imagen, informe o comentario sobre cada suceso.

Capítulo 4

Información de Estaciones Meteorológicas

El presente capítulo tiene por objetivo hacer una revisión del estado del arte y la práctica con respecto a las estaciones meteorológicas automáticas, con el fin de establecer una propuesta que aborde especificaciones para su instalación, operación y el tratamiento correspondiente a la información generada por estas. En base a esto, el capítulo se configura de la siguiente forma:

- En la sección 4.1, se revisan los diferentes campos de datos provenientes de las variables meteorológicas y los metadatos asociados a la estación.
- En la sección 4.2, se presentan las diferentes herramientas para la transmisión, almacenamiento y formato de la información de estaciones meteorológicas
- En la sección 4.3, se presenta el proceso de validación de registros de datos y los procesos ejecutados en diferentes partes del globo
- En la sección 4.4, se realiza una revisión sobre la diferencia de disponibilidad de información y las variadas plataformas para la disponibilidad de información climática.
- En la sección 4.5, se encuentra el protocolo de gestión de información obtenida de las estaciones meteorológicas

4.1. Captura de Información de Estaciones Meteorológicas

Este apartado busca conseguir una correcta captura de información meteorológica. Para cumplir con ello, se procederá a revisar elementos como la distribución de estaciones, guías y normativas para su instalación, sensores necesarios para que las variables meteorológicas correspondientes y la información que se podrá obtener de cada instalación, incluyendo los metadatos necesarios.

4.1.1. Tipo de estaciones meteorológica

Para capturar la información meteorológica, existen diferentes tipos de estaciones climáticas. Algunas de ellas son estaciones marinas, de avión, de altura, satelitales, etc. Sin embargo, este estudio, está en estaciones meteorológicas automáticas, ya que, se preocupa del clima que rodea a las carreteras.

La OMM las define como estación meteorológica en que las observaciones se efectúan y se transmiten automáticamente (Wylie y Lalas, 1992). La gran ventaja de estas estaciones, es que consiguen registros más confiables, ya que, al no necesitar personal humano, es posible aumentar la red de estaciones consiguiendo datos fuera de las horas normales de trabajo, reduciendo errores humanos, entregando informes con frecuencia estandarizada y homogeneiza la red (la misma estación en varios lugares).



Figura 4.1.1: Estación automática (*Dirección Meteorológica de Chile*)

4.1.2. Variables Meteorológicas y Sensores

Dependiendo del objetivo de la información recabada, diferentes variables meteorológicas deben ser obtenidas. Así, en el caso de una estación meteorológica, con el objetivo de proporcionar información que represente el clima circundante a una carretera, se ha decidido que se debe comenzar al menos con las cinco variables solicitadas por la *Guía Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos de AASHTO* (AASHTO, 2008), que son temperatura del aire, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa y radiación, al menos de forma horaria.

Sin embargo, existen otras variables que también aportan información en la carretera, pero que su uso no está asociado a su gestión o diseño, sino más bien a la operación de la carretera como la intensidad

de lluvia, visibilidad, detección de heladas, etc. Así, fue necesario realizar una revisión de las distintas variables y de los sensores necesarios para su obtención. Esta revisión que incluye temperatura, presión atmosférica, humedad, viento, precipitación, radiación (de distintas naturalezas) duración de insolación, visibilidad y temperatura de las capas del pavimento, se encuentra en el apéndice C.

4.1.2.1. Requisitos de sensores para una estación Meteorológica

Para cada variable meteorológica existen diversos sensores que pueden ayudar a encontrar la magnitud de cada una de ellas en un cierto momento. Sin embargo, no todos los sensores son apropiados cuando, lo que se busca es instalar una estación meteorológica viaria. Se debe comprender que estas estaciones muchas veces se encuentran alejadas de lugares poblados y por lo tanto, deben llevar a cabo sus procesos lo más automatizado posible.

Así se presenta a continuación los sensores propuestos por la OMM en su *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos* (OMM, 2017) para el caso de una estación automática viaria y *Adquisición de Sistemas Meteorológicos Climatológicos* de la Dirección Meteorológica de Chile (DMCH, 2015).

Tabla 4.1.1: Variables y el sensor recomendado por la DMCH (2015)

Variable	Sensor DMCH (2015)	Sensor OMM (2017)	Precisión
Temperatura	Para la medición de la variable de Temperatura del aire, el cual deberá ser del tipo resistencia de platino, con salida de señal analógica de 0 a 1 Volts y un rango de -40° a +60°C, aceptando un rango de alimentación de 7 a 35 Volts DC o mejor, además debe incluir protección contra radiación solar, accesorios para instalación en torre de montaje y un cable de alimentación/señal de 5 metros	Termómetro de resistencia eléctrica de platino.	± 0.1°C
Humedad Relativa	Para la medición de la variable de Humedad relativa del aire, el cual deberá ser de tipo capacitivo, con salida de señal analógica de 0 a 1 Volts y un rango de 0 a 100%, aceptando un rango de alimentación de 7 a 35 Volts DC o mejor, además debe incluir protección contra radiación solar y filtro de membrana teflón, accesorios para instalación en torre de montaje y un cable de alimentación/señal de 5 metros.	Higrómetro Conductivo o Capacitivo	± 3 % HR
Velocidad y Dirección del Viento	Para la medición de la velocidad (m/s) y dirección del viento (° sexagesimales), tipo generador de pulso en velocidad con rango de 0 a 100 m/s, y tipo resistencia potenciómetro con rango de 0 a 360° en dirección, su superficie exterior debe ser absorbente a la radiación solar y su textura contra la formación de hielo, con cable de alimentación/señal de 10 m de largo y accesorios para instalación en torre de montaje.	Sensor de Cazoleta (o Hélice) y Veleta	± 0.5 m/s para velocidades inferiores a 5m/s, ± 10% para velocidades mayores a 5 m/s
Precipitación	Para la medición de precipitación líquida, el cuál deberá ser del tipo cangilón con switch magnético (closure) y resolución de 0.1 mm de precipitación, con poste de instalación y cable de señal de 10 m de largo.	Pluviógrafo de Cubeta Basculante	± 0.1 mm para precipitación acumulada menor a 5mm , ± 2 % para precipitaciones acumuladas mayores a 5mm
Visibilidad		Transmisómetros y dispersómetros frontales	
Radiación Global	Para la medición de radiación solar global del tipo termopila, con salida analógica de voltaje y de rango de medición 300 a 3000 nanómetros, con cable se señal de 10 m y accesorios para instalación en torre de montaje	Piranometro termoelectrico o fotoeléctrico (Pirgeómetro mediante termopila para onda larga)	± 1MJ m-2 por día.

Junto a la anterior tabla, es necesario establecer requisitos para la ubicación de los sensores, ya que, la velocidad del viento varía con la altura, la temperatura se encuentra normada en su altura a la cual medirse, y por lo tanto, es menester delimitar la ubicación de cada uno de los sensores. En este sentido la FHWA en su *Road Weather Information System Environmental Sensor Station Siting Guidelines* (Manfredi et al, 2008), establece requisitos de ubicación de sensores y requisitos para la ubicación de una estación viaria.

En primer lugar la publicación hace referencia a la representatividad de una estación y para ello define estaciones regionales y locales. Las primeras hacen llamado a estaciones capaces de representar un sector amplio (entre 3 km a 100 km) mientras que las segundas buscan caracterizar solo un punto y en algunas ocasiones una o dos variables (humedad y temperatura en un puente). Como una regla general se propone una estación general cada 30 a 50 kilómetros. Luego, esta establece las recomendaciones para la ubicación de la torre:

- La torre debe ser resistente, debe tener un sistema de enrejado que permita pasar al viento y tener protección a los sensores.
- La ubicación de la torre debe ser entre 9 y 15 metros adyacente a la carretera. Ilustración 4.1.2

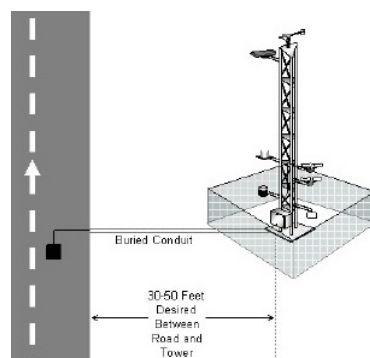


Figura 4.1.2: Ubicación de la estación con respecto a la vía (Manfredi et al, 2008).

- La base de la torre debe ser con hormigón, y su tamaño debe tomar en cuenta las posibles fuerzas sobre la torre.
- La base de la torre debe tener la misma cota que la carretera
- Evite lugares donde a 90 metros existan pendientes empinadas.
- La torre debe estar en la dirección desde donde sopla el viento (si el viento viene desde el sur, entonces la estación se ubicaría en el lado sur).
- La estación debe estar lejos de aguas estancadas como tranques de regadío. Debe haber un cierre para la estación, se recomienda una distancia a la torre de 5 metros.
- Es preferible que la estación se encuentre en terrenos propios de la vía.

Con respecto a los sensores, entrega las siguientes imágenes que mencionan la altura donde se deben ubicar los sensores:

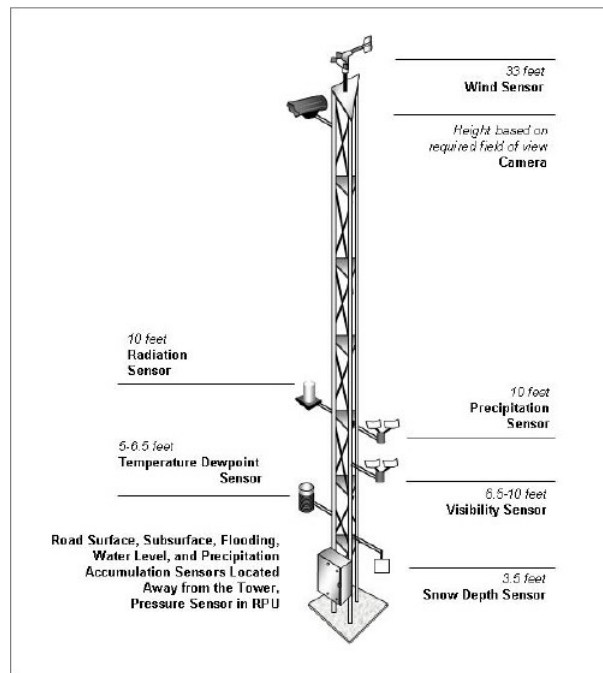


Figura 4.1.3: Ubicación de los sensores en la torre de la estación meteorológica (Manfredi et al, 2008)

En el caso de requerirse sensores para el pavimento:

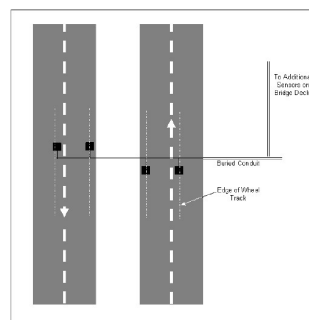


Figura 4.1.4: Esquema de ubicación de sensores ubicados en el pavimento (Manfredi et al, 2008).

4.1.3. Metadatos

Los metadatos son definidos por NORDKLIM (Andresen et al, 2002) como información sobre la estación meteorológica de diversos tipos, como por ejemplo, coordenadas geográficas, dirección, historia de la estación, historia de los sensores (reparaciones, calibraciones), descripción del ambiente que rodea la estación (vegetación, terreno, exposición), tipo de equipamiento, estado de la estación, servicio de información y planes, estadística de sensores (tipos de errores, frecuencia), clima de la estación, versión

de software, etc. Sobre que metadatos son necesarios, diferentes publicaciones mencionan aquellos que deben ser puestos a disposición a quien le interese la información meteorológica. Por ejemplo, Plummer (Plummer et al, 2007) establece que los metadatos necesarios son y muy similares pueden encontrarse en otras publicaciones (Aguilar et al, 2003; Manfredi et al, 2008):

- Fecha de referencia utilizada por la base de datos (GMT, huso horario, otros);
- Calidad atribuida a la observación;
- Historia de los valores atribuidos al parámetro meteorológico, y banderines asociados;
- Instrumento utilizado para registrar la observación, con una indicación más detallada de su propio programa de mantenimiento, sus valores de tolerancia, sus parámetros internos, etc;
- Nombre del observador; Pormenores de la estación e historia de ésta; Programa de observaciones vigente, e historia de éste; Inventario de los elementos almacenados en la base de datos, junto con sus unidades y valores límite;
- Datos sobre la topografía y el terreno del emplazamiento, información sobre árboles circundantes, edificios, etc, y evolución de éstos a lo largo del tiempo.

Dado que el almacenamiento de los metadatos es complicado, ya que, los tipos de archivos necesarios para completarlos son variados. En el último tiempo, han comenzado a aflorar herramientas que pueden gestionar y facilitar el acceso a estos metadatos como **STATPROP** en Austria, el cual es una base de datos que almacena la información de los metadatos.

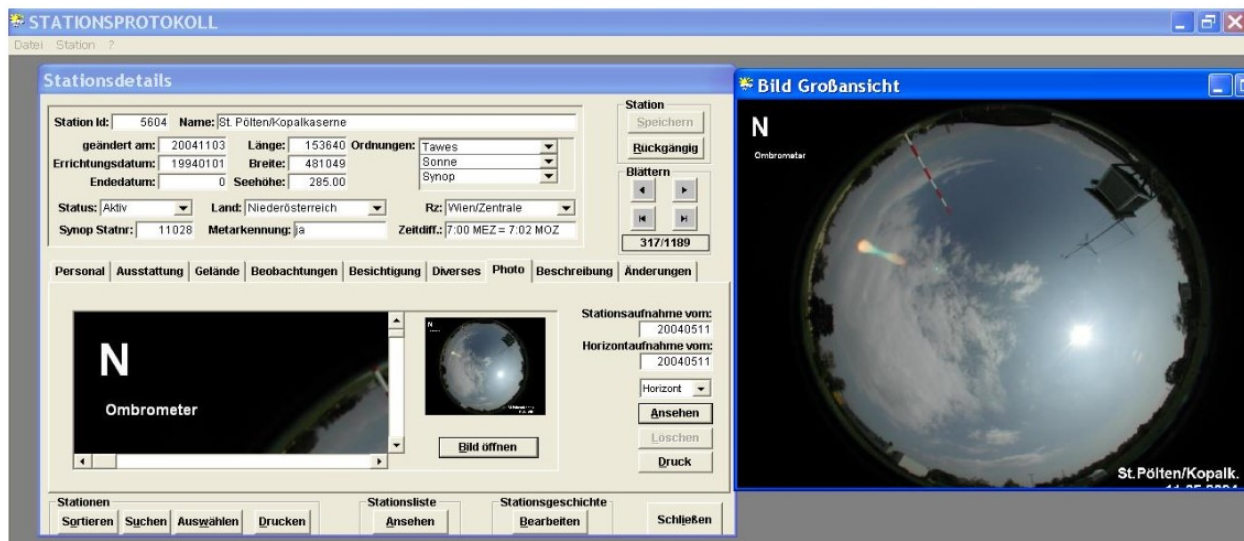


Figura 4.1.5: El programa informático STATPROT para la gestión de metadatos, del ZAMG (Instituto Central de Meteorología y Geodinámica, Austria) (Plummer et al, 2007)

4.1.4. Definición de Requisitos para una estación meteorológica viaria automática y la captura de información

4.1.4.1. Requisitos de sensores e Información

Luego de la revisión previa acerca de los tipos de estaciones, las variables meteorológicas y los requisitos para la instalación de sensores, es necesario definir aquellas especificaciones necesarias para capturar de forma correcta y eficiente la información climática que rodea un tramo de carretera. De acuerdo con lo anterior y comprendiendo que en este caso, el objetivo de captura de información tiene un carácter retrospectivo, se ha decidido establecer obligatorios la captura de los siguientes campos de información:

- Velocidad y Dirección del tiempo instantánea, velocidad y dirección del viento promedio cada dos minutos.
 - Temperatura del aire promedio de un minuto, temperatura del aire mínima en las últimas 12 horas y temperatura del aire máxima en las últimas 12 horas; incluyendo las hora en que ocurre la temperatura del aire máxima y mínima en las últimas 12 horas
 - Humedad relativa promedio cada un minuto
 - Precipitación acumulada, precipitación acumulada en las últimas 6 horas y precipitación acumulada en las últimas 24 horas
 - Radiación global instantánea y radiación global de las últimas 24 horas
 - Duración de la insolación diaria
- Las siguientes variables, solo se aconseja su medición:
- radiación de onda larga instantánea y radiación de onda larga acumulada en las últimas 24 horas
 - Temperatura de superficie del pavimento por minuto, temperatura del pavimento por minuto a 5, 10 y 20 centímetros de profundidad

En el caso de los tipos de sensores necesarios para la estación meteorológica, para los sensores obligatorios, se establecen los requisitos encontrados en la tabla 4.1.1. En el caso de las variables no obligatorias, se recomienda lo estipulado por FHWA en su *Road Weather Information System Environmental Sensor Station Siting Guidelines, Version 2.0* (Manfredi et al, 2008).

Un punto importante dentro de los sensores y la estación, es la necesidad de generar mantenimientos regulares. En este sentido, la OMM ha definido la necesidad de establecer una mantención cada seis meses sobre la estación y sus sensores (OMM, 2017). En esta mantención, se deberán cambiar los sensores con desperfectos, limpiarlos, revisar el estado de los cables, de la torre y del cerco, recomendando que la empresa que realice esta acción de mantenimiento, se encuentre certificada, en especial con la certificación ISO 9001. Además, mes por medio debe llevarse a cabo una inspección física de la estación, que revise el estado del gabinete, la torre y sus tirantes, ubicación de sensores, cierre, estado de la hierba, estado

del absorbente en el gabinete, estado de la conexión a tierra, siendo muy importante, que la persona que lleve a cabo esta mantención física, sea capacitado apropiadamente.

Acerca de los metadatos de cada estación y de los sensores que esta incluye, será necesario que se recopilen todos los metadatos incluidos en el anexo 4.5.3, los cuales deberán ser frecuentemente actualizados, sin eliminar la información previa.

4.1.4.2. Sobre la ubicación de la estación

Es necesario establecer requisitos de ubicación que maximicen la representatividad de una estación meteorológica. En este sentido, deberá instalarse una estación no más allá de 50 Km de otras estación. De la misma forma, se recomienda que en zonas donde ya existe alguna estación de la Dirección Meteorológica de Chile o algún aeropuerto, se intente evitar la instalación debido a la redundancia.

Por otro lado, debido a la necesidad de representar un área más grande, se recomienda instalar una estación por cada zona climática que cruce la carretera. Para conocer dichas zonas climáticas, se recomienda el uso de la clasificación de Köppen, la cual es posible encontrar en el siguiente link http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/Inicio/Paginas/UntitledFrameset-1.htm. Esta clasificación es muy importante, ya que, al ya estar conformada para todo el territorio nacional permite conocer que zonas climáticas cruza la carretera. Además, esta división del territorio, se encuentra validada en el área vial, ya que, es posible encontrar trabajos de investigación en Chile (Delgadillo et al, 2017a; Delgadillo et al, 2017b).

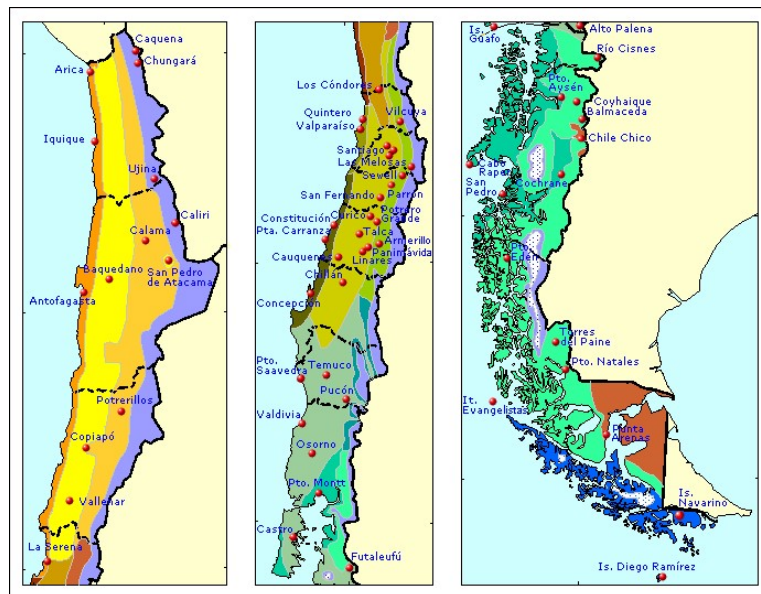


Figura 4.1.6: Ubicación geográfica de cada clima en Chile según la clasificación de Köppen (Cartografía interactiva de los climas de Chile)

Acerca de la instalación de la estación en las cercanías de la carretera, se debe velar que todo el tiempo

en que la estación funcione, el terreno donde se encuentra emplazada no cambie de funcionalidad, ya que, un cambio de ubicación puede afectar la homogeneidad de la información capturada, por ende, es necesario que esta se encuentre siempre dentro de los límites de concesión. Además será necesario que al menos el borde del cerco de la estación se encuentre alejada del borde derecho de la pista exterior por 10 metros, aunque también es posible su instalación en la mediana siempre que las distancias a ambas vías sea mayor a 10 metros.

Por último siempre será necesario que la valla que rodea la estación no se interponga en las mediciones que realiza la estación, pero que tampoco permita la intromisión dentro de la estación de personas externas o de animales que puedan circular por las cercanías de esta.

4.2. Transmisión y Almacenamiento de la Información de Estaciones Meteorológicas

Este punto corresponde a los procesos necesarios que debe sufrir la información, una vez que esta ya fue capturada por los sensores de la estación meteorológica. Estos procesos pueden ser divididos en dos grandes secciones, la primera que está asociada a la transmisión de los registros desde la estación hasta una central de bases de datos, luego la segunda es el almacenamiento y archivo de los registros, buscando siempre un formato común, incluyendo también la necesidad de imponer seguridad sobre esta información.

4.2.1. Transmisión de Información

Sobre la transmisión de información desde una estación meteorológica a una central de datos, es necesario precisar que los medios a necesitar para conseguir esta comunicación, deben estar asociados al nivel de información requerida. Esto quiere decir, que si es necesario que la información se encuentre disponible en tiempo real o minuto a minuto, los medios para conseguirlo deberán ser más robustos, que por ejemplo, si se requiere una actualización de información diaria o cada hora.

Debido a lo anterior, FHWA (Manfredi et al, 2008) menciona que se pueden utilizar diferentes medios como fibra óptica, cables de cobre, uso de satélites, señal telefónica u otros. Esto es posible compararlo con lo expuesto en las bases técnicas de la DMCH, ya que en ellas se evidencia la solicitud de que el traspaso de información sea mediante señal GPRS, o señal telefónica de equipos móviles y establece una frecuencia de envío de información desde la estación de 15 minutos (DMCH, 2015), por lo tanto, en este sentido sería necesario que la zona donde se instale la estación, requiere de cobertura telefónica. Sobre este mismo tema, la FHWA menciona que es recomendable acercar la estación a puntos de la carretera donde existan medios de comunicación como en plazas de pesaje, de peaje o en letreros de información dinámica de la carretera.

Dado que debe enviar información cada 15 minutos, esto implica que frente a cualquier problema de comunicación, la demora en envío puede acumular mucha información en la estación y por lo tanto, es recomendable que la estación sea capaz de almacenar información durante al menos cinco días, para luego permitir recuperar esta información, ya sea a través, de recuperar los canales de información o la recuperación en forma manual de esta.

Otro elemento que considerar en la comunicación es la energía con que funcionan los sensores y el envío de información. Como las estaciones tienden a situarse alejadas de lugares poblados, es probable que un suministro de energía constante no sea posible, frente a lo cual se recomienda el uso de energías como la solar o de eólica, lo que también implica la instalación de baterías que permitan su funcionamiento aún cuando estas fuentes no se encuentren disponibles.

Finalmente, el último apartado sobre la transmisión de la información desde una estación, es el formato en que esta información se envía. En general y tal como hace la DMCH, esta información es enviada en

un formato llamado JSON, el cual es bastante común en información climática, de hecho en la figura, se puede ver un extracto de un registro modelo que enviaría una estación a la central de información. Este formato además, permite el envío de información ordenada, facilitando el procedimiento de orden de la información en los procesos de almacenamiento y archivo.

```
{"Nombre1":"valor1","Nombre2":"valor2",....."NombreN":"valorN"}
Nota 1:Cada línea de dato debe ser auto referenciada de acuerdo a:
      Código Estación – Fecha – Hora – Site(Cabezal)
Nota1:Código Estación:{"CódigoNacional":"1234",.....}
Nota2:Fecha           :{.....,"Fecha":"YYYY-MM-DD",....} Año-Mes-Día
Nota3:Hora            :{.....,"Hora":"HH:MM:SS",.....},Hora-Minuto-Segundo.
```

Figura 4.2.1: Registro modelo de información meteorológica en formato JSON (DMCH, 2015)

4.2.2. Almacenamiento de la Información

En este punto se debe hacer distinción entre dos conceptos que muchas veces es utilizado de forma similar, el almacenamiento y el archivo. La diferencia entre ambos se basa en que el almacenamiento es una parte previa del archivo, la cual se encarga de contener la información antes que esta sea evaluada, ya sea, por procedimientos de validación, reorganización u homogenización. Una vez, realizados esos procedimientos, los registros resultantes se traspasan al archivo, el cual es el elemento donde se guarda la información de forma definitiva y el encargado de disponerla al usuario interesado.

Con respecto al almacenamiento y la gestión de bases de datos, el ente encargado requiere tener la consideración de estimar correctamente las necesidades de almacenamiento. Para ello, este deberá ser capaz de predecir la demanda de información sobre la base de datos, donde no solo deberá considerar la información de las variables climatológicas, sino que otros elementos como alertas de la estación fallas o baja batería, etc (OMM, 2011), que si bien no tienen la relevancia de las variables normales, estas si debiesen quedar registradas frente a dudas de datos incoherentes que pueden tener su explicación en un mal funcionamiento.

Para poder gestionar los datos, lo primero es comprender que los registros son solo elementos alfanuméricos y que dado el gran número de sensores, es probable que existan grandes cantidades de información. Si a lo anterior, se le suma que todos estos registros se encuentran relacionados, ya que, todos son tomados en el mismo instante, el sistema de base de datos debiera ser una sistema de bases de relacional. Por otro lado, el ente encargado siempre deberá buscar los procedimientos necesarios para que la base de datos tenga la menor cantidad de información posible, haciendo que su funcionamiento sea más eficiente. Para esto, puede normalizar tablas, eliminar registros duplicados, evitar cualquier redundancia aunque siempre evitando la supresión información importante.

Por lo tanto, la agencia deberá elegir un sistema de gestión de bases de datos. En el mercado, existen diversos elementos. Algunos que son posibles de encontrar en los computadores personales como Microsoft Access u otros más elaborados como Oracle. El seleccionado es decisión del ente encargado y debe ser elegido en función de los requisitos de volumen de información y del nivel de disponibilidad de esta. OMM en su *Directrices sobre la gestión de datos climáticos* (Plummer et al, 2007) presenta la tabla 4.2.1 que muestra las ventajas y desventajas de cada sistema gestor de bases de datos disponible. Es

importante siempre remarcar, que la elección de este sistema se basa en los costos, funcionalidades del sistema, adaptabilidad a la información y compatibilidad con sistemas previos.

Tabla 4.2.1: *Sistemas de gestión de bases de datos (Plummer et al, 2007)*

SGBDR	Empresa	Sistema operativo	Código abierto	Comentario
Access	Microsoft	Windows	No	Fácil de utilizar y ampliamente utilizado por el público en general. Limitado en términos de volumen. No es realmente un SGBD cliente/servidor, sino más bien un servidor de archivos
DB2	IBM	Linux, Unix, Windows, OS400	No	Compatibilidad con OS400, que es un estándar de numerosas grandes empresas
FileMaker	FileMaker	Windows, MacOS	No	Fácil de utilizar, pero limitado en términos de ampliabilidad.
Firebird	Firebird	Linux, Unix, Windows	Sí	Basado en Interbase
Ingres	Computer Associates International	Linux, Unix, Windows y OpenVMS	Sí	SGBDR muy popular, publicado el régimen de código abierto.
Interbase	Borland	Linux, Unix, Windows	No	Buena elección para gestionar bases de datos pequeñas y medianas
MaxDB(SAP)	MySQL	Linux, Unix, Windows	Sí/No	Código abierto con licencia dual y licencia comercial. Puede gestionar cantidades ingentes de datos.
MySQL	MySQL	Linux, Mac OS X, Unix, Windows	Sí	Muy popular en Internet. Su funcionalidad no llega todavía a la de otros SGBD.
Oracle	Oracle	Linux, Mac OS X, Unix, Windows	No	Al igual que DB2, es un estándar en empresas sujetas a numerosas limitaciones que procesan enormes volúmenes de datos.
PostgreSQL	PostgreSQL	Linux, Mac OS X, Unix, Windows	Sí	SGBD robusto, uno de los principales estándares de código abierto.
SQL Anywhere Studio, Adaptive Server IQ	Sybase	Windows, Novell NetWare	No	Se distribuye una versión gratuita para Linux: Adaptive Server Enterprise Express
Servidor SQLskt	Microsoft	Windows	No	Una buena elección para una organización de tamaño mediano

El último punto acerca del almacenamiento y archivo, es la responsabilidad y la seguridad de la información en una base de datos climática. En general esta no se diferencia mucho de lo expuesto en el capítulo sobre la información de inventario y desempeño de carreteras 2.4.2, donde es necesario establecer clara-

mente las responsabilidades y los accesos para cada usuario de la base de datos, desde el usuario capaz de editar esta información, hasta el usuario interesado en generar algún resultado con esta. Se puede sumar a esto lo expuesto por la OMM (Plummer et al, 2007), la cual detalla lo siguiente:

- Todo el personal deberá ser consciente de sus responsabilidades profesionales y de las precauciones necesarias; Los archivos y el entorno de la base de datos deben ser seguros y estar protegidos de incendios, humedades, etc.;
- Sólo las aplicaciones protegidas, autorizadas para un número reducido de personas, tienen permitida la manipulación de datos (inserción, actualización, borrado). Quienes tengan acceso de escritura en la base de datos deberán avenirse a no realizar ninguna transacción diferente de las operaciones y prácticas aprobadas por el gestor de los datos. Todo cambio en las tablas de datos debería ir acompañado de un historial de auditoría, y el acceso a ese historial debería estar controlado;
- Debería imponerse la norma de no compartir contraseñas y de no anotarlas por escrito en ningún lugar. Todas las contraseñas deberían cambiarse periódicamente, desde la del administrador de la base de datos hasta la del usuario que maneja aplicaciones de manipulación de datos. La contraseña puede ser una concatenación incongruente de letras o números, aunque también puede construirse con las primeras letras de las palabras de una frase.;
- Los datos de archivos del sistema deberán estar protegidos por un *Firewall* (cortafuegos) con el máximo nivel de seguridad posible; Todos los servicios innecesarios, como el correo electrónico instalado en la computadora que alberga la base de datos, deberían estar desactivados. El sistema informático de la computadora que aloja la base de datos debería permitir únicamente el funcionamiento del sistema operativo y del sistema de gestión de la base de datos;
- Las computadoras que acceden a la base de datos deberán estar también protegidas frente a virus y ataques de intrusos; Deberán hacerse copias de seguridad a intervalos lo suficientemente frecuentes para que, en caso de fallo, las pérdidas de trabajo realizado no sean inaceptables. Lo normal sería una copia de seguridad acumulativa diaria y una copia completa semanal;
- Los archivos menos frecuentes (por lo general, mensuales) del contenido de las tablas de datos deberían estar en formato ASCII y alojarse en un lugar seguro, protegido frente a incendios, y distante de la ubicación física de la base de datos climáticos.
- Debería establecerse un plan de recuperación que indique los procedimientos a seguir con las copias de seguridad y los archivos en situaciones de emergencia, con el fin de recuperar la base de datos. El plan debería contemplar todos los escenarios de desastre posibles.
- El plan de recuperación debería ser reexaminado y sometido a pruebas a intervalos regulares.
- Deberán hacerse copias de seguridad del Sistema de Gestión de Datos Climáticos (CDMS) antes de introducir cualquier cambio en el software del sistema, en el diseño del CDMS o en las aplicaciones que éste contenga; y
- A intervalos apropiados, debería hacerse una auditoría de los archivos en papel de los documentos originales y de los archivos en formato ASCII.

4.2.3. Definición de Requisitos para la Transmisión y Almacenamiento de Información

Para la transmisión de los registros desde la estación hasta una central de información, el medio por el cual debe realizarse debe ser definido por el ente encargado tomando en cuenta la existencia de medios de comunicación como señal telefónica, cables, satelital u otras. Sin embargo, se recomienda el uso de la señal GPRS producto de su ya demostrado buen desempeño. Sin embargo, independiente del medio seleccionado, es necesario que los registros sean enviados al menos cada 15 minutos. Esto tiene la finalidad de primero liberar memoria de la estación meteorológica y segundo, para los procesos de validación, es más seguro y eficiente observar los registros en un tiempo más acotado y que estos no se acumulen.

En el caso del almacenamiento de esta información, es recomendable el uso de bases de datos relacionales debido a que los registros se encuentran enlazados debido al punto temporal y geográficos en que fueron capturadas, aún así es deber del ente encargado seleccionar un sistema que permita almacenar y archivar correctamente, y a la vez, permita la recuperación de información cuando algún usuario requiera un registro de esta. Para ello, es fundamental que se escoja un sistema de gestión de bases de datos, que sea capaz de cumplir con los requisitos de disponibilidad mencionados en el punto 4.4.3. En este mismo sentido, es necesario que se debe anticipar la cantidad de información que será generada por las estaciones que la capturan y se debe incluir en esta anticipación, toda la información asociada a los metadatos de cada estación.

Finalmente en lo asociado a la seguridad de la información, se establece que lo más relevante es la clara demarcación de las responsabilidades de los encargados, además de la ejecución frecuente de respaldos de toda la información contenida, tomando en cuenta la frecuencia establecida por la OMM.

4.3. Validación de Registros Meteorológicos

En esta sección se revisarán distintas fuentes que proponen métodos y prácticas para validar la información meteorológica

4.3.1. UNE (2004) Directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automática

El objetivo de esta norma es establecer directrices mínimas acerca de la validación de datos procedentes de estaciones meteorológicas automáticas que permitan no solo saber el grado de validez de los datos, sino también las manipulaciones a las que han sido sometidos. Para cumplir con el objetivo anterior, esta norma presenta siete niveles, que van desde el nivel 0 hasta el nivel 6, los cuales se deben aplicar desde el cero al seis a excepción del último que permite realizarse después del nivel 1.

Nivel 0

En este nivel se debe comprobar que el formato del registro capturado como la cantidad de información es la correcta. Por lo tanto, cualquier archivo que no cumpla con los formatos establecidos debe ser declarado No Válido.

Nivel 1

En el presente nivel, lo que se compara es el valor del registro con respecto a rangos en los cuales este puede oscilar. Existen dos casos, los límites rígidos y los límites flexibles, los primeros obedecen a restricciones instrumentales y físicas (Tabla 4.3.1), mientras que los flexibles se encargan de generar límites con respecto a las máximas y mínimas históricas en la ubicación de la estación. En caso de fallar un límite rígido el registro se considera no válido y en caso de fallar un registro en los límites flexibles, se debe etiquetar como sospechoso y una inspección visual determinará su validez.

Tabla 4.3.1: Límites rígidos (UNE 500540, 2004)

Variable	Unidad	Rango
Humedad relativa	%	0 a 100
Temperatura	°C	-35 a 55
Velocidad del viento	m/s	0 a 75
Dirección del viento	grados	0 a 360
Precipitación en 10 minutos	mm	0 a 50
Presión	hPa	700 a 1080
Radiación	W/m ²	-1 a 1400

Nivel 2

En este nivel lo que se busca reconocer es el nivel de cambio entre dos mediciones consecutivas distanciadas en diez minutos. En caso que el “salto” de la variable sea muy superior a cierto valor prefijado, se considera que el registro no ha superado este nivel.

Nivel 3

El nivel 3, se enfoca en comparar variables que fueron medidas en el mismo momento y misma estación. En caso que exista una falta de coherencia entre ambas, ambas mediciones deben ser declararse como no suficientes para superar esta prueba. Ejemplos de coherencia pueden ser dirección del viento distinto de cero y velocidad del viento igual a cero.

Nivel 4

Aquí se busca encontrar el nivel de coherencia de una serie de registros, en este caso puede ser una secuencia de 24 horas. Al calcularse el promedio y su desviación típica (estándar) se debe verificar que su desviación cumpla con un valor mínimo. También debe revisarse la mayor diferencia entre dos datos de la serie, si la diferencia es menor a cierto valor la serie de datos debe declararse sospechosa. Solo una inspección visual puede determinar la validez de los datos.

Nivel 5

Este nivel hace referencia a lo llamado validación espacial. Este procedimiento se basa en que las estaciones ubicadas “cerca” de la estación objetivo, deben tener cierto nivel de coherencia. Para revisar esta coherencia existen distintos enfoques pero principalmente se basan en la ponderación basada en la distancia entre distancia o de su coeficiente de correlación (Estévez y Gavilán, 2006).

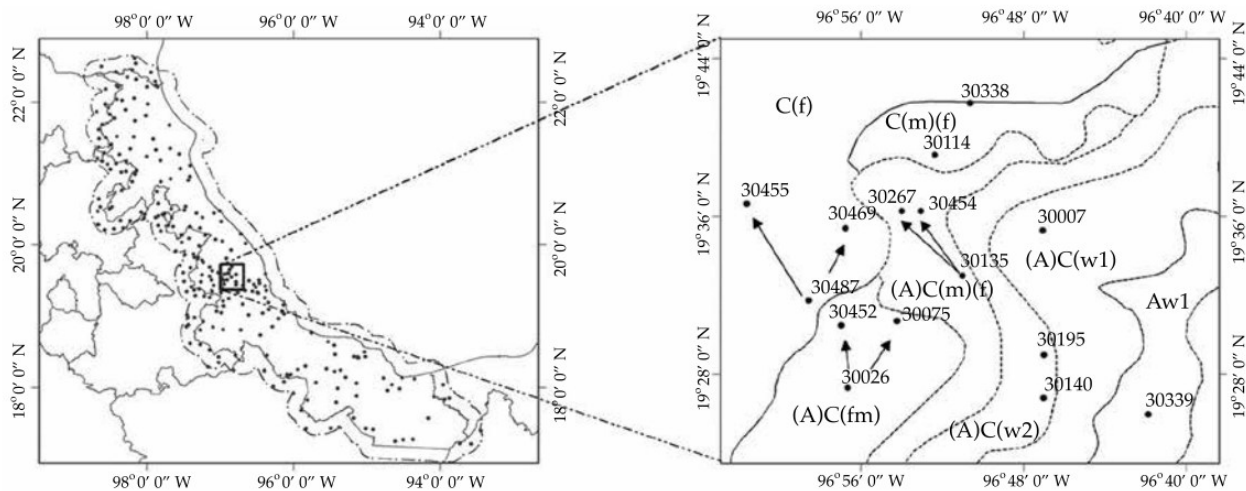


Figura 4.3.1: identificación de estaciones vecinas a la estación de referencia (Guajardo et al, 2017)

Nivel 6

Este nivel obedece a la inspección visual, por lo tanto, las series de datos pueden agregarse para efectuar análisis estadísticos más refinados como métodos de doble masas, análisis de valores promedios. Lo determinante de este nivel es que requiere de personal adecuado a esta tarea.

Códigos de Control

La siguiente tabla, muestra los códigos de control. Estos etiquetan los registros en función del nivel superado

Tabla 4.3.2: *Valores de primer código (UNE, 2004)*

Primer Código	Descripción	Segundo Código	Descripción
0	Dato sin ningún tipo de validación	0	Dato sin inspección visual
1	Válido para nivel 1	1	Dato con inspección visual
2	Válido para nivel 2		
3	Válido para nivel 3		
4	Válido para nivel 4		
5	Válido para nivel 5		
6	Dato no válido		
7	Sin definir		
8	Sin definir		
9	Dato no registrado		

4.3.2. Zahumensky (2004) Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations

El enfoque de esta guía es ayudar a la realización de controles de calidad tanto en la estación como en el centro de procesamiento de datos. En este caso, los procedimientos de validación, solo se enfocan en la coherencia temporal de los datos, es decir, otras estaciones no influyen en la evaluación sobre estos. Esta guía presenta dos niveles de control de calidad:

1. QC de datos en bruto: se refiere a los controles de calidad en las muestras tomadas por las estaciones meteorológicas automáticas. El tipo de chequeo es mediante uso de rangos, consistencia, chequeos temporales, etc.
2. QC de datos procesados: este tipo de chequeo se realiza en la estación meteorológica automáticas y también en el centro de procesamiento de datos. Su enfoque es encontrar errores de consistencia interna y sesgos en el largo plazo

4.3.2.1. Procedimientos básicos de Control de calidad (QC)

Estos procedimientos básicos afectan tanto los datos en bruto como a los datos procesados. Los controles a realizar son los siguientes:

Datos en bruto

A estos datos se les realizan dos pruebas, el “chequeo de valor posible”, donde cada muestra es comparada a un cierto rango y “chequeo de tasa de cambio posible”. En este último, se entrega un cambio máximo que puede sufrir un muestra entre dos mediciones consecutivas. Por ejemplo en el caso de la temperatura del aire son 2°C, mientras que en la velocidad del viento son 20m/s.

Datos procesados

A estos valores se les genera una mayor cantidad de chequeos:

1. Chequeo de valor posible: revisión si el valor cumple con un rango especificado
2. Chequeo de consistencia en el tiempo: se verifica la tasa de cambio de un registro con el siguiente
 - a) Chequeo de una variabilidad máxima, en este caso la regla general se puede ver en la siguiente ecuación $|V_i - V_{i-1}| + |V_i - V_{i+1}| \leq 4\sigma$; donde V_i es el valor normal del parámetro y σ es la desviación estándar del parámetro calculada con los últimos 10 minutos de registros
 - b) Chequeo de una variabilidad mínima, en caso que su desviación estándar no sea lo suficientemente grande se pueden detectar errores. Además se presentan algunos límites para encontrar errores por variabilidad mínima
 - c) Chequeos de consistencia interna: obedecen a comparar más de una variable a la vez.

4.3.2.2. Procedimientos de control de calidad extendidos

Estos se realizan en el centro de procesamiento de datos y son similares a los procedimientos sobre los valores procesados, pero esta vez deben ser realizados con una forma más elaborada. Además, la cantidad de comparaciones entre variables aumento, al igual que los requisitos.

4.3.3. Andresen et al, (2002) Quality Control of Meteorological Observations

Esta guía es parte del proyecto de cooperación entre NORDKLIM y NMD/NORDMET. Este documento se enfoca en mostrar las mejores prácticas que existen en los países nórdicos para proveer niveles de validación a un registro meteorológico, y se centran en: temperatura, precipitación, viento y humedad.

En primer lugar esta guía divide los niveles de controles de calidad en cuatro:

- QC0: control de calidad en el sitio de la estación, este nivel se enfoca en realizar acciones correctivas en la estación. Estas acciones correctivas principalmente son desarrolladas por empleados de la empresa que instala la estación. Las acciones pueden ser entrenamiento a empleados, evaluación del sitio, instalación de instrumentos, etc.
- QC1, Control de calidad en tiempo real, este es un chequeo automático desarrollado en línea. este tipo de chequeo solo se realiza a través de una sola estación. Los principales métodos para este tipo son chequeo de rangos, tasas cambio, consistencia, etc.
- QC2, Control de calidad en tiempo no real, el principal enfoque en este tipo de controles es la validación temporal de los registros. Por otro lado, se pueden realizar análisis estadísticos para verificar el nivel de cumplimiento de calidad.
- HQC, control de calidad humano, este tipo de control son los controles de calidad manuales. Este es el tipo final de control de calidad y solo se revisan valores erróneos y sospechosos

Luego los divide en dos, chequeos para una estación y chequeos para dos o más:

Tabla 4.3.3: *Valores de primer código (UNE, 2004)*

Métodos para una estación	Métodos para más de una estación
Controles de paso: buscan encontrar cambios muy bruscos en dos meses prefijados	Chequeo espaciales simples: se desarrolla la comparación visual entre parámetros calculados cada 6, 12 o 24 horas.
Controles de consistencia: algoritmos que comparan entre variables medidas	Chequeo espacial mediante análisis de mediana: método de evaluación espacial sin parámetro. Este método está basado en valores de la mediana y los cuartiles superiores e inferiores de los datos provenientes de las estaciones cercanas.
Uso de HIRLMAM: sistema desarrollado en Suecia que genera chequeos de validación de paso cada seis horas y detecta alrededor del 90% de los errores, pero también aumenta el riesgo de eliminar datos correctamente tomados. Además, desarrolla pruebas de consistencia interna.	Chequeo espacial basado en la interpolación estadística de Kriging: Una forma de realizar comprobaciones espaciales es comparando los valores medidos con el valor esperado que fue estimado por interpolación estadística de estaciones vecinas. El control de calidad en este caso no es en tiempo real y se realiza una vez al día.

4.3.4. Definición de Requisitos para la Validación de Registros Meteorológicos

La revisión anterior, es una revisión que evidencia que los procesos de validación son similares en diferentes partes del mundo. Esto es aún más claro al revisarse los procedimientos expuestos por la OMM (Zahumensky, 2004), donde al revisarse los límites existentes pueden ser exagerados en algunas zonas climáticas, mientras que en otras pueden ser aceptables. En este sentido, se recomienda la utilización de la norma UNE 500540 (UNE, 2004), ya que, establece un orden jerárquico en que deben realizarse los procedimientos de validación y, al tener carácter normativo, obliga a su cumplimiento, a diferencia de los otros estudios que son ilustrativos y referenciales.

En general, todos los niveles de a norma UNE 500540 debiesen ser obligatorios, a excepción del último, el nivel que establece la necesidad de validación espacial de la estación. Tres razones existen para esto, la primera es la posible falta de estaciones vecinas que permitan dicha validación, ya que, se requiere más de una, la segunda razón, es que esta validación puede tardar demasiado en realizarse lo cual demoraría el proceso y la última, es que este procedimiento dependería de estaciones que no son los encargados de la estación viaria, por lo tanto, es un procedimiento que no se encuentra bajo control del ente encargado. Por estas razones, es recomendable la realización de la validación espacial, pero no debiese ser obligatoria su realización.

Un elemento que la norma no aborda, es la necesidad de establecer límites, ya sea, para coherencia entre registros, saltos de variable en cierto periodo de tiempo u otra razón, es necesario que la agencia los de-

termine en función de la ubicación de la estación meteorológica. Para establecer estos límites, se puede buscar el historial de registros de estaciones vecinas o en la literatura asociada a eventos climáticos. Es muy importante que todos los límites queden claramente registrados al igual que las razones para establecerlos. Esto, también implica que la alerta generada por errores en sensores deben ser revisadas y que el análisis de estas alarmas pueda generar acciones de mantenimiento sobre la estación meteorológica.

Finalmente, es necesario que los registros a los cuales se les realicen los niveles de validación de la norma UNE500540, sean etiquetados en función del último nivel que estos han logrado superar, lo cual reflejaría el nivel de confianza que estos datos puedan entregar. Estas etiquetas, debiesen estar definidas en función de lo expuesto en la misma norma.

4.4. Disponibilidad de la Información Meteorológica

4.4.1. Dirección Meteorológica de Chile

En su portal web, la Dirección Meteorológica de Chile permite ver en tiempo real los registros que capturan sus estaciones meteorológicas automáticas (llamado Estaciones en Línea) de cinco variables:

- Viento y dirección
- Temperatura
- Radiación global
- Presión y humedad
- Agua caída

El usuario (es de libre acceso) además, puede descargar cualquier información de estas variables en versión mensual a través de un archivo formato XLS. Sin embargo, la antigüedad máxima permitida de estas estaciones automáticas es desde su instalación, es decir, inicios del 2017 hasta 2018.

También se puede encontrar información sobre los controles llevados a cabo, en este caso existen controles diarios (estaciones que envían o no la información en tiempo real, estado de la red de estaciones automáticas, etc.), mensuales y controles de calidad como las estaciones con errores, errores pendientes y errores por variables. Además, se permite conocer los metadatos de estaciones

Ficha de la Estación
Metadatos disponibles en el Sistema SACLIM

Identificación General

Ubicación en Mapa

Código Nacional	180005
Código OMM	85406
Código OACI	SCAR
Nombre De Estación	Chacalluta, Arica Ap.
Propietario de la Estación	Dirección Meteorológica de Chile
Fecha de Creación	01-01-1956 00:00



Ubicación

Dirección y Contacto

Propietario de la Estación

Latitud	-18.355555
---------	------------

Dirección	Aeropuerto Chacalluta, Arica
-----------	------------------------------

Institución	Dirección Meteorológica de Chile
-------------	----------------------------------

Figura 4.4.1: metadatos de la estación Chacalluto (DMCH)

Cuando una estación, no envía la información generada según los tiempos estimados, este retraso queda consignado y se genera la alarma

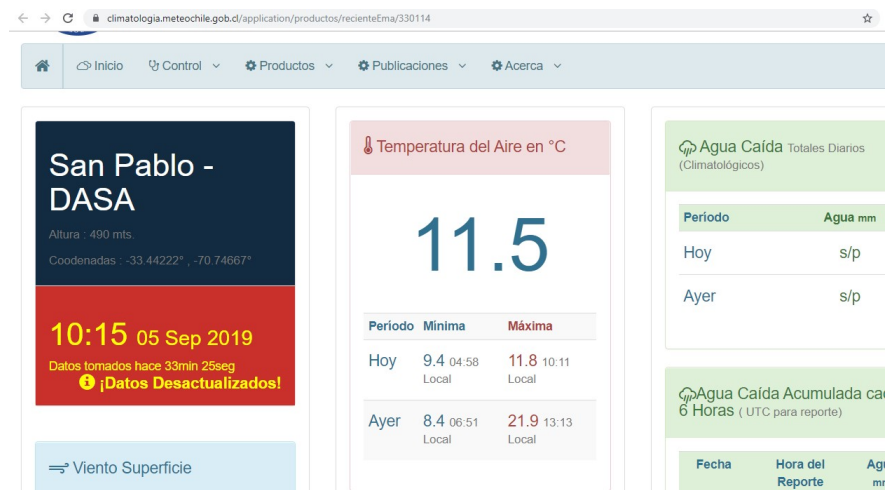


Figura 4.4.2: Aviso datos desactualizados (DMCH)

4.4.2. MERRA

MERRA es un producto de la NASA y es una alternativa para obtener datos históricos de alta calidad de la atmósfera y la superficie. MERRA está basada en observaciones de bases climáticas obtenidas en tierra, mar y observaciones satelitales y se entrega al usuario como una grilla de 0.5 grados por 0.67 grados de todo el mundo. La gran ventaja de MERRA en el mundo vial es que es capaz de proporcionar todos los valores de entrada para el diseño de pavimentos propuestos por la MEPDG. Además, la base de datos entregada no tiene lagunas, como si las tienen las estaciones terrestres, entregando valores desde 1979 hasta 2016. En este momento, se sigue el proceso para mejorar MERRA y relanzarlo como MERRA-2, el cual mejora los modelos usados antes y adopta nuevas variables como el perfil de ozono y la asimilación del resplandor hiperespectral.

El Long-Term Pavement Performance realizó un estudio (Schwartz et al, 2015) comparando estaciones meteorológicas incluidas en el software de la MEPDG en Estados Unidos y los valores entregados por MERRA, además, evaluó la diferencia de los pronósticos entregados por el software de la MEPDG utilizando la base de datos de las estaciones y la base de datos entregados por MERRA. El rango de años de estudio es sobre las bases de datos desde 1996 hasta 2013 y se consideró el efecto de la temperatura y la tasa de precipitaciones, ya que, eran las únicas variables que podrán ser comparadas (falta de datos en muchas estaciones). La comparación entregó que MERRA siempre proporciona temperaturas mayores, alrededor de un 1.4°C y que en el caso de la precipitación los valores de MERRA están muy cercanos, de hecho tienen un sesgo de 0.02 mm/h. En la comparación del desempeño de los pavimentos diseñados con los valores de estaciones por defecto en el software de la MEPDG y los valores climáticos de MERRA, se obtuvieron los gráficos de la figura ??, es en estos gráficos donde queda de manifiesto el buen nivel de información proporcionado por MERRA y los posibles buenos resultados a obtener

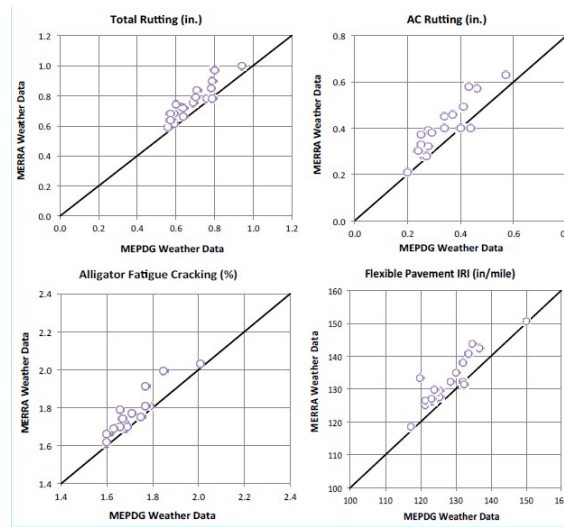


Figura 4.4.3: Gráficos de comparación para Ahuellamiento total, Ahuellamiento de la capa asfáltica, fatiga e IRI según valores climáticos entregados por MERRA y las estaciones por defecto en MEPDG (Schwartz et al, 2015)

Al día de hoy en el portal web de LTPP, se puede descargar la información generada por MERRA pero también la información de estaciones climáticas y sus metadatos como la elevación, latitud y longitud, código etc. Además se puede descargar la información anual, mensual, diaria y horaria del clima en todos los países incluido Chile en el apartado ClimateTool de InfoPave.

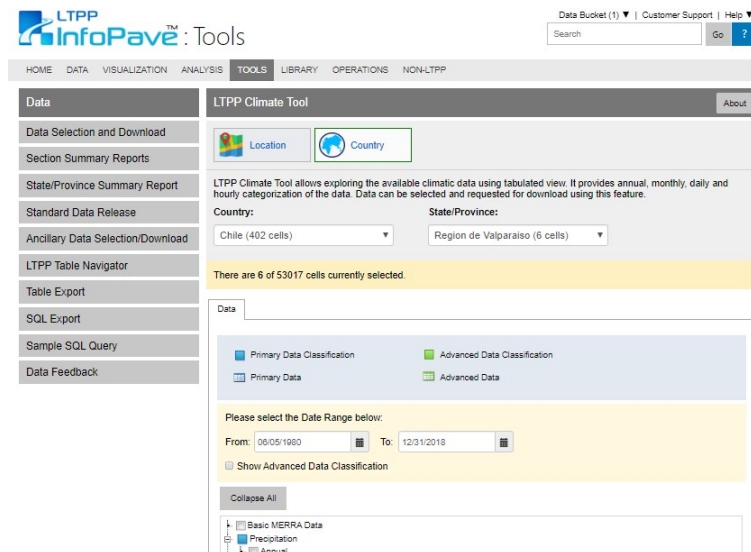


Figura 4.4.4: Selección de celdas Región de Valparaíso en Chile (Infopave LTPP)

4.4.3. Definición de Requisitos de Información Climática

Al ver estas dos plataformas, donde ambas tienen información directa de Chile, es posible observar que las principales variables meteorológicas se encuentran totalmente abiertas a los usuarios interesados, a excepción que en el portal de a DMCH, solo es posible encontrar solo los últimos tres años de cada variable. Pero esto puede deberse a que estas estaciones automáticas son relativamente nuevas y la primera información pudiera tener problemas o no estaban antes de estos tres años, por lo tanto, es evidente que la información capturada por las estaciones puede y debe encontrarse totalmente disponible al público, lo cual incluye también los metadatos de cada estación. Además de las variables meteorológicas generadas por la estación, debido a la existencia de métodos empírico-mecanicistas para el diseño de pavimentos, se establece la necesidad de que la información climática de las variables temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación global y precipitaciones de forma horaria y que de forma similar a los otros campos de información, estas se encuentren completamente disponibles al público.

Sobre los metadatos, al ser información que podría incluir fotografías, esquemas, mapas y datos, es necesario establecer un formato tipo, que permite algún grado de homogeneidad en como estos metadatos son mostrados al público, por lo tanto, en los protocolos de información, se incluye un formato tipo que permite el ingreso de los datos más relevantes sobre la estación meteorológica.

Finalmente, es necesario establecer una frecuencia de actualización de la información disponible en el portal, en este sentido se establece el requisito que la información debe actualizarse en un plazo máximo de 24 horas, es decir, día a día la información disponible debe actualizarse con los últimos registros capturados por las estaciones dentro de la concesión.

4.5. Protocolo Sobre la Información de Estaciones Meteorológicas

El presente protocolo, busca entregar los requisitos y procedimientos necesarios para la gestión de información conseguida mediante el uso de estaciones meteorológicas. Este, se divide en 6 partes que tienen por objetivo, cubrir los puntos necesarios para asegurar una correcta gestión de esta información, comenzando desde el momento de la obtención de registros, hasta su posterior disposición. En general, las partes se enfocan en apuntar una serie de requisitos que el ente encargado deberá cumplir sumados a procedimientos que indican las acciones a tomar dependiendo la situación.

Definiciones

1. Por “centro de procesamiento de datos” se entiende el lugar donde se reúnen los elementos, infraestructuras y recursos necesarios para el procesamiento de la información registrada por una entidad u organización.
2. Por “datos en tiempo real” se entiende por aquellas observaciones recuperadas por métodos de procesamiento de datos automáticos desde el sitio en tiempo real o prácticamente en tiempo real y transmitidos al centro de procesamiento de datos instantáneamente enviada a los usuarios (Nordlik, 2002).
3. Por “estación meteorológica automática” se entiende como una estación meteorológica en las que las observaciones se efectúan y transmiten automáticamente (OMM, 2017)
4. Por “metadatos” se entiende que son distintos tipos de información sobre las estaciones meteorológicas como: información general (coordenadas geográficas, dirección, personal), historial de la estación, historial de los instrumentos (reparaciones y calibración), descripción del ambiente que rodea la estación, tipo de la estación, servicio de información, versiones del software y referencias a documentación.
5. Por “validación de datos” se entiende el proceso que un conjunto de técnicas, procedimientos, algoritmos y pruebas que sirven como herramientas para la identificación y detección de errores y aportan un indicativo del nivel de calidad de cada uno de los datos registrados, asegurando la fiabilidad de dichas observaciones (Estevez, 2004).
6. Por “validación espacial de datos” se entiende el proceso donde se verifica que los valores de una misma variable no difieren demasiado unos de otros en estaciones correlacionadas a la presente.
7. Por “validación temporal” se entiende el proceso donde se verifica que los valores de las variables cumplan características de formato, coherencia interna y consistencia de los datos.

4.5.1. Sobre la recopilación de información

El proceso mediante se recopilan los registros de una estación meteorológica, se deben guiar según lo dispuesto en el diagrama 4.5.1. Dicho diagrama, expone el proceso que debe realizar el ente encargado, desde la toma de datos por un sensor hasta el envío de los registros para su validación. Los siguientes puntos buscan dar más detalle de lo expuesto en el diagrama mencionado

1. Los registros deberán seguir el siguiente procedimiento
 - a) Calcular el promedio por minuto o por dos minutos según sea la variable
 - b) Almacenar dichos promedios en la memoria local de la estación
 - c) Ordenar las variables según 3 de 4.5.1
 - d) Nombrar el archivo según 2 de 4.5.1
 - e) Enviar los registros cada 15 minutos
 - f) De haber problemas en la comunicación registrar problema en bitácora, la causa del problema y su posible causa
 - g) Si el problema de comunicación es superior a una semana gatillar recuperación manual
 - h) En caso de recuperación manual, entregar los registros conseguidos
2. Los archivos de datos enviados desde la estación al centro de procesamiento de datos, deberán cumplir con lo expuesto en el diagrama 4.5.1:
 - a) Formato de Nombre de Archivo: XXXXXXXX_YYYYMMDD_HHMM.JSON
 - Nota1: XXXXXXXX Código de Estación Numérico 8 caracteres; largo fijo justificado por la izquierda por ceros. Ej.: 00001234
 - Nota2: YYYYMMDD_HHMM, Fecha y Hora UTC
 - b) Población de Datos de Archivo:
 - Todas las variables meteorológicas medidas por la estación.
 - c) Envío de archivo de datos
 - Cada archivo debe contener los 15 últimos minutos de registros
 - d) Formato de Archivo de datos:
 - Debe ser formato JSON (estándar y facilitador para procesos posteriores)
 - Formato JSON de la forma

```
{“Nombre1”:”valor1”,”Nombre2”:”valor2”,.....”NombreN”:”valorN”}
```

Nota 1: Cada línea de dato debe ser auto referenciada de acuerdo a: Código Estación – Fecha – Hora – Site(Cabecal)

Nota 2: Código Estación: {“CódigoNacional”:”1234”,.....,}

Nota 3: Fecha :{ , "Fecha": "YYYY-MM-DD", } Año-Mes-Día

Nota 3: Hora :{ . . . , "Hora": "HH:MM:SS, . . . }, Hora-Minuto-Segundo.

Para frecuencia de mediciones (no frecuencia de envío de datos.)

e) Frecuencia de Envío: Cada 15 minutos

f) Lista de variables o elementos meteorológicos del archivo

Tabla 4.5.1: *Lista de variables o elementos meteorológicos del archivo, parte 1 de 2*

Variable	Nombre	Tipo
Código estación	"CodigoEstacion"	123456; siendo los dos primeros el número de la ruta y los últimos cuatro el kilómetro de la ruta
Fecha	"Fecha"	2034-09-30
Hora	"Hora"	17:46:00
Dirección del viento	"dd"(dirección instantánea)	Numérico
Velocidad del viento	"ff"(velocidad instantánea)	Numérico
Dirección del viento	"dd02Min"(dirección promedio 2 minutos)	Numérico
Velocidad del viento	"ff02Min" (velocidad promedio 2 minutos)	Numérico
Dirección del viento	"dd10Min"(dirección promedio 10 minutos)	Numérico
Velocidad del viento	"ff10Min" (velocidad promedio 10 minutos)	Numérico
Temperatura del aire	"ts" (temperatura promedio 1 minuto)	Numérico
Temperatura del aire	"tMin12H" (temperatura mínima últimas 12 horas)	Numérico
Temperatura del aire	"tMin12Hora" (hora de la temperatura mínima últimas 12 horas)	Hora
Temperatura del aire	"tMax12H" (temperatura máxima últimas 12 horas)	Numérico
Temperatura del aire	"tMax12Hora" (hora de la temperatura máxima últimas 12 horas)	Hora
Humedad relativa	"hr" (humedad relativa promedio 1 minuto)	Numérico
Precipitación acumulada	"RR" (precipitación instantánea)	Numérico

Tabla 4.5.2: Lista de variables o elementos meteorológicos del archivo, parte 2 de 2

Variable	Nombre	Tipo
Precipitación acumulada	“rr6h”(precipitación en las últimas 6 horas)	Numérico
Precipitación acumulada	“rr24h” (precipitación en las últimas 24 horas)	Numérico
Radiación global	“rins”(radiación global instantánea)	Numérico
Radiación global	“RGlobal”(radiación global acumulada 24 horas)	Numérico
Duración insolación	“dins”(duración de la insolación diaria)	Numérico
Radiación de onda larga	“rinslarga”(radiación de onda larga instantánea)	Numérico
Radiación de onda larga	“rlarga24h”(radiación de onda larga acumulada 24 horas)	Numérico
Temperatura superficie pavimento	“tpavsup” (temperatura promedio 1 minuto en la superficie del pavimento)	Numérico
Temperatura pavimento a 5 cm.	“tpav5”(temperatura promedio 1 minuto a 5 centímetros de la superficie del pavimento)	Numérico
Temperatura pavimento a 10 cm.	“tpav10”(temperatura promedio 1 minuto a 10 centímetros de la superficie del pavimento)	Numérico
Temperatura pavimento a 20 cm.	“tpav20”(temperatura promedio 1 minuto a 20 centímetros de la superficie del pavimento)	Numérico

3. Sobre los archivos de datos enviados desde la estación al centro de procesamiento de datos, estos deberán cumplir con lo siguiente:

```
{ "CodigoNacional":"99999999", "Fecha":"2012-03-23", "Hora":"14:15:00", "dd":"316.3624", "ff":"0",
"dd02min":"0", "ff02min":"0", "dd10min":"279.8953", "ff10min":"1.697961",
"TS":"22.01811", "TMin12":"12.51281", "TMin12Hora":"2012-03-23 11:55:40",
"TMax12":"24.94861", "Tmax12Hora":"2012-03-23 00:00:20", "hr":"35.5295", "RR":"0",
"rr6h":"0.2", "rr24h":"0.2", "rins":"720.3", "RGlobal":"512.8", "dins":"10.03",
"rinslarga":"98.6", "rlarga24h":"143.5", "tpavsup":"29.456", "tpav5":"18.056",
"tpav10":"15.689", "tpav20":"15.086", }
```

4. Ante cualquier error de software o hardware, la estación meteorológica deberá enviar un mensaje señalando el error. Este mensaje deberá ser registrado en la bitácora de la estación y deberá ser reenviado al menos cada una hora.
5. Deberá quedar registrado en todo momento la hora y fecha en que se envía el paquete de archivos desde la estación y la hora y fecha en que este paquete llega al centro de procesamiento de datos.

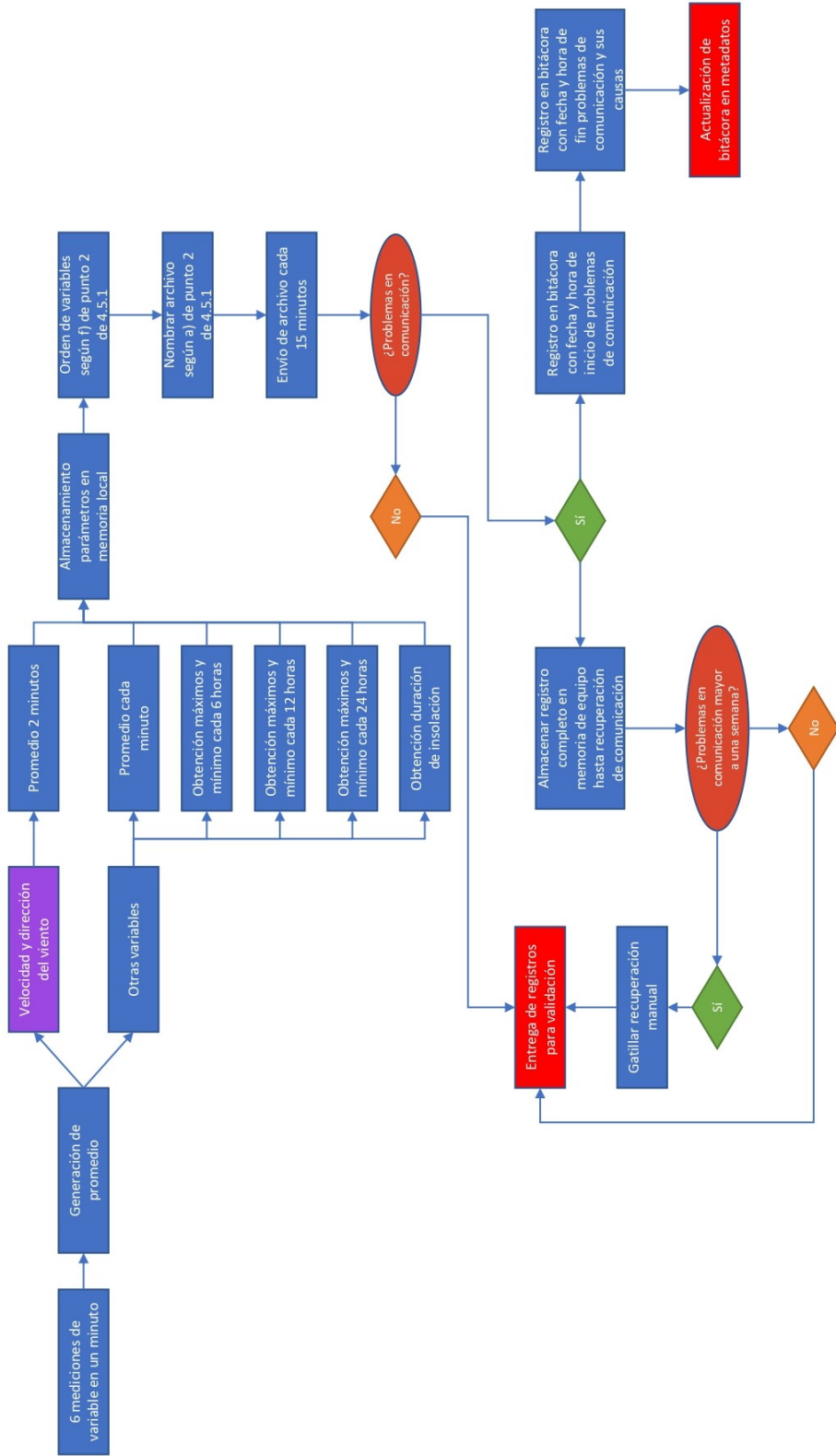


Figura 4.5.1: Procedimiento para la toma de registros obtenidos de una estación meteorológica

4.5.2. Sobre la validación de los datos

Este apartado busca establecer procedimientos de validación que puedan detectar, etiquetar y suprimir registros meteorológicos que puedan no ser correctas. En este caso, el objetivo principal es detectar errores groseros y allanar el camino para un futuro realizar procedimientos más elaborados.

1. Para la validación de los registros tomados por las estaciones meteorológicas, se considerará la normativa UNE 500540:2004. Con esta normativa se busca que todos los registros meteorológicos realicen el procedimiento 4.5.2:
2. Serán de forma obligatoria la validación en todos los niveles propuestos por la norma UNE 500540:2004 a excepción del nivel 5 y 6.
3. Deberá agregarse las etiquetas que consiga el registro según sortee los niveles establecidos
4. Como referencia para validar registros meteorológicos tomados por la estación meteorológica se pueden utilizar los criterios pertinentes de Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations (OMM, 2004).
5. Entendiendo que los rangos, exigencias u otras limitaciones para validar los registros meteorológicos del punto 4.3 tienen un marco global y que pudiesen no representar completamente la realidad de la ubicación de la estación meteorológica, se permite la incorporación o supresión de rangos, exigencias u otro elemento pertinente.
6. Antes de incorporar o suprimir algún rango, exigencia o limitante, el ente a cargo de la estación meteorológica deberá pedirlo fundadamente al inspector fiscal. En caso de aprobación este cambio deberá quedar registrado en los metadatos de la estación junto a los fundamentos para solicitar el cambio.
7. Sobre la etiqueta de los datos validados, estas deberán ceñirse a lo especificado por UNE 500540:2004 en su punto 4.2 Códigos de Control. Tanto para el primero como el segundo de los códigos.
8. Será obligación realizar los niveles 0 y 1 de la norma UNE 500540:2004 apenas los datos, sean recibidos en el centro de procesamiento de datos, esto con la finalidad de generar una alarma inmediata por un posible error en la estación.

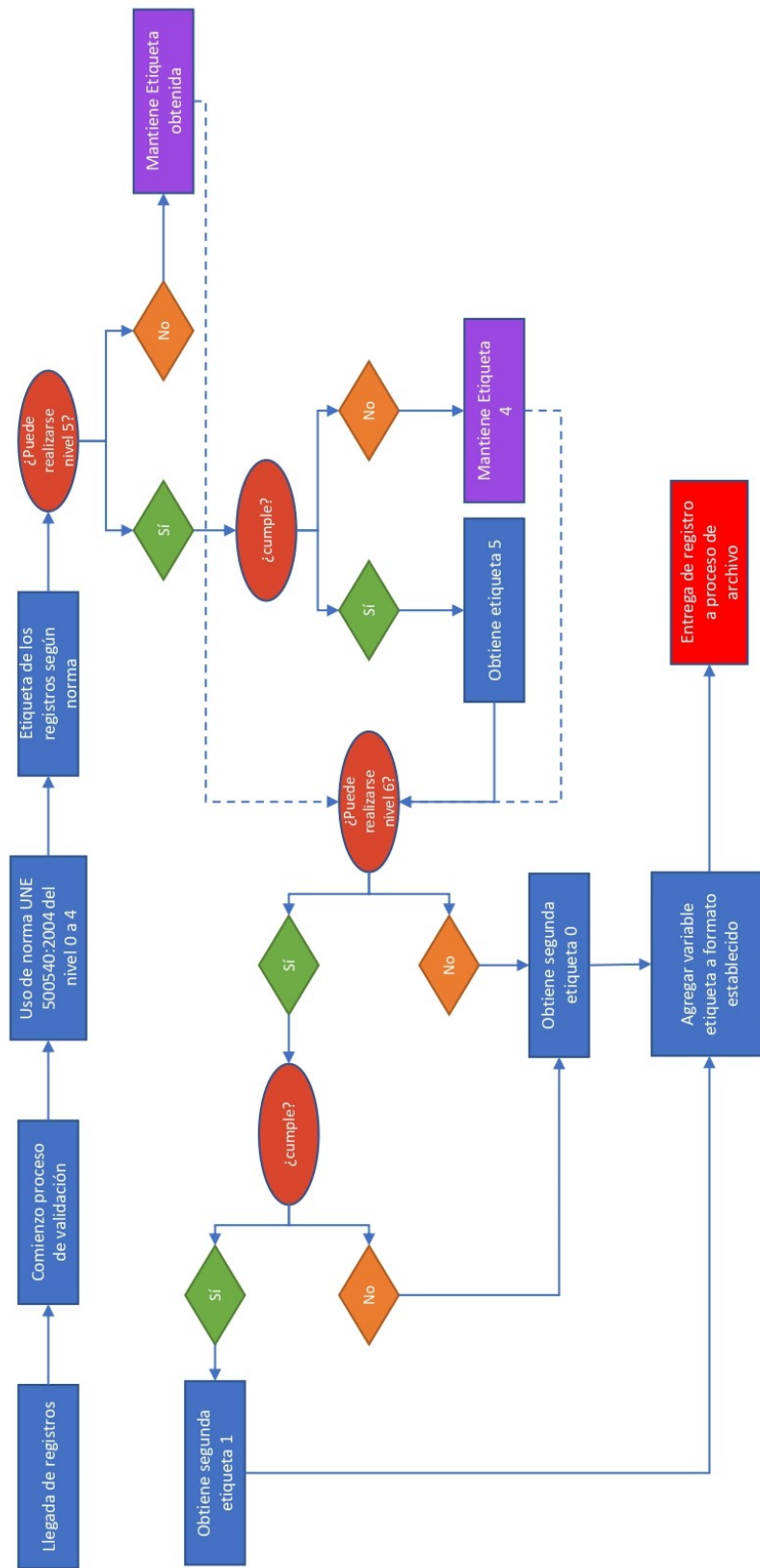


Figura 4.5.2: Procedimiento para la validación de registros obtenidos de una estación meteorológica

4.5.3. Metadatos y bitácora de la estación meteorológica

La bitácora y metadatos de la estación meteorológica, tiene el fin de ser el elemento que albergue todos los sucesos que influyan en la normal operación de la estación. Se busca con esto, que en caso de dudas sobre los datos, un registro ordenado cronológicamente permita conocer lapsos de tiempo en que la estación tener desempeños diferentes, que expliquen errores, sesgos, etc.

1. Los metadatos de la estación meteorológica, deberán ser constatados en la forma “Inventario de Estación Meteorológica”. Para rellenar los elementos requeridos por esta forma, se deberá seguir lo impuesto por los siguientes puntos, rellenando el formato establecido:
 - a) Toda estación tendrá una identificación que constará de 8 dígitos, de los cuales los tres primeros corresponden al número de la ruta, mientras que los últimos cinco corresponden al hectómetro de la ruta en que se ubica la estación. Por ejemplo, el código de una estación de la ruta 68 y que se ubique en el hectómetro 1045 será “06801045”.
 - b) La estación deberá ser reconocida con un nombre, el cual se adoptará según la existencia cercana de un elemento representativo del lugar, por ejemplo: ríos, ciudades, hospitales, viñas, etc. Del mismo modo deberá añadirse un alias a la estación que permita un fácil reconocimiento de la ubicación.
 - c) Deberán encontrarse dentro de los metadatos los datos de la organización responsable de la estación y las formas de contacto con la organización.
 - d) Con respecto a la ubicación esta deberá ser informada en decimales hasta el sexto decimal y su elevación hasta la unidad en m.s.n.m. También deberá informarse la zona horaria UTC en que se ubica la estación.
 - e) Con respecto al ambiente local, deberá informarse sobre el tipo de cubierta de suelo que existe en la estación, los grados de exposición a los que se someten los instrumentos de la estación, el horizonte de radiación, el tipo de clima presente, fotografías del sitio que releven el tipo de cubierta, los grados de exposición de los instrumentos, planos del sitio y diagramas de cielo.
 - f) Sobre la instrumentación y mantenimiento de la estación, deberá informarse sobre cada instrumento en la estación, la fecha de inicio y fin de operación de cada instrumento, la condición en la que se encuentra el instrumento (operativo/fallando), las calibraciones realizadas a cada instrumento, las mantenciones realizadas a cada instrumento o elemento de la estación.
 - g) Sobre la observación de la estación meteorológica, deberá quedar registrado la identidad de la persona que la lleve a cabo junto a su nivel de calificación. De dichas observaciones deben registrarse las fechas, horas, unidades utilizadas, el reemplazo de unidades y las correcciones llevadas a cabo en la estación.
 - h) Deberá registrarse cada cambio que concierne a las estaciones meteorológicas sobre la institución que las administre.

INVENTARIO ESTACIÓN METEOROLÓGICA

I. Identificación de la estación

1. Nombre y alias: _____
2. Código de la estación: _____
3. Estado de operatividad (Sí/No): _____
4. Tipo de estación: _____
5. Organización responsable: _____
6. Zona horaria: _____

II. Datos geográficos

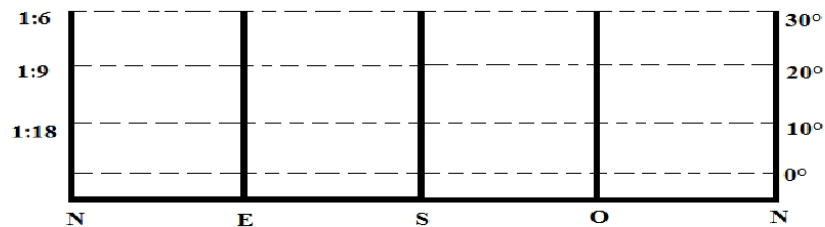
1. Latitud (Grados, Minutos y Segundos enteros): _____
2. Longitud (Grados, Minutos y Segundos enteros): _____
3. Elevación (M.S.N.M. hasta segundo decimal): _____
4. Kilómetro de la vía (hasta un decimal): _____

III. Datos geográficos (en caso de reubicación)

1. Latitud (Grados, Minutos y Segundos enteros): _____
2. Longitud (Grados, Minutos y Segundos enteros): _____
3. Elevación (M.S.N.M. hasta segundo decimal): _____
4. Kilómetro de la vía (hasta un decimal): _____



IV. Ambiente local

1. Cubierta del suelo: _____
2. Horizonte de radiación

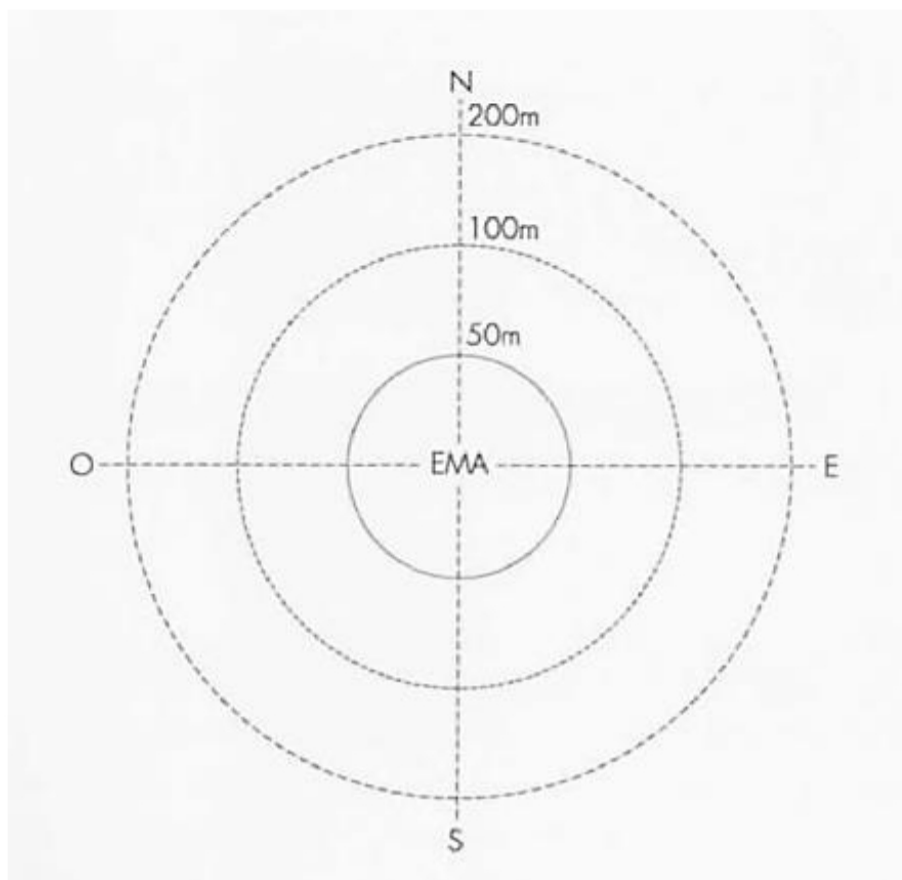


3. Fotografías del sitio:

Fotografía Dirección Norte
Comentarios: (sobre cualquier elemento característico y su distancia a la estación)
Fotografía dirección Este
Comentarios: (sobre cualquier elemento característico y su distancia a la estación)

<p>Fotografía Dirección Sur</p> 
<p>Comentarios: (sobre cualquier elemento característico y su distancia a la estación)</p>
<p>Fotografía dirección Oeste</p> 
<p>Comentarios: (sobre cualquier elemento característico y su distancia a la estación)</p>

4. Condición del sitio (bosquejo de obstáculos):



V. Instrumentación y Comunicación

1. Tabla de los sensores

Nº	Sensor	Fabricante	Modelo	Serie	Alimentación	Rango de Operación	Fecha
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							

Comunicación

1. Fabricante de Modem: _____
2. Modelo de modem: _____
3. Compañía suministradora de señal: _____
4. Número de teléfono o contacto: _____

VI. Validación de datos

1. ¿La estación contiene un sistema de validación, recuperación, control de calidad de datos?
(sí/no): _____
2. En caso que la respuesta anterior fuese sí, adjunte todos los documentos que puedan explicar todos los procesos llevados a cabo con la información tomada por la estación.

2. Una vez exista un cambio en estos elementos, el periodo máximo para actualizar los metadatos, será de 15 días.
3. Dentro de los metadatos, la bitácora de la estación registrara fallas en ella como también las mantenciones sobre esta. El formato utilizado deberá obedecer al siguiente:

Bitácora Estación Meteorológica					
Estación	Ruta	Km	Elevación	Latitud	longitud
Código según a) de 4.5.3	según punto 2 de 2.5.1	según punto 2 de 2.5.1	Según tabla 2.5.3	Según tabla 2.5.3	Según tabla 2.5.3
Zona horaria		Fecha de instalación		Fecha de instalación (reubicación)	
En UTC		dd-mm-aa		dd-mm-aa	
Registro de fallas					
En este apartado mencionar de forma cronológica situaciones de falla en software, componentes técnicos, fallas en sensores, energía, comunicaciones. En cada falla debe quedar registrado:					
<i>Fecha / Hora de Falla/ Hora de Aviso / Hora de Detención de la Estación/ Nombre del funcionario que comunica y recibe la falla/ Descripción de la Falla/ Hora de Llegada de Empresa a Estación/Hora de Término de Mantención/ Descripción Técnica del trabajo realizado (incluyendo sensores intercambiados o arreglados)/ Fotografías, planos o diagramas que faciliten el entendimiento del proceso/ Hora de inicio actividades Estación.</i>					
Registro de mantenciones rutinarias					
En este apartado mencionar de forma cronológica situaciones de mantención rutinaria. De cada una debe quedar registrado lo siguiente					
<i>Fecha/ Nombre del funcionario que realiza la acción/Hora de Término de Mantención/ Descripción Técnica del trabajo realizado/ Fotografías/Informes</i>					
Registro de mantenciones especiales					
En este apartado mencionar de forma cronológica todas aquellas mantenciones especiales					
<i>Fecha/ descripción de trabajo/ Fecha de término de actividades/ Hora de término de actividad/ Descripción técnica del trabajo realizado/ fotografías o diagramas que faciliten el entendimiento del proceso</i>					

4.5.4. Sobre la seguridad de los datos y archivos

En este punto se enumeran requisitos que el ente a cargo deberá cumplir con el fin de evitar cualquier corrupción o pérdida de los registros

1. Todo el personal del sistema de gestión de datos climáticos, deberá ser consciente de sus responsabilidades profesionales.
2. Como medio contra el deterioro, los archivos y el entorno de base de datos deben ser seguros y estar seguros de riesgos materiales, como incendios y exceso de humedad.
3. En relación con los datos digitales, los usuarios deberán respetar las normas de seguridad relativas a la base de datos y sus componentes. Solo un número reducido de personas tendrá permitida la manipulación de datos, su inserción, actualización y eliminación.
4. En ningún caso se permitirá el cambio de registros, es decir, no se deberá alterar el valor adquirido por la estación meteorológica.
5. El personal autorizado para manipular una base de datos debe comprometerse a no efectuar ninguna transacción aparte de las operaciones y prácticas aprobadas por el gestor de datos.
6. Cualquier modificación que se introduzca en las tablas de datos debe ser objeto de un registro de auditoría, que debe ser accesible y ser sometido a un control.
7. Deberán aplicarse principios relativos a la seguridad de las contraseñas, como los que suponen no desvelarlas ni anotarlas en un papel, cambiarlas regularmente, usar contraseñas muy seguras compuestas por letras, números y caracteres aparentemente no relacionados.
8. Deberán desactivarse todos los servicios innecesarios que estén presentes en la base de datos del ordenador.
9. La base de datos también deberá estar protegida contra virus y ataques de piratas informáticos.
10. Deberán hacerse copias de seguridad frecuentemente, puesto que es probable que el trabajo realizado con posterioridad a la copia de seguridad más reciente se pierda y sea necesario repetirla por si se produce un fallo informático. Por lo general, debería hacerse una copia de seguridad acumulativa diaria y una copia completa semanal.
11. De vez en cuando, por lo general, una vez al mes, deberá guardarse una copia de seguridad completa de las tablas de datos en un lugar seguro, protegido contra incendios y distante de la ubicación física de la base de datos climáticos. Es común conservar tres copias del mismo archivo en diferentes lugares seguros y, de ser posible, en diferentes pueblos o ciudades.

4.5.5. Sobre el almacenamiento de los datos

Con el fin de ordenar y gestionar todos los registros efectuados por las estaciones de las estaciones meteorológicas, se deberá generar una base de datos la cual deberá estar ordenada en función de cada variable medida.

1. Con el fin de ordenar y gestionar todos los registros efectuados por las estaciones meteorológicas automáticas, se deberá generar una base de datos la cual deberá estar ordenada en función de cada variable medida.
2. Como parte del proceso de creación de la base de datos y sus objetos, la institución a cargo deberá realizar un análisis del volumen y crecimiento de los datos, para realizar un dimensionamiento adecuado de la infraestructura, configuración y tamaño de la base de datos a crear. De la misma manera es relevante conocer el número de transacciones esperadas, niveles de concurrencia, número de usuarios potenciales, entre otros puntos que puedan favorecer la realización de un dimensionamiento correcto e informado.
3. Al momento de generar una base de datos debe definirse un responsable técnico o administrador de la base de datos y un responsable o propietario de la información contenida.
4. Utilizar una nomenclatura estándar para las bases de datos y sus objetos, para todos los proyectos y sea que constante durante todo su diseño.
5. Se sugiere mantener nombres cortos y descriptivos, sin utilizar espacios en blanco o caracteres especiales.
6. Se debe confirmar la longitud máxima permitida para los nombres por el Sistema Manejador de Bases de Datos Relacional (RDBMS por sus siglas en inglés) a emplear. Se recomienda un uso máximo de 30 caracteres para el nombre de tablas o campos.
7. Para aquella información que no correspondan a registros meteorológicos como: la bitácora de la estación, sus metadatos u otros, el ente encargado deberá repetir el proceso 8.5, asumiendo los distintos formatos que esta información contiene. En caso que la información sea entregada en papel, esta deberá ser digitalizada y dicho elemento ser ingresado a la base de datos.

4.5.6. Sobre la publicación de la información

Se deberá generar un portal web con acceso totalmente público, el cual deberá responder a los siguiente requerimientos: En este caso, el medio utilizado para cumplir estos requisitos no es parte del alcance de este punto, pero deberá cumplirse con los requisitos expuestos.

1. En este portal se podrá elegir la estación meteorológica automática que al usuario interese. Las estaciones deberán estar georreferenciadas y nombradas en una mapa de la concesión.
2. En este portal la información obtenida de los sensores de la estación, deberá actualizarse en tiempo real, es decir, con una frecuencia de al menos una vez cada 15 minutos.
3. Los usuarios del portal podrán descargar de forma inmediata los archivos históricos de las mediciones hasta los últimos cinco años. El usuario podrá descargar la variable que él estime necesaria estableciendo un periodo determinado, además el usuario podrá elegir si descargar los datos con o sin los procesos de validación (etiqueta en los datos).
4. En caso que el usuario desee registros históricos de más de cinco años, este podrá solicitarlos en el mismo portal web. La institución a cargo no deberá exceder en cinco días a contar del envío de solicitud la entrega de los registros solicitados.
5. El usuario podrá descargar los archivos de los registros históricos en formato XLS. Aunque se permite el uso de archivos comprimidos, dentro de los cuales se encuentren archivos en XLS.
6. El nombre del archivo descargado deberá ser el siguiente:

a) XXXXXXXX_YYYYMMDD_YYYYMMDD_Variable.xls

Nota 1: XXXXXXXX es el código de la estación (Ej.: 06801245).

Nota 2: El primer YYYYMMDD hace referencia a la fecha inicial del periodo de descarga y el segundo a la última fecha dentro de dicho periodo.

Nota 3: La variable podrá ser temperatura aire, humedad, velocidad y dirección de viento, precipitaciones, radiación o temperatura pavimento.

7. La estructura del archivo descargado deberá ser como lo indica

Código Estación	Fecha	Hora	Var. 1	Var. 2	...	Cód. Val. 1	Cód. Val. 2
06801245	01-04-2022	13:45	23.4	15.3	...	5	1
06801245	01-04-2022	13:46	23.7	15.3	...	5	1
06801245	...	...	...	...	...	...	...
06801245	31-03-2024	19:23	12.2	12.2	...	5	1

8. Una vez elegida la estación meteorológica, el usuario podrá revisar todos aquellos registros que hayan sido etiquetados con algún nivel de error (que no hayan superado algún nivel de validación según UNE 500540:2004). Esto deberá estar en un apartado llamado “Informe de Control de Validación de Datos” y debe estar según los niveles de validación, porcentaje de registros erróneos y una explicación sobre cada error.

9. El portal web deberá tener un apartado con información sobre cada variable, su definición, su importancia, las formas de medirlas, los distintos instrumentos para efectuar registros y los instrumentos utilizados en las estaciones.
10. El portal deberá permitir revisar y descargar un manual que explique el funcionamiento del portal web y los pasos necesarios para descargar los registros históricos, los metadatos, la bitácora de la estación elegida.
11. En el portal web deberá encontrarse un apartado donde se permitan los comentarios de los usuarios.
12. En el portal web se deberá poder revisar la bitácora de la estación donde esta deberá contener filtros sobre cada ítem (Ejemplo: revisar solo las Mantenciones semestrales) y se podrá descargar cualquier imagen, informe o comentario sobre cada suceso.

Capítulo 5

Recomendaciones para el Monitoreo de Salud Estructural de Puentes Chilenos

El presente capítulo tiene por objetivo entregar recomendaciones para el monitoreo e instrumentación de puentes chilenos

- En la sección 5.1, se revisan diferentes motivaciones y objetivos que una agencia puede tener para monitorear sus puentes
- En la sección 5.2, se presenta la relevancia de realizar inventarios de puentes
- En la sección 5.3, se presentan diferentes índices y formas de priorizar puentes en Chile y el mundo
- En la sección 5.4, se revisan formas de analizar la condición de puentes existentes y nuevos
- En la sección 5.5, se presentan diferentes estados límites y la búsqueda de respuestas críticas a monitorear
- En la sección 5.6, se introduce a la necesidad de monitorear diferentes variables que afectan al puente
- En la sección 5.7, se revisan las diferentes formas de realizar un monitoreo de un puente
- En la sección 5.8, se presenta la relevancia de realizar una evaluación económica del proyecto completo de monitoreo tanto para un puente como para toda la red
- En la sección 5.9, se revisan los diferentes sensores necesarios para monitorear un puente en función del objetivo buscado
- En la sección 5.10, se presentan las diferentes herramientas para procesar las señales obtenidas de los sensores instalados
- Finalmente en la sección 5.11, se encuentra redactada la guía para normalizar el procedimiento de monitorear puentes chilenos

En Chile contiene alrededor de 12 mil estructuras ubicadas en rutas urbanas e interurbanas. De ellas, 4750 corresponden a pasos desnivelados y pasarelas y 7250 a puentes. De estos último, 6800 son puentes bajo la tuición de la Dirección de Vialidad del MOP y los restantes 450 corresponden a puentes concesionados. Cuidar este patrimonio es imperativo, ya que, el poder salvar un accidente geográfico con una estructura vuelve los viajes seguros, rápidos y más eficientes, sin embargo, con solo construir un puente no basta para solucionar el problema de forma permanente, porque situaciones ambientales como terremotos, crecidas de ríos, mareas, y efectos generados por las personas como la extracción de material del lecho de los ríos, el paso sobre estructuras con sobrepeso, dañan a la estructura y esta, en algunos casos ve restringida su capacidad y una disminución de su vida útil.

Es por esto que se vuelve prioritario buscar metodologías que permitan elevar y mejorar la vida útil de los puentes. Entre estas metodologías, aparece el monitoreo de puentes, pero no solo mediante las inspecciones visuales de rutina, sino que mediante la instalación de sensores en los puentes, los cuales entreguen resultados objetivos que puedan ser traducidos en su verdadero estado. Sin embargo, no basta con insertar sensores en los puentes, se requiere un proceso que sea capaz de analizar las señales es allí, donde aparecen los SHM (Structural Health Monitoring), que son los métodos más avanzados y que a través de ,a instalación de sensores y un análisis de sus señales, es posible determinar el real estado de la estructura, y desde allí se puede determinar las acciones a tomar sobre esta.

Uno de los problemas con los SHM es que al ser un método avanzado, es un método relativamente reciente, donde la cantidad de artículos, reportes, normas y códigos demuestran que es un tema que si bien comienza a definir ciertos elementos, aun le resta maduración. Entonces, se ha decidido que a diferencia de los capítulos anteriores, en este capítulo se genere una guía que entregue los primeros lineamientos para la instalación y operación para sistemas de monitoreo de salud estructural. Esta guía, se conformará en base a lo encontrado en a diferentes normas, lineamientos y publicaciones que establecen requisitos y recomendaciones a la hora de instalar un SHM.

5.1. Motivación y Objetivos de Monitoreo

Uno de los problemas que ha sufrido el desarrollo de SHM en el mundo, es que siempre se ha centralizado fuertemente en el aspecto de la sensorización y la medición de variables, cuando el verdadero comienzo de este proceso nace en las motivaciones de una entidad y los objetivos que esta se ha dispuesto a cumplir mediante la instalación de SHM en su red de puentes. Es necesario que esto quede muy claro desde el comienzo, porque dependiendo de esta motivación y sus objetivos, se establezcan los siguientes pasos, incluyendo todos los sensores a instalar y las variables a registrar.

Comprendiendo ello, las motivaciones pueden ser muy variadas, en caso de entidades ligadas por ejemplo, al área de la investigación, varían con respecto a agencia pudieran interesarse en volver más eficiente el gasto de sus recursos. Así, por ejemplo, (Mayorga, 2016) menciona que para una agencia, algunas motivaciones pueden ser seguridad de personas, ganar confianza del público, presión pública, continuidad de operación, apoyo para la toma de decisiones y el registro de cargas y respuestas estructurales para investigación. Visto de otra forma, más bien como situaciones en que es deseable instalar y operar un SHM, (Brownjohn, 2007) citando los trabajos de Ross, Mathew y Mita, menciona los casos en que es deseable la instalación de un SHM:

1. Modificaciones de una estructura existente
2. Monitoreo de estructuras afectadas por trabajos externos
3. Monitoreo durante la demolición
4. Estructuras sujetas a movimientos de largo plazo o degradación de materiales
5. Ciclos de retroalimentación para mejorar diseños futuros basados en la experiencia
6. Evaluación de fatiga
7. Sistemas novedosos de construcción
8. Evaluación de integridad estructural luego de un sismo
9. Declive en la construcción y crecimiento en necesidades de mantención
10. Tendencia hacia un diseño basado en la filosofía del diseño por desempeño

Situaciones como los mencionados en (Brownjohn, 2007; Mayorga, 2016) , se pueden encontrar dentro y fuera de Chile. Por ejemplo, uno de los casos más famosos de SHM se encuentra en el puente construido luego de la caída del puente I-35W sobre el río Mississippi en el año 2007. En este caso, debido a la alta exposición sufrida y las víctimas fatales producto del derrumbe, la agencia decidió instalar un SHM que se encontrara cercano al estado del arte, buscando recuperar la confianza pérdida (Inaudi et al, 2009). Otro ejemplo, en el ámbito internacional ocurrió con el puente Z24 en Suiza, el cual fue monitoreado con un arreglo de sensores por mucho tiempo aun cuando se había demostrado la degradación en su estado estructural con una finalidad investigativa. En el ámbito nacional, se pueden mencionar por ejemplo los requisitos de instrumentación sobre el nuevo puente que une la isla grande de Chiloé y el continente y los

requisitos de instrumentación sobre el puente Kay Kay, que son puentes que destacan por su magnitud y tipología extrañas en la realidad nacional (Márquez et al, 2017).

En el caso de los objetivos de la instrumentación de puentes, el intentar conocer el estado estructural del puente, por defecto implica conocer el daño que ha sufrido en su operación. (SAMCO, 2006) menciona que el daño son cambios introducidos dentro de un sistema que afectan adversamente el desempeño normal o futuro de una estructura. Esta definición está limitada a cambios en las propiedades geométricas y/o materiales de una estructura, incluyendo cambios en las condiciones de soporte y sistemas de compatibilidad. El daño tiene diferentes características que sirven para identificarlo y estas mismas características pueden servir como objetivos a la hora de instalar un SHM en un puente.

- Nivel 1, Detección: Determinación que el daño está presente en la estructura.
- Nivel 2, Localización: Determinación de la ubicación geométrica del daño.
- Nivel 3, Cuantificación: Determinación de la severidad del daño.
- Nivel 4, Prognosis: Predicción de la vida de servicio remanente de la estructura

Es decir, se puede establecer un SHM con el objetivo de alcanzar la cuantificación del daño en un puente o tan solo detectarlo. La decisión de la profundidad a la cual debe llegar el sistema de monitoreo, corresponde a la agencia a cargo de la estructura tomando en consideración sus recursos, su personal técnico y el apoyo de otras formas de monitoreo sobre el puente como las inspecciones visuales.

5.2. Inventario y Conocimiento de Estado de la Red

Si el objetivo es instalar un SHM sobre puentes de forma correcta, uno de los primeros pasos a esa meta consiste en establecer un inventario completo de los puentes de la red y del estado en que se encuentran estos. La posibilidad de llevar a cabo una elección del puente a instrumentar y de realizar una correcta gestión de estos activos, depende fuertemente de la información recabada sobre la red. En este sentido, por ejemplo, Autroads (Dowling y Rummey, 2004) ha establecido la información a recolectar para alimentar su sistema de gestión de puentes. En este caso, esta información se encuentra en nueve campos que son:

Tabla 5.2.1: *Información Austroads (Dowling y Rummey, 2004)*

Datos de Inventario
identificación del puente, ubicación y descripciones de funciones, información estructurales (fundaciones, subestructura y superestructura), capacidad de carga, servicios adjuntos como agua potable y electricidad, listado ambiental e histórico y detalles geométricos como alineación y largo de su luz.
Inspección del Puente
El principal propósito es determinar la condición del estado estructural de cada elemento del puente. En este caso Austroads establece cuatro niveles de inspecciones a realizar en un puente.
Historial de Mantenición
registro de defectos y acciones de mantención sobre el puente, mencionando aquellos elementos diferentes al diseño de la estructura
Diseño y Construcción del Puente
Planos, estudios de suelo, información hidrológica, nombres de entidades involucradas en su diseño, capacidades de carga del sistema original o reforzada y en el caso de la construcción, fechas de construcción, fotografías, manuales de mantención, costos, tipos de sellos, requisitos de mantención, etc.
Flujo del río
Niveles máximos conocidos y sus fechas, escombros e historial de socavación
Inspecciones de Tránsito
Volúmenes, espectros de tránsito y cargas pesadas
Servicios
consignar ubicación de los servicios adjuntos al puente
Reporte de accidentes
Incluir accidentes que pudiesen dañar de forma estructural al puente, como choque de vehículos, botes o barcos
Consignación de Costos
Intentar incluir costos de la agencia como costo de diseño, costos de gestión, construcción, inspección, etc. y costos de usuarios

Una situación similar, se ha generado en Chile donde se puede encontrar a la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE). Esta empresa estatal desde el año 2012 ha iniciado una dura batalla que tiene el objetivo de conseguir que las actividades de mantenimiento sobre los puentes ferroviarias, cambien su carácter reactiva a un carácter proactiva, lo cual tendrá como resultado que sobre los puentes bajo responsabilidad de EFE, se realizarán frecuentes campañas de inspecciones y levantamiento de información de cada estructura de su red. En este sentido, este proyecto buscó información sobre planos, levantamiento en terreno, estudios de suelo, materialidad, diseño, condiciones actuales, etc. como base para alimentar su sistema de gestión de estructuras (Durán et al, 2017).

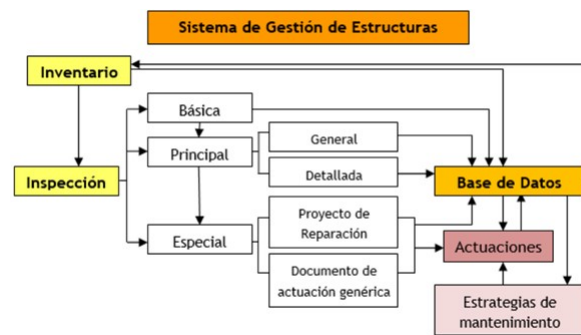


Figura 5.2.1: Sistema de gestión de estructuras de EFE (Durán et al, 2017).

Dado que el levantamiento de información de los puentes contiene muchísimos campos como materialidad de cada componente, dimensiones, fotografías actualizadas, planos, mejoramiento u otros elementos, es necesario que se utilice un medio que permita almacenar esa información, de forma que permita recuperarla cuando el usuario la estime y que la almacene de forma ordenada. En este sentido y volviendo este proceso más simples, diversas plataformas de gestión de información han salido al mercado para solventar esta necesidad. Hace algunos años algunas concesionarias en Chile han comenzado a utilizar herramientas informáticas para la gestión de sus activos viales. Una de estas es i3MET (Infrastructures: Management, Maintenance and Monitoring Expert Tool) desarrollado por *INES ingenieros*.

En el caso de i3MET, esta responde a las principales cuestiones relacionadas con la gestión de activos, siguiendo los principios de la Norma internacional ISO 55000:2014, que se organiza alrededor de cinco capítulos principales:

1. Conocimientos de los activos (asset knowledge)
2. Estrategia y planificación
3. Organización y recursos humanos
4. Relación con clientes y otros participantes (stakeholders)
5. Gestión del riesgo

En Chile algunos de sus clientes son Ministerio de Obras Públicas, concesionarias Albertis y en etapa de aprobación Empresa de Ferrocarriles del Estado y dentro de las características generales de i3MET son las siguientes:

- Acceso a datos en tiempo real
- Datos de emplazamiento del activo vial
- Definición geométrica de un activo y sus subcomponentes
- Permite registrar archivos con cualquier otro formato

- Permite la visualización y archivo de planos
- Información de Inspecciones
- Información de Actuaciones de mantenimiento
- Idioma
- Seguimiento de inspecciones

Se destaca además que la posibilidad de revisar la información dispuesta en esta herramienta, es accesible desde diferentes computadores solo teniendo un usuario y contraseña.

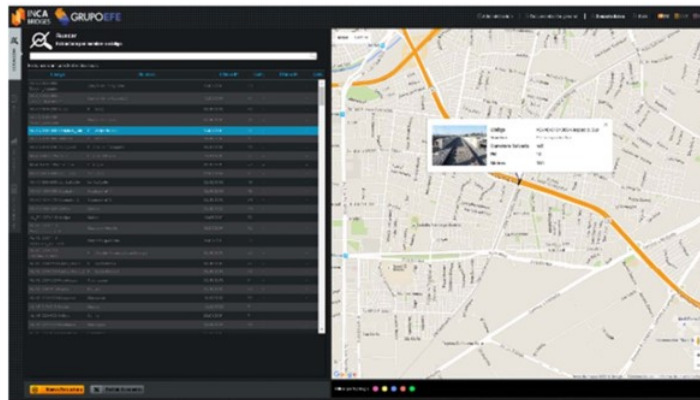


Figura 5.2.2: Datos generales de un activo (INES Ingenieros)

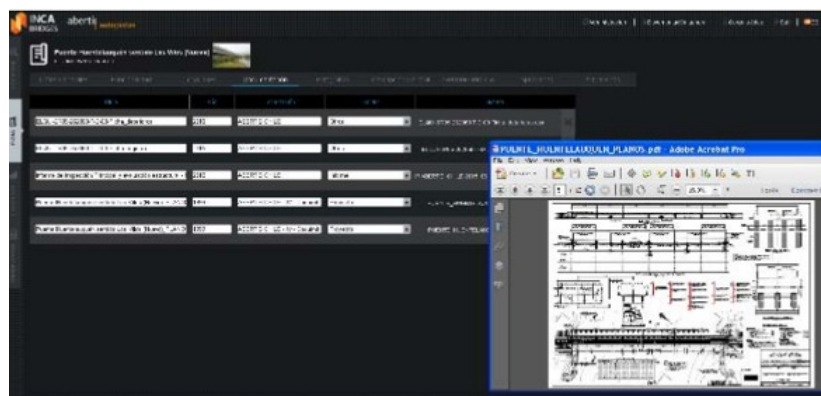


Figura 5.2.3: Documentación relativa a un activo (INES Ingenieros)

Con la información de la red ya levantada, incluyendo los diversos campos que pueden ser considerados, se comprende que es necesario establecer un indicador que permita concentrar y representar el estado estructural del puente, permitiendo la comparación entre sus pares. Para esto, se han desarrollados diversos índices de condición o salud del puente. Estos índices nos relatan el estado estructural y/o funcional de la estructura considerando el estado en que se encuentran los diversos elementos que componen el

puente. No todos los índices se obtienen de la misma forma o incluyen en su procedimiento los mismos elementos y por lo tanto, existe una gama de índices que cada agencia puede utilizar. En general se puede establecer que existen 4 tipos de índices (Chase et al, 2016), los cuales son:

- Métodos basados en el ratio de condición actual sobre condición nueva.

Utilizados para obtener el valor residual del puente. Se utiliza en California y por AASHTOWARE. Entre sus ventajas se encuentra que realizan una revisión a nivel de elemento y consideran extensión y severidad del daño, por contraparte, sus desventajas es que los riesgos a los usuarios no son considerados y al utilizar costos en su cálculo estos pueden variar demasiado y pueden no ser contrastables.

- Métodos basados en un promedio ponderado

Se considera un método adecuado para gestionar acciones correctivas sobre un puente. Estima la condición de los puentes en función del estado e importancia de sus elementos. Entre sus ventajas es que considera el grado, severidad e importancia de cada elemento y sus desventajas son que no considera la exposición de la estructura al ambiente y no considera la importancia del puente en la red. Este tipo de índice es utilizado por ejemplo en 5.3.2.2

- Método del elemento con peor condición

Procedimiento común en agencias que buscan en elementos claves del puente y por lo tanto, es utilizado para detectar problemas críticos en la estructura. Entre sus ventajas se haya en que es exitoso en su capacidad para evaluar la vulnerabilidad de la estructura frente a eventos externos y a nivel de red sirve para resaltar estructuras con alto riesgo. Por otro lado, sus desventajas es que no entrega una visión completa del puente y es necesario encontrar todos los defectos en la estructura.

- Métodos cualitativos

Son aquellos métodos que no utilizan ponderadores, sino que utilizan categorías como “muy bueno”. Se ocupan principalmente en revisiones generales, aunque no aportan en situaciones de priorización.

Como se mencionó más arriba, cada agencia determina cual es el sistema apropiado para sus objetivos, en este sentido, en la tabla 5.2 se observa que tipo de indicador utilizan algunos países según lo expuesto en (Chase et al, 2016; Hsien-Ke et al, 2017):

Tabla 5.2.2: *Enfoques de obtención de índices de condición estructural por país*

Estados Unidos	Método cualitativo
Taiwan	Método basados en un promedio ponderado
Japón	Método del elemento con peor condición
Reino Unido	Método basados en un promedio ponderado
Sudáfrica	Método basados en un promedio ponderado
Dinamarca	Método basados en un promedio ponderado
Suecia	Método basados en un promedio ponderado
Alemania	Método del elemento con peor condición
California	Basado en el ratio
Australia	Método basados en un promedio ponderado
Austria	Método basados en un promedio ponderado
Finlandia	Método basados en un promedio ponderado

El conocimiento del estado de la red de puentes, también es un elemento que no solo importa a la agencia a cargo, sino que debido al hecho que los puentes son infraestructura de un valor crítico para los habitantes y aquellos que circulan por ellos, es importante que ellos conozcan el estado general de la infraestructura. Los puentes a diferencia del pavimento, donde su estado estructural y funcional se puede percibir con la mirada o circulando por ellos, su estado estructural se encuentra escondido al público que solo ve su estructura superior, sin poder determinar el estado de las cepas, vigas y tableros del puente. En este sentido, en los Estados Unidos la FHWA permite conocer el estado estructural general de todos los puentes bajo su responsabilidad. Esta información se publica al final de cada año calendario, allí la FHWA publica los resultados finales del estado de los puentes de cada estado. En este sentido, se encuentra el resultado general o final obtenido por cada puente (no hay acceso al público del estado detallado de los puentes). La información sobre dicho estado, se encuentra subdividida en los siguientes puntos:

- Condición de puentes por Sistema de Autopistas
- Condición de puentes por Condado
- Condición de los puentes por Clasificación funcional
- Condición de los puentes por Dueño
- Condición de los puentes por Estado de publicación (abierto, cerrado, con restricción de circulación)
- Estado de los puentes por año de construcción
- Costos unitarios por reemplazo de puentes

Tabla 5.2.3: Estado de todos los puentes en cada estado (FHWA)

State	Bridge Counts				Bridge Area (Square Meters)			
	All	Good	Fair	Poor	All	Good	Fair	Poor
ALABAMA	16,130	6,838	8,603	689	9,760,735	3,661,978	5,851,785	246,971
ALASKA	1,592	711	725	155	743,788	298,515	385,915	59,158
ARIZONA	8,294	5,068	3,076	150	5,846,176	3,169,212	2,581,507	95,457
ARKANSAS	12,892	6,816	5,488	588	6,708,589	3,475,609	2,919,170	313,811

Tabla 5.2.4: Estado de puentes en cada estado pertenecientes a la National Highway Systems (FHWA)

State	Bridge Counts				Bridge Area (Square Meters)			
	All	Good	Fair	Poor	All	Good	Fair	Poor
ALABAMA	3,144	1,002	2,100	42	5,126,685	1,394,640	3,631,898	100,147
ALASKA	415	190	202	22	386,176	152,058	209,354	24,564
ARIZONA	3,335	2,149	1,156	30	3,202,091	1,810,710	1,355,016	36,365
ARKANSAS	2,368	1,368	943	57	3,362,565	1,691,648	1,538,333	132,584

Por otro lado, también la FHWA publica información histórica acerca de los puentes de las redes norteamericana. En este sentido, la información al público es:

- Reporte anual de materiales en construcción de puentes nuevos y rehabilitación de existentes
- Puentes por tipo de estructura de su tablero
- Puentes por su superficie de desgaste
- Puentes por año de construcción, año de reconstrucción y tipo de material
- Puentes deficientes por sistema de autopista
- Puentes deficientes por material de la superestructura
- Puentes deficientes por tipo de superestructura
- Puentes de Federal-Aid Highway y Non Federal-Aid Highway system
- Mediciones de desempeño de la movilidad de un puente

Tabla 5.2.5: *Número de puentes Estructuralmente Deficientes (SD) entre todos los puentes (FHWA)*

State	Bridge Counts		Bridge Area (Square Meters)	
	All	SD	All	SD
ALABAMA	16,129	1,200	9,207,383	317,110
ALASKA	1,569	165	725,363	60,815
ARIZONA	8,289	205	5,151,663	119,860
ARKANSAS	12,864	765	6,377,740	422,629

Tabla 5.2.6: *Número de puentes Estructuralmente Deficientes (SD) cada estado pertenecientes a la National Highway Systems (FHWA)*

State	Bridge Counts		Bridge Area (Square Meters)	
	All	SD	All	SD
ALABAMA	3,154	48	4,966,732	104,641
ALASKA	412	24	378,169	25,063
ARIZONA	3,384	44	2,873,904	53,008
ARKANSAS	2,367	71	3,251,471	219,803

Es evidente que una de las primeras tareas antes de gestionar la infraestructura de puentes de una agencia, es recabar la información sobre el inventario y estado de esta red. Esta información es la base sobre la cual se tomarán una serie de decisiones sobre las acciones a tomar y también, es una información muy relevante para poder seleccionar el puente adecuado para la instrumentación. A continuación, se revisarán procedimientos nacionales e internacionales para priorizar puentes y seleccionar en que se puente se instalará un SHM.

5.3. Priorización y Elección de Puentes a Monitorear

Uno de los aspectos a considerar para monitorear puentes, es establecer a que puentes dentro del inventario levantado instalar el sistema de monitoreo. Para comenzar, se debe tener el cuenta cada factor que puede influir en la elección de instrumentar un puente. Estos factores son diversos y va a depender de cada agencia que administre los puentes, cuales considerar y que valor o peso darle a cada aspecto.

A pesar de que la instrumentación de puentes es una técnica que lleva algunas décadas, aun sus proyectos son bastante puntuales y específicos, por lo tanto, la elección del puente se determina por aspectos como el tipo de puente (atirantado, en arco, Gerber, etc.), materialidad, prueba de tecnologías para monitorear, etc. que si bien son aspectos relevantes, no son completamente atingentes a la hora de realizar una elección en una red o en un proyecto importante como una concesión.

Con ese fin, es que se revisaran los aspectos más fundamentales que consideran algunas agencias y estudios a la hora de decidir mantenciones para los puentes de la red, entre estos se pueden mencionar la condición de los puentes, los costos de mantención, la importancia de la estructura para la red, etc.

5.3.1. Criterios de Priorización Internacionales

Los criterios más utilizados en diferentes países del mundo, en especial en Europa para gatillar la reparación o mantención de un puente, se pueden ver en la tabla 5.3.1 encontrada en (Godart y Vassie, 1999) . En esta tabla se logra apreciar que uno de los elementos más relevantes es la importancia de la vía que el puente conecta y el estado del puente, además de los aspectos económicos que implican la realización de la mejora

Tabla 5.3.1: *Criterios de clasificación (Godart y Vassie, 1999)*

País o Estado	Criterio de Priorización
Alemania	Condición de los puentes
	Grado y consecuencias de los daños
	Importancia de las vías
	Ancho del tablero
	Seguridad de tránsito
Dinamarca	Minimización de los costos de mantención
Francia	Condición de los puentes
	Importancia de las vías
	Política
Reino Unido	Costo de vida Completo
	Índice de seguridad
	Política
Noruega	Grado y consecuencia de daños
	Investigación de estrategias alternativas en términos de opciones técnicas y comparación entre el costo de mantenimiento (costos directos e indirectos) y el valor de reemplazo del puente
Finlandia	Índice de reparación (basado en clases de daños de las partes estructurales y de urgencia de reparación de los daños)
Eslovenia	Clasificación de la estructura
	importancia de las vías
	Capacidad de carga
California	Ratio Costo Beneficio

5.3.2. Propuestas de Priorización Nacionales

En Chile, existen propuestas de priorización de puentes que si bien tienen un enfoque de gestión de estos, los revisamos con el fin de ver cuales pueden ser los aspectos a considerar cuando se busquen aquellos puentes idóneos para instrumentar.

5.3.2.1. Diseño de un sistema de gestión de puentes bajo enfoque de priorización de la inversión

En este trabajo (Molina, 2012) se pretendió generar un modelo de sistema de gestión de puentes de acuerdo a un estudio de las distintas experiencias encontradas a nivel mundial. El enfoque dado al sistema, busca acoger criterios de priorización de la inversión para ordenar jerárquicamente las necesidades de conservación de las distintas estructuras. La jerarquización de los puentes, se basa en el establecimiento de un Índice de Priorización (IP), el cual se basa principalmente en dos áreas, por un lado el estado de conservación del puente y su coeficiente (BC), y por el otro, la importancia del puente en la red, englobada en el concepto de Factor de Importancia (FI).

La forma de definir el Índice de Priorización es la siguiente:

$$IP = BC \quad ; si BC < 4 \quad (5.3.1)$$

$$IP = BC - X * FI + 4 \quad ; si BC \geq 4 \quad (5.3.2)$$

donde:

BC : Es la nota del estado de conservación de la estructura.

X : Peso del factor de importancia, se calcula con:

$$X = 2.3^{-2*BC+8} \quad (5.3.3)$$

FI : Peso del factor de importancia, se calcula con:

$$FI = 0.4NT + 0.3VA + 0.15A + 0.15R \quad (5.3.4)$$

NT : Nivel de tránsito

VA : Vías alternativas

A : Ancho

R : Restricción de carga

El valor del IP, se encuentra entre 3 y 11, siendo el primero el caso en que un puente o estructura requiere inmediata mantención o reparación, mientras que 11, es aquella estructura que por su condición e importancia no es urgente. Queda claro al ver la ecuación (5.3.1) que cuando la condición del puente es cuatro o menos, se considera un puente en extremo prioritario, mientras que al tener una mayor nota, este entra en el juego de ver si su importancia en la red acelera o ralentiza acciones para mejorar su estado.

En el caso de la condición del puente (BC), este debe ser obtenido mediante visitas a terreno, en las cuales los ingenieros mediante inspección visual califican al puente por partes, entregando finalmente un valor entre 3 y 7, siendo el primero el caso de mayor urgencia y el último el de mayor espera.

Para el factor de importancia (FI), queda a la vista que son cuatro los factores que afectan su medición. Estos son el tránsito medio diario anual, el ancho del puente calificando si es angosto o satisfactorio, existencia de restricción de carga y la existencia de vías alternativas.

5.3.2.2. Propuesta de un índice integrado para la priorización de mantención en puentes

En este trabajo (Valenzuela et al, 2010) se elabora un Índice Integrado de Puente (IBI), el cual tengo la ventaja de utilizar poca información y que sea simple de utilizar. Dentro de los aspectos que influyen en este IBI se encuentran la condición del puente (BCI), el riesgo hidráulico (HV), el riesgo sísmico (SR) y la importancia estratégica del puente para la red (SI). En este caso, es relevante mencionar que los valores de IBI oscilan entre el 1 y 10, siendo la ecuación que define el valor de IBI la siguiente:

$$IBI = -1.411 + 1.299BCI + 0.754HV + 0.458SR - 0.387SI \tag{5.3.5}$$

Índice de importancia estratégica (SI)

La forma de obtener este índice es con la siguiente ecuación:

$$SI = 0.261EA + 0.206T + 0.193SEE + 0.093W + 0.133L + 0.114R \tag{5.3.6}$$

Donde cada término se obtiene de tablas entregadas en la misma publicación. En estas tablas se ponderan la actividad económica de la zona, el tránsito sobre el puente, la existencia de rutas alternativas, el ancho del puente, presencia de restricción de carga para la circulación de camiones y el largo del puente.

Riesgo Hidráulico de puentes (HV)

Se basa en las características estructurales y geométricas de un puente y como este respondería ante una crecida que pueda dañar una parte o en su totalidad. El efecto se puede definir como la probabilidad de que el flujo de agua dañe la estructura, considerando que la crecida pueda cubrir el tablero.

Riesgo Sísmico (SR)

De forma similar al riesgo hidráulico, el riesgo sísmico se entiende como la probabilidad del puente a fallar debido a un sismo que lo afecte. En este caso, este factor se estima en función del nivel de daño modelado en la estructura.

Concepto de Condición del Puente (BCI)

mediante inspecciones visuales se busca establecer la condición de cada elemento del puente y desde allí obtener una “ nota” que refleja la condición del puente, por lo tanto se puede definir que el BCI expresa el nivel de daño que mantiene el puente. La forma de estimar este parámetro es mediante la siguiente ecuación:

$$BCI = \frac{\sum_{i=1}^n w_i m_i ECI_i}{\sum_{i=1}^n w_i m_i} \tag{5.3.7}$$

donde:

ECI_i : Índice de condición del elemento “i”, que va desde peligroso hasta un estado de Nuevo

w_i : Peso de cada elemento “i” con respecto a toda la estructura.

m_i : factor material de cada elemento. Otorga valores para madera, acero, hormigón reforzado y otros materiales

En la revisión de los tópicos incluidos en la priorización de puentes, es notoria la repetición de algunos elementos claves como la importancia de la vía, el estado estructural del puente y la presencia o no de vías alternativas o competitivas al puente. Esto implica que la decisión sobre que puente instrumentar puede seguir lineamientos que no solo se relacionen con una tipología en particular o del valor patrimonial que representa un puente, sino que debe revisarse cuidadosamente el entorno del puente y esto incluye aspectos ambientales (riesgo hidráulico o volcánicos), sociales, patrimoniales o científicos. Así, se podrían enumerar los siguientes aspectos como situaciones que otorgarían ventaja a un puente para ser portador de un SHM:

1. Existencia de rutas alternativas competitivas al puente
 2. Estado de condición del puente, el cual puede obtenerse mediante el uso de índices basados en inspecciones visuales
 3. Flujo de tránsito sobre el puente
 4. Uso del puente para la actividad económica dominante de la región o por centros de urgencias como ambulancias y bomberos
 5. Número de pistas para la circulación de tránsito sobre el puente
 6. Largo del puente
 7. Tipología de los puentes
- Por otro lado, existen situaciones y casos relativamente excepcionales, donde la instalación de un SHM pudiera ser requerida:
8. Modificaciones a una estructura existente
 9. Monitorear una estructura afectada por trabajos externos
 10. Monitoreo durante una demolición
 11. Estructuras sujetas a movimientos de largo plazo o degradación de materiales
 12. Ciclo de retroalimentación para mejorar los diseños futuros
 13. Evaluación de fatiga
 14. Monitorear una estructura que se construye con nuevas tecnologías
 15. Evaluación de integridad de estructuras después de un sismo, incendio, evento natural como una crecida o un acto humanos como choques o terrorismo

5.4. Análisis de Condición Estructural

En un análisis de condición estructural lo que se busca, es conseguir un modelo de la estructura que la caracterice lo mejor posible. Este proceso comienza luego de seleccionar el puente a instrumentar y tiene dos caminos dependiendo del puente. El primero es el camino que se embarca en los Puentes Existentes, es decir, puentes que ya se han construido y por lo tanto, parte de su vida de servicio ha sido utilizada, mientras que el segundo sendero es en los puentes nuevos, donde existen los planes de construcción.

Esta diferenciación radica en el hecho que los valores de entrada y las fuentes de estos valores varían si provienen de un puente nuevo a un existente. En el caso de los existentes muchas veces no hay planos, no hay historiales, hay carencia de anotaciones sobre mejoramientos y otras, mientras que los puentes nuevos tienen otras preocupaciones como problemas en la construcción, uso de nuevas tecnologías o etc. Así, esta sección se ha dividido en dos.

5.4.1. Puentes Existentes

5.4.1.1. Diseño y Construcción

El primer paso del análisis de condición estructural es la obtención de información de entrada para poder elaborar un modelo computacional que reproduzca el comportamiento que la estructura mantiene cuando se ve afectada a las influencias del ambiente o las cargas producidas por acciones humanas. Debido al hecho que un puente es un activo construido para durar al menos 50 años, muchas de las propiedades con las que fue diseñado y construido, no son representativas de la realidad producto de la afectación que implica su exposición al ambiente.

En este caso, la información necesaria para la caracterización de la estructura viene en tres grandes paquetes. El primero los materiales, las dimensiones geométricas del puente y finalmente las influencias y cargas sobre la estructura.

5.4.1.1.1. Materiales Sobre la recopilación de información acerca de los materiales que conforman el puente, la norma ISO 13822 (ISO, 2010) que establece el procedimiento general de una evaluación a estructuras existentes, menciona lo erróneo de utilizar información de propiedades de los materiales mencionadas en los planos e informes de diseño. Por lo anterior, establece la necesidad de capturar las propiedades actuales de los materiales a través de pruebas de laboratorio a través de toma de muestras.

En este tópico, las pruebas que dominan el escenario son las pruebas no destructivas. En estas pruebas se busca conseguir capturar las propiedades del material sin dañar la estructura, mediante pruebas indirectas. Algunas de estas son la inspección visual, la prueba de cadenas, prueba de eco, métodos ultrasónicas, GPR, conductividad, pruebas de vibración, radiografías, y tantas otras. Se puede encontrar una acabada revisión de estas, más las ventajas y desventajas de cada una de ellas en (Rehman et al, 2016), incluyendo sugerencias para planes de inspección periódicas en función de la severidad de cada tipo de deterioro. También es posible encontrar información acerca de estas pruebas en diversas publicaciones de SAMCO (2006) y FHWA (Aktan et al, 2002).

Comprendiendo la necesidad de constantemente recolectar información de los puentes, el programa Long-Term Bridge Performance (LTBP) ha establecido una serie de protocolos sobre la adquisición, manejo y almacenamiento de la información (Hooks et al, 2016). En estos protocolos, se pueden encontrar las herramientas necesarias, el procedimiento para realizar dichas pruebas incluyendo una serie de pruebas sobre los puentes.

5.4.1.1.2. Dimensiones El caso de las dimensiones no varía en gran medida a diferencia de lo ocurrido en los materiales. Sin embargo, existen procesos como el creep y la corrosión que producen un cambio en la geometría de la estructura. En este sentido, a norma ISO 13822 (ISO, 2010) menciona capturar esta información de sus planos originales a menos que exista incerteza. Esto último, es muy importante, ya que, frente a mantenciones importantes o mejoramientos de los puentes, esta geometría puede verse alterada. En estos casos, se pueden utilizar tecnologías como fotogrametría, inspecciones con topografía, GPS, Lidar, etc.

Un elemento diferente en este proceso de obtener las dimensiones de la estructura, supone la inclusión de los deterioros en los elementos. Es menester incluir estos puntos o su efecto en las dimensiones correctas.

5.4.1.1.3. Acciones e Influencias sobre la estructura Las acciones son cargas y desplazamientos que afectan a la estructura y que son dependiente de esta misma y del uso al que se encuentra expuesta. Mientras las dimensiones nos indican como es la estructura, los materiales de qué está elaborada, las acciones nos presentan aquellos elementos que ponen a prueba la estructura. Las acciones son muy diversas, ya que dependen del tipo, de su fuente y el carácter de esta. En SAMCO (2006), se clasificaron estas según algunos parámetros:

Tabla 5.4.1: *Tipos de carga y la dependencia de dichas cargas (SAMCO, 2006)*

Cargas estáticas		Cargas Dinámicas	
Cargas que dependen de la estructura	Peso propio, Fuerzas de soporte, Cambios en estribos, Creep, Cargas de construcción y Restricciones	Cargas que dependen del uso	Cargas de tránsito, Cargas de máquinas, Fuerzas de freno y centrífugas, Cargas de excitación humana
Cargas que dependen del uso	Tránsito y transporte de cargas, Materiales de construcción, Cargas de grúa y Tuberías en servicio	Cargas del medio ambientales	Viento, Olas, Sismos y Avalanchas
Cargas ambientales	Presión del suelo y rocas, Presión de fluidos estáticos, Presión de poros Nieve y hielo Corrosión Humedad	Cargas del medio técnico	Vibraciones, Colisión de vehículos y Cargas de explosión

1. Carácter de las Acciones

Tabla 5.4.2: *Carácter de las Actions (SAMCO, 2006)*

Cargas Muertas	Cargas Vivas
Tipos de Actions estacionarias, donde el cambio que sufren en el tiempo es pequeño en comparación a su promedio. Como ejemplo se pueden mencionar el peso propio, corrosión, asentamiento.	Actions donde no hay constancia y los cambios espaciales y temporales son esenciales y frecuentes. Como se ejemplo se pueden mencionar el viento, la temperatura, nieve u otros.

2. Carga y efecto de las cargas

Los efectos son cantidades estocásticas en cuanto a su distribución temporal y espacial. Por lo tanto, se vuelve importante conocer y describir la magnitud y carácter de estas mediante análisis estadístico.

Muchas veces la carga en sí, solo es de interés si el efecto como carga local es importante, por ejemplo, el viento al generar presión sobre pequeños componentes de fachada de la estructura.

Otra clasificación es la que se puede encontrar en la tesis de magister de Mayorga (2016), quien citando a Bachmann y Ammann, presenta el siguiente esquema:

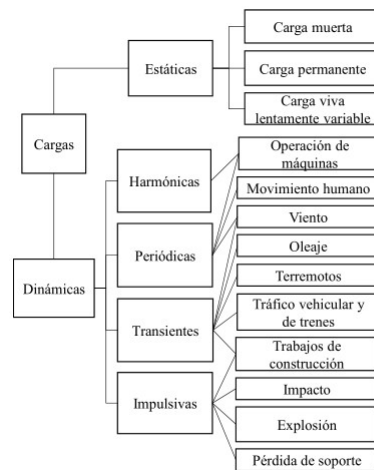


Figura 5.4.1: *Cargas en ingeniería civil (Bachmann y Ammann, 1987)*

Determinación de Acciones

- Patrón de Monitoreo: Las acciones deberán ser medidas de acuerdo a su frecuencia, dimensión y su distribución en el espacio y tiempo. El monitoreo puede ser continuo, cíclico, dependiente de los eventos o dependiente de la carga. En general para cargas lentas un monitoreo a intervalos regulares bastará, no así en casos donde se requiera situaciones precisas (ej: exceso de carga sobre un puente), en ellas se pueden programar gatilladores de medición.

- **Cargas de Viento:** La complejidad de este fenómeno y el hecho que solo frente a ciertas situaciones esta carga genera problemas, resulta en una profunda dificultad para predecir cargas de seguridad en el estado de diseño. Sin embargo, con análisis de datos de largo plazo es posible calibrar modelos para ubicaciones particulares.
- **Cargas de Tránsito:** Las cargas de tránsito poseen componentes dinámicos y estáticos, además poseen efectos locales y globales sobre las deformaciones de los componentes de un puente. Las cargas de ejes y sus configuraciones pueden ser medidas mediante el uso de sistemas WIM, sin embargo, se requiere mucho cuidado ya que las vibraciones en el propio puente dificultan las mediciones volviéndolas menos exactas.
- **Cargas por desplazamiento:** asentamientos y elevaciones dependen de los cambios en la reacción del suelo. La determinación de estas cargas se realiza mediante modelos basados en mediciones de desplazamiento.
- **Impactos y colisiones; vibraciones:** Este tipo de carga no puede ser separada de la estructura y por lo tanto se requiere modelos aptos para su determinación.
- **Cargas de Temperatura:** Los campos de temperatura estacionarios y transitorios dentro de una estructura se pueden determinar utilizando procedimientos computacionales si los parámetros y dimensiones del material térmico se conocen. Sin embargo, es imperativo conocer las condiciones iniciales para determinar la progresión temporal.

5.4.1.1.4. Propiedades de la Estructura En algunos casos, donde luego de obtener la información de materiales, aspectos geométricos y cargas sobre la estructura, aún se mantiene un velo de baja confianza en el posible modelo computacional a generar, porque existe daño que es difícil considerar en un posible modelo, ha existido un cambio de uso en el puente al que tenía por diseño, diferencias en la estructura con sus planos y/o se ha evidenciado un comportamiento la estructura o parte de esta diferente al asumido durante su diseño, es recomendable realizar pruebas que permitan un mayor conocimiento sobre la estructura (ISO, 2010). Para ello, existen las pruebas de carga y las pruebas no destructivas dinámicas y estáticas, que buscan cumplir algunos de estos objetivos (ISO, 2010; Li-Kuan et al, 2013):

- Predecir la resistencia última o para establecer las propiedades de servicialidad de la estructura
- Para examinar el comportamiento de estructuras existentes o componentes estructurales
- Para conocer parámetros del sistema usados en verificación de análisis como el periodo fundamental, el amortiguamiento, frecuencias naturales, etc.
- Detectar, localizar, cuantificar el grado de daños y estimar la vida útil del puente o de cierto componente estructural

En el caso de las pruebas de carga, AASHTO (2011) establece dos tipos de prueba de carga, la primera es la prueba de Diagnóstico en la que se determinan características del puente y en especial se calibran, validan y ajustan las predicciones de los modelos estructurales analíticos. El otro tipo de prueba es la prueba de Comprobación, en esta se comprueba la capacidad del puente para soportar las cargas dinámicas mayoradas. Esta es especial para puentes dañados o antiguos.



Figura 5.4.2: Prueba de carga efectuada en el puente Cau Cau en la ciudad de Valdivia (DICTUC)

Junto a ello se puede dividir en pruebas dinámicas o estáticas, las dinámicas son cargas que varían en el tiempo mediante el uso de cargas móviles, tales como el viento o el paso de distintos vehículos por el puente (tránsito normal). Esto para conseguir aspectos propios del puente como su amortiguamiento, frecuencia natural, evaluaciones de fatiga, etc. mientras que las pruebas estáticas son con cargas estacionarias con el fin de evitar las vibraciones del puente.

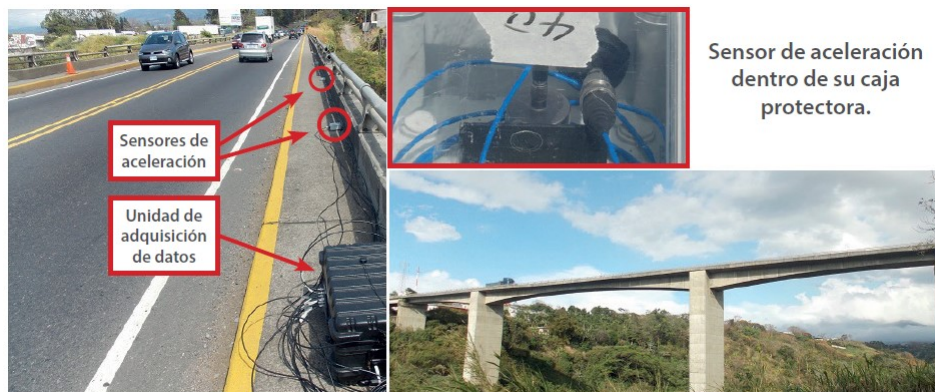


Figura 5.4.3: Esquema de monitoreo Ocasional con prueba dinámica (LanammeUCR).

5.4.1.1.5. Identificación y Modelación Estructural La mejor forma de apoyar la toma de decisiones sobre la gestión de puentes, es el procedimiento de la identificación estructural. Este procedimiento, lo que busca es caracterizar la estructura en un modelo computacional que incorpore todas las características del puente. Este proceso, ha sido resumido en distintas publicaciones (Aktan et al, 2002; SAMCO, 2006), donde sus principales pasos son los siguientes:

- Colección de información, conceptualización, y modelamiento preliminar.
 - Diseño base experimental, basado en estudios experimentales y preliminares.
 - Pruebas de carga controladas y pruebas modales a escala completa para identificar, verificar y evaluar el comportamiento local y global.
 - Procesamiento y condicionamiento de los resultados experimentales para mitigar cualquier error.
 - Calibración progresiva de los modelos analíticos a través de ajuste de propiedades de materiales, de borde y continuidad.
 - Utilización del modelo calibrado para la toma de decisiones.

Un punto muy importante en este apartado, es el nivel de refinamiento que puede necesitarse en un modelo. En este sentido, los modelos son basados en elementos finitos (Aktan et al, 2002; SAMCO, 2006; ISO, 2010) y pueden ir desde modelos muy simplificados, donde solo utilizan relaciones determinísticas, hasta modelos en exceso refinados, donde todos los valores de entrada se encuentran asociados a funciones de probabilidad.

Este escalafón de detalles en los modelos, puede encontrarse en *Guideline for the Assessment of Existing Structures* (SAMCO, 2006). Esta guía propone niveles de evaluación, pero estos no son imperativos y las condiciones donde comienza y termina un nivel son flexibles. Por otro lado, los niveles se adhieren aproximadamente a los establecidos en el Reino Unido para la evaluación de puentes de carretera.

Nivel 0, evaluación cualitativa no formal

Evaluación basada en la experiencia del ingeniero. Principalmente utilizada como una evaluación previa. Es capaz de evaluar deterioro visual, corrosión o signos de daño.

Nivel 1, Medición basado en la determinación del efecto de carga

Evaluación de la servicialidad a través de la medición de valor de desempeño y su comparación con valores umbrales, que pueden venir de códigos o guías.

Nivel 2, método de los factores parciales basado en revisión de documentos

Revisión de la capacidad de carga y servicialidad usando información del diseño, construcción y documentos de inspección. El análisis estructural, es realizado mediante modelos simplificados y la evaluación de seguridad y servicialidad es mediante factores parciales.

Nivel 3, método de los factores parciales, basado en investigación complementaria

Evaluación de la capacidad de carga y servicialidad usando información de investigaciones detalladas no destructivas. El análisis estructural es llevado a cabo usando métodos refinados y modelos detallados, y la evaluación de seguridad y servicialidad es mediante factores parciales.

Nivel 4, Confiabilidad objetivo modificada, modificación de factores parciales

Verificación de la capacidad de carga con factores de seguridad parciales modificados. En este caso las propiedades estructurales pueden afectar la medición de seguridad. Prácticamente, modificación de los factores parciales es llevada a cabo por grupos de estructuras con comportamiento similar.

Nivel 5, Evaluación completamente probabilística

Evaluación que toma en cuenta todas las variables básicas con sus propiedades estadísticas. El análisis de la confiabilidad estructural es utilizado directamente en lugar de los factores parciales. Las incertezas son modeladas probabilísticamente.

Tabla 5.4.3: Objetivos y Metodología según el nivel elegido (SAMCO, 2006)

Classes of Assessment	Objectives	Methodology		
NON-FORMAL ASSESSMENT (Level 0)	qualitative condition assessment	Visual Inspections Experience Based Graduation		
MEASUREMENT-BASED ASSESSMENT (Level 1)	quantitative serviceability control and assessment	Determination of Load Effects		Verification
		Measurement of Performance Values under Service Loading		Comparison with Threshold Values
MODEL-BASED ASSESSMENT	quantitative safety and serviceability assessment	Determination of Load Effects		Verification
		Data Acquisition	Structural Analysis	
		Document Review	Basic Structural Models	Deterministic (Permissible Stress) -- only exceptional --
		Inspections		
		Monitoring of Static Load Effects and Deterioration (Deformations, Stresses, Cracks, Corrosion etc.)	Refined Models (FEM, Nonlinear Analysis)	Semi-Probabilistic (Partial Safety Factors)
Monitoring of Live Load and Environmental Influences				
(Level 4)	Testing and Measurement of Material Properties and Dimensions	Adaptive FE – Models	Probabilistic Approximation Methods (FORM, SORM)	
(Level 5)	Monitoring of Dynamic Load Effects (Eigntrequencies, Mode Shapes)	Stochastic FE – Models	Probabilistic Simulation Methods (MCS, LHC)	

5.4.2. Puentes Nuevos

Se les llamó puentes a nuevos a aquellos puentes que aun no han sido construidos y que se encuentran en una fase de diseño. En estos casos, el proceso de identificación estructural, es similar a los puentes exis-

tentes, aunque, tienen la ventaja que las propiedades de los materiales, su geometría, el aspecto asociado a la mecánica de suelos y el proceso de caracterizar las cargas sobre este, se encuentran determinados en su proceso de diseño, sin embargo, debe existir la preocupación que en la fase de construcción se dejen registrados cualquier diferencia con el diseño, permitiendo con esto actualizar lo realizado en el modelo computacional.

5.5. Estados Límites y Respuestas Críticas

Un puente es una estructura especialmente crítica en la red vial de una región o país, porque, consigue comunicar y salvar accidentes geográficos que sin estos, las posibilidades de traslado disminuyen volviendo más costoso y lento el transitar. Sumado a su importancia, estas estructuras se encuentran afectas a una importante cantidad de riesgos debido a situaciones como una crecida de río que fluya bajo este, su estado de directa afectación de las variables meteorológicas, exceso de cargas y repeticiones de vehículos que circulan sobre estos, sismos de gran magnitud, etc. implicando que estas estructuras constantemente se encuentren afectadas por factores externos a ellas. Estas situaciones pueden generar daños en la estructura, pero no todos los daños tienen el mismo resultado, algunos dejan como resultado pérdidas en la servicialidad de un puente, por ejemplo, limitando su capacidad de carga ante la necesidad de restricciones al peso de los vehículos que circulan por este, también, pueden resultar en aumentos de costos de mantención producto del debilitamiento de ciertos elementos o pueden disminuir la vida de servicio de una estructura, generando un adelanto en los costos de reconstrucción de estructuras de una red, mientras que otros resultados, pueden ser el colapso del puente o una parte de este, el asentamiento de una fundación u otro resultado que implique la falta de seguridad y estabilidad de la estructura.

Estas posibilidades de daños, han sido considerados en el concepto denominado Estados Límites. Estos estados límites se pueden definir como la frontera entre la situación en que un puente o un elemento de este, deja o no de cumplir el desempeño para el cual ha sido diseñado. En este sentido, AASHTO en su especificaciones de diseño para puentes LRFD (AASHTO, 2017b) ha establecido la existencia de cinco estados límites de diseño:

- De servicio, donde este debe ser considerado como restricciones de esfuerzos, deformaciones y ancho de grietas bajo condiciones de servicio regular
- De fractura y fatiga, donde el de fractura obedece a requisitos impuestos en las especificaciones de materiales de AASHTO, mientras, que el de fatiga atiende a restricciones de esfuerzo producto del paso de un camión sobre el puente un número determinado de veces
- De resistencia, donde en el diseño se debe asegurar que la estructura o parte de esta no colapsará frente a una combinación de cargas
- De eventos extremos, que es obtener la constancia de la sobrevivencia estructural del puente luego de un sismo importante, crecida de un río, choque de barcos, hielo o socavación

De forma análoga, en Europa, al considerar los estados límites de AASHTO, los han dividido en cuatro grupos principales, donde además se incluye el desempeño que debe sostener una estructura según el tamaño de la situación que la afecta representado en un probable periodo de retorno (Akan et al, 2002):

Tabla 5.5.1: Desempeño de la estructura y eventos límites (Akan et al, 2002)

	Utility and Functionality	Serviceability and Durability	Safety and Stability of Failure	Safety at Conditional Limit States
Limit events	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Environmental, social impact ▪ Initial cost ▪ Life-cycle cost ▪ Operational capacity and safety ▪ Feasibility of: <ul style="list-style-type: none"> ▫ Construction ▫ Inspection ▫ Maintenance ▪ Aesthetics 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vibrations ▪ Deformations ▪ Deterioration ▪ Damage ▪ Durability 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excessive movements ▪ Settlements ▪ Material failure ▪ Stability failure ▪ Incomplete (premature) collapse mechanism(s) ▪ Undesirable failure mode(s), eg, progressive collapse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Natural hazards associated with very long return periods (eg, New Madrid EQ) ▪ Catastrophic accidents, fire ▪ Cascading of accidents ▪ Terrorism ▪ War
Return	Events with 0–25 year Return Period (RP)	Conditional events with 25–100 yr RP	250–500 year RP such as Major CA quakes)	Events with 2500–5000 yr RP
Goal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No service disruption 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Momentary service disruption 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Minimization of casualties ▪ Quick recovery 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protection of escape routes ▪ Minimization of casualties

Al revisar ambas fuentes, estas atienden a dos tipos de posibles fallas, una asociada a la pérdida de servicialidad de la estructura y la otra a la pérdida de estabilidad del puente. Esto es muy relevante para el diseño del SHM que quiera instalarse y operar en un puente, ya que, este deberá encontrarse asociado a los estados límites que la agencia encargada del puente requiera cumplir. Por ejemplo, si un puente es la única forma en que se puede comunicar una minera con la ciudad, es probable que el estado límite principal a cumplir, sea la no pérdida de capacidad de carga del puente, es decir, en este caso lo buscado es que no se genere una pérdida de servicialidad en él, mientras que, en un puente con poco tránsito es probable que el principal desempeño buscado, sea que no ocurra el colapso de este.

El problema a solucionar entonces, es establecer las métricas y umbrales necesarios para definir que una estructura o parte de esta no ha superado alguno de estos límites. En algunos casos, esto puede ser muy sencillo, ya que, basta con definir umbrales, por ejemplo, la rotación de una cepa, el nivel de socavación, el ancho de una grieta, sin embargo, algunos eventos generan daños, donde revisar este límite es más complicado, por ejemplo los efectos de cargas muy altas de forma repetida, el choque de un barco o vehículo en una cepa o pila, o en el caso de un sismo de alta magnitud. En estos casos, no existe una medición directa que nos permita conocer el daño sufrido en la estructura y con esto chequear el cumplimiento del límite establecido.

Es por lo anterior, que en muchos casos la unión y contraste de métricas obtenidas de distintos sensores es lo que permite determinar el estado posterior de la estructura luego de un evento. En este sentido, para unir estas métricas se han utilizado índices o indicadores de desempeño donde, (Zanini et al, 2019) dividió los indicadores de desempeño en dos áreas principales, por un lado los indicadores técnicos de desempeño operacionales, los cuales son los utilizados a nivel mundial, ya que utilizan las inspecciones visuales realizadas al puente para definir un estado global del puente. Estos están basados en la calificación de estado de cada elemento del puente (de forma subjetiva) y luego ya sea través de una suma ponderada o la consideración del peor elemento, se define un estado del puente similar a lo utilizado en (Valenzuela et al, 2010; Molina, 2012) para incluirlo en la priorización de una estructura. De forma paralela están los indicadores de desempeño de investigación, los cuales tienden a ser expuestos en proyectos académicos o en casos donde fue posible la instalación de un SHM. En estos casos, la evaluación de cada elemento se realiza de forma objetiva a través de la medición de sensores que permitan modelar la probabilidad de falla de cada elemento (confiabilidad estructural) y desde allí obtener la probabilidad de falla de la estructura completa, y además, estos métodos pueden incluir factores como probabilidades de ocurrencia de crecidas, sismos e incorporar otras consideraciones. Dado que a medida que se recojan valores de los sensores en algunos elementos, estas funciones se adecuan a lo que muestra el sensor y se termina actualizando la confiabilidad de la estructura, este indicador ha sido utilizado en estudios como (Catbas, 2008; Orcesi et al, 2010) donde mediante la obtención de confiabilidad establecen límites de mantención y el estado del puente. El indicador de confiabilidad no es el único indicador de investigación, sino que existen otros como resiliencia, vulnerabilidad, robustez, redundancia, etc. sin embargo, el de confiabilidad es el más utilizado, el cual incluso ya tiene un amplio uso en las áreas de diseño (Ghosn et al, 2016).

Sobre los indicadores de desempeño utilizados en Chile, (Valenzuela y Peña-Frits, 2019) en función de lo determinado en el proyecto TU COST 1406 y mediante el análisis de las principales patologías observadas en los puentes nacionales, se menciona que sobre el comportamiento dinámico de la estructura se deben correlacionar ciertos elementos con los indicadores de desempeño. Estos elementos pueden ser nivel de vibración, profundidad de socavación, zona de aceleración sísmica, tipo de suelo y nivel de importancia del puente.

Para conseguir estos indicadores de desempeño sobre la condición estructural del puente, (SAMCO, 2006) nombra los siguientes aspectos a evaluar:

- medición de deformaciones, deflexiones, curvaturas, inclinación, las cuales pueden resultar en conclusiones acerca de asentamientos de fundaciones, cambios en la rigidez global, pérdida del efecto de viga continua, etc.
- Observaciones de frecuencias de resonancia seleccionadas (cambios en la rigidez)
- Monitoreo selectivo de cambios en los modos de vibrar dominantes

Pudiendo estos ser acompañados de monitoreos de elementos estructurales puntuales:

- Evaluación de largo y ancho de grietas, observación de partes estructurales con incremento en el riesgo de agrietamiento

- Deformaciones en puntos con concentración de esfuerzos
- Deflexión estática y vibraciones causadas por desplazamiento de componentes estructurales
- Asentamientos de fundaciones
- Deformaciones de tendones preesforzados

5.6. Definición de Variables Físicas

El monitoreo de una estructura se basa en la captación de las magnitudes de ciertas variables como temperatura, aceleraciones, rotaciones, deformaciones, etc. Estas variables pueden otorgar una relación con el nivel de daño que ha sufrido una estructura, así como también esta relación puede ser bastante indirecta. La decisión sobre que variables físicas captar, no es una decisión fácil, ya que, en el ideal podría capturarse una serie de variables en cada elemento del puente, sin embargo, esto no es factible ni eficiente, debido a su costo y el proceso de gestión de estos registros.

En algunos casos, como en socavación puede existir una relación directa entre la profundidad de socavación y el estado de la pila, pero en otras situaciones, donde se busca encontrar el estado estructural del puente, las aceleraciones pueden entregar una pista de su estado a través de las frecuencias naturales de la estructura o de sus modos de vibrar.

En este punto, quien diseña el SHM deberá seleccionar que variables deben registrarse y en que elementos del puente registrarla, ya que, eso determinará los sensores, el régimen de monitoreo, costos, y para seleccionarlas deberá considerar los indicadores de desempeño que se utilizarán en el monitoreo y evaluación de la estructura, los riesgos a los que la estructura se encuentra amenazada, el estado de la estructura y el tratamiento necesario para capturar cada variable y transformar esos datos en bruto en información que respalde las decisiones tomadas sobre el puente.

5.7. Monitoreo de la Estructura

Por mucho tiempo la única forma de conocer el estado de los puentes era mediante el uso de inspecciones visuales, sin embargo, estas carecen de ciertas características que permitan un conocimiento completo del estado del puente. En muchos casos el daño se genera en zonas donde lograr observarlo es complicado y peligroso o este se genera de forma paulatina, tal que, en el momento en que es posible apreciarlo su nivel es extremo. Aún más, este tipo de monitoreo incluye una parte subjetiva, ya que depende de la experiencia y los criterios del profesional que la esté llevando a cabo. De hecho en 2001 la FHWA condujo un estudio el cual determinó que el 56 % de los puentes de vanos tamaño mediano y corto, se les otorgó una condición mediante inspección visual en promedio incorrecta (Phares et al, 2000).

Dado todo lo anterior, es evidente que no todos los puentes pueden monitorearse solo mediante el uso de inspecciones visuales, sino que deben buscarse métodos que permitan un análisis objetivo del estado

del puente, el cual permita conocer el daño, su magnitud y ubicación. Todo con el fin de volver a estas estructuras más seguras y duraderas. Con el paso del tiempo distintas modalidades han aparecido en la búsqueda de conseguir el estado de un puente, entre ellas se pueden mencionar el Monitoreo Continuo, el Monitoreo Puntual (Ocasional o fuera de línea) y el Monitoreo de Salud Estructural.

5.7.1. Monitoreo Continuo

El tipo de monitoreo continuo, se basa en instalar sensores en la estructura del puente y mantenerlos allí de forma permanente, intentando que no varíe su ubicación y por un periodo de tiempo muy prolongado. En algunos casos se incluye dentro de este tipo los sensores que son embebidos dentro de la materialidad del puente y por ende reutilizar los sensores es impracticable. Para conseguir un monitoreo continuo se deben llevar a cabo tres etapas

1. Evaluación preliminar, construcción y calibración del modelo de los elementos finitos del puente

Tal como lo refleja su nombre, esta fase preliminar se basa en conocer mediante el uso de modelos de elementos finitos los puntos críticos del puente y con ellos las partes del puente que deben ser monitoreadas. En este criterio juegan un rol la materialidad, el tipo de puente y las condiciones a las que se encuentra afectado como la humedad, vientos, tránsito pesado, etc. Lo anterior permite que al identificar las secciones críticas, se consiga determinar los sensores adecuados a instalar y cualquier infraestructura necesaria para el correcto funcionamiento de estos.

2. Instalación de los instrumentos de medición y sistema de adquisición de datos

Este no es solo el paso de instalar cualquiera de los sensores, sino que también en esta etapa es fundamental conseguir la instalación considerando siempre la factibilidad y las futuras necesidades de mantenimiento o sustitución de los sensores.

3. Procesamiento, interpretación y administración de los datos

Dada la cantidad de sensores, el tipo de estos y su frecuencia de muestreo es muy probable que la cantidad de información que se produzca sea inmensa, es por ello que es necesario generar metodologías de interpretación y almacenamiento que vuelvan más eficiente este proceso.

Es muy importante comprender que el monitoreo continuo requiere que se combine una serie de mediciones locales con mediciones globales de la estructura. Los locales se basan en la medición de deformaciones, esfuerzos, rotaciones, deflexiones, etc. que sufren ciertos elementos del puente, en especial aquellos que son de vital importancia en la salud del puente, mientras que los globales determinan valores del estado de la estructura mediante el procesamiento de los análisis modales y con ello, también llevar a cabo una actualización del modelo de elementos finitos.

Queda a la vista entonces, que en caso de las mediciones locales para un monitoreo continuo es necesario solo establecer un valor umbral desde el cual comenzar a considerar los datos, no así los valores globales (vibraciones) los cuales si requieren un procesamiento que permita transformar toda esa información generada en información útil.

5.7.2. Monitoreo Puntual

Este tipo de monitoreo está principalmente enfocado en puentes o estructuras que hayan sufrido un daño, ya sea por un sismo o una mala construcción o para puentes en que después de un tiempo en operación son refaccionados, en este caso muchas veces se le aumenta la cantidad de pistas lo que genera que el puente no se desempeñe para lo que fue diseñado. Los tipos de pruebas y los posibles resultados de estas, ya fueron descritos en el apartado 5.4.1.1.4.

Este tipo de monitoreo es muy común porque permite la obtención de una “fotografía” objetiva del estado estructural del puente, sin la complicación y el costo del uso de sensores continuamente instalado y su posterior gestión de información.

5.7.3. Monitoreo de Salud Estructural

El monitoreo de salud estructural o SHM por sus siglas en inglés, es un sistema que busca proporcionar a la estructura funciones semejantes a las del mundo biológico, en especial lo que es detección, procesamiento de la información y reacción.



Figura 5.7.1: Esquema de funcionamiento de un SHM (Instituto Mexicano de Transporte).

Tal como se ve en la imagen superior, lo primero para lograr desarrollar un SHM, es instalar instrumentación en el puente la cual entregará información crítica para conocer el real estado del puente, luego un sistema de adquisición de datos toma estos resultados los que son enviados a un “cerebro” de la estructura que permite filtrar, procesar, sintetizar y analizar la información recolectada, trabajo que será ejecutado por una computadora (Martinez et al, 2016)

Es más según (Comisu et al, 2017), los sistemas de monitoreo permanente logran reducir los costos de inspección en un 25 %, costos de tránsito en un 30 % y reducir en un 10 % el costo de ciclo de vida de un puente. En el caso que se quiera confeccionar un SHM, se requiere un paradigma de reconocimiento que consta de cuatro partes (Sohn et al, 2004):

- Evaluación operacional

Debe identificarse el tipo de daño que se dese monitorear, ya sea una parte especial como las pilas por socavación o una forma global como las vibraciones del puente. Es importante que en esta parte se defina la información a recopilar.

- Adquisición, integración y discriminación de datos

Se debe seleccionar el tipo, la cantidad y la ubicación de los sensores, además debe generarse la metodología de toma de datos.

- Extracción de características y condensación de información

Aquí se identifican los patrones de daño, el procesamiento de señales y la identificación de parámetros del modelo dinámico.

- Desarrollo de modelo estadístico para la discriminación de patrones.

se busca determinar el modelo estadístico adecuado y la selección del parámetro más sensible al tipo de daño que se busca.

5.8. Evaluación Económica

Ciertamente, al igual que en proyectos de diversa índole, este debe superar la barrera de lo económico. Se debe comprender que la instalación de un SHM y el monitoreo de los puentes es una inversión que tiene sus costos pero a la vez puede significar importantes ahorros para los entes encargados de estas estructuras.

Muestra de los posibles ahorros que implica la instalación de un SHM en los puentes de una red, es lo expuesto por Inaudi (2009), donde establece la distinción entre puentes nuevos y existentes en caso de ser instrumentados. En el caso de los puentes nuevos, se menciona que la instalación y la configuración de los sensores es alrededor del 0,5 % al 3 % del costo total de construcción, más un 5 % a 20 % del costo de instalación al año por motivos de la gestión del SHM, lo que resulta en un 2 % a 5 % del costo total de construcción en los 10 primeros años. Por supuesto que a medida que aumenta el tamaño del puente, dicho costo total como porcentaje del costo de construcción comienza a decrecer. Los ahorros en estos casos, se basan en el hecho que un SHM en un puente nuevo, puede detectar problemas generados por defectos en la construcción lo que implica una serie de acciones de mantenimiento para corregir esta situación, las cuales en la vida de servicio del puente pueden llegar a ser cercanos al 30 % del costo de construcción. Este argumento, se basa en que al detectarse estos problemas el dueño del puente puede hacer uso de garantías incluidas en el contrato de construcción.

En el caso de los puentes existentes que muchas veces ya han comenzado a definirse como deficientes, el autor menciona que debido a la falta de procedimientos objetivos como un SHM o una prueba de carga, la definición de si un puente requiere o no de un reemplazo, tiende a ir en el sentido más conservador, lo cual significa que en general que los puentes se califican subestimando su estado estructural. Desde este punto de vista, Inaudi, establece que si un SHM es instalado en cada puente clasificado como en estado

de reemplazo y se realizan las pruebas objetivas, de forma conservadora, se podría conseguir que un 60 % debe reemplazarse, un 20 % se encuentra en mucho mejor estado y no necesita mantenimiento y un 20 % de los puentes requiere actividades de rehabilitación, pudiendo realizarse el siguiente cálculo:

- Se requiere un presupuesto del 100 % para el reemplazo de todos los puentes considerados deficientes
- No se genera gasto en aquellos que se encuentran en buen estado
- La instalación y gestión de los SHM cuestan un 3 % del presupuesto de reemplazo (por reconstrucción)
- La rehabilitación se considera de un 30 % del costo total de reconstrucción y al aplicarse en el 20 % de los puentes, implica un 6 % del presupuesto total
- En los puentes que requieren reemplazo, esto implica un gasto del 60 % del presupuesto

Al considerar todos estos puntos, se obtiene que el instalar y operar SHM en estos puentes, rehabilitación y reconstrucción de solo aquellos que lo necesitan, solo implica un 69 % del presupuesto total, aun cuando este cálculo es realizado de forma conservadora. Análisis similar es el realizado por Thomson (Thomson, 2013) , el cual comenzando con el argumento que muchas veces el estado estructural de los puentes es subestimado ante la falta de pruebas objetivas y que al instalarse estos SHM se puede conseguir un rédito económico al conseguir retrasar la inversión de reemplazo. Esto se debe a que el endeudamiento anual menos la tasa de inflación para incluso estructuras pequeñas y medianas es mucho menor al costo de un SHM. Thomson además menciona que este rédito es mucho mayor en caso de puentes existentes y cercanos al fin de su vida útil y no tanto en puentes nuevos, lo cual es semejante a los expuesto por Inaudi.

Un caso más realista es lo expuesto por Dalia, donde se compara el costo en el ciclo de vida del famoso puente I-35 W ST. en los Estados Unidos, entre la situación sin SHM y con SHM para un largo de vida de 40 y 65 años respectivamente. En este caso, luego de llevar a cabo la comparación entre los costos y los beneficios, se obtiene que la razón entre los beneficios y los costos es más de 17,5 % para un puente con SHM en comparación a uno sin SHM (Dalia et al, 2018).

Claro está que para conseguir todos estos réditos económicos un paso muy relevante es que la instrumentación instalada en un SHM sea solamente aquella necesaria. Instrumentos que no aporten a conseguir información relevante para definir el estado y desempeño del puente o de uno de sus elementos, solo estarán generando gasto en la instalación y en la gestión de la información recabada. Además, tal como se observa en las publicaciones mencionadas, los réditos económicos conseguidos a través del monitoreo de una estructura, por lo general, vienen a través de ahorros en gastos futuros o en formatos de beneficios, lo cual implica que no generan un ingreso directo lo cual podría desincentivar o disuadir a los gestores o dueños de estas estructuras, pero que sí sostendrá beneficios en el largo plazo.

En conclusión, se puede mencionar que siempre es necesario realizar un análisis económico para sostener la inversión de instalación de un SHM en uno o varios puentes. En general, el costo de un SHM

puede estar entre el 3% al 5% del costo de construcción lo cual es un costo importante, al igual que los réditos obtenidos a través de su instalación y análisis. Si bien estos beneficios son importantes, siempre es importante recordar y dejar marcado que estos beneficios tienen un carácter largoplacista, ya que, se generan en la vida de servicio del puente.

5.9. Sensorización

Para conseguir un monitoreo del puente, es necesario encontrar la instrumentación adecuada. Para ello se deben considerar una gran cantidad de factores, entre ellos el costo, la información que proporcionan, la vida útil, resolución, repuestos, las mantenciones y cuidados, el lugar y la factibilidad de instalación y otros aspectos.

En el Anexo D, se encuentran los tipos de sensores englobados en el área de monitoreo, ya sea de cargas y acciones ambientales, respuestas globales de la estructura o respuestas locales.

5.9.1. Selección de Sensores

Los sensores a instalar en una estructura, dependen de las variables físicas en que los dueños del puente se vean interesados. Si por ejemplo, existe el deseo de conocer los valores máximos de socavación que ocurren en cada crecida, es probable que el sistema del anillo deslizante sea el más adecuado, mientras que si el interés se encuentra asociado a descubrir como esta socavación varía en el tiempo un sonar o GPR pueden ser la mejor solución.

Incluyendo los deseos, otros aspectos deben ser considerados cuando se define los sensores necesarios para una estructura. En este sentido, (Aktan et al, 2002) estableció que los requisitos para la selección de sensores se dividen según requisitos técnicos, límites ambientales y consideraciones económicas. Los requisitos técnicos se enfocan en como se desempeña el sensor bajo situaciones de trabajo normales, los de límites ambientales según su capacidad para desempeñarse correctamente en un ambiente que fluctúa (especialmente importante es la seguridad que los equipos no se verán largamente afectados por tormentas eléctricas) y las consideraciones económicas más asociadas a la eficiencia en el gasto. Claro está que todos estos elementos deben considerarse cuando se selecciona el sensor para ser instalado.

Tabla 5.9.1: *Requisitos de selección de sensores (Aktan et al, 2002)*

Sensor performance characteristics	Environmental constraints	Economic considerations
Sensitivity Resolution Discrimination Range Linearity Hysteresis Accuracy Error Precision Stability Response time Frequency response	Temperature range Humidity range Size Packaging Isolation Thermal effects	Cost Availability Reliability Ease of installation Data acquisition needs

Si bien la selección de estos sensores depende de muchos factores, la disminución de costos de instrumentación, el aumento en el número de puentes con SHM e incluso la existencia de una necesidad por instalar estos sistemas en ciertos puentes muy relevantes, ha generado el nacimiento de una norma que establece requisitos técnicos y objetivos para la selección de sensores. Esta norma de nacionalidad China y presentada por Moreau (Moreu et al, 2018) presenta los requisitos de rango, resolución y sensibilidad que deben cumplir los sensores a instalar en un SHM en China. Estos requisitos pueden verse en la tabla 5.9.2 y además, establece que estos deben cumplir con una vida de servicio de al menos cinco años y en los casos de sensores embebidos de al menos 20 años.

Tabla 5.9.2: *Requisitos técnicos para la instalación de sensores en China (Moreu et al, 2018)*

Sensor type	Requirements		Section
	Specific areas	Accuracy, range, resolution, sensitivity, resolution	
Load and environment monitoring sensor	Vehicle load monitoring	Range \geq 200% of the axle load	6.2.1
	Wind speed and wind direction monitoring	Range \geq design wind speed of its installation height	6.2.2
	Wind pressure monitoring	-1,000 Pa (-0.145 Psi) < range < 1,000 Pa (0.145 Psi); -2 Pa (-0.00029 Psi) < measurement error < 2 Pa (0.00029 Psi)	6.2.3
	Temperature monitoring	Atmospheric temperature: Year extreme minimum temperature $-20^{\circ}\text{C} (-4^{\circ}\text{F}) \leq$ range \leq year maximum temperature $+20^{\circ}\text{C} (+68^{\circ}\text{F})$; Accuracy $\geq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (31.1 ~ 32.9°F); resolution $\geq \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (31.82 ~ 32.18°F) Structural surface temperature: Year extreme minimum temperature $-20^{\circ}\text{C} (-4^{\circ}\text{F}) \leq$ range \leq year maximum temperature $+20^{\circ}\text{C} (+68^{\circ}\text{F})$; Accuracy $\geq \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ (31.64 ~ 32.36°F); resolution $\geq \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ (31.82 ~ 32.18°F)	6.2.6
	Humidity monitoring	Range: 0-100% RH; accuracy \geq 3% RH	6.2.7
Structural global response monitoring sensor	Accelerometer	Large span bridge with low-natural frequency: Frequency response range: 0 ~ 100 Hz Range $\geq \pm 2$ g; transverse sensitivity < 1%	6.3.1
		Bridge structure with high-natural frequency: Frequency response range: 0.2 ~ 1,000 Hz Range $\geq \pm 20$ g; transverse sensitivity < 5%	
Structural local response monitoring sensor	Strain sensor	30% full range < static strain measurement < 80% full range Range of dynamic strain gage $\geq 2 \times$ maximum predicted value	6.4.1

Dado que el objetivo de este capítulo es entregar una guía que permita facilitar el proceso para el desarrollo de SHM en una red de puentes, se considera necesario el definir un mínimo de sensores a instalar en un puente nacional. Esto es posible de generar dado que la tipología de puentes en Chile es bastante estándar, siendo continuo o de tramos simplemente apoyados con vigas pretensadas, postensadas o metálicas, donde en los últimos años son las pretensadas las que han ganado terreno debido a su fabricación

en planta y no in-situ. Por otro lado, en Chile una de los principales amenazas sobre los puentes son los eventos sísmicos y por lo tanto, es necesario que se considere una instrumentación que se enfoque en ellos, ya que la instrumentación de socavación (otra gran amenaza) se sitúa por carriles diferentes.

Así, luego de la revisión efectuada, se cree necesario la división entre una sensorización dinámica (asociada a las vibraciones sufridas por el puente) y una sensorización ambiental (asociada a las variables climáticas que rodean al puente) se establece la siguiente instrumentación mínima para una puente típico nacional:

Tabla 5.9.3: Sensores dinámicos y ambientales mínimos a instalar

Sensores Dinámicos	Sensores Ambientales
1 acelerógrafo triaxial de movimiento fuerte en el piso	2 anemómetros de veleta*
1 acelerómetro triaxial por pila/cepa	2 termómetros ambientales**
2 acelerómetros triaxial por vano	
1 transductor de desplazamiento por estribo	
1 medidor de deformación unitaria por viga y vano	
1 inclinómetro por pila/cepa	

**En caso que las dimensiones del vano principal del puente cumplan con la definición de Estructura Mayor en Manual de Carreteras Vol. 3, punto 3.11.1001.201(2)*

***Uno de ellos deberá proporcionar la temperatura sobre el vano del puente, mientras que el otro la proporcionará bajo el mismo vano*

Por otro lado, en el caso que algún puente presente alguno de los siguientes factores:

- Historial de socavación ante crecidas
- Presencia de afluentes importantes cercanos al puente
- Retiro de áridos en la vecindad del puente
- Importancia crítica del puente para la red

Es recomendable proporcionar la siguiente instrumentación:

Tabla 5.9.4: Instrumentación para socavación

Socavación General	Socavación Total
Instalación de un sistema de cadenas para la medición de socavación general en el lecho del río	Instalar un sistema de medición de socavación que sea capaz de medir la evolución del lecho del río durante cada crecida, como por ejemplo sistemas de sonar y Time Domain Reflectometry
Deben instalarse al menor 3 sistemas de cadenas en el lecho mayor	En las 2 pilas más afectadas por el flujo de agua
Se deberá revisar una vez al año o luego de una crecida que genere algún tipo de daño al puente	Durante cada crecida con un máximo de error de 10 cm y medición cada 5 minutos

Comprendiendo que la instrumentación mencionada es el grupo de sensores básicos, en ciertas oportunidades, dados los riesgos, incertezas en ciertas tipologías de puentes se requerirá una mayor cantidad y variedad de sensores. Por lo anterior, se presentan las siguientes tablas que dan cuenta de la relevancia de un cierto tipo de monitoreo, el cual en la tabla está según “****”: mucho riesgo/incerteza, “***”: riesgo/incerteza regular y “**”: bajo riesgo/incerteza, y para cada incerteza un tipo de sensor (Inaudi, 2009), se busca con estas tablas que el diseño del SHM comience con la instrumentación básica y se complemente con las incertezas más importantes y que estas sean aclaradas con la instalación de los correspondientes sensores:

Tabla 5.9.5: Instrumentación para socavación (Inaudi, 2009)

Riesgo/Incerteza	Vigas de Hormigón	Vigas de Acero	Voladizo de Hormigón	Arco	Atirantado	Suspendido
Correspondencia entre modelo de elementos finitos y comportamiento real	**	**	**	**	*	*
Deformación dinámica debido al tránsito, viento, sismos, explosión, etc		***		*	***	***
Creep, relajación de preesfuerzos					**	**
Correspondencia entre modos de vibrar y comportamiento real	*	*	*	*	*	*
Bearings no trabajando y juntas de expansión	**	**	**		**	*
Agrietamiento de Hormigón o Acero	*	*	*	*	*	*
Cambios en la temperatura y gradientes térmicos en los elementos de carga	***	***	***	***	***	***
Asentamientos diferenciales entre pilas o fundaciones	*	*	**	**		
Cambios en nivel freático o presión de poros alrededor de las fundaciones	*	*	*	*	*	*
Estabilidad de pendientes sobre fundaciones y estribos	*	*	*	*		
Cambios en el ambiente químico	***	*	***	**	**	**
Condiciones ambientales				*	***	***
Tránsito y sobrecargas	*	*	*	*		
Programa de construcción y acciones específicos	**	**	**	**	**	**

Tabla 5.9.6: *Sensores propuestos según riesgo o incerteza (Inaudi, 2009)*

Riesgo/Incerteza	Respuesta/Consecuencia	Sensores Propuestos
Correspondencia entre modelo de elementos finitos y comportamiento real	Distribución de deformaciones y magnitud de diferentes modelos de forma	Sensores para deformación local, incluyendo strain gauges, VW gauges y sensores de fibra óptica, inclinómetros
Deformación dinámica debido al tránsito, viento, sismos, explosión, etc.	Grandes deformaciones, fatiga y grietas	Sensores para deformación local, incluyendo strain gauges, VW gauges y sensores de fibra óptica, con sistemas de adquisición de datos dinámicos. Sensores de fibra óptica distribuidos para detectar nuevas grietas
Creep, relajación de preesfuerzos	Deformaciones globales	sensores de grandes deformaciones de fibra óptica, medidores de asentamiento, inclinómetros, medidores de distancia de láser, topografía
Cambios en las fuerzas de los cables	Fuerza y redistribución de las deformaciones	Celdas de carga: vibrating wire, resistivas o de fibra óptica
Correspondencia entre modos de vibrar y comportamiento real	Modos de vibrar y frecuencias diferentes del modelo	Acelerómetros, fibra óptica para deformación
Bearings no trabajando y juntas de expansión	Movimiento reducido, movimiento ocurren en ubicación equivocada, redistribución de deformaciones	Medidores de juntas: potenciómetros, Vibrating wire o fibra óptica
Agrietamiento de Hormigón o Acero	Apertura de grietas	Medidores de grietas: potenciómetros, Vibrating wire o fibra óptica
Cambios en la temperatura y gradientes térmicos en los elementos de carga	Redistribución de deformaciones, agrietamiento	Sensores de temperatura, eléctricos, sensores de punto de fibra óptica o sensores distribuidos
Asentamientos diferenciales entre pilas o fundaciones	Movimientos globales, inclinación, redistribución de deformaciones	Medidor de distancia mediante láser, topografía, medidores de asentamiento, inclinómetros

Tabla 5.9.7: *Sensores propuestos según riesgo o incerteza (continuación) (Inaudi, 2009)*

Riesgo/Incerteza	Respuesta/Consecuencia	Sensores Propuestos
Cambios en nivel freático o presión de poros alrededor de las fundaciones	cambios en la presión de poros	Piezómetros: Vibrating wire o fibra óptica
Estabilidad de pendientes sobre fundaciones y estribos	Pendiente de deslizamiento	sensores de estabilidad de suelos de fibra óptica distribuida, medidor de distancia mediante láser, inclinómetros
Cambios en el ambiente químico	Corrosión de refuerzos	Corrosión de hormigón y sensores de humedad
Condiciones ambientales	Acciones sobre el puente	Estación climática, mediciones de viento
Tránsito y sobrecargas	Acciones sobre el puente	Estación de pesaje en movimiento, sensores de deformación dinámica
Programa de construcción y acciones específicos	Dificultad en el análisis de datos	Webcam, captura de imágenes y archivo

Dado que se requiere energizar cada uno de los sensores incluidos en el SHM. Para esto, se recomienda el uso de equipos que sostengan el sistema de energía continuamente. Esto se debe a que por lo general, los puentes se encuentran en zonas alejadas y los equipos en áreas de difícil acceso, por lo tanto, el conseguir una reparación puede demorar varios días o semanas, lo que vuelve necesario equipos alternos de energía. Se recomienda el uso de energías como solares o eólicas que permiten un trabajo sin la necesidad de conectar la red de sensores a un sistema convencional de suministro de energía que podría volverse costoso y técnicamente complicado. De igual forma, si el suministro de energía se encuentra disponible se recomienda este, sin por ello eliminar algún sistema alternativo de energía.

5.10. Procesamiento de Señales y Caracterización de Daño

5.10.1. Gestión de la Información

A diferencia de áreas como la generación de sensores, la caracterización de daño mediante el uso de las medidas de aceleración en estructuras, la gestión de información recabada por los SHM es un área poco tratada. Esto tiene una razón principal la cual es que cada proyecto SHM es distinto porque atiende a puentes distintos, con motivaciones distintas y muchas veces estos proyectos se enfocan en puentes especiales de tipologías poco convencionales que decantan en la selección de sensores más especializados. Así, entonces establecer un lineamiento de como debe gestionarse la información debe ser de carácter general. En este sentido (Mcneill, 2009) realiza una revisión general de todos los procesos que de sortear los registros capturados por los sensores, hasta que de todo esto cúmulo de datos se obtiene información que permita tomar decisiones informadas sobre el puente.

El proceso general que atraviesan los datos generados por un SHM, son los cuatros siguientes pasos:

1. La directa medición de propiedades estructurales desde cada uno de los sensores
2. El transporte de los registros desde la estructura a un centro de procesamiento de datos
3. Almacenar las mediciones de forma tal que sea una forma eficiente y que se vea facilitado el acceso
4. Análisis de los registros y revisión de los resultados con respecto a los objetivos de monitoreo.

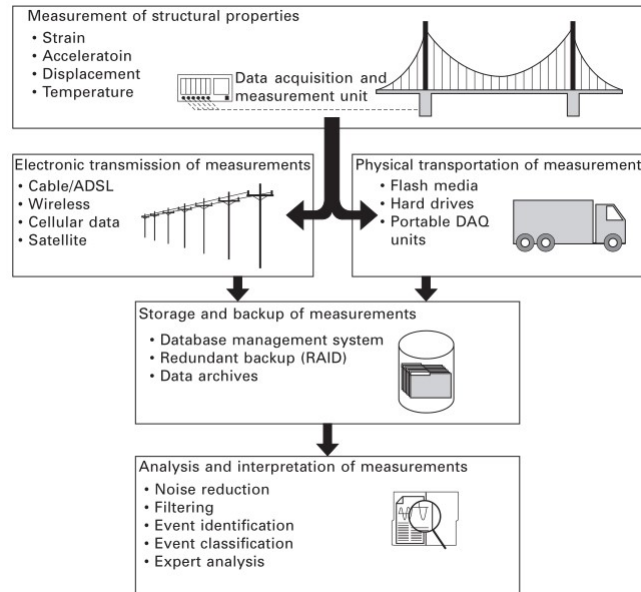


Figura 5.10.1: Procedimiento genérico para el tratamiento de datos (Mcneill, 2009)

De forma similar a lo que se presenta en (Moreu et al, 2018) sobre los requisitos técnicos que deben cumplir los sensores en China, esta norma también se enfoca en requisitos que se deben cumplir en cada proceso de la gestión de información. En este sentido esta norma establece requisitos para selección de equipos, frecuencia, sincronización, transmisión de archivos, procesamiento y funciones para la gestión de datos. Algunos de estos requisitos son menos específicos que los incluidos en la sensorización, son una buena recomendación a considerar en el diseño del proceso:

Tabla 5.10.1: *Características por tecnología (Moreu et al, 2018)*

TABLE 4 | New Chinese structural health monitoring code data requirements.

Data	Requirements	Section
Data collection	Equipment selection Charge signal: charge amplifier Digital signal: RS485, CAN, Modbus TCP, or UDP distributed data collection Analog signal: 4–20 mA and +5 V	7.2.2
	Sampling frequency Load and environment monitoring: minimum value Boat piers acceleration: 50 Hz; wind pressure: 20 Hz; earthquake: 50 Hz; temperature: 1/600 Hz; humidity: 1/600 Hz; rainfall: 1/60 Hz Structural global and local response monitoring: minimum value Vibration acceleration: 50 Hz; moving displacement: 20 Hz Static displacement: 1 Hz; dynamic strain: 20 Hz; static strain: 1/3,600 Hz Support reaction: 1 Hz	7.2.4
	Time synchronization accuracy Same type of monitoring variables: <0.1 ms Different same type of monitoring variables: <1 ms	7.2.5
Data transmission	Transmission distance Relatively short and without strong electromagnetic interference: analog signal Far or strong electromagnetic interference: digital signal Up to a few kilometers or even tens of kilometers: optical fiber transmission	7.3.2
Data processing	Preprocessing Digital filtering, denoising, intercepting, and exception handling	7.4.1
	Postprocessing Specialized design	
Data management	Functions: quick display, efficient storage, report generation, and data archiving	7.5.1

Si bien, el principal objetivo de un SHM está basado en el análisis de los registros obtenidos, para que dicho análisis tenga la seguridad de que los datos han sido recogidos de forma correcta, es necesario generar un registro de información sobre el proceso de medición. Esto último, es de principal importancia en los casos en que los datos generados tienen un retraso importante entre que se generan y cuando llegan al centro de procesamiento de datos. Los datos reportar sobre el proceso de colección en sí mismo son los siguientes:

- Descripción resumida del objetivo de monitoreo
- Ubicaciones de los sensores
- Empresa y número de modelo del sensor instalado
- Empresa y número del sistema de colección de datos
- Canales de entrada de los equipos y a que sensor están conectados
- Configuración de información para el sistema de adquisición de datos
- Información de calibración de los sensores

5.10.1.1. Recolección de datos y gestión de datos en el sitio

Para obtener mediciones útiles, lo más relevante es que las mediciones sean capaces de representar correctamente el comportamiento de la variable elegida, por ejemplo, es necesario que la frecuencia con la

que se adquieren los datos, sea mayor la frecuencia de la variable. En caso que sea menor, las mediciones no serán capaces de representar el verdadero comportamiento. En específico, (Shannon, 1949) establece que la señal análoga debe tomar muestras de datos al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal. Como ejemplo, la siguiente imagen es una señal de 12 Hz, a la cual se le registran datos a una tasa de 9 Hz, el resultado obtenido es una señal de 3Hz. Por lo tanto, cualquier frecuencia que sea mayor a la posible a tomar, debe ser eliminada y se puede eliminar mediante el uso de filtro sobre las señales. Se puede complementar a esto lo expuesto por (SAMCO, 2006), donde se menciona que, si los datos son tomados en el dominio de la frecuencia, la tasa de muestreo necesita ser al menos el doble de la frecuencia máxima, mientras que, si se adquieren en el dominio del tiempo, se requiere una tasa de adquisición de datos mayor y en la práctica, una tasa de muestreo cinco veces mayor a la máxima frecuencia de interés ha demostrado ser razonable.

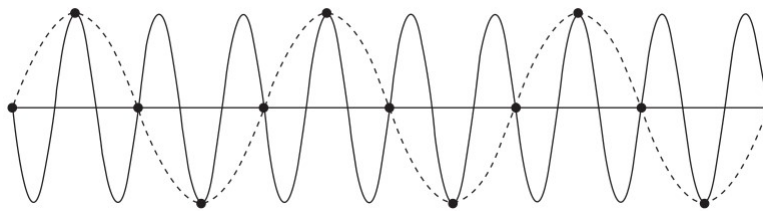


Figura 5.10.2: *Ejemplo de fenómeno mal capturado por mala elección de frecuencia a utilizar (Mcneill, 2009)*

Otro factor importante para recolectar datos, es el hecho de sincronizar las mediciones. Es necesario, que las vibraciones, rotaciones, temperatura, viento tengan la misma hora, esto para poder comprobar las verdaderas influencias y respuestas sobre la estructura. Este problema es mayor cuando existe más de un sistema de adquisición de datos, ya que se vuelve imperativa su sincronización.

Para abordar este problema, existe la opción manual, donde el reloj de cada equipo es sincronizado con otros, sin embargo, tiene la desventaja que cada cierto periodo debe volver a repetirse este proceso, y la opción de conectarlos a Internet. Esta conexión a Internet, se lleva a cabo mediante el Network Time Protocol (NTP). El NTP comunica estos equipos a otros sistemas que están configurados como servidores de hora NTP. Así, este problema puede ser solucionado y automáticamente se sincroniza.

Para los casos donde el monitoreo es continuo y a largo plazo, no siempre existe la posibilidad de enviar la información constantemente, esto por problemas de energía o comunicaciones, por lo tanto, en la ubicación del sistema de adquisición de datos, debe existir la forma de almacenar la información, al menos hasta que se recupere la comunicación, para ello se debe estimar las necesidades de almacenamiento. Como ejemplo un SHM que tome muestras a 100 Hz y con resoluciones de 16 o 24 bits, el resultado es de 26 MB de datos de un solo sensor. En el caso de un SHM con doce sensores, en una semana pueden generar alrededor de 2.2 GB.

5.10.1.2. Problemas en la comunicación de datos

El texto afirma que dadas las nuevas tecnologías y que los sistemas de adquisición de datos ahora traen una interface de red ethernet para su control y comunicación, es muy posible configurar la comunicación mediante el Protocolo de Internet (IP). Este es un protocolo para el intercambio de información basado en dos sistemas de computadores en red a través de Internet.

Esto se basa en que cada equipo tiene un número que lo identifica (dirección IP) y la información es enviada en paquetes entre los computadores conectados. Para que esta información llegue a un servidor, necesita este acceso a la internet común, para ello el sistema necesita conectarse a un router y con este se conecta al servidor remoto.

Una vez el SHM se conecte a Internet, recibir información, será mucho más sencillo, ya que existe una importante cantidad de software para controlar la toma de datos y enviarla. Sin embargo, existen problemas con el Internet y el principal es la seguridad. Para ello, se puede acceder (a veces mediante pago) a sistemas de protección que proveen los mismos fabricantes, se pueden generar contraseñas difíciles de robar y cambiarlas frecuentemente, se puede actualizar constante los softwares y se puede codificar la información, tal que, si esta es robada no tenga utilidad, ya que la forma de descryptarla solo puede hacerla el verdadero destinatario.

5.10.1.3. Efectivo almacenamiento de los datos del SHM

Cuando los datos dejan el sitio y son enviados a una base de datos, esta requiere tener una facilidad de acceso y que la exista la posibilidad de generar copias de seguridad. Para ello el autor menciona que lo mejor es utilizar alguna base de datos de tipo comercial. En algunos casos el mismo proveedor de los equipos puede vender el software con la base de datos, aunque también en el mercado existen bases de datos alternativas. La más común de estas últimas es MySQL, la cual, si bien comenzó como código abierto, el 2008 fue adquirido por Sun Microsystems y este dispone dos opciones, la versión básica que es gratis y que provee la funcionalidad básica pero no la asistencia técnica que si dispone la versión pagada.

Si bien MySQL solo es una opción de todas las posibles bases de datos comerciales, comúnmente implementan SQL, que es una abreviatura de lenguaje de consulta estructurado. SQL es un lenguaje estandarizado para comunicarse con los sistemas de bases de datos para recuperar y manipular los datos almacenados en ellos.

5.10.1.4. Procesamiento de las mediciones de un SHM

En esta parte, se presentan técnicas para volver útiles las mediciones tomadas por los SHM. Aquí se presentan cuatro elementos, el ruido, filtrado de señales, falla de sensores y una técnica novedosa.

El ruido es la variación en la señal de entrada la cual no es debida al fenómeno medido, sino que se introducen desde otras fuentes. Este ruido puede venir de interferencia electromagnética de otros equipos cercanos al sistema de adquisición de datos o del mismo equipo. Para reducir el ruido, se puede utilizar cables con protección interna, con cables que comprenden pares de conductores trenzados o aumentando

la frecuencia de toma de datos, sin embargo, esta última es complicada porque incide en el almacenamiento de datos y no siempre los equipos pueden. Lamentablemente es casi imposible eliminar todo el ruido, sin embargo, el objetivo deberá ser siempre disminuirlo lo más posible, tal que la magnitud de la señal no se vea relativamente afectada.

El ruido anterior, es ruido del tipo aleatorio, por lo tanto, es común asumir que su promedio es cero, sin embargo, existen ruidos que no son aleatorios, sino que tienen su propia naturaleza. En estos casos lo mejor será la aplicación de filtros que busquen específicamente estos tipos de ruido. Con respecto a las fallas de sensores, existen variadas formas de conocerlas. Una de ellas es comparando los valores arrojados con sensores cercanos o relacionar la medición de este sensor con otros, por ejemplo, temperatura con deformación.

En el caso del filtrado, este se enfoca en quitar de las señales aquellos elementos que no son parte del interés de quien utiliza los registros. SAMCO muestra una serie de posibles filtros para aplicar sobre las señales que emiten los sensores en la tabla 5.10.2. Es posible agregar a los procesos de filtrado de la tabla, el proceso de filtrado para la eliminación del ruido electromagnético, el cual surge del carácter eléctrico que tiene el sensor.

Tabla 5.10.2: *Métodos para el análisis de señales (SAMCO, 2006)*

High and low-pass filter	Filtrado de señales cuasi-estáticas y de alta frecuencia, por ejemplo: variación de temperatura, movimientos del cable o medidas de ruido
Band-pass filter	Usado para filtrar fuera de la frecuencia determinada para las cuales la estructura es sensible
Integration	Uso de integradores para transformar aceleraciones en velocidad y desplazamiento.
Parameter generating	Cálculo de promedio, desviación estándar, valores máximos.
Frequency analysis	Determinación del contenido espectral de la señal de respuesta temporal
Statistical analysis	Determinación de la función densidad de probabilidad de una variable

Otro de los procesos necesarios a realizar con las mediciones de los SHM, es la validación de los registros que este captura. Al igual que en los casos de información de pesaje en movimiento y los registros meteorológicos, se deben aplicar procedimientos que verifiquen que los registros se mantengan dentro de ciertos rangos, que no generen el mismo valor por un cierto periodo de tiempo (un registro “pegado” en un valor), que los registros varíen de forma realista y que todos los campos necesarios sean registrados. (Aktan et al, 2002), estableció dos niveles de chequeos, el primero asociado a revisiones elementales para los valores y el segundo que se basa en correlaciones entre variables y revisiones estadísticas.

Tabla 5.10.3: *Chequeos elementales y datos de procesamiento de datos (Aktan et al, 2002)*

Wind Data	Process Type	Definition	Implementation
Time	Range	Start-end time within recorded date	$t_0 \leq t_i \leq t_f$ t_0 is the start record time t_f is the final record time t_i is the current record time
	Sequential Increase	Consecutive readings to progress in time	$t_i < t_{i+1}$
	Consistent Sampling	Sampling interval to satisfy predefined range	$\Delta t - \sigma \leq t_{i+1} - t_i \leq \Delta t + \sigma$ Δt is the defined sampling interval σ is the acceptable threshold
Sensor Data	Sensor Limits	Range of sensor readings	$|W_i| \leq W_{max}$ W_i is the current sensor reading W_{max} is the sensor reading limit
	Repeated Data	Consecutive zero, or large magnitudes	$W_j = \dots = W_n = W_D$ W_D is determined by data trend
	Smooth data	Presence of spikes or high gradient data	Spike detection: $|W_i - (W_{i-1} + W_{i+1}) / 2| - |W_{i-1} - W_{i+1}| / 2 > \Delta H_1$ $(\Delta H_1 = 5\text{mph})$ High gradient detection: $|W_i - (W_{i-1} + W_{i+1}) / 2| > \Delta H_2$ $(\Delta H_2 = 10\text{mph})$ ΔH_1 is the limit of acceptable sudden change in consecutive points ΔH_2 is the limit of acceptable change in wind gradient
	Random variations	Noise or known frequency contaminations	Low-pass filter

Tabla 5.10.4: *Chequeos secundarios y postprocesamiento de datos (Aktan et al, 2002)*

Sensor Data Analysis	Post-Process Type	Definition, Implementation and Examples
Time data	Smoothing-trend	Spline smoothing Running average
	Statistical characterization	Mean, Variance Frequency Distribution Models Statistical trend over time
	Data correlations	Correlations with representative distribution Correlations with different sensor readings
Frequency	Autocorrelation	Autocorrelation with known frequency responses
	Power distribution	Determination of dominant frequency content
	Coherence	Correlation of signal spectra

La técnica novedosa mostrada aquí tiene su objetivo en reducir la gran cantidad de información generada. Esta se basa en la regularidad estadística y que esta sirva como modelo base para los datos, el argumento es generar mediciones que representen el comportamiento general de la estructura y luego compararlo con las nuevas mediciones, si las nuevas mediciones muestran un comportamiento diferente, se guardan y si no, estas nuevas mediciones se desechan, con este procedimiento (Mcneill, 2009) lograron reducir en un 97% la cantidad de datos a tomar.

5.10.1.5. Plataformas

Hoy en día debido al aumento de proyectos SHM alrededor del mundo, han nacido plataformas comerciales que permiten capturar y tratar todos los registros que el SHM genera. Estas plataformas tienen la facilidad que a través del registro de usuarios, estos pueden conocer la información que se genera de forma remota. Un ejemplo, lo da a conocer VCE (Furtner et al, 2013) donde presentan su plataforma comercial para el tratamiento de la información de un SHM. Los objetivos de esta plataforma pueden ser descritos en los siguientes puntos:

1. Confiabilidad en el sistema de monitoreo, en caso de fallas o mal funcionamiento, estos deben ser automáticamente reconocidos
2. Fácil y rápido acceso a la información a pesar de su gran cantidad y variabilidad
3. Detectar y eliminar datos erróneos, no consistentes o no coherentes.
4. Notificación de eventos, ya sean regulares como paso de vehículos o irregulares como tormentas o sismos
5. Capacidad de analizar los datos, ya que, no todos los sensores obtienen resultados inmediatos, algunos son valores de entrada para un siguiente análisis
6. Funciones de alerta en caso de superar un umbral y generación de acciones en caso de dicha superación
7. análisis estadístico para realizar correlaciones entre variables monitoreadas
8. Reducción de datos. Es necesario eliminar o suprimir la información que sea redundante
9. Transferencia de datos. Se debe buscar que el proceso de envío de la información, no genere errores en los archivos o los corrompa
10. Facilidad en la presentación de los datos
11. Soporte de los sistemas operadores

Para conseguir que estos objetivos se cumplan, VCE desarrolló herramientas informáticas que permiten una operación remota de los SHM. Dichas herramientas se dividen en tres tipos:

- Herramientas en el Estación Maestra

Esta estación se ubica en donde en el puente, en donde se recolecta la información captada por los sensores en tiempo real. Los computadores de monitoreo, los cuales son capaces de chequear el estado de operación de los sensores y realizan sistemas de control de calidad, eliminando las mediciones erróneas(Furtner et al, 2013).

- Herramientas en la oficina central de VCE

El servidor web y el servidor de la base de datos se encuentran en un datacenter en un ambiente seguro en Viena. Todas las mediciones son guardadas y duplicadas para eliminar la posibilidad de pérdida de datos. Es en este lugar donde, VCE puede realizar fácilmente diferencias entre cada proyecto, buscando cumplir las diferentes demandas que el cliente o usuario solicite.

- Herramientas en el dispositivo del operador del sistema: interfaz web del usuario

el interfaz es absolutamente web, por lo tanto, no requiere programas a excepción de un navegador para utilizar su portal de acceso. La interface ofrece las siguientes características

- usuario y clave de acceso
- Usuarios de distintos niveles, pudiendo restringir acceso a personas no autorizadas
- Vista general del proyecto de monitoreo (resumen de la información relevante)
- Gráfica de cualquier medición o grupo de mediciones
- Posibilidad de elección de intervalo de tiempo para ver y descargar las mediciones
- Diferentes tipos de gráficos
- Ejecución automática de operaciones matemáticas y estadísticas (correlaciones, clasificación, etc.)
- Mensajes de alerta. Posibilidad de uso de e-mail o SMS.
- Gráfica en tiempo real de mediciones, incluso mediciones dinámicas
- Posibilidad de exportar datos en distintos formatos como en XLS.
- Importar datos de diferentes fuentes

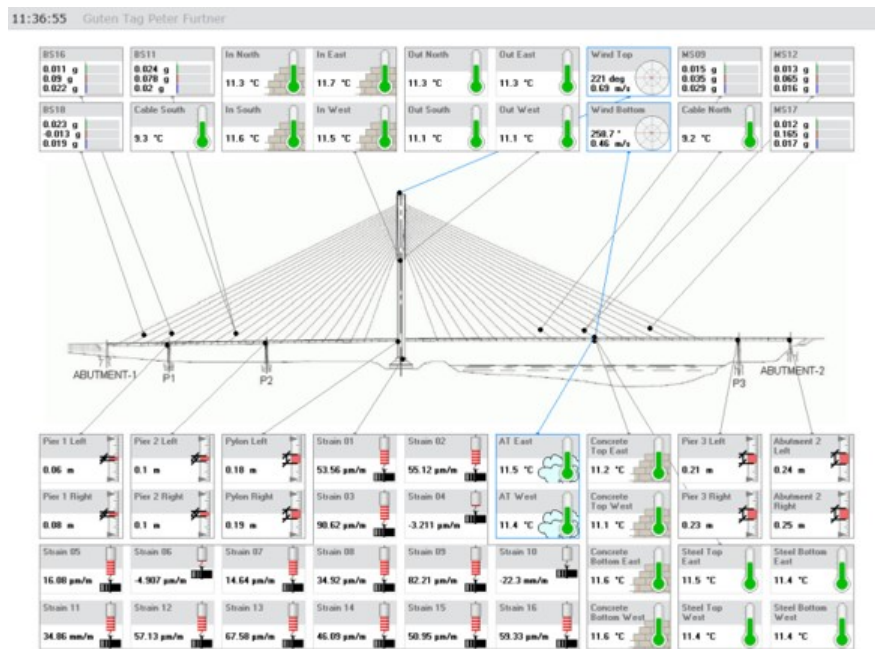


Figura 5.10.3: Módulo de monitoreo de los sensores (Furtner et al, 2013)



Figura 5.10.4: Módulo de representación de mediciones realizadas (Furtner et al, 2013)

5.10.2. Caracterización del Daño

El daño sobre una estructura puede ser definido como cambios introducidos dentro de un sistema que afectan adversamente su normal o futuro desempeño (SAMCO, 2006). Este daño sobre una estructura

puede tener diferentes fuentes como sobrecargas que superan los umbrales de esfuerzos o deformaciones, cargas regulares sobre elementos que han perdido resistencia con el paso del tiempo, combinaciones de ambas, corrosión, y fatiga de elementos estructurales.

Como se revisó en el apartado 5.1 puede identificarse en cuatro niveles, donde cada uno es más profundo que el anterior. El primero siendo la detección del daño, el segundo determinando la ubicación, el tercer nivel la severidad y por último, el nivel cuatro que es la predicción y el cálculo de la vida de servicio remanente de la estructura. Para poder conseguir algunos de estos niveles, se utilizan las variables capturadas por el SHM mediante procedimientos locales y globales.

5.10.2.1. Métodos Globales

Los métodos globales se enfocan en utilizar las vibraciones que sufre el puente en su vida de servicio, determinando con estas las propiedades fundamentales del puente y desde ellas definir algunas características del daño que ha sufrido la estructura. Los principales procedimientos que utilizan las vibraciones del puente, sus ventajas y desventajas son los siguientes (SAMCO, 2006; Karbhari y Lee, 2009; Fan y Qiao, 2011):

- Método de las frecuencias naturales

Este método utiliza la obtención de las frecuencias naturales para la detección del daño. El supuesto es que una vez que la estructura pierda masa, rigidez o cambios en los apoyos, estos se verán evidenciados en las frecuencias naturales de la estructura. Este método es conveniente porque requiere un bajo número de sensores y tiende a contener menos ruido en sus mediciones. Por otro lado, su desventaja principal es que se ve fuertemente afectado por los cambios ambientales y solo consigue el primer nivel, el de detección de daño.

- Método sobre los modos de vibrar

bastante similar al de las frecuencias naturales, pero con la ventaja que es capaz de definir la zona en que se produce el daño en la estructura, por lo tanto, es capaz de llegar al nivel dos y no se ve afectado en gran medida por las condiciones ambientales. Su limitación, es que requiere un número mayor de sensores y tiende a existir una mayor cantidad de ruido en sus mediciones. En algunos métodos mejorados utilizando los modos de vibrar, se ha conseguido obtener el nivel tres, sin embargo, requieren métodos de procesamiento de señales modernos.

- Método de energía de deformación modal

Este método que puede ser calificado como un caso especial de métodos basados en la curvatura de los modos de vibrar en el contexto de elementos tipo placa o viga. Este se define como la razón entre la energía de deformación modal de un elemento antes y después de un daño. Al utilizar propiedades de los modos de vibrar, es capaz de conseguir llegar al segundo nivel.

- Métodos de actualización de modelos

Este método se enfoca en la realización de un modelo computacional de elementos finitos, al cual se le varían las propiedades de los elementos, hasta conseguir igualar las propiedades globales de

la estructura monitoreada. Esto permite conseguir la ubicación y el nivel de daño de una estructura, sin embargo, el problema de este sistema, es que en ciertos casos existe más de una solución para conseguir los mismos niveles de daños.

- Métodos matriciales

A través de ensamblar y evaluar matrices de los parámetros modales de una estructura es posible conseguir la ubicación y la severidad del daño, mediante la comparación de las matrices con y sin daño. Las limitaciones de este sistema, es que pueden existir es que al no detectarse todos los modos de la estructura, solo se obtendrían matrices con información parcial, además otro de los elementos que puede afectar estos procedimientos son las funciones objetivos a utilizar y las restricciones del problema

- Machine learning

Este procedimiento utiliza métodos de inteligencia computacional como redes neuronales y algoritmos genéticos. Su principal ventaja, es que puede trabajar en el área de detección de daño aun cuando existan incertezas, información insuficiente o ruido en las mediciones. Sin embargo su limitación se encuentra en la necesidad de entrenar estos algoritmos con situaciones de detección de daño anteriores.

Algunos de estos procedimientos se encuentran comparados en la tabla 5.10.5 de (Karbhari y Lee, 2009), entregando sus ventajas y desventajas:

Tabla 5.10.5: *Ventajas y desventajas de procedimientos de métodos globales para la detección de daño (Karbhari y Lee, 2009)*

Technique	Advantages	Disadvantages
Frequencies	<ul style="list-style-type: none"> • Capable of damage identification • Simplest derived modal parameter 	<ul style="list-style-type: none"> • No spatial information provided by frequency measurements • Qualitative damage severity estimation • Low sensitivity to damage
Mode shapes	<ul style="list-style-type: none"> • Contains spatially related information, thus damage location is readily available 	<ul style="list-style-type: none"> • Large number of measurement locations required to accurately characterize mode shapes
Matrix update methods	<ul style="list-style-type: none"> • Resolving system matrix provides damage location and severity 	<ul style="list-style-type: none"> • Most precise solution is an approximation since all modes of a structure cannot be measured
Artificial neural networks	<ul style="list-style-type: none"> • Able to solve complex problems difficult to model and explain by classical mathematics • Flexibility available in feature used for damage detection 	<ul style="list-style-type: none"> • Uncertainty in assigning weights to connections between layers • Training of networks requires prior knowledge of damage mechanisms in the system • Potential convergence instability with large quantities of data
Genetic algorithms	<ul style="list-style-type: none"> • Capable of solving large complex problems for optimal solutions • Optimization begins from a population unlike traditional methods which initiate from a single point • Operates in the presence of uncertainty and insufficient information 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependent on validity of the objective function • Appropriate size of population, crossover rate, and mutation rate not clearly defined for structural problems

5.10.2.2. Métodos locales

La aplicación de procedimientos locales en puntos débiles o críticos de la estructura se comprende en las siguientes situaciones:

- Conociendo el tipo y ubicación del daño, se puede cuantificar el daño existente (nivel 3), luego si se evalúan las condiciones globales, se puede generar una predicción de las condiciones (nivel 4).

- Sobre la base de conocimiento existente, se puede esperar daño en cierta ubicación, por ejemplo, por sobrecarga o fatiga (nivel 1). Esta tarea puede ser completada utilizando monitoreo de carga.
- Si los daños locales tienen consecuencias globales, las observaciones locales en otras partes de la estructura pueden ser sensibles (nivel 1 a 3)

Mediante estos métodos lo que se busca finalmente es una caracterización del daño que ha sufrido la estructura. Dado que se ha establecido una sensorización básica para los puentes típicos nacionales, se puede establecer algún grado de resultado que la medición de las variables pueda entregar. En este sentido se considera que la detección del daño es alcanzable con los métodos más simples como el de las frecuencias naturales, por ende es esperable que se puedan conseguir mayores resultados. Así se establece que los métodos de caracterización de daño se enfoquen en conseguir hasta el nivel dos, es decir, la ubicación de este y es recomendable que la forma de conseguirlo sea por medio de métodos de modos de vibrar, ya que, se ha comprobado su factibilidad en cumplir estos requisitos, aunque siempre métodos más sofisticados pudieran ser probados.

5.11. Normas y Lineamientos de Evaluación y Monitoreo Estructural para Puentes Chilenos

5.11.1. Guía

La presente guía propone un proceso, mediante el cual se pueda diseñar, desarrollar y utilizar sistemas de monitoreo de salud estructural en los puentes chilenos. Esta guía, nace como una primera aproximación al desarrollo de SHM en Chile, partiendo desde la necesidad de optimizar el uso de recursos, a través, de la correcta elección de aquellos puentes dentro de una red que dada su relevancia o estado, requieran un sistema que permita su mejor gestión, luego realizando una diferencia entre puentes nuevos y existentes, se optan por caminos diferentes, para finalizar en los procesos de sensorización y procesamiento de señales, los cuales en conjunto pueden generar resultados, que permitan una correcta toma de decisiones.

La guía, se encuentra basada en la literatura anterior, buscando siempre tomar lo mejor y más novedoso de la literatura en el extranjero. Por otro lado, los requisitos establecidos se encuentran contextualizados bajo la realidad nacional, que en muchos casos, dista bastante de la realidad en el extranjero.

El procedimiento de esta se puede observar en la figura 5.11.1

5.11.2. Motivación y Objetivos de Instrumentación

El primer paso de cualquier proyecto de instalación y operación de un Sistema de Monitoreo de Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés), es conocer la motivación y los objetivos del gestor de la infraestructura para monitorear parte de su red de puentes. De estas motivaciones y objetivos, se decantan los resultados posteriores, ya que, por ejemplo, si la motivación se orienta o nace por problemas ocurridos en los puentes como resultado de crecidas anteriores, la instrumentación y los tipos de alertas, se enfocarán en la inclinación de pilas, los niveles de socavación en estas o cualquier daño que genere la socavación.

De forma análoga conocer a cabalidad los objetivos del gestor permiten conocer los resultados que debiese generar un SHM. Por ejemplo, algunos resultados que pueden buscar y obtenerse son:

1. Caracterización de daño en la estructura, dependiendo si el deseo es detectarlo, ubicarlo, cuantificarlo o pronosticar su avance.
2. Asegurar que situaciones límites no generen daños en la estructura o reduzcan su capacidad de uso
3. Extender la vida de servicio de las estructuras de la red mediante la correcta aplicación de actividades de mantenimiento
4. Mejorar la seguridad de aquellos que utilicen la infraestructura
5. Evitar situaciones que dificulten la operación
6. Apoyo a la investigación científica y aporte de información para la actualización de normas y códigos de diseño o construcción

Otro grupo de motivaciones, pueden ser, los estados límites son los de servicialidad, los cuales buscan establecer límites tal que, no se produzca una reducción o limitación en el servicio prestado por la estructura, por ejemplo, el caso típico es la restricción de carga que circula sobre un puente. En esta situación, los estados límites de servicialidad incluyen:

1. Daño local que puede reducir la vida de servicio de la estructura, por ejemplo, fallas por fatiga, excesiva socavación en las pilas, agrietamiento en elementos del puente, etc.
2. Deformaciones inaceptables que afectan su eficiente uso
3. Vibraciones excesivas que generen molestia a las personas

5.11.3. Inventario y Conocimiento del Estado Presente de la Red

Como fase elemental a la hora de poner en práctica una metodología para la instalación y operación de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de los puentes de la red, es necesario fijar una línea de base que establezca el real estado de la red. En este sentido, se vuelve imperativo conocer lo siguiente:

1. Número de puentes en la red
2. Ubicación georreferenciada de los puentes en la red
3. Materialidad de la estructura y subestructura del puente
4. Detalles geométricos de los elementos del puente
5. Información geotécnica de la ubicación del puente
6. Fechas de las visitas de evaluación, mantenimiento y mejoramiento para cada uno de los puentes
7. Resultados de las evaluaciones, jornadas de mantenimiento y mejoramiento o reforzamiento de cada puente
8. Fechas y daños generados al puente por terceros, desastres naturales u otros
9. Nivel de tránsito sobre el puente

Todos los puntos anteriores, si bien no es la información suficiente para ya tomar la decisión de que puentes serán los elegidos para instalar en ellos un SHM, es información básica que permitirá conocer mejor la red y aportará a la elección óptima.

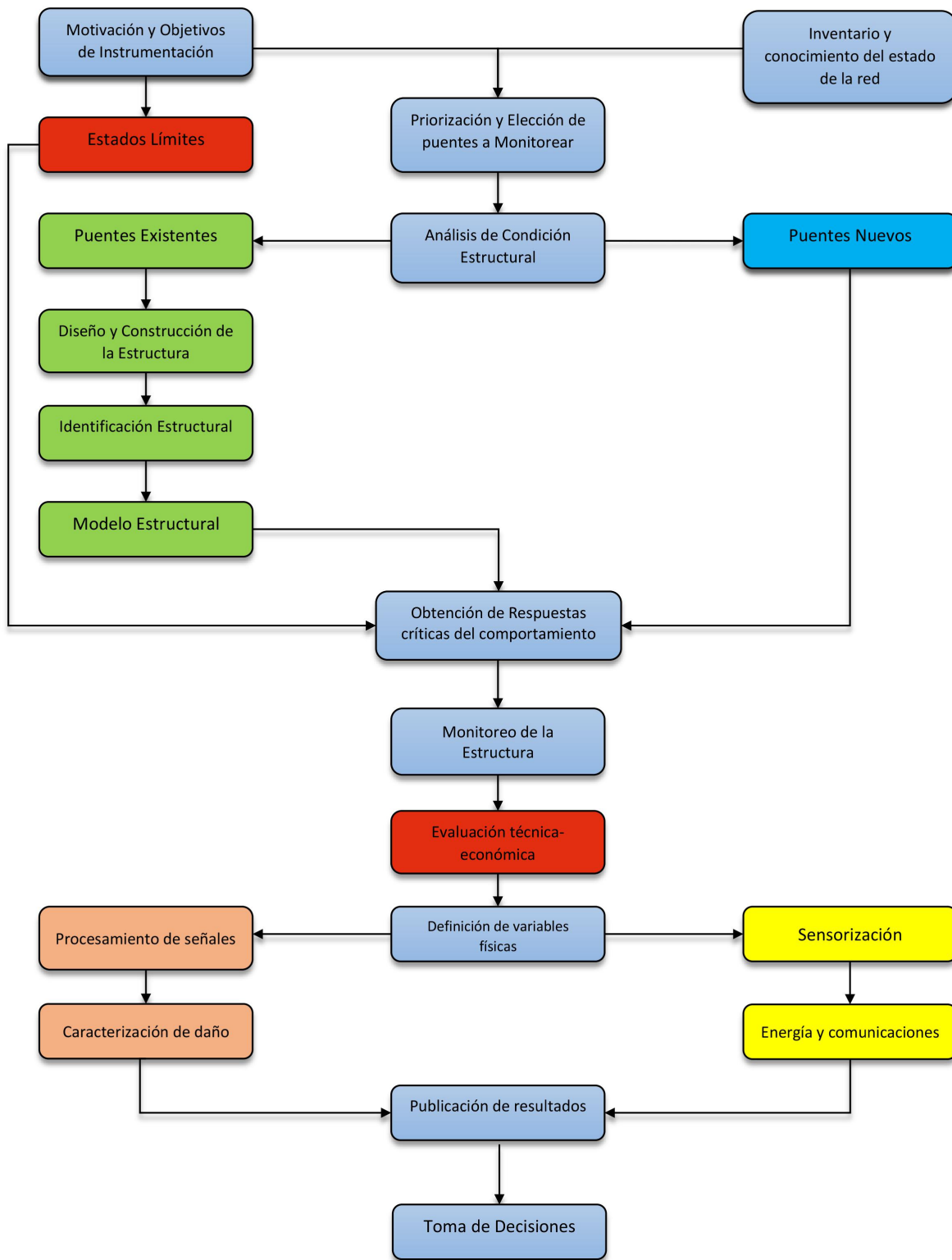


Figura 5.11.1: Propuesta de guía para la instalación de sistemas de monitoreo de salud estructural en Chile

5.11.4. Priorización y elección de Puentes a Monitorear

El resultado de este punto debe ser la elección de aquellos puentes que se les instalará un SHM. Esto se debe a que instalar y operar un SHM tiene un alto costo y, por lo tanto, llevarlo a cabo en todos los puentes de la red puede ser excesivamente costoso, además puede generar una cantidad excesiva y repetitiva de información. Por otro lado, la tipología de puente en Chile es bastante homogénea y tal como lo enuncia el Manual de Carreteras, un puente típico chileno es un puente de tramo recto simple apoyo de uno o varios vanos, con vigas de metálicas, postensadas o pretensadas.

Dado lo anterior, monitorear cada uno de ellos podría arrojar los mismos resultados, por lo tanto, ello está lejos de ser la solución óptima. Para este caso, se pueden seguir los siguientes indicadores para priorizar puentes de una red:

1. Existencia de rutas alternativas competitivas al puente
2. Estado de condición del puente, el cual puede obtenerse mediante el uso de índices basados en inspecciones visuales
3. Flujo de tránsito sobre el puente
4. Uso del puente para la actividad económica dominante de la región o por centros de urgencias como ambulancias y bomberos
5. Número de pistas para la circulación de tránsito sobre el puente
6. Largo del puente
7. Tipología de los puentes
Por otro lado, existen situaciones y casos relativamente excepcionales, donde la instalación de un SHM pudiera ser requerida:
8. Modificaciones a una estructura existente
9. Monitorear una estructura afectada por trabajos externos
10. Monitoreo durante una demolición
11. Estructuras sujetas a movimientos de largo plazo o degradación de materiales
12. Ciclo de retroalimentación para mejorar los diseños futuros
13. Evaluación de fatiga
14. Monitorear una estructura que se construye con nuevas tecnologías
15. Evaluación de integridad de estructuras después de un sismo, incendio, evento natural como una crecida o un acto humanos como choques o terrorismo

Por lo tanto, es claro que la elección de un puente para la instalación de un SHM en él, más allá de la información que pueda entregar, obedece al conjunto de valor patrimonial, social, económico, científico que representa este puente para la red y sus usuarios.

5.11.5. Análisis de condición Estructural

El objetivo de este punto, es conseguir la mejor caracterización posible de la estructura a monitorear. Para conseguir este objetivo, es vital realizar una modelación de esta basada en la información actual de la estructura y así conseguir los parámetros asociados a esta.

5.11.5.1. Puentes Existentes

Dado que los puentes existentes en una red, muchas veces han sufrido cambios en su estructura, producto de desastres naturales como crecidas y sismos, excesos de carga a través de vehículos que circulan sobre estos, degradación de los materiales, fatiga y toda una gama de acciones de desgaste, es necesario actualizar la información de sus características.

1. Descripción de diseño y construcción de la estructura

Este punto se enfoca en recolectar la mayor cantidad posible de información sobre la estructura para generar el modelo más detallado posible, además con esta información se busca eliminar las incertezas producto del paso del tiempo y el uso de servicio de la estructura. La información necesaria se divide en cuatro grupos principales:

a) Materiales

Las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de la estructura son fundamentales, sin embargo, es necesario que las propiedades como la resistencia, humedad, concentración de químicos, amortiguamiento, etc. se encuentren actualizadas, para ello se puede obtener la información desde:

- Planos originales
- Normas y códigos que especifiquen el cambio en las propiedades
- Pruebas No-Destructivas

Sobre este último punto, para puentes de hormigón se puede elegir la prueba más apropiada según el nivel de daño o el tipo de daño, a través de lo propuesto en *Nondestructive test methods for concrete bridges: a review* (Rehman, et al., 2016)[?]. En caso de estructuras de acero se ha observado que las pruebas ultrasónicas de alta frecuencia han sido exitosas en determinar la separación entre flats y las radiografías para encontrar grietas y vacíos.

b) Dimensiones

Producto de los procesos químicos (corrosión) o físicos (sismos, temperatura, creep, etc.), la geometría de la estructura se ve alterada, en el momento de realizar un análisis estructural se debe verificar las dimensiones de la estructura. Para esto la información puede ser obtenida de:

- Planos originales si no existe duda de su fiabilidad
- Pruebas de medición mediante fotometría y tecnologías láser
- Inspecciones de sitio, siempre que se tomen las debidas medidas de seguridad.
- Detalles constructivos de la estructura como tipo de juntas, tipo de preesfuerzo, funcionamiento de estos elementos, deficiencias, puntos críticos

c) Acciones e Influencias

Las Acciones sobre la estructura deberán ser adoptadas según lo establecen las normas y códigos actuales. En el caso de las influencias que pueden ser físicas, químicas y biológicas, estas se deben verificar en función de inspecciones en el lugar.

Mención aparte es la información geotécnica, absolutamente necesaria para un buen modelo de la estructura. Esta requiere un análisis detallado y por lo tanto, se recomienda un exhaustiva investigación y correcta modelación.

2. Identificación Estructural

Para llevar a cabo el proceso de identificación estructural, es necesario seguir los siguientes pasos:

- a) Recolectar información y primera iteración de modelo
- b) Evaluar la condición actual de la estructura, considerando los documentos, el daño, las inspecciones visuales, resultados de pruebas no destructivas
- c) Evaluar la capacidad de carga actual
- d) Preparar el análisis experimental, mediante el uso del primer modelo que de cuenta de las excitaciones óptimas y así generar rangos aceptables de mediciones.
- e) Pruebas a escala completa, pueden ser pruebas de capacidad de carga o pruebas basadas en vibraciones, lo relevante es que estas pruebas puedan verificar el comportamiento del sistema y los mecanismos críticos de la estructura.
- f) Procesar los datos experimentales
- g) Calibrar el modelo en sus propiedades mecánicas, tipos de uniones y condiciones de continuidad en el modelo. Es relevante que el modelo consiga generar respuestas similares a las obtenidas en las pruebas a escala completa.
- h) Uso del modelo calibrado para la toma de decisiones

3. Modelo estructural

Entendiendo que el modelo necesario para realizar el análisis estructural puede variar ampliamente, ya sea en su complejidad, completitud y alcance, es imperativo establecer algunas necesidades mínimas para el modelado de la estructura.

En respuesta al párrafo anterior, se utilizará la nivelación utilizada en F08a Guideline for the Assessment of Existing Structures (SAMCO, 2006)[?], en especial se solicitará que los modelos utilizados para la evaluación estructural, contengan lo necesario para considerarse como Nivel 2 o mayor.

La exigencia de nivel 2 además, se le agrega la necesidad de que el modelo utilizado contenga:

- Modelación en Elementos Finitos
- Análisis No lineal sobre los comportamientos de los materiales que componen la estructura

5.11.5.2. Puentes Nuevos

En el caso de los puentes nuevos o por construir, los niveles de confiabilidad en las propiedades de los materiales, dimensiones, aspectos geotécnicos y propiedades dinámicas de las estructuras son mucho mayores a los ya existentes. Dado lo anterior, se recomienda que su proceso de análisis estructural sea similar a los existentes con la diferencia que el proceso de recolección de información necesaria para realizar el modelo, no requiera pruebas no destructivas.

Por otro lado, si es recomendable que a la estructura se le lleve a cabo un proceso de monitoreo de sus propiedades dinámicas con el fin de calibrar el modelo utilizado para su diseño.

5.11.6. Definición de respuestas críticas para el comportamiento

Con el uso del modelo estructural del punto anterior, el siguiente paso es encontrar aquellos puntos o sectores de la estructura que son más propensos a sufrir daños. Por lo tanto, es necesario encontrar los “Hot Spots” y en función de estos, definir la instrumentación apropiada.

Para encontrar dichos puntos, es necesario considerar los estados límites asociados, es decir, en función de los estados límites se pueden encontrar:

- Sectores o elementos sometidos a mayores esfuerzos
- Sectores o elementos que sufren las mayores deformaciones
- Sectores o elementos que sufren las mayores rotaciones
- Elementos afectos a socavación
- Elementos que puedan verse agrietados por cargas
- Elementos afectos a daños por corrosión
- Puntos de la estructura que por su dificultad constructiva puedan generar incertezas en su comportamiento

Una vez determinados los Hot Spots de la estructura es posible comenzar con el proceso de diseño de instrumentación de los puentes.

Es muy relevante que además de encontrar los puntos más críticos de la estructura, se debe encontrar los umbrales que puede soportar la estructura en cada uno de dichos puntos, por ejemplo, si se detecta que la rotación de una pila es una situación crítica para la estructura, es imperativo determinar el nivel de rotación aceptable para dicha pila. Estos límites pueden determinarse por medio de:

- Literatura científica
- Normas y códigos de diseño

- Otros sistemas de monitoreo de salud estructural
- Experiencia ingenieril
- Modelación estructural

5.11.7. Monitoreo de la Estructura

El monitoreo estructural de los puentes de la red, pueden dividirse en monitoreo de carácter ocasional y en monitoreo de tipo continuo.

5.11.7.1. Monitoreo Ocasional

busca conocer los parámetros dinámicos de la estructura de los puentes de la red que no sean considerados críticos. La obtención de dichos parámetros deberá ser mediante el registro de aceleraciones producidas por vibraciones ambientales o forzadas. La frecuencia con la cual se deberán realizar estas mediciones no debe ser mayor a 5 años o cada vez que un evento o situación pudiese haber generado daño a alguna estructura.

5.11.7.2. Monitoreo Continuo

Se basa en la instalación de sensores en el puente de forma permanente. Estos sensores, darán cuenta de todas aquellas situaciones a las que sea sometido el puente, entregando la posibilidad de conocer el historial completo de la estructura, facilitando el reconocimiento del estado y nivel de daño de esta.

5.11.8. Evaluación Técnica y Económica

Dado que la instalación y operación de un sistema de monitoreo tiene un costo, que en muchos casos es elevado, este debe pasar por un proceso de evaluación económica que permita definir si la contribución de este sistema en la anticipación al daño generado, en la correcta definición del nivel de daño, en la optimización de periodos de mantenciones en el puente objetivo y otros, produce una mejora en el estado financiero.

Es importante mencionar que la retribución de un sistema de monitoreo, es a largo plazo y por ende, dichas retribuciones se obtendrán en cada fase de vida de servicio de la estructura.

5.11.9. Definición de Variables Físicas

Cuando se mencionan las variables físicas, se mencionan aquellas mediciones sobre el comportamiento de la estructura que permitirán conocer y comprender el verdadero estado del puente. Este tipo de mediciones, por lo tanto, buscan realizar las mediciones necesarias para determinar el nivel de daño existente en la estructura.

Siendo que el daño de una estructura, no puede ser directamente medido, sino que es necesario realizar una serie de mediciones que indirectamente, pueden ser traducidas a niveles de daño en cada uno de sus elementos. Las mediciones pueden entregar resultados directos como la rotación de una pila, o indirectos como la medición de aceleraciones, las cuales permiten conocer los parámetros modales de la estructura.

Siempre será deseable conocer el estado global de la estructura y el estado local de cada uno de sus elementos, sin embargo, comprendiendo que el costo económico y la dificultad técnica de conseguir este deseo, implican que dicho deseo necesita ser abordado mediante la necesidad de establecer una sensorización mínima y protocolos que demarquen procedimientos necesarios a seguir con la información surgida de dicha sensorización

5.11.9.1. Sensorización

Una vez que se seleccionen aquellos puentes que requerirán sensorización continua, la mínima sensorización deberá ser:

Tabla 5.11.1: Sensores dinámicos y ambientales mínimos a instalar

Sensores Dinámicos	Sensores Ambientales
1 acelerógrafo triaxial de movimiento fuerte en el piso	2 anemómetros de veleta*
1 acelerómetro triaxial por pila/cepa	2 termómetros ambientales**
2 acelerómetros triaxial por vano	
1 transductor de desplazamiento por estribo	
1 medidor de deformación unitaria por viga y vano	
1 inclinómetro por pila/cepa	

**En caso que las dimensiones del vano principal del puente cumplan con la definición de Estructura Mayor en Manual de Carreteras Vol. 3, punto 3.11.1001.201(2)*

***Uno de ellos deberá proporcionar la temperatura sobre el vano del puente, mientras que el otro la proporcionará bajo el mismo vano*

La ubicación de cada sensor deberá ser obtenida como se menciona en el punto 5.11.6, siempre buscando optimizar la relevancia de los registros a obtener.

En caso que algún puente presente alguno de los siguientes factores:

- Historial de socavación ante crecidas
- Presencia de afluentes importantes cercanos al puente
- Retiro de áridos en la vecindad del puente
- Importancia crítica del puente para la red

Proporcionar la siguiente instrumentación:

Tabla 5.11.2: Instrumentación para socavación

Socavación General	Socavación Total
Instalación de un sistema de cadenas para la medición de socavación general en el lecho del río	Instalar un sistema de medición de socavación que sea capaz de medir la evolución del lecho del río durante cada crecida, como por ejemplo sistemas de sonar y Time Domain Reflectometry
Deben instalarse al menor 3 sistemas de cadenas en el lecho mayor	En las 2 pilas más afectadas por el flujo de agua
Se deberá revisar una vez al año o luego de una crecida que genere algún tipo de daño al puente	Durante cada crecida con un máximo de error de 10 cm y medición cada 5 minutos

Comprendiendo que la instrumentación indicada es el grupo de sensores básicos a instalar en el SHM, en ciertos casos, dados los riesgos, incertezas o tipología de puentes se puede requerir una mayor cantidad y variedad de sensores. Por lo anterior, se presentan las siguientes tablas, las cuales dan cuenta de la relevancia de un cierto tipo de monitoreo, el cual en la tabla está según “***”: mucho riesgo/incerteza, “**”: riesgo/incerteza regular y “*”: bajo riesgo/incerteza, y para cada incerteza un tipo de sensor:

Tabla 5.11.3: Instrumentación para socavación

Riesgo/Incerteza	Vigas de Hormigón	Vigas de Acero	Voladizo de Hormigón	Arco	Atirantado	Suspendido
Correspondencia entre modelo de elementos finitos y comportamiento real	**	**	**	**	*	*
Deformación dinámica debido al tránsito, viento, sismos, explosión, etc		***		*	***	***
Creep, relajación de preesfuerzos					**	**
Correspondencia entre modos de vibrar y comportamiento real	*	*	*	*	*	*
Bearings no trabajando y juntas de expansión	**	**	**		**	*
Agrietamiento de Hormigón o Acero	*	*	*	*	*	*
Cambios en la temperatura y gradientes térmicos en los elementos de carga	***	***	***	***	***	***
Asentamientos diferenciales entre pilas o fundaciones	*	*	**	**		
Cambios en nivel freático o presión de poros alrededor de las fundaciones	*	*	*	*	*	*
Estabilidad de pendientes sobre fundaciones y estribos	*	*	*	*		
Cambios en el ambiente químico	***	*	***	**	**	**
Condiciones ambientales				*	***	***
Tránsito y sobrecargas	*	*	*	*		
Programa de construcción y acciones específicos	**	**	**	**	**	**

Fuente: Inaudi, 2009

Tabla 5.11.4: *ISensores propuestos según riesgo o incerteza*

Riesgo/Incerteza	Respuesta/Consecuencia	Sensores Propuestos
Correspondencia entre modelo de elementos finitos y comportamiento real	Distribución de deformaciones y magnitud de diferentes modelos de forma	Sensores para deformación local, incluyendo strain gauges, VW gauges y sensores de fibra óptica, inclinómetros
Deformación dinámica debido al tránsito, viento, sismos, explosión, etc.	Grandes deformaciones, fatiga y grietas	Sensores para deformación local, incluyendo strain gauges, VW gauges y sensores de fibra óptica, con sistemas de adquisición de datos dinámicos. Sensores de fibra óptica distribuidos para detectar nuevas grietas
Creep, relajación de preesfuerzos	Deformaciones globales	sensores de grandes deformaciones de fibra óptica, medidores de asentamiento, inclinómetros, medidores de distancia de láser, topografía
Cambios en las fuerzas de los cables	Fuerza y redistribución de las deformaciones	Celdas de carga: vibrating wire, resistivas o de fibra óptica
Correspondencia entre modos de vibrar y comportamiento real	Modos de vibrar y frecuencias diferentes del modelo	Acelerómetros, fibra óptica para deformación
Bearings no trabajando y juntas de expansión	Movimiento reducido, movimiento ocurren en ubicación equivocada, redistribución de deformaciones	Medidores de juntas: potenciómetros, Vibrating wire o fibra óptica
Agrietamiento de Hormigón o Acero	Apertura de grietas	Medidores de grietas: potenciómetros, Vibrating wire o fibra óptica
Cambios en la temperatura y gradientes térmicos en los elementos de carga	Redistribución de deformaciones, agrietamiento	Sensores de temperatura, eléctricos, sensores de punto de fibra óptica o sensores distribuidos
Asentamientos diferenciales entre pilas o fundaciones	Movimientos globales, inclinación, redistribución de deformaciones	Medidor de distancia mediante láser, topografía, medidores de asentamiento, inclinómetros

Fuente: Inaudi, 2009

Tabla 5.11.5: *Sensores propuestos según riesgo o incerteza (continuación)*

Riesgo/Incerteza	Respuesta/Consecuencia	Sensores Propuestos
Cambios en nivel freático o presión de poros alrededor de las fundaciones	cambios en la presión de poros	Piezómetros: Vibrating wire o fibra óptica
Estabilidad de pendientes sobre fundaciones y estribos	Pendiente de deslizamiento	sensores de estabilidad de suelos de fibra óptica distribuida, medidor de distancia mediante láser, inclinómetros
Cambios en el ambiente químico	Corrosión de refuerzos	Corrosión de hormigón y sensores de humedad
Condiciones ambientales	Acciones sobre el puente	Estación climática, mediciones de viento
Tránsito y sobrecargas	Acciones sobre el puente	Estación de pesaje en movimiento, sensores de deformación dinámica
Programa de construcción y acciones específicos	Dificultad en el análisis de datos	Webcam, captura de imágenes y archivo

Fuente: Inaudi, 2009

5.11.9.2. Suministro de energía y comunicación del sistema

Al ser un sistema de monitoreo continuo, es vital que el sistema siempre se encuentre operando. En caso de no operar continuamente, es probable que ciertos episodios no sean registrados por los sensores, lo que puede afectar la validez de la información generada por el sistema. Es por lo anterior, que el sistema nunca debe quedar sin suministro energético, por lo tanto, quien fuese el ente encargado deberá velar por sistemas alternativos de energía, que permitan el funcionamiento continuo de la instrumentación.

Con respecto a la comunicación entre sensores y de estos con el sistema de adquisición de datos, es necesario que este proceso de envío, no altere los registros obtenidos. En consecuencia, según sea la distancia entre los puntos se recomienda la siguiente tecnología:

1. Cerca y sin interferencia: uso de señal analoga
2. Lejos o con interferencia: uso de señal digital
3. Algunos kilómetros y más: uso de fibra óptica

5.11.9.3. Estrategia de Procesamiento de señales

El objetivo de este punto, es transformar datos y registros en información valiosa que permita mejorar el proceso de toma de decisiones por parte del gestor de la infraestructura. Es por ello, que los siguientes requisitos son un paso necesario para conseguir los beneficios de la instalación de una red de sensores en un puente.

1. Sobre la frecuencia de toma de datos, los sensores del área dinámica, deberán registrar información al menos al doble de la frecuencia de la variable que buscan capturar.
2. Sobre la sincronización de sensores, la red de sensores deberá estar apoyada sobre un sistema que permita el ajuste automático de estos, permitiendo que siempre se mantengan sincronizados. Se recomienda uso de protocolo de internet
3. Sobre el filtrado de los datos, se recomienda el uso de procesos de filtrado de aquellos sensores que demuestren un ruido en sus registros. Los siguientes tipos de filtros pueden ser aplicados:
 - a) Filtro de paso alto
 - b) Filtro de paso bajo
 - c) Filtros que anulen el ruido inducido por la potencia eléctrica
 - d) Uso de técnicas de transformación al dominio de las frecuencias
 - e) Uso de parámetros estadísticos, que permitan reconocer patrones de frecuencias indeseadas
4. Sobre la validación de los datos, se recomienda realizar una validación automática de los valores obtenidos por los sensores. En este caso, se recomienda una validación primaria basada en límites de variaciones y rangos, y una validación secundaria que busque una correcta correlación entre distintas variables

Tabla 5.11.6: Validación primaria para los registros de los sensores

	Tipo de Proceso	Definición	Implementación
Tiempo	Rango	Tiempo de inicio y fin dentro de la fecha registrada	$t_0 \leq t_i \leq t_f$ <i>t₀ es el inicio de registro de tiempo</i> <i>t_f es el final de registro de tiempo</i> <i>t_i es el registro presente de tiempo</i>
	Incremento secuencial	Progreso de lecturas consecutivas en el tiempo	$t_i < t_{i+1}$
	Consistencia en el muestreo	Intervalo de muestreo para satisfacer rangos predefinidos	$\Delta t - \sigma \leq t_{i+1} - t_i \leq \Delta t + \sigma$ <i>Δt es el intervalo de muestreo definido</i> <i>σ es el umbral aceptable</i>

Fuente: Aktan, et al, 2002

Tabla 5.11.7: Validación primaria para los registros de los sensores (continuación)

Datos del sensor	Límites del sensor	Rango de lecturas del sensor	$|W_i| \leq W_{MAX}$ W_i es la lectura actual del sensor W_{MAX} es el límite de lectura del sensor
	Datos repetidos	Ceros consecutivos o muy grandes magnitudes	$W_i = \dots = W_n = W_D$ W_D es determinado por la tendencia de datos
	Datos poco variables	Presencia de peaks o grandes gradientes en los datos	Detección de peaks: $|W_i - \left(\frac{W_{i-1} + W_{i+1}}{2}\right)| - \frac{|W_{i+1} - W_{i-1}|}{2} > \Delta H1$ Detección de gradientes excesivos: $|W_i - \left(\frac{W_{i-1} + W_{i+1}}{2}\right)| > \Delta H2$ $\Delta H1$ es el límite del cambio repentino en puntos consecutivos $\Delta H2$ es el límite de cambio aceptable en el gradiente
	Variaciones aleatorias	Ruido o contaminación de frecuencias conocidas	Filtro de paso bajo

Fuente: Aktan, et al, 2002

Tabla 5.11.8: Validación secundaria para los registros de los sensores

Análisis de datos del sensor	Tipo de post-procesamiento	Definición, implementación y ejemplos
<i>Datos en el tiempo</i>	Tendencias de suavizado	Spline smoothing
		Running average
	Caracterización estática	Promedio, varianza
		Modelos de distribución de frecuencias
		Tendencias estadísticas en el tiempo
Correlaciones de datos	Correlaciones con distribución representativa	
	Correlaciones con diferentes lecturas de sensores	
<i>Frecuencia</i>	Autocorrelación	Autocorrelación con respuestas de frecuencias conocidas
	Distribución de energía	Determinación de contenido dominante de frecuencias
	Coherencia	Correlación del espectro de señales

Fuente: Aktan, et al, 2002

5.11.10. Caracterización de daño

La caracterización del daño puede ser dividida en cuatro niveles diferentes:

- I.** Detección de daño
- II.** Ubicación de daño
- III.** Extensión o cuantificación de daño
- IV.** Pronóstico de daño

Entendiendo que para que un sistema de monitoreo estructural pudiese cumplir con todos los niveles mencionados, se requiere un muy alto procesamiento de información con todos los costos que ello implica.

Por lo anterior, mediante el uso de los sensores instalados y utilizando métodos basados en vibraciones del puente, se deberá conseguir el objetivo del segundo nivel, es decir, la ubicación del daño. Para ello, se recomienda el uso de métodos asociados a los modos de vibrar de la estructura y su acompañamiento con sistemas de reconocimiento de patrones.

5.11.11. Publicación de Resultados

Para cumplir los objetivos requeridos por el gestor de la infraestructura, es necesario traducir toda la información dispersa del puente (información geotécnica, geométrica, cuantificación de cargas, mantenimientos, inspecciones, mejoras, registros captados por sensores, etc.) en información que permita tomar decisiones, es decir, información útil.

Dada la alta cantidad de elementos que tiene un rol para la toma de decisiones, esta información bruta o dispersa, requiere estar concentrada y ordenada en una misma instalación o mejor aún, en un mismo servicio digital.

Este servicio digital deberá ser capaz de aportar al gestor las facilidades suficientes para simplificar la búsqueda de información propia de cada puente. Como requisitos de este servicio, es conveniente que este disponga de al menos las siguientes capacidades:

- Acceso y entrega de información general o de contexto sobre cada puente de la red. En esta parte de la información, es donde se encuentran fotografías del puente, su ubicación en la carretera, latitud y longitud de la ubicación, estado de operación, etc.
- Es necesario que en este servicio se pueda conocer la materialidad y geometría de cada elemento de un puente. Es necesario que esta información se mantenga actualizada.
- Además de la información geométrica, se pueda tener a disposición los planos de diseño y construcción del puente. Por consiguiente, es fundamental que el servicio digital permita cargar y entregar documentos con distintos tipos de formatos.

- El servicio deberá también poder mantener archivos como fotografías, informes de revisión del puente, monitoreos ocasionales realizados, expedientes, etc. Es fundamental que, en este caso, la información se encuentre fechada para poder realizar un seguimiento cronológico de cada parte del puente.
- Dado que, en Chile, cada vez es más común la realización periódica de inspecciones visuales a los puentes, estas tengan su módulo dentro del servicio y que este disponga de formatos especiales para el ingreso de su información.
- Que aquellas personas que tengan acceso a este servicio, puedan acceder en tiempo real a la información, es decir, si se genera un cambio o se agrega una nueva información al set de esta, todos los usuarios puedan conocerla.
- Debe existir un módulo aparte para la información de los sensores. Esto incluye además de sus registros (aceleración, temperatura, vientos, etc.) la información asociada a su ubicación, calibración, detalles técnicos, fotografías de instalación, frecuencia de adquisición, reposición o cambio por otro modelo similar o el mismo, etc.
- Para el caso del módulo de sensores, es deseable que el usuario pueda elegir en función de la ubicación del puente, el sensor que quiere conocer y desde allí, tenga acceso a su información general (metadatos del sensor) como al de sus registros.
- Es necesario que el monitoreo realice filtros asociados a los registros necesarios a mantener en este sistema informático, es decir, no es necesario que el sistema almacene todos los datos capturados durante la vida útil del sensor, es por esto, que se requiere que solo aquellos registros que puedan resultar en información útil para la detección de daño y análisis de la estructura se mantenga. Para ello, se pueden definir umbrales que establezcan la prioridad del registro capturado a través de técnicas y métodos estadísticos, literatura, experiencia ingenieril, etc. Este punto se enfoca principalmente en los registros obtenidos por el grupo de sensores dinámicos, ya que, dada su alta frecuencia de toma de datos, es muy probable que capturen grandes cantidades de información redundante.
- El sistema deberá permitir al usuario la descarga de cualquier registro capturado por lo sensores, además el registro descargado deberá mencionar claramente:
 - El sensor elegido
 - La fecha y hora de la obtención del registro
 - Ubicación del sensor, estableciendo el elemento del puente al cual está adherido
 - La medición obtenida en cada toma de datos del sensor (si la frecuencia de toma de datos es 100 Hz y la medición es de un minuto, que el registro se componga de un número cercano a 6000 mediciones)
- Dado la relevancia del aspecto de seguridad de un SHM instalado en un puente, el sistema deberá ser capaz de emitir alertas, cada vez que un sensor capture registros que se traduzcan en un potencial peligro a la seguridad de los usuarios o pérdida de servicio que pueda prestar el puente. Es necesario

que si estas alertas, se generan por razones equivocadas (error de los sensores), solo mediante el permiso de personas encargadas, se consiga anular o pausar estas alarma

5.11.12. Obtención de Resultados y Toma de Decisiones

Un SHM luego de ser instalada y operado, es capaz de proporcionar los valores de entrada para que la agencia pueda obtener los indicadores de desempeño necesarios para conseguir calificar el estado estructural del puente. Este estado estructural, que puede ser en base a niveles de confiabilidad u otros indicadores nos hablan del nivel de daño que ha sufrido la estructura y esto, puede actualizar los planes de gestión de puentes que la agencia ha esbozado.

La obtención de estos indicadores, son los resultados buscados por la agencia. El esfuerzo de capturar, transmitir, almacenar y procesar estas señales implicando filtros, chequeos de calidad, análisis de vibraciones muestra que este es un proceso largo y que la cantidad de información puede ser inabordable, es por esto que lo mejor para esta situación sea el uso de plataformas que permitan conocer cada uno de los procesos señalados y los valores entregados por cada uno de los sensores. Esto último tiene un importante valor, ya que, permite la generación de alarmas inmediatas cuando uno de los sensores detecta alguna variable que pudiera sobrepasar algún valor límite seleccionado. Esto, es posible verlo en la normativa china sobre los requisitos técnicos de sensores de SHM (Moreu et al, 2018), en la cual se evidencia la necesidad de generar parámetros como cargas máximas y promedio, aceleraciones máximas, mínimas y promedio, parámetros modales y la formación de alertas amarillas y rojas en función del peso de vehículos, temperatura ambiente velocidad del viento, etc.

Tabla 5.11.9: *Requisitos de evaluación y seguridad de la nueva norma China sobre monitoreo de salud estructural*

Safety		Requirements	Section
Safety warning	Yellow and red warning	Total weight of the vehicle or axle weight > design vehicle load x 1.5 → yellow (>design vehicle load x 2.0 → red) Maximum average wind speed > design wind speed x 0.8 → yellow (>design wind speed → yellow) Maximum/minimum temperature, maximum temperature difference, and maximum temperature gradient > design value → yellow Displacement > design value x 0.8 → yellow (>design value or more than 10 yellow warnings appear within a month → red)	8.2.2
Data analysis	Load and environment	(a) Vehicle load parameters: bridge traffic, vehicle type, axle weight, gross weight, speed, and overload ratio (b) Wind parameters: speed, direction (c) Earthquake data: acceleration peak, velocity peak, duration, spectrum, and response spectrum (d) Temperature data: maximum/minimum temperature, the maximum temperature gradient of the section (e) Humidity data: maximum internal/external humidity of the component, mean value, and time exceeding the limit (f) Rainfall data: maximum rainfall per hour, cumulative rainfall	8.3.2
	Structural global response monitoring	(a) Acceleration: absolute maximum, maximum root mean square value (b) Deformation: mean, absolute maximum (c) Displacement: maximum, cumulative displacement (d) Modal parameters: frequency, mode, and damping ratio	8.3.3
	Structural local response monitoring	Strain: mean, maximum, minimum, stress amplitude maximum; support reaction time course: mean, maximum/minimum, and maximum change	8.3.4
Special assessment	(a) Maximum average wind speed > design wind speed (b) earthquake horizontal acceleration peak > design E1 earthquake's corresponding acceleration peak (c) the bridge was hit by a boat (d) the bridge is flooded		8.3.1–8.3.4

Fuente: Moreau, et al., 2018

Para conseguir esto, es necesario que la agencia desarrolle por cuenta propia o compre una de las plataformas comerciales disponibles para la gestión de información (Furtner et al, 2013) ya que además de ofrecer acceso remoto a los usuarios interesados y la obtención rápida de estos parámetros necesarios para el monitoreo de la estructura, permite sostener seguridad acerca de la información del puente. A diferencia de lo que ocurre con pavimentos, los pesajes en movimiento y la información climática, la información del estado del puente no puede ser compartida a todo el público, ya que, al ser estructuras muy críticas en la comunicación vial, estas deben ser resguardadas con mayor atención, así la información del estado del puente debe entregarse solo a usuarios relacionados a la gestión y cuidado de la estructura.

En el caso de la toma de decisiones, es evidente que solo determinar el estado de un puente no basta para tomar una decisión, en este caso el nivel de daño debe ser reunido con elementos asociados a los costos, la materialidad, los riesgos en el ambiente sobre el puente, el uso que quiere implementarse en el puente (aumento de pistas), implica que esta es una decisión holística.

Conclusiones y Recomendaciones

Se considera que del estudio realizado, se puede obtener las siguientes conclusiones

- Se ha caracterizado un proceso general de gestión de información, sobre el cual se establecieron requisitos y procedimientos en cada uno de sus hitos. Este proceso, consta de cuatro hitos principales: captura de información, almacenamiento y procesamiento de datos, validación de los registros y disposición de los datos conseguidos, agregando la toma de metadatos. En particular los hitos de captura de información y validación de registros se deben desarrollar en función de procedimientos que establezcan los pasos a seguir de acuerdo con las circunstancias dadas, mientras, para el almacenamiento y disposición de información, se considera apropiado liberar los medios para cumplir los requisitos establecidos.
- Para la captura de información, se establecen procedimientos en las estaciones de pesaje en movimiento y meteorológicas, que incluyen variables, frecuencia de envío de registros, inclusión de metadatos y reacciones frente a problemas de comunicación. En el caso del inventario y desempeño de pavimentos, al ser un proceso asociado a campañas de medición, se establece que este se mantenga libre entre la agencia vial y el prestador de servicio.
- Los procesos de validación, en los casos de estaciones meteorológicas y de pesaje en movimiento, se basan en detectar errores mediante pruebas de información mínima, rangos y coherencia entre variables, junto con, proponer una etiqueta en cada registro. Para el inventario y desempeño de pavimentos, se propuso un procedimiento que incluye las fases, antes, durante y después de la toma de datos, donde se establezcan procedimientos de control de calidad y control de aceptación.
- En el almacenamiento y manejo de datos, los protocolos establecen requisitos donde se asegura que los registros se encuentren en bases de datos que tengan un tamaño adecuado y la elaboración de copias de seguridad con cierta frecuencia, mientras, se considera para la disponibilidad de la información, proponer el uso de un portal web donde cualquier usuario interesado pueda descargar información con los formatos propuestos, incluyendo metadatos y la bitácora de cada activo.
- Para la instrumentación de puentes, en Chile no es factible establecer protocolos de gestión de información, ya que, su estado incipiente y la diversidad de objetivos en casos de instrumentación, apuntan a que primero corresponde normalizar los procedimientos de monitoreo. Así, se ha desarrollado la guía Normas y Lineamientos de Evaluación y Monitoreo Estructural para Puentes Chilenos, la cual busca servir de referente para próximos casos de instrumentación en puentes.

- En función de lo revisado, para asegurar una correcta gestión de información de pesaje en movimiento, estaciones meteorológicas e inventario y desempeño de pavimentos, todo protocolo de gestión de información, ya sean estos u otros, debe ceñirse a los cuatro hitos principales mencionados

Si bien los protocolos de gestión de información, se han desarrollado para cada tópico bajo una exhaustiva revisión del estado del arte y la práctica internacional, se sugiere lo siguiente para futuras investigaciones:

- Investigar sobre el uso de las mediciones meteorológicas en su faceta sinóptica, es decir, realizar este análisis con el fin de medir variables donde su fin es inmediato, tales como, velocidad del viento en zonas que puede generar riesgos, visibilidad en la carretera, detección de escarcha y/o presencia de nieve.
- Adaptar los procesos de validación de registros para alguna concesionaria en específico, elaborando rangos, pruebas de coherencia, diagramas de flujo y alertas en función del tránsito existente en dicha carretera
- Realizar una prueba piloto, en la cual se sigan los procedimientos y exigencias de los protocolos desarrollados para examinar su funcionamiento y posibles mejoras.

Referencias

- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T., and Wieringa, J., (2003). Guidance on metadata and homogenization. Wmo Td, 1186(January 2003):1–53.
- Aktan, A. E., Catbas, F. N., Grimmelsman, K. A., & Pervizpour, M. (2002). Development of a model health monitoring guide for major bridges. Rep. Dev. FHWA Res. Dev.
- Al-Qadi, I., Wang, H., Ouyang, Y., Grimmelsman, K., & Purdy, J. E. (2016). LTBP Program’s Literature Review on Weigh-in-Motion Systems.
- Andresen, L., Hellsten, E., Rissanen, P., Palsdóttir, T., & Arason, T. (2002). Quality control of meteorological observations.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Subcommittee on Bridges. (2011). The manual for bridge evaluation.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2016) Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method. AASHTO Designation: T 360-16
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017a) Standard Specification for Smoothness of Pavement at the Approaches to Weigh-In-Motion (WIM) Scales. AASHTO Designation: M 331-17.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017b) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8^o Edition.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) (2017) Standard Specification for Highway Weigh-In-motion (WIM) Systems with User Requirements and Test Methods. ASTM Designation: E 1318-09 (Reapproved 2017)
- Briaud, J. L., Chen, H. C., Li, Y., Nurtjahyo, P., & Wang, J. (2005). SRICOS-EFA method for contraction scour in fine-grained soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131(10), 1283-1294.

- Brownjohn, J. M. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 589-622.
- Burgos, S. (2019). Indicadores de desempeño para Capacidad Estructural y Vibraciones del Pavimento y Serviciabilidad de Paraderos, para Modelo de Niveles de Servicio en Carreteras Concesionadas. Memoria de Titulo. Ingeniería Civil. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile
- Camacho-Garita, E., Quirós-Cascante, M., Aguiar-Moya, J. P., & Loría-Salazar, L. G. (2016). Informe de Avance LTPP-CR 2016. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanam-meUCR.
- Catbas, F. N., Susoy, M., & Frangopol, D. M. (2008). Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data. *Engineering Structures*, 30(9), 2347-2359.
- Chase, S. B., Adu-Gyamfi, Y., Aktan, A. E., & Minaie, E. (2016). Synthesis of national and international methodologies used for bridge health indices (No. FHWA-HRT-15-081). United States. Federal Highway Administration.
- Choummanivong, L., & Martin, L. (2017). Austroads LTPP/LTPPM study: summary report 2015-16 (No. AP-T321-17).
- Comisu, C. C., Taranu, N., Boaca, G., & Scutaru, M. C. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *Procedia engineering*, 199, 2054-2059.
- Corbally, R., Žnidarič, A., Leahy, C., Kalin, J., Hajializadeh, D. and Zupan, E., (2014) Algorithms for Improved Accuracy Static Bridge-WIM System, Bridgemon D1.3 Report. Dublin: ROD.
- Dagá, J., Chamorro, A., de Solminihac, H., & Echaveguren, T. (2018). Development of fragility curves for road bridges exposed to volcanic lahars.
- Dalia, Z. M., Bagchi, S., Sabamehr, A., Bagchi, A., & Bhowmick, A. (2018). Life cycle cost-benefit analysis of SHM of I-35 W St. Anthony Falls bridge. *strain*, 9(14), 15.
- Delgadillo, R., Arteaga, L., Wahr, C., & Garcia, G. (2017a). Comparación de metodologías de zonificación superpave para Chile.
- Delgadillo, R., Segovia, M., Wahr, C., & Thenoux, G. (2017b). Zonificación superpave para Chile. *Revista ingeniería de construcción*, 32(1), 25-36.
- Department of Transportation the State of New Jersey (DOT NJ) (2019). New Jersey Department of Transportation Pavement Data Collection Data Quality Management Manual.
- Ding, Y., Yan, T., Yao, Q., Dong, X., & Wang, X. (2016). A new type of temperature-based sensor for monitoring of bridge scour. *Measurement*, 78, 245-252.

- Dirección de Vialidad (2015) Estudio Básico Auscultación Automatizada de Parámetros de Deterioro de Pavimentos, Región de Antofagasta.
- Dirección de Vialidad (2017) Informe Proposiciones de Acciones de Mantenimiento (PAM) y Estado de la Calzada y Bermas para caminos Pavimentados de la Red Vial nacional, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Dirección Meteorológica de Chile DMCH (2015) Bases técnicas-adquisición de sistemas meteorológicos climato- lógicos fase IV.
- Dolcemascolo, V., Hornyh, P., Jacob, B., Schmidt, F., & Klein, E. (2015). Heavy Vehicle Traffic and Overload Monitoring in France and Applications. In The XXVth World Road Congress PIARC (pp. 1-12).
- Dowling, L., & Rummey, G. (2004). Guidelines for Bridge Management: Structure Information (No. AP-R252/04).
- Durán, G., Altamirano, H., Arias, G., y Rodríguez, J. (2017) Plan de Mantenimiento de Puentes de la Empresa de Ferrocarriles del Estado. Segundo Congreso Internacional de Puentes-Chile; Diseño, Construcción y Mantenimiento.
- Dutch Metrology Institute (NMI) (2016) International WIM standard - Specifications and test procedures for Weigh-in-Motion Systems.
- Eady, P., Giang, C., & Taylor, S. (2016). National strategic weigh-in-motion network (No. AP-R535-16).
- Ebensperger, M. (2020) Propuesta conceptual para evaluación del servicio a la comunidad y el medio ambiente aledaños durante la operación de una carretera interurbana concesionada. Tesis de Magíster. Universidad Técnica Federico Santa María
- Elkins, G. E., Ostrom, B., Visintine, B. A., & Groeger, J. (2012). Long-term pavement performance ancillary information management system (AIMS) reference guide (No. FHWA-HRT-12-058). United States. Federal Highway Administration.
- Enright, B., & OBrien, E. J. (2011). Cleaning weigh-in-motion data: Techniques and recommendations. University College Dublin & Dublin Institute of Technology.
- Estévez, J., & Gavilán, P. (2006). Test de coherencia espacial. Aplicación de la Red de Información Agroclimática de Andalucía.
- Fan, W., & Qiao, P. (2011). Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study. *Structural Health Monitoring*, 10(1), 83–111. <https://doi.org/10.1177/1475921710365419>
- Fendi, K. G., Adam, S. M., Kokkas, N., & Smith, M. (2014). An approach to produce a gis database for Road Surface Monitoring. *APCBEE procedia*, 9, 235-240.

- Federal Highway Administration (FHWA). (2001). Guide to LTPP traffic data collection and processing.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2007). Effective Use of Weigh-in-Motion Data: The Netherlands Case Study. Publication No. FHWA-PL-07-028.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2013)LTPP Information Management System IMS Quality Control Checks.
- Federal Highway Administration (FHWA). (2015) Traffic Monitoring Guide
- Fendi, K. G., Adam, S. M., Kokkas, N., & Smith, M. (2014). An approach to produce a gis database for Road Surface Monitoring. APCBEE procedia, 9, 235-240.
- Fisher, M., Chowdhury, M. N., Khan, A. A., & Atamturktur, S. (2013). An evaluation of scour measurement devices. Flow Measurement and Instrumentation, 33, 55-67.
- Flintsch, G., Dymond, R., & Collura, J. (2004). NCHRP Synthesis 335–Pavement Management Applications Using Geographic Information Systems. Transportation Research Board, 1-73.
- Flintsch, G., & McGhee, K. (2009). NCHRP Synthesis 401: Quality management of pavement condition data collection. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC.
- France-Mensah, J., O'Brien, W. J., Khwaja, N., & Bussell, L. C. (2017). GIS-based visualization of integrated highway maintenance and construction planning: a case study of Fort Worth, Texas. Visualization in Engineering, 5(1), 7.
- Furtner, P., Stöger, M., & Schreyer, M. (2013). SHM DATA—management, treatment, analysis and interpretation—a solution for permanent monitoring systems. In 6th International conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure, Hong Kong (pp. 9-11).
- Garach Morcillo, L. (2013). Medida de la consistencia en carreteras convencionales y su relación con la seguridad vial. Aplicación a la provincia de Granada (Doctoral Dissertation. Universidad de Granada).
- Ghosn, M., Frangopol, D. M., McAllister, T. P., Shah, M., Diniz, S. M. C., Ellingwood, B. R., ... & Zhao, X. L. (2016). Reliability-based performance indicators for structural members. Journal of Structural Engineering, 142(9), F4016002.
- Godart, B., & Vassie, P. R. (1999). Review of existing BMS and definition of inputs for the proposed BMS. BRIME Report Project PL97-2220, 18-22.
- Guajardo, R., Granado, G., Sánchez, I., Díaz, G., & Barbosa, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. Tecnología y ciencias del agua, 8(5), 157-177.

- Hallenbeck, M., & Weinblatt, H. (2004). Equipment for collecting traffic load data (Vol. 509). Transportation Research Board.
- Hamill, L. (1998). Bridge hydraulics. CRC Press.
- Han, C., Bennett, P., & Luk, J. (2010). Weigh-in-motion management and operation manual. (No. AP-T171/10).
- Hooks, J. M., & Weidner, J. (2016). Long-Term Bridge Performance (LTBP) Program Protocols, Version 1 (No. FHWA-HRT-16-007). Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Hsien-Ke, L., Jallow, M., Nie-Jia, Y., Ming-Yi, J., Jyun-Hao, H., Cheng-Wei, S., & Po-Yuan, C. (2017). Comparison of Bridge Inspection Methodologies and Evaluation Criteria in Taiwan and Foreign Practices. In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 34). IAARC Publications.
- Hunt, B. E. (2009). Monitoring scour critical bridges (Vol. 396). Transportation Research Board.
- Hussein, E. A. (2012). Vibration based damage detection of scour in coastal bridges. North Carolina State University, 1-208.
- Im, S. B., Hurlebaus, S., & Kang, Y. J. (2013). Summary review of GPS technology for structural health monitoring. Journal of Structural Engineering, 139(10), 1653-1664.
- Inaudi, D. (2009). Structural Health Monitoring of bridges: general issues and applications. In Structural health monitoring of civil infrastructure systems (pp. 339-370). Woodhead Publishing.
- Inaudi, D., Bolster, M., Deblois, R., French, C., Phipps, A., Sebasky, J., & Western, K. (2009). Structural health monitoring system for the new I-35W St Anthony Falls Bridge. In 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII 2009.
- Iturriaga, F. (2013). Análisis de espectros de carga para 6 plazas de pesaje chilenas y 4 wim zona urbana santiago norte, y su influencia en el desempeño de los pavimentos de hormigón. Memoria de Título. Ingeniería Civil. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Jacob, B., & Feypell-de La Beaumelle, V. (2010). Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. IATSS research, 34(1), 9-15.
- Jacob, B., & Loo, H. V. (2008). Weigh-in-motion for enforcement in Europe. In Proceedings of the 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology, Paris, France (pp. 19-22).
- Jacob B., OBrien, E. and Jehaes, S. (2002). COST 323 Weigh-in-Motion of Road Vehicles: Final Report.
- Jones, D. J., & Paige-Green, P. (2003). Protocol for the establishment and operation of LTPP sections-1st draft.

- Kaimal, J. (1980). Sonic anemometers. In *Air-Sea Interaction*, pages 81–96. Springer.
- Karbhari, V., & Lee, L. (2009). Vibration-based damage detection techniques for structural health monitoring of civil infrastructure systems. In *Structural health monitoring of civil infrastructure systems* (pp. 177-212). Woodhead Publishing.
- Ko, J. and Ni, Y. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27(12):1715 – 1725. SEMC 2004 Structural Health Monitoring, Damage Detection and Long-Term Performance.
- Koniditsiotis, C. (2000). Weigh-in-motion technology (No. AP-R168/00).
- Koniditsiotis, C., Buckmaster, R., & Fraser, P. (1995). Australian High Speed Weigh-In-Motion-An Overview. In *International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions* (4th: 1995: Ann Arbor, Mich.). Road transport technology--4.
- Kulprapha, N., & Warnitchai, P. (2012). Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses. *Engineering Structures*, 40, 20-38.
- Leahy, C. (2013). Using weigh-in-motion data to predict extreme traffic loading on bridges (Doctoral dissertation, University College Dublin).
- León Méndez, A. J., Hernández González, A., Garrido Monagas, M., & Andalia Gilbert, A. I. (2013). Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 73-87.
- Long-Term Pavement Performance (LTPP) (2001). *Data Collection Guides for SPS WIM Sites*, Version 1.0. FHWA, Washington, DC.
- Lui-Kuan, Y. C., Castillo-Barahona, R., & Loría-Salazar, L. G. (2013). Monitoreo y evaluación estructural de puentes utilizando un sistema de Instrumentación Inalámbrico. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.
- Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164.
- Manfredi, J., Walters, T., Wilke, G., Osborne, L., Hart, R., Incrocci, T., ... & Krechmer, D. (2008). Road weather information system environmental sensor station siting guidelines, version 2.0 (No. FHWA-HOP-05-026).
- Márquez, M., Bazález, R., Boroscheck, R., Luders, C., Cerda, F., Soto, P., Valdebenito, G., Valenzuela, M., Alende, I., Subcomité de Mantenimiento (2017). Monitoreo Estructural de Puentes en Chile: Estado del Arte. Segundo Congreso Internacional de Puentes-Chile; Diseño, Construcción y Mantenimiento
- Martin, T., Byrne, M., & Aguiar, G. (2011). Establishment of a new pavement maintenance database: stage 1 and 2 analysis (No. AP-R394/11).

- Martin, T., & Choummanivong, L. (2016). The benefits of long-term pavement performance (LTPP) research to funders. *Transportation Research Procedia*, 14, 2477-2486.
- Martinez, L., Quintana, J., Arroyo, B., Carrión, F., Crespo, S. , Hernandez, J., & Hernandez, A. (2016). Sistema inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes.
- Mayorga, J. (2016). Metodología para el diseño preliminar de sistemas de diagnóstico estructural conceptos, recomendaciones y aplicaciones para puentes. Tesis de Magíster. Universidad de Concepción.
- McNeill, D. K. (2009). Data management and signal processing for structural health monitoring of civil infrastructure systems. In *Structural health monitoring of civil infrastructure systems* (pp. 283-304). Woodhead Publishing.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP) (2009) Bases de Licitación Concesión Autopista de la Región de Antofagasta. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2012). Bases de Licitación Concesión Mejoramiento y Conservación de la Ruta 43, de la Región de Coquimbo. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP) .(2015). Dirección General de Concesiones. Bases de licitación “Segunda Concesión Camino Nogales-Puchuncaví”, Chile.
- Molina, N. (2012). Diseño de un sistema de gestión de puentes bajo enfoque de priorización de la inversión. Memoria de Título. Ingeniería Civil. Universidad Austral de Chile
- Moreu, F., Li, X., Li, S., & Zhang, D. (2018). Technical specifications of structural health monitoring for highway bridges: New Chinese structural health monitoring code. *Frontiers in Built Environment*, 4, 10.
- Muñoz, R., (2020) . Desarrollo de un Modelo para Evaluar el Nivel de Servicio de Carreteras Interurbanas Concesionadas desde el Punto de Vista del Usuario. Tesis de Magíster. Universidad Técnica Federico Santa María
- O’Brien, E., Znidaric, A., Baumgärtner, W., González, A., McNulty, P. (2001). Weighing-in-motion of axles and vehicles for europe (wave) wp2: A data quality assurance system for the european wim-database.
- Oehry, B., Haas, L., & van Driel, C. (2013). Study on heavy vehicle on-board weighing. Final report. Rapp Trans AG. Belgium, 20.
- Orcesi, A. D., & Frangopol, D. M. (2011). Optimization of bridge maintenance strategies based on structural health monitoring information. *Structural Safety*, 33(1), 26-41.
- Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML) (2006) Automatic instruments for weighing road vehicles in motion and measuring axle loads. OIML, R. 134-1

- Organización Internacional de Normalización (ISO) (2010) Bases for design of Structures-Assessment of existing structures. ISO Designation: 13822: 2010
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2011). Guía de prácticas climatológicas. Suiza, OMM.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2017) Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos.
- Papagiannakis, A. T., Quinley, R., & Brandt, S. R. (2008). High speed weigh-in-motion system calibration practices (Vol. 386). Transportation Research Board.
- Pierce, L. M., McGovern, G., & Zimmerman, K. A. (2013). Practical guide for quality management of pavement condition data collection.
- Pigman, J. G., Graves, C., Hunsucker, D. Q., & Cain, D. (2012). Wim Data Collection and Analysis.
- Phares, B. M., Rolander, D. D., Graybeal, B. A., & Washer, G. A. (2000). Studying the reliability of bridge inspection. *Public Roads*, 64(3), 15-19.
- Plummer, N., Lipa, W., Palmer, S., Prank, G., Shortridge, J., & Stuber, D. (2007). Directrices sobre la gestión de datos climáticos. Ginebra, organización meteorológica mundial.
- Prendergast, L. J., & Gavin, K. (2014). A review of bridge scour monitoring techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(2), 138-149.
- Prendergast, L. J., Gavin, K., & Reale, C. (2016). Sensitivity studies on scour detection using vibration-based systems. *Transportation Research Procedia*, 14, 3982-3989.
- Quinley, R. (2010). WIM data analyst's manual (No. FHWA-IF-10-018). United States. Federal Highway Administration.
- Rehman, S. K. U., Ibrahim, Z., Memon, S. A., & Jameel, M. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and building materials*, 107, 58-86.
- Roberts, G. W., Meng, X., & Dodson, A. H. (2004). Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor the deflection of bridges. *Journal of Surveying Engineering*, 130(2), 65-72.
- Rodrigues, C., Félix, C., Lage, A., & Figueiras, J. (2010). Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges. *Engineering Structures*, 32(8), 1993-2002.
- San Juan, A. (2013). Análisis crítico y comparativo de fórmulas para estimación de socavación en puentes. Memoria de Título. Ingeniería Civil. Universidad Técnica Federico Santa María

- Schwartz, C. W., Elkins, G. E., Li, R., Visintine, B. A., Forman, B., Rada, G. R., & Groeger, J. (2015). Evaluation of long-term pavement performance (LTTP) climatic data for use in mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG) calibration and other pavement analysis (No. FHWA-HRT-15-019). Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Shannon, C. (1949) Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37 (1), 10-21.
- Shekharan, R., Frith, D., Chowdhury, T., Larson, C., and Morian, D. (2007). Effects of comprehensive quality assurance/quality control plan on pavement management. *Transportation Research Record*, 1990(1):65–71.
- Silverman, B. W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis* (Vol. 26). CRC press.
- Simpson, A. L., Ostrom, B. K., & Schmalzer, P. N. (2006). *Guidelines for the collection of long-term pavement performance data* (No. FHWA-HRT-06-067). United States. Federal Highway Administration.
- Simpson, A. L., & Copeland, C. R. (2006). *Long-Term Pavement Performance Inventory Data Collection Guide* (No. FHWA-HRT-06-066). United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development.
- Sivakumar, B., Ghosn, M., and Moses, F. (2011). *Protocols for collecting and using traffic data in bridge design*, volume 683. Transportation Research Board.
- Sohn, H., Wait, J. R., Park, G., Farrar, C. R., et al. (2004). Multi-scale structural health monitoring for composite structures. In *The 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring. Structural Health Monitoring*.
- Solminihaç, H. (1998). *Gestión de infraestructura vial*. Editorial Universidad Católica de Chile, Chile.
- *Structural Assessment Monitoring and Control (SAMCO) (2006). Ambient vibration monitoring., Case studies., Certification., Guidelines for structural control., Guideline for the assessment of existing structures., Guideline for SHM, in Report on Bridge Management., SAMCO Monitoring Glossary., SAMCO History and Events., and Strategic Research Agenda*
- Sweere, G. T. H., Dohmen, L. J. M., Jämsä, H., Potter, J. F., & Waterbouwkunde, D. W. E. (1998). *Paris performance analysis of road infrastructure in Europe*.
- Thomson, D. J. (2013). The economic case for service life extension of structures using structural health monitoring based on the delayed cost of borrowing. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 3(4):335–340.
- Una Norma Española (UNE) (2004) *Redes de estaciones meteorológicas automáticas. directrices para la validación de registros meteorológicos procedentes de redes de estaciones automáticas. validación en tiempo real*. Designación UNE: 500540

- Valenzuela, M. A. and Peña-Fritz, A. (2019). The state of damage on south american road bridges due to degradation and extreme events: a proposal for performance indicators. 15:244–251.
- Valenzuela, S., Solminihac, H., and Echaveguren, T. (2009). Proposal of an integrated index for prioritization of bridge maintenance. *Journal of Bridge Engineering*, 15:337.
- Villaluenga Morán, J. L. (2011). Uso de acelerómetros para el control de dispositivos mediante captura de movimiento.
- Walker, D. and Cebon, D. (2011). The metamorphosis of long-term pavement performance traffic data. *TR News-Transportation Research Board*, (277):9.
- Watson, C., Watson, T., and Coleman, R. (2007). Structural monitoring of cable-stayed bridge: analysis of gps versus modeled deflections. *Journal of Surveying Engineering*, 133(1):23–28.
- White, G., Velozo, S., Peshkin, D., and Ram, P. (2016). Framework for a Pavement- Maintenance Database System. Number Project 14-31
- Wieringa, J. (1967). Evaluation and design of wind vanes. *Journal of Applied Meteorology*, 6(6):1114–1122.
- Wylie, R. G. and Lalas, T. (1992). Measurement of temperature and humidity: specification, construction, properties and use of the WMO reference psychrometer. Number 194. World Meteorological Organization.
- Yu, X., & Yu, X. (2010). Laboratory evaluation of time-domain reflectometry for bridge scour measurement: comparison with the ultrasonic method. *Advances in Civil Engineering*, 2010.
- Zahumensk'ý, I. (2004). Guidelines on quality control procedures for data from automatic weather stations. World Meteorological Organization, Switzerland.
- Zanini, M. A., Faleschini, F., and Casas, J. R. (2019). State-of-research on performance indicators for bridge quality control and management. 5.
- Zanolli., J. (2011). Datos climatológicos de Chile para la elaboración del modelo chile-SR. Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Zhang, L. (2007). An evaluation of the technical and economic performance of weigh-in-motion sensing technology. Tesis de Magíster, University of Waterloo.
- Zhang, Z., Rehtien, M. R., Fowler, D. W., & Hudson, W. R. (1999a). A Summary of Pavement and Material-related Databases within the Texas Department of Transportation (No. FHWA/TX-00/1785-1). University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.
- Zhang, Z., Rehtien, M. R., Fowler, D. W., & Hudson, W. R. (1999b). Plan for Developing a Materials Performance Database for the Texas Department of Transportation (No. FHWA/TX-00/1785-2). University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.

-
- Zhou, G., Wang, L., Wang, D., and Reichle, S. (2010). Integration of gis and data mining technology to enhance the pavement management decision making. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4):332–341.
 - Žnidaric, A., Kreslin, M., Leahy, C., OBrien, E., Schmidt, F., and Pederson, C. (2015). Guidelines on collecting wim data and forecasting of traffic load effects on bridges. Technical report for the Re-Gen project.
 - Zolghadri, N. (2017). Short and Long-Term Structural Health Monitoring of Highway Bridges.

Apéndice A

Información capturada por proyectos viales

A.1. Proyecto PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure)

PARIS es un proyecto que comenzó en octubre de 1996 y acabó en septiembre de 1998, teniendo el objetivo principal de desarrollar modelos de deterioro para los diferentes pavimentos de Europa. Este proyecto, tuvo la particularidad de alimentar sus modelos de deterioro con mediciones realizadas a lo largo de Europa y, que dichas mediciones fueran complementadas con registros obtenidos en pistas de pruebas aceleradas como la de CEDEX en España y la de LCPC en Francia (Sweere et al., 1998).



Figura A.1.1: Pista de ensayo acelerado LCPC (izquierda) y CEDEX (derecha)

Dado que el proyecto PARIS utilizó información sobre secciones de pavimento real a lo largo de Europa, se debió obtener la información sobre su estructura, número de capas, espesores de capas, fechas de construcción y mantenimiento, tipos de pavimentos y otros elementos necesarios para un acabado conocimiento de la estado de los pavimentos utilizados para alimentar los modelos de deterioro:

Tabla A.1.1: *Campo de datos de Inventario (Sweere et al, 1998)*

Field Name	Description
PARIS_ID	Identification number for PARIS test section
Local_ID	Identification number or code for test section in local performance study
Country	Country in which test section is located
Constr	Type of construction of test section
Lanes	Number of lanes on test site in both directions
Width	Width of the lane on which the test section is located
In_Serv	Test section still in service (yes/no)
Date_Out	Date test section out of service

Tabla A.1.2: *Campo de datos de construcción (Sweere et al, 1998)*

Field Name	Description
PARIS_ID	Identification number for PARIS test section
Pave	Type of pavement construction
Surf	Type of surface layer
Th_Bit	Total thickness of bituminous layers
Th_Rig	Total thickness of rigid layers
Th_Gra	Total thickness of granular base layer(s)
Th_Sub	Total thickness of sub-base layer(s)
Subgrade	Type of subgrade
Rig_Type	Type of rigid layer

Tabla A.1.3: *Campos de datos de Rehabilitación (Sweere et al, 1998)*

Field Name	Description
PARIS_ID	Identification number for PARIS test section
Y_Const	Year of construction
Y_Overl	Year of latest overlay
Y_Surf	Year of latest surface layer

Sobre las mediciones de desempeño, en este proyecto se registraron alrededor de 720 secciones a las cuales se le midieron diferentes características, entre ellas es posible mencionar:

- Agrietamiento de cocodrilo o bloque para baja, mediana y alta severidad
- Agrietamiento longitudinal y transversal de baja, mediana y alta severidad
- Raveling
- Deflectometría de impacto
- Regularidad longitudinal
- Ahuellamiento en ambas huellas de las ruedas

A.2. Estados Unidos

A.2.1. Long-Term Pavement Performance

En los Estados Unidos, desde el año 1986 en el marco de un proyecto SHRP, se concreta la idea de generar una base de datos sobre el desempeño de los pavimentos a un largo plazo (LTPP por sus siglas en inglés). Y es por este registro que al día de hoy LTPP contiene información de más de 2500 secciones de estudios generales de pavimentos (GPS) y de estudios específicos de pavimento (SPS), donde la diferencia entre ambos es que en los SPS se busca determinar el efecto sobre el desempeño de una situación o material, por ejemplo, un nuevo betún asfáltico, o pavimentos con poca carga, mientras que los primeros solo se consideran por ser pavimentos representativos de la zona en que están emplazados.

Como elemento primordial, el LTPP requiere tener información detallada sobre cada una de sus secciones en estudio. Por ejemplo, la información de inventario, LTPP ha desarrollado la guía sobre *Colección de datos de Inventario* (Simpson y Copeland, 2006), en esta guía se busca proveer uniformidad a la hora de recopilar la información de inventario, mediante el uso de códigos y explicación de cada uno de ellos. Dicha información se puede dividir en tres partes principales:

- Identificación de la sección
- Detalles geométricos de su construcción y propiedades de los materiales
- Identificar costos de construcción y costos de acciones de conservación.

En más detalle, los campos que LTPP entrega por cada sección son las siguientes:

Tabla A.2.1: *Identificación y detalles geométricos de la sección de estudio (Simpson y Copeland, 2006).*

1. Test Section Identification	
Route Number State, County, and District Lane Monitored Experiment Code	Functional Class Location of Test Section Direction of Travel
2. Geometric Details and General Information	
Number of Lanes Lane Width Type of Pavement Type of Subsurface Drainage Location of Subsurface Drains Identification of Layer Materials Thickness of Layers Depth to Rigid Layer Year Widened Identification of Materials Used in Overlay or Reconstruction Dowel Bar Diameter, Length, and Installation Method	Shoulder Width Shoulder Structure Portland Cement Concrete (PCC) Shoulder Joint Information Year Originally Constructed Thicknesses of Overlays or Final Layer Years when Major Improvements Occurred Joint Spacing, Reservoir Width Sealant Type and Forming Method Type of Load Transfer (Aggregate Interlock or Dowels) Tie Bar Spacing, Coating, Diameter, Length, and Spacing

Tabla A.2.2: *Propiedades de los materiales (Simpson y Copeland, 2006).*

3. Material Properties	
a. Subgrade Soil	
Soil Type and Classification Plasticity Index In Situ Dry Density In Situ Moisture Content Swell Potential Frost Susceptibility Resilient Modulus Relative Density Optimum Laboratory Moisture Content	Liquid Limit Percent Passing No. 40 Sieve Percent Passing No. 200 Sieve California Bearing Ratio R-Value Modulus of Reaction Maximum Laboratory Dry Density Soil Suction Rate of Heave
b. Base and Subbase Layers (Unbound or Stabilized)	
Soil Type and Classification Optimum Laboratory Moisture Content Material Gradation Percent of Stabilizing Agent California Bearing Ratio Resistance (R-Value) Compressive Strength	Maximum Laboratory Dry Density In Situ Dry Density In Situ Moisture Content Resilient Modulus Type of Treatment (Cement, Lime, etc.) Modulus of Subgrade Reaction

Tabla A.2.3: *Materiales y costos asociados (Simpson y Copeland, 2006)*

c. Asphalt Concrete (AC) Layers	
Asphalt Grade Asphalt Content Penetration of Original Asphalt Source and Specific Gravity of Asphalt Viscosity and Ductility of Original Asphalt Softening Point of Asphalt Types of Asphalt Modifiers Original Stability Properties of Laboratory Aged Asphalt Type of Asphalt Plant In-Place Mixture Properties Type and Amount of Antistripping Additives Compaction Data Mixing Temperatures	Initial Air Voids Voids in Mineral Aggregate Types of Coarse and Fine Aggregates Geologic Classifications of Coarse Aggregates Polish Value of Coarse Aggregates Gradations of Coarse and Fine Aggregates Bulk Specific Gravities of Aggregates Effective Specific Gravities of Aggregates Aggregate Durability Resilient Modulus Tensile Strength Creep Compliance Moisture Susceptibility
d. Portland Cement Concrete Layers	
Type, Amount, Yield Strength, and Placement of Reinforcing Steel Mix Design Information Coarse Aggregate Type and Gradation Fine Aggregate Type and Gradation Alkali Content of Cement Entrained Air Aggregate Durability Method for Curing and Finishing	Modulus of Rupture Elastic Modulus Tensile Strength Compressive Strength Type of Paver Slump Type of Cement Insoluble Residue Bulk Specific Gravities
4. Historical Pavement Related Cost Data	
Initial Construction Cost Costs for Major Improvements Maintenance Costs	

Para conocer el desempeño de la sección de estudio durante su vida de servicio, el LTPP norteamericano captura de forma periódica registros que detallan mediciones de deflectometría de impacto, fricción

superficial, evaluaciones de deterioro y mediciones de perfil longitudinal de la carretera. La siguiente tabla muestra los módulos dentro de la base de datos de LTPP que comprenden el área de monitoreo de desempeño

Tabla A.2.4: *Módulos de datos para el monitoreo de desempeño de pavimentos (Simpson et al., 2006).*

Módulo de datos	Prefijo nombre tablas	Descripción
Data Consolidated Views	NA	Este módulo contiene datos sobre las propiedades de las capas consolidadas de módulos INV (inventario), RHB (rehabilitaciones) y SPS (estudios específicos)
Deflection /FWD	MON_ DEFL	Deflexión es un submódulo de los datos de monitoreo. Este contiene datos de las pruebas de deflectometría
Distress	MON_ DIS	Deterioros es un submódulo de los datos de monitoreo. Este contiene datos de deterioro tanto de estudios manuales y basadas en filmaciones
Drainage		Drenaje es un submódulo de los datos de monitoreo. Este contiene las condiciones generales del sitio y los resultados de las inspecciones en vídeos de los sistemas de drenes de las secciones SPS 1 y 2.
Friction	MON_ FRICTION	Fricción es un submódulo de los datos de monitoreo. Este contiene mediciones de fricción tomadas por agencias de carreteras participantes. Hoy en día estos datos son solo una opción a medir.
Profile (Longitudinal)	MON_ PROFIL	Perfil longitudinal es un submódulo de los datos de monitoreo. Este contiene datos recolectados por un perfilómetro automático o por mediciones hechas con dipstick manual
Profile (Transverse) /RUT	MON_ T_PROOF	Perfil trasversal es un submódulo de los datos de monitoreo. Este contiene tanto datos de perfil trasversal como índices de distorsión del perfil trasversal calculados de mediciones manuales (dipstick) o de los sistemas Ópticos de Análisis de Deterioros (PADIAS)

Cada una de las áreas de la tabla, goza de la pertenencia de diferentes manuales para la obtención de los registros pertinentes (Simpson et al., 2006). Además, es posible mencionar, que algunos de los registros obtenidos de cada tópico son los siguientes:

Deflectometría

Con el objetivo de evaluar la condición estructural de los pavimentos, LTPP registra mediante el uso del software de recopilación de datos propio del deflectómetro, los registros de tiempo, temperaturas del aire y del pavimento, ubicación, deflexiones, cargas, carga seleccionada y datos históricos de deflexión. Por otro lado, LTPP también registra información acerca de la calibración realizada sobre el deflectómetro.

Deterioros

La información de deterioros de LTPP, se registra tanto de forma manual como semiautomática. Esta incluye pero no se limita al tipo de deterioro, severidad y cantidad de agrietamiento en la sección; y sobre los defectos superficiales, perfiles transversales, escalonamiento, bacheo y otros deterioros.

Perfil Longitudinal

Los registros sobre el perfil longitudinal en LTPP, son obtenidos mediante perfilómetros inerciales y el uso de Face Dipstick en casos de que no sea posible el uso del perfilómetro inercial. Dentro de las mediciones finales, se obtiene el IRI en cada huella de la rueda, su promedio y el número de pasadas para las mediciones.

A.2.2. NCHRP Report 820 - Framework for a Pavement-Maintenance Database System

Esta publicación (White et al., 2016) se enfoca en el problema de recopilar la información de inventario, mantención y condición de carreteras, ya que, se ha detectado que las agencias de tránsito norteamericanas recopilan parte de esta información para respaldar su toma de decisiones, sin reparar, en la información necesaria para que estas decisiones puedan ser mejores en el tiempo, mediante un proceso de análisis crítico. En otras palabras, no se hace una revisión, sobre si las decisiones tomadas fueron las opciones óptimas y como poder mejorarlas en las próximas decisiones a tomar.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue el de desarrollar un marco para un sistema de bases de datos que incluya acciones de mantenimiento, materiales y metodologías utilizadas y que a la vez permita evaluar la efectividad de estos para pavimentos asfálticos, de hormigón y compuestos; siempre buscando la uniformidad de la información recopilada para mejorar la decisión sobre dichas acciones de mantenimiento. Para conseguirlo, una de sus primeras tareas fue la decisión de que información recopilar, cual no y los rangos de validez de estos datos. Esta decisión se dividió en tres ítems principales, inventario, mantenimiento y condición del pavimento. Algunos ejemplos de cada ítem son los siguientes:

■ Inventario

Tabla A.2.5: *Datos generales de una sección para inventario (White et al., 2016)*

Data Element	Description	Required?	Default Values
Functional classification	HPMS functional classification code	Yes	Interstate Other freeways and expressways Other principal arterial Minor arterial Major collector Minor collector Local
Rural code	HPMS urbanized area code	Yes	Rural Small urban Large urban Federal-aid interstate
Climatic zone	Environmental conditions at the location of the pavement	Yes	Dry freeze Wet freeze Dry no freeze Wet no freeze

■ Mantenimiento

Tabla A.2.6: *Datos generales de actividades de mantención sobre una sección (White et al., 2016)*

Data Element	Description	Required?	Default Values
Treatment name	Name of the specific maintenance activity being performed	Yes	See asphalt-surface pavement treatment data elements and concrete-surface pavement treatment data elements
Treatment type	Category of maintenance treatment	Yes	Preventive Routine Reactive
Treatment reason	Purpose or objective in placing the maintenance treatment	Yes	Safety improvement Noise reduction Service life extension Condition improvement Ride improvement Stopgap
Contract type	Type of contract for the maintenance treatment	Yes	In-house Contractor Warranty Performance

■ Condición del pavimento

Tabla A.2.7: *Datos de condición de un pavimento (White et al., 2016).*

Data Element	Description	Required?
Distress name	Name of distress being recorded (see Table 44 and Table 45)	Yes
Distress severity	Severity or state of distress, such as low, medium, or high	Yes
Distress amount	Specific amount of distress, such as linear feet or square feet	Yes

A.2.3. Plan for the developing a Materials Performance Database for the Texas Department of Transportation

Este reporte técnico (Zhang et al., 1999b) del año 1999, tiene el objetivo de delimitar los registros necesarios para desarrollar una base de datos que permita el monitoreo del desempeño de los materiales utilizados por el departamento de tránsito de Texas. Una de las principales tareas en este estudio, fue la de priorizar que propiedades de los materiales debían registrarse entendiéndose que los procesos de diseño y los tipos de materiales varían en el tiempo, es decir, se debía encontrar una metodología que permitiera la priorización de información, obteniendo como resultado una lista de propiedades a capturar, pero que a la vez permitiera el ingreso de nuevas metodologías, materiales o propiedades según avance el tiempo.

La solución a este problema, fue el uso de Cartas de Organización de Datos (DOCS por su sigla en inglés). Estas se componen gráficos, donde mediante cajas y uniones se puede organizar la información en niveles decrecientes. La ventaja de estas, es que permite una claridad en las relaciones entre materiales

y propiedades. La figura A.2.1 es un ejemplo de una DOC, donde se puede ver los diferentes niveles de datos, hasta donde se encuentran las propiedades finales.

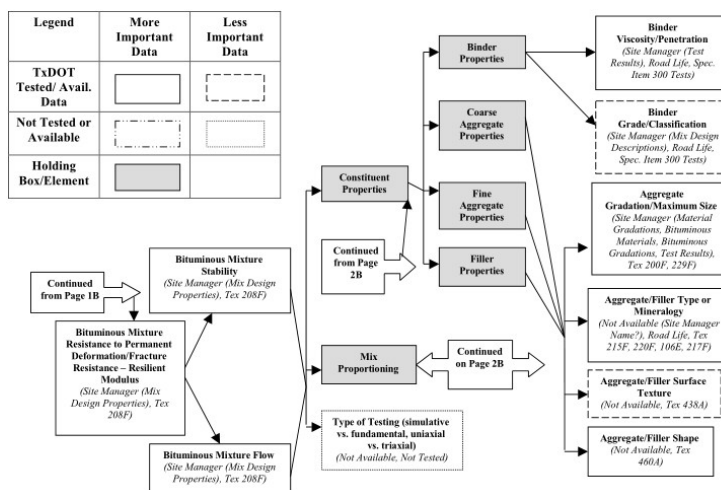


Figura A.2.1: DOC sobre resistencia a la deformación permanente, resistencia a la fractura y módulo resiliente del asfalto (Zhang et al., 1999b).

Una vez las DOCS se encuentran terminadas, comienza el proceso de priorización. No todas las propiedades son atingentes al problema, o no todas son medidas o almacenadas en algún base de datos. Para conseguir esta priorización, en este proyecto se revisaron los procedimientos de diseño como AASHTO o procesos mecanicistas para los distintivos tipos de pavimento y también, se revisó la disponibilidad de la información en las bases de datos de mantenimiento, gestión de pavimentos y vida de servicio de la red de Texas (Zhang et al., 1999a)

Finalmente en el apéndice de este estudio, se encuentran las DOCS para pavimentos de hormigón, asfalto y pavimentos compuestos, donde además se establece su disponibilidad y nivel de relevancia para una base de datos que permita controlar y conocer el desempeño de los materiales utilizados, tal como se ve en la figura A.2.1.

A.3. LTPP-LanammeUCR

En Costa Rica desde el año 2004, se decide la medida de reunir periódicamente información sobre el estado de los pavimentos, sin embargo, la información de desempeño por si sola no es suficiente, se necesita además una valoración específica para cada condición. Para esto, han establecido un proyecto de monitoreo a largo plazo de secciones de pavimentos en uso en Costa Rica, incluyendo la información de desempeño, materiales y otros, al cual también se le ha llamado LTPP.

Al igual que los otros LTPP, se ha buscado una diversa gama de tipos de pavimentos, en distintos climas y distintos tránsitos, a pesar de esto, no se debe dejar de lado el hecho que es un proyecto bastante nuevo

y que por lo mismo solo se mantiene con 25 secciones, con algunas recién construidas y otras que ya estaban en servicio.

En general, además de la información de desempeño de las vías, este LTPP recoge información sobre la sección, pruebas con sus materiales y espesores. Como ejemplo, se muestran las siguientes tablas que hablan de la información aquí incorporada (Camacho-Garita et al., 2016) :

Tabla A.3.1: *Detalles sección LTPP Costa Rica (Camacho-Garita et al., 2016)*

Descripción del tramo	Sabalito - Las Mellizas
Provincia	Puntarenas
Cantón	Coto Brus
Distrito	Sabalito
Ruta	613
Punto de referencia GPS (UTM)	8°49'35,4" N, 82°53'54,5999" O
Altitud	980 msnm
Sección de control	60311
TPDA	390
Velocidad promedio de operación	20 km/h
Zona Climática	Valle de El General
Zona de conservación vial	4-2

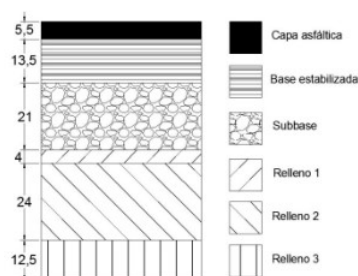


Figura A.3.1: *Espesores sección LTPP Costa Rica (Camacho-Garita et al., 2016)*

Tabla A.3.2: *Ensayos realizados para una sección de prueba (Camacho-Garita et al., 2016)*

Muestra	Tipo Muestra	Tamaño partícula de suelo	Límites	Próctor estándar	Próctor modificado	CBR	Análisis granulométrico	Material más fino (No 200)	Contenido de asfalto	Contenido de agua en mezcla	Módulo resiliencia
1590-13	Subbase		✓	✓		✓	✓	✓			
1591-13	Relleno 1		✓	✓		✓	✓	✓			
1592-13	Relleno 2		✓	✓		✓	✓	✓			
1593-13	Subrasante	✓	✓	✓		✓					
1594-13	Núcleos										
1595-13	Bloque						✓		✓	✓	

La información en este proyecto, se enfoca en facilitar datos de cada uno de los tramos que van desde sus elementos generales como fotografías, ubicación, detalles geométricos hasta resultados de IRI, PCI,

deflectometría etc. Se puede mencionar que la información de desempeño contenida en este proyecto para cada una de las secciones son:

- Características generales de los tramos
- Detalles de capas de pavimento
- Ensayos de granulometría, contenido de asfalto, próctor, CBR y consistencia
- PCI
- IRI
- Deflectometría de impacto

A.4. LTPP-Australia

Este proyecto LTPP comenzó el año 1994, intentando ir de la mano con el LTPP norteamericano. La intención de este, es que mediante una cantidad bastante menor de secciones, se consiga ajustar o calibrar el desempeño de los pavimentos australianos con respecto a las secciones provenientes de Norteamérica. Este proyecto puede dividirse en dos partes principales (Martin y Choummanivong, 2016) :

- El desarrollo de modelos de desempeño de pavimentos para su uso a nivel de red como a nivel de proyecto (LTPP por sus siglas en inglés)
- Capturar la influencia de las actividades de mantenimiento sobre las secciones. Esta parte se denomina LTPPM por sus siglas en inglés

Con el fin de conseguir la estructura del pavimento de las secciones, Austroads el año 2005 llevó a cabo pruebas mediante el uso del cono de penetración, donde es posible conseguir los espesores de cada capa y las distintas propiedades del suelo (Choummanivong y Martin, 2017), así los resultados pueden verse en la siguiente tabla, donde cada S_i es una zona de la sección de prueba

Tabla A.4.1: *Perfiles del pavimento y límites de Atterberg para una sección del LTPPM (Choummanivong y Martin, 2017)*

Segment No.	Bore hole No.	Chainage (m)	Layer No.	Thickness (mm)	Material description	Soil properties			
						LL	PL	PI	LS
S1	DN1	66 m	1	100	Asphalt				
			2	50	Non-descriptive crushed rock				
			3	150	Soft Rock fill & crushed rock (CR)	26	17	9	3.5
S3	DN2	406 m	1	80	Asphalt				
			2	420	20mm CR	29	17	12	7
			3	200	Soft Rock fill				
S5	DN3	835 m	1	140	Asphalt				
			2	260	20mm CR	18	16	2	1.5
			3	300	Soft Rock fill	28	16	12	5

Note: LL = Liquid limit (%), PL = Plastic limit (%), PI = Plasticity index (%) = LL - PL, LS = Linear shrinkage (%)

Por otro lado, los datos para identificar una sección de prueba y la forma en que se registran las mantenimientos pueden verse en las siguientes tablas:

Tabla A.4.2: *Detalles de las secciones ubicadas en Queensland (Choumanivong y Martin, 2017)*

State	Test section number	Test section length (m)	Study program	Road name	Location ⁽¹⁾	Pavement composition ⁽²⁾	Lane/direction ⁽³⁾	TMI
Qld	QL02	150	SHRP	Bruce Highway	Beerburrum	Asphalt/CR	1/N	73
	QL04	150	SHRP	Warrego Highway	Ipswich	Asphalt/CR base/CTSB	1/W	5
	QL13	100	ALF	Bruce Highway	Beerburrum	Asphalt/CTCR	1/S	70
	QL14	100	ALF	Bruce Highway	Beerburrum	Asphalt/CTCR	1/S	70
	ARRB1	200	NA ⁽⁴⁾	Rainbow Beach Road	Rainbow Beach	Spray seal/bitumen emulsion/cement	1/W	28

Donde, TMI es el índice de humedad de Thornthwaite

Tabla A.4.3: *Trabajos de mantención y rehabilitación por sitio (extracto) (Choumanivong y Martin, 2017)*

Site ID	Chainage	Work type	Date	Work description ⁽¹⁾
ACT01-C1	0–225	Rehabilitation	1/06/2007	Lane widening/realignment with new seal.
ACT01-C1	0–300	Rehabilitation	1/07/2014	Construction of a new roundabout within the test section.
ACT01-P1	0–225	Rehabilitation	1/06/2007	Lane widening/realignment with new seal.
ACT01-P1	0–300	Rehabilitation	1/07/2014	Construction of a new roundabout within the test section.
ACT02-C2	0–700	Maintenance	15/02/2009	Section was partially resurfaced with 14 mm (14E).
ACT02-C3	0–700	Maintenance	15/02/2009	Section was partially resurfaced with 14 mm (14E).

La información sobre el estado de la vía en este proyecto, no es muy diferente a lo buscado por los proyectos anteriores. La información capturada es la siguiente (Jones y Paige-Green, 2003; Martin y Choumanivong, 2016) :

- Ahuellamiento por pista mediante la medición completa del perfil transversal. Antiguamente se media cada 100 mm y se obtiene la profundidad máxima y el ancho ahuellado.
- Regularidad de la pista mediante el uso del IRI en (m/Km). Se reporta cada 50 metros hasta 100 metros y medido en ambas huellas de la rueda
- Deflectometría de impacto, medida a intervalo de 10 metros sobre la huella derecha y en la zona central de la pista. De esta mediciones se obtiene el código del equipo, la posición, la carga, temperatura del aire y pavimento, peak de deflexiones y bulbo de deformaciones
- Deterioros superficiales, medidos en un principio de forma visual, ahora se utilizan equipos automáticos.

A.5. Chile

Al igual que en otras partes del mundo, en Chile también existen fuentes de información sobre el desempeño de pavimentos. En este apartado se revisarán tres de ellas,: los requisitos especificados en las bases de licitación, en especial durante la fase de explotación de la concesión; los informes de estado del pavimento de la Dirección de Vialidad y los requisitos emanados durante el proceso de desarrollo del proyecto FONDEF IT16I10008.

A.5.1. Bases de Licitación de Obras Viales Concesionadas

En Chile durante la fase de explotación de una concesión, las concesionarias deben cumplir con ciertos umbrales del estado del pavimento para que a la vez, cumplan con los requisitos de niveles de servicios prestados a sus usuarios, en este sentido, estas deben realizar de forma periódica mediciones de regularidad longitudinal promedio y puntual, mediciones de agrietamiento por pista, ahuellamiento por cada huella de rueda en la pista, ondulaciones, número de losas agrietadas, medición de escalonamiento en pavimentos rígidos y otros aspectos que hablan sobre el desempeño de los pavimentos de la carretera.

Sumado a lo anterior, la concesionaria con el objetivo de evaluar el estado estructural de sus pavimentos, debe realizar cada cinco años una medición de deflectometría de impacto a una tasa de diez mediciones por kilómetro intercalando las pistas de medición (MOP, 2009; MOP, 2012; MOP, 2015) sumándose a ellas una medición de deflectometría de impacto dos años antes del término de la concesión.

De esta forma, dada la obligación en la frecuencia de medición, las carreteras concesionadas son una importante fuente de información sobre el estado y desempeño de los pavimentos en Chile, y sumado al hecho que estas se sitúan en diferentes zonas del país, podrían permitir el mejor conocimiento del efecto de tratamientos, materiales, efectos climáticos y otros aspectos sobre los pavimentos en Chile.

A.5.2. Propositiones de Acciones de Mantenimiento (PAM) y Estado de la Calzada y Bermas para Caminos Pavimentados de la Red Vial Nacional

Este informe presenta el resultado de evaluaciones estructurales y funcionales de los caminos que se encuentran bajo la tutela de la Dirección de Vialidad de Chile (Dirección de Vialidad, 2017). Uno de los objetivos de este informe es que a partir de los resultados obtenidos, utilizando la herramienta HDM-4 se lleven a cabo evaluaciones técnico-económicas que permitan establecer las acciones correctivas óptimas para cada tramo evaluado.

Frente al hecho que la información proviene de buena parte de la red nacional, se vuelve inevitable que la información de entrada provenga de fuentes distintas. Las fuentes de entrada son:

- Deterioros de pavimento a través de inspección visual de pavimentos entre los años 2016 a 2017
- Índice de Rugosidad Internacional (IRI) a partir de mediciones hechas entre los años 2011 a 2017
- Tránsito del año 2012 y

- Inventario vial del año 2016

Es importante mencionar que, gran parte de las mediciones de inspección visual fueron llevadas a cabo por sistemas de auscultación automática, sistema que debe cumplir con los requisitos necesarios para realizar dichas mediciones automáticas ya que estas deben cumplir con ciertos objetivos (Dirección de Vialidad, 2015)

- Obtener información de indicadores del estado funcional, estructural y superficial de los caminos pavimentados y de sus bermas tales como agrietamiento, ahuellamiento, escalonamiento, baches, pérdida de áridos, exudación, Índice de Rugosidad Internacional (en adelante IRI) y deflexiones, Lo anterior deberá ejecutarse bajo un sistema automatizado, continuo y de alto rendimiento.
- Generar las bases de datos compatibles con los sistemas actualmente en uso en el Departamento de Gestión Vial de la Dirección de Vialidad, para obtener el Índice de Condición de Estado de las calzadas pavimentadas, siglas ICP y de sus bermas, siglas ICB. Por otra parte, el Consultor deberá generar la información necesaria para ingresar los tramos de caminos al software computacional Highway Development and Management-4 (en adelante HDM-4) Versión 2.0, en función de los datos obtenidos en este Estudio y a los criterios que se entregan en los presentes Términos de Referencia.

Dentro de los términos de referencia se hace mención a proporcionar la siguiente información:

- La auscultación de los deterioros estructurales mediante equipos automatizados deberá realizarse con un sistema de barrido en tres dimensiones (3D), de tal manera que los deterioros pueden evaluarse tanto en superficie como en profundidad para así considerar el daño real en la carpeta de rodadura e identificar claramente cada tipo de deterioro superficial.
- En el caso de las deflexiones, se deberán realizar cinco mediciones por cada kilómetro en cada pista. En el caso de pavimentos flexibles deberá proporcionarse el Módulo Resiliente y el Número Estructural Efectivo, mientras que en los pavimentos rígidos, deberá entregarse el Módulo de Reacción de la subrasante, el Módulo Resiliente y la eficiencia de transferencia de carga.
- Se deberán entregar copias de las licencias de software y demostrar que los equipos cumplen las tolerancias permitidas.
- En el caso del IRI, deben ser mediciones continuas según lo expresado en el volumen 8 del Manual de Carreteras
- Por último deben entregarse imágenes frontales de las vías tal que, se puedan observar todos los elementos (pista más berma).
- Cada información recolectada debe ser compatible con la necesidad de alimentar la base de datos del HDM-4

Como muestra de la relevancia de las mediciones automatizadas, la siguiente figura (A.5.1), donde los colores verdes y amarillos son los kilómetros medidos de esta forma, mientras que el rojo son las inspecciones no automatizadas

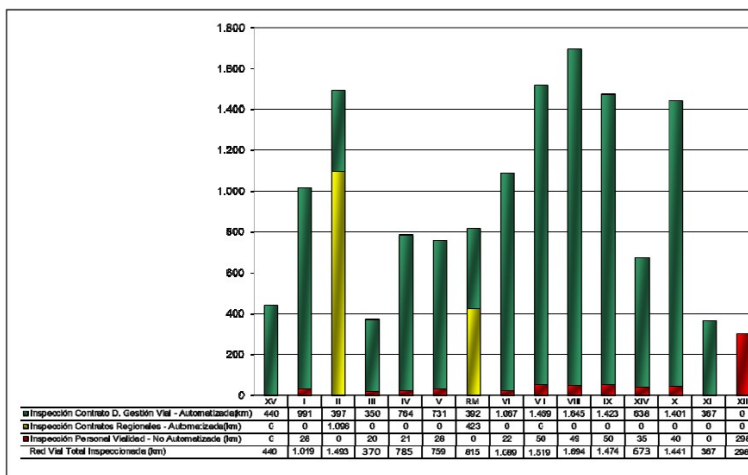


Figura A.5.1: Cobertura de la Inspección Visual por Región (Dirección de Vialidad, 2015).

Los resultados del procedimiento anterior más la acción de mantenimiento recomendada son publicadas en un informe de la Dirección de Vialidad (Dirección de Vialidad, 2017).

REGIÓN DE ANTOFAGASTA
EVALUACIÓN POR TRAMOS HOMOGÉNEOS

Ki	Kf	Calzada	Pista Insp. N°	Tipo Carp.	IRI m/km	Grietas Lineales %	Grietas Fatiga %	Baches %	P. Áridos %	Ahuell. mm	Exud. %	Losas c/+ 3 trozos %	Estado Juntas	Estado Calzada	Intervención Propuesta en Calzada
Código: 62A00100 Rol: Ruta 1 Nombre: Cruce Ruta 5 (Las Breas) - Tal Tal - Río Loa - Iquique, Sector: Las Breas - Tal Tal - Paposo - Cruce B-70 (Caleta El Cobre)															
0,00	1,00	U	1	A	2,63	1,15	0,00	0,00	0,00	5,69	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
1,00	2,00	U	1	A	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	8,90	0,00	-	-	Bueno	Conservación Rutinaria
2,00	3,00	U	1	A	2,17	0,00	0,00	0,00	0,00	6,68	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
3,00	7,00	U	1	A	2,11	0,00	0,00	0,00	0,00	5,21	0,00	-	-	Bueno	Conservación Rutinaria
7,00	10,00	U	1	A	2,19	0,00	0,00	0,00	0,00	7,02	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
10,00	21,00	U	1	A	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	2,96	0,00	-	-	Bueno	Conservación Rutinaria
21,00	22,00	U	1	A	2,18	0,00	0,00	0,00	0,00	8,62	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
22,00	23,00	U	1	A	2,16	0,00	0,00	0,00	0,00	4,33	0,00	-	-	Bueno	Conservación Rutinaria
23,00	40,00	U	1	A	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	6,99	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
40,00	42,00	U	1	A	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	6,34	0,00	-	-	Bueno	Conservación Rutinaria
42,00	43,00	U	1	A	2,51	0,00	0,00	0,01	0,00	6,32	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
43,00	45,00	U	1	A	2,04	0,00	0,00	0,00	0,00	5,49	0,00	-	-	Bueno	Conservación Rutinaria
45,00	45,50	U	1	A	2,52	0,00	0,00	0,00	0,00	5,65	0,00	-	-	Regular	Conservación Rutinaria
45,50	48,00	U	1	T	2,79	0,00	0,00	0,00	0,00	6,20	0,00	-	-	Bueno	Riego Neblina
48,00	55,00	U	1	T	1,77	0,00	0,00	0,00	0,00	7,12	0,00	-	-	Muy Bueno	Riego Neblina

Figura A.5.2: Propuesta de acciones de mantenimiento, región de Antofagasta (extracto) (Dirección de Vialidad, 2017).

A.5.3. FONDEF IT16I10008

En junio de 2016 se dio inicio al proyecto FONDEF de Investigación Tecnológica (FONDEF IT 16I0008) titulado “Modelo para evaluar los niveles de servicio de carreteras en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones”, a cargo de la institución beneficiaria principal, Universidad Técnica Federico Santa María y de la institución beneficiaria asociada, la Universidad de Concepción.

El proyecto tiene por objetivo principal desarrollar un modelo para evaluar los niveles de servicio para carreteras concesionadas en Chile, implementable en bases de licitación para nuevas concesiones, que

impulse el uso de tecnologías desarrolladas previamente en nuestro país y que además incentive un mejoramiento continuo en la gestión vial.

Como parte de las tareas para conseguir el objetivo principal, se definieron indicadores de niveles de servicio asociados a regularidad longitudinal del pavimento, indicadores técnicos para la evaluación de pavimentos, indicadores de nivel de servicio asociados a capacidad estructural, entre otros. Para la evaluación de dichos niveles de servicio, se estableció una serie de requisitos sobre las mediciones, que van desde la frecuencia de medición, longitud de reporte de cada uno de los tipos de deterioro, exigencia de normas para una correcta elección de equipos, normas para calibración de los equipos y la información que debe ser reportada con cada proceso de medición.

Más detalles sobre los procesos de selección de normas y como estas se seleccionaron, se pueden encontrar en las memorias de titulación (Burgos, 2019; Muñoz, 2020; Ebensperge, 2021). A continuación se muestra un resumen de cada uno de los elementos a reportar según el tipo de deterioro en el pavimento:

■ **Regularidad Longitudinal**

- Kilómetro inicial y final de cada segmento
- Fecha de medición
- Perfil longitudinal de cada huella por pista.
- Reportar IRI cada 50 metros y a 1 Km
- Velocidad promedio de medición
- Se debe agregar el archivo del perfil longitudinal, el cual deberá ser compatible con software ProVal

■ **Ahuellamiento**

- Kilómetro inicial y final de cada segmento
- Fecha de medición
- Ancho perfil transversal en metros
- Espaciamiento entre puntos de medición en metros
- Número de perfiles transversales
- Promedio de pendiente transversal en porcentaje
- Área de ahuellamiento en metros cuadrados
- Promedio de huella izquierda y derecha cada 50 metros en milímetros
- Desviación estándar de cada huella

■ **Agrietamiento**

- Kilómetro inicial y final de cada segmento

- Fecha de medición
- Reporte por tipo de grietas (patrón, longitudinal y transversal) y severidad (incluir grietas selladas)
- Longitud de resumen 50 metros
- Considera como losa agrietada aquella que tiene una grieta longitudinal, transversal o de esquina
- Cada pista se divide en 5 secciones en dirección longitudinal, en cada una de las secciones se reportan las grietas

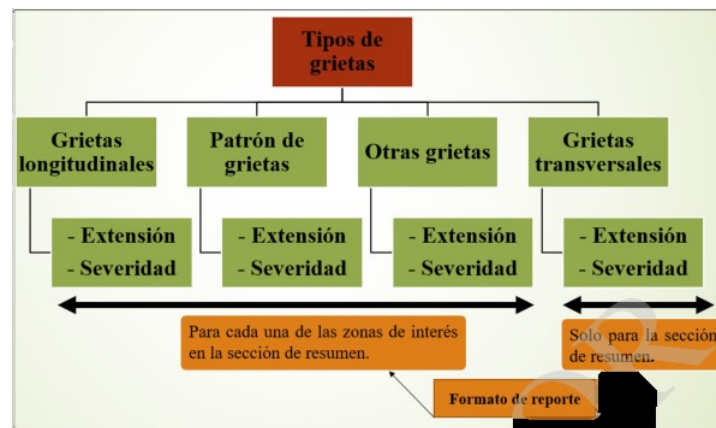


Figura A.5.3: Clasificación de grietas

- Es muy relevante mencionar que frente a los errores que se generan en las mediciones hechas con equipos de alto rendimiento, la confiabilidad de los resultados sugiere la necesidad de validar estos resultados. Para ello, se establece el uso de la norma AASHTO PP 67 que establece el porcentaje de éxito por cada tipo de grieta que debe cumplir la medición del equipo.

■ Escalonamiento

- Fecha de medición
- Kilómetro inicial y final
- Pista
- Sentido
- La medición es en junta o grieta
- Escalonamiento promedio cada 50 metros por pista
- Escalonamiento máximo cada 50 metros por pista

■ Deflectometría de Impacto

- Fecha y hora de ensaye

- Ubicación de geófonos
- Nivel de carga
- Temperatura de la superficie y del aire en unidades del SI
- Pista
- Kilómetro inicial y final
- Radio o diámetro del plato de carga
- Deflexiones medidas por cada geófono en micrómetros
- Obtención de parámetros D0, BLI, MIL, LLI
- **Eficiencia de Transferencia de Carga (LTE)**
 - Fecha de medición
 - Kilómetro inicial y final
 - Pista
 - Sentido
 - Carga
 - Radio plato de carga
 - Porcentaje de transferencia de carga
- **Ruido de Rodadura**
 - Fecha y hora de medición
 - Kilómetro inicial y final
 - Tipo de pavimentos
 - Pista y sentido
 - Velocidad de circulación
 - Frecuencia
 - Niveles de intensidad, coherencia y presión sonora de ambos micrófonos para cada sonda
 - Nivel de intensidad promedio de ambos micrófonos para cada sonda

Apéndice B

Tecnología y redes de sistemas WIM

B.1. Culway

Este tipo de tecnología nace en Australia en la década de 1980, teniendo su origen etimológico en la combinación de las palabras culvert (alcantarilla) y way (camino), lo que hace referencia, que es un sistema que se inserta en las alcantarillas de la carretera. Es más, es el tipo de pesaje en movimiento más común en Australia, siendo la aproximadamente la mitad de toda la red de pesaje en movimiento de este país (Han et al., 2010).

Tabla B.1.1: *Tipo y número de pesaje en movimiento en cada región de Australia y Nueva Zelandia (Han et al., 2010).*

Jurisdiction	Culway	Plate-in-road	Piezoelectric
NSW	11	13	5
VIC	17	1	2
QLD	19	2	33
SA	8	0	0
WA	8	0	3
TAS	4	0	3
NT	6	0	0
NZ	0	14	0

El funcionamiento de este sistema, se basa en la instalación de medidores de deformación en el techo de la alcantarilla y dos cables piezoeléctricos en el carril, distanciados generalmente diez metros entre ellos. Cuando el eje de un vehículo pisa el primer piezoeléctrico gatilla la toma de datos en el sensor de deformación, este mediante algoritmos matemáticos relaciona la deformación con el peso de cada eje, para que luego mediante el conocimiento de la distancia con el otro sensor piezoeléctrico (10 metros) el sistema sea capaz de pesar y clasificar el vehículo que atraviesa la alcantarilla.

Dado que la posición transversal de las cargas genera una superposición en los resultados de los medidores de deformación, se vuelve necesario el establecer requerimientos sobre el pavimento que está sobre

la alcantarilla, para ello se define el Largo de Influencia de la Alcantarilla el cual puede obtenerse de relacionar geométricas que se pueden ver en la figura B.1.1

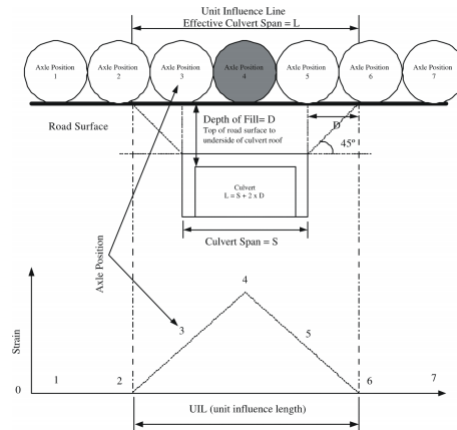


Figura B.1.1: Geometría para algoritmo de sistemas culway (MAIN ROADS WESTERN Australia)

El sistema Culway tiene ventajas con respecto a otras tecnologías, la primera de ellas se debe a que su medidor de deformación se encuentra en el techo de la alcantarilla y no embebida en el mismo pavimento, lo cual le proporciona un ciclo de vida que puede llegar hasta los 25 años, otra ventaja es que comparada a otras tecnologías, su costo de mantención y su capital inicial es relativamente bajo, también su exactitud le permite incluirse dentro del tipo I según ASTM E 1318-09, sin embargo, dentro de sus limitaciones se encuentra que no está disponible para pavimentos de hormigón y solamente para algunos pavimentos de asfalto, además su ubicación va a depender de la pre-existencia de una alcantarilla y está disponible solo para un máximo de dos carriles (Eady et al., 2016).

B.2. Plate-in-Road/ Bending Plate

Desarrollado en la década de 1960 en Colonia, Alemania, este tipo de tecnología ha sido utilizada ampliamente en numerosos programas de monitoreo de largo plazo tanto de tránsito como de pavimentos (Han et al., 2010). La placa de flexión o Bending Plate se basa en medidores de deformación sellados en una capa de goma, la cual se encuentra situada dentro de una placa de acero de alta resistencia. Cuando se instala un sistema de pesaje en movimiento Bending plate, este requiere ser acompañado por lazos inductivos tanto aguas arriba como aguas abajo de los sensores, ya que, el de aguas arriba permite iniciar la toma de datos, mientras que el de aguas abajo otorga los tiempos de pasada de cada eje, de allí se pueden obtener valores como velocidad y distancia entre ejes, permitiendo la clasificación de los vehículos.

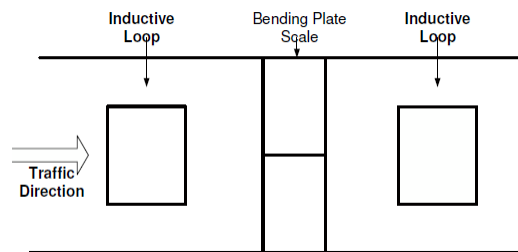


Figura B.2.1: Plano de un sistema *Bending Plate* (Zhang, 2007)

Dentro de las ventajas de este sistema, se encuentra que el valor de peso por rueda es más exacto que otros sensores, ya que su ancho permite que el eje se sitúe completamente sobre la placa. Dentro de sus desventajas está el hecho que algunos dispositivos han presentado fallas prematuras (10 años) y que la mantención anual es relativamente costosa (Eady et al., 2016).

B.3. Plate-in-Road/ Capacitance WIM

Este sistema de pesaje en movimiento basa su funcionamiento en dos placas de metal separadas por material dieléctrico, cuando el eje de un vehículo circula sobre esta placa la distancia entre ambas placas se ve disminuida, lo cual sumado a un voltaje aplicado resulta en un cambio de capacitancia en el sistema y es este cambio se relaciona con el peso de cada eje del vehículo. Al igual que el sistema anterior, se requieren lazos inductivos que permitan mediante el lapso de tiempo calcular la velocidad como también la clasificación del vehículo.

De esta tecnología hay dos tipos, aquellos que están instalados de forma permanente o aquellos que son portátiles. Los primeros se instalan sobre marcos de acero que al instalarse la placa, la superficie de la carretera queda al ras con la placa, lo que garantiza un ciclo de vida más prolongada, ya que, se disminuye el golpe que genera el vehículo al posicionarse sobre la placa, sin embargo los portátiles tiene la ventaja de ser más versátiles, porque pueden ser dispuestos en zonas donde exista preocupación de exceso de carga.



Figura B.3.1: Fotografía de un *Capacitance WIM* (Mikros)

B.4. Single Load Cells

El sistema de pesaje en movimiento basado en celdas de carga, se basa en que una carga externa es transformada en una señal eléctrica proporcional. Si bien muchas celdas de carga son de dispositivos hidráulicos, hoy la mayoría utiliza medidores de deformación (galgas extensométricas).

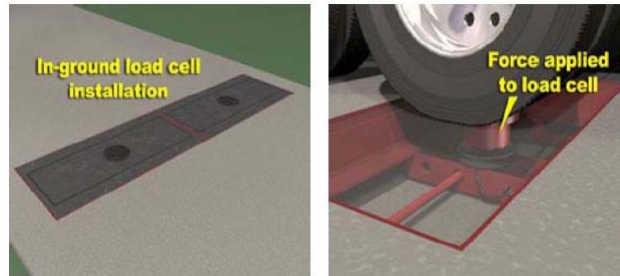


Figura B.4.1: Representación de funcionamiento de una celda de carga (Zhang, 2007)

Existen distintos tipos de celdas de cargas, en algunas solo un tubo de torsión es el que transmite la carga, mientras que en otras, la carga es transmitida por más de una celda de carga, siendo en estos casos la suma de las cargas el peso entregado por la rueda. Aunque independiente del tipo, al igual que otras tecnologías las celdas de carga deben ir acompañadas, ya sea de detectores de ejes, como de lazos inductivos. Como ventaja esta tecnología es muy amplia y se reconoce que es capaz de funcionar en los cuatro tipos exactitud propuestos por ASTM E 1318-09, también que dada su tamaño (por lo general de 30x72 pulgadas) el juego de ruedas cupe sin ninguna dificultad y que es insensible al punto de carga, ofreciendo una buena resistencia a las cargas laterales. Sin embargo, dentro de sus desventajas está que requieren de una bóveda de hormigón armado que puede demorar en instalarse y son el tipo de tecnología más cara teniendo en cuenta costos de adquisición e instalación (Al-Qadi et al, 2016).

B.5. Sensores Piezoelectricos

Este sistema de pesaje en movimiento, puede ser el de uso más amplio en el mundo, consiste en al menos un sensor y dos lazos inductivos tal como se observa en la figura B.5.1. El sensor piezoeléctrico y los lazos inductivos se encuentran embebidos en cortes que se le realiza al pavimento y sellados por un material epóxico que generalmente está basado en aluminio. Su funcionamiento se basa en que cuando son cargados por la rueda de un eje, se genera un voltaje que es proporcional a dicha fuerza, con esto se obtiene la carga dinámica y a través de factores de calibración el resultado es el peso estático del vehículo o su eje.

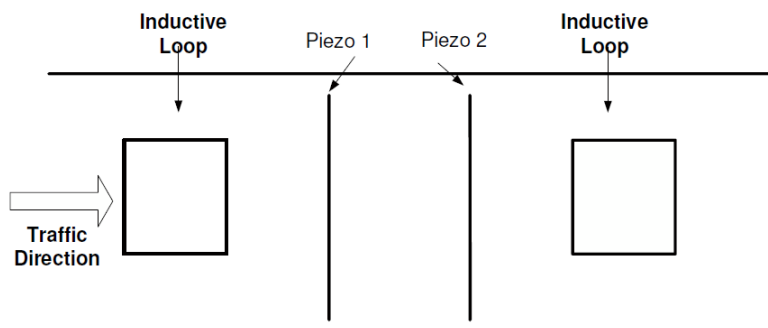


Figura B.5.1: Plano de un sistema de pesaje en movimiento con sensores piezoeléctricos (Zhang, 2007)

Tres son los principales tipos de sensores piezoeléctricos, sensores de película piezoeléctrica de PVDF (polivinilideno), sensores piezoeléctricos cerámicos y piezoeléctricos de cuarzo (Al-Qadi et al, 2016):

B.5.1. Sensores de película piezoeléctrica

Si bien este es el tipo de sensor piezoeléctrico más utilizado, es también el más económico pero el de menor vida. Se debe tener el cuidado que no debe quedar apoyado directamente con el pavimento, sino que se le deben colocar apoyos aproximadamente cada 6 pulgadas. Si bien son un sistema ampliamente usado, su sensibilidad a factores como la rugosidad del pavimento o la temperatura o su corta vida se están utilizando como detectores de ejes o clasificadores de vehículos.

B.5.2. Sensores de piezoeléctricos cerámicos

Consisten en polvo de cerámica densificado entre un núcleo de cobre y una cubierta del mismo material. Normalmente se instalan en un canal de metal rígido lleno con una resina epoxica reforzada con fibra de vidrio. La parte superior de este sensor debe quedar al ras con el pavimento y se puede encontrar en largos de 6 y 12 pies, la ventaja de los de seis pulgadas, es que pueden utilizarse dos para el carril, se puede obtener la carga por rueda y no solo el eje.

B.5.3. Sensores piezoeléctricos de cuarzo

Son del tipo más nuevo de los piezoeléctricos, y su gran ventaja con las otras materialidades es su mayor ciclo de vida (mayores a 10) y su nula sensibilidad a la temperatura, por lo que genera mediciones de mayor exactitud. Al igual que los cerámicos vienen en largos menores a 12 pies, por lo que también se puede obtener el peso por rueda. Su alto estándar queda demostrado en el hecho que este tipo de tecnología es ampliamente utilizada en el programa LTPP para sus estudios de carácter específico (Al-Qadi et al, 2016), sin embargo, es importante mencionar que pese a sus grandes ventajas, su desventaja principal es el alto costo tanto de adquisición como de mantención.

B.5.4. Sensores de Fibra Óptica

Así como algunas tecnologías dependen de la deformación u otras de la variación de corrientes, el pesaje en movimiento basado en fibra óptica depende de cómo varía la intensidad de la luz a lo largo de la fibra cuando un vehículo pasa sobre ella, entendiéndose que esta se encuentra embebida ya sea en el pavimento o instalada en algún material. Gracias a que la fibra óptica es insensible a la temperatura, tampoco necesitan un suministro eléctrico y tiene la capacidad de procesar datos en tiempo real, se han obtenidos buenos resultados utilizándola, sin embargo, no existen equipos comerciales que tengan esta tecnología (Al-Qadi et al, 2016).

B.6. Información generada en Europa

En Europa dependiendo del país, diferentes registros son tomados. Más detalle se puede encontrar en la siguiente tabla.

Tabla B.6.1: Información generada en cada país en Europa (Žnidarič et al, 2015)

	Eslovenia	Irlanda	Reino Unido	Holanda	Dinamarca	Alemania
Identificación del sitio		x	x			
Identificación del vehículo				x		
Placa patente delantera				x		
Placa patente trasera				x		
Fecha y hora	x	x	x	x	x	x
Pista		x	x	x	x	
Dirección		x		x		
Velocidad	x	x	x	x	x	x
Clasificación	x	x	x	x	x	x
Número de ejes	x	x	x	x	x	x
Configuración de ejes	x					x
Peso bruto	x	x	x	x	x	x
Carga por ejes	x	x	x	x	x	x
Distancia entre parachoques				x		
largo del vehículo	x	x	x			x
Headway		x	x			
Espaciamiento entre ejes	x	x	x	x	x	x
Temperatura de la vía	x			x		
Distancia al vehículo previo		x	x	x	x	x
Códigos de error y advertencias	x	x				
Ejes Equivalentes	x					
Estimador de calidad	x					
Posible sobrecarga por peso total y/o de ejes						x

B.7. Redes de pesaje en movimiento

B.7.1. Red de Pesajes en Movimiento De Estados Unidos y Long-Term Pavement Performance

En los Estados Unidos, existe una gigantesca red de sistemas WIM. Esta red sin embargo, no está centralizada sino que varía de estado a estado. Por ejemplo en el caso de Florida, esta cuenta con 40 sitios WIM, mientras que California tiene 137 (entre sistemas portables fijos) y Virginia solo tiene 3. Con respecto a que tipo de sistema WIM utilizan los estados, según lo reportado por el NCHRP 386 Papagiannakis et al, (2008), alrededor de un 60% utiliza sistemas tipo I según ASTM y teniendo en cuenta que dicho documento fue elaborado hace 12 años, nos permite pensar que al día de hoy ese porcentaje puede ser aun mayor.

En Estados Unidos, la red WIM tiene un punto en común, el LTPP. En este programa, los estados proponen secciones de estudio y en algunos casos se requerirá un conocimiento acabado del tránsito que circula por dichas secciones, para ello es necesario la instalación o el uso de una estación WIM cercana pero requerirá que los procedimientos de mantención, selección de equipos, etc. cumplan con ciertas condiciones.

En LTPP, se generó el plan de instalar dichos sistemas las secciones SPS, entregando información con un nivel de calidad apta para investigación. La forma de conseguirlo fue primero centralizar la gestión de estos sistemas de pesaje en movimiento y generar un plan que estableciera el tipo de equipo, el pavimento ideal para su instalación y la frecuencia de calibraciones. Todo se fundió en *Data Collection Guide for SPS WIM Sites Version 1.0* (LTPP, 2001), el cual establece que los equipos deben cumplir con los requerimientos de tipo I según ASTM E 1318, deben tomarse datos durante 210 días del año, requerimientos de pavimento (que luego se transformó en la norma AASHTO M 331 – 17 (AASHTO, 2017a)) y establece una guía de instalación y calibración de los sistemas.

En esta red, la calibración como la validación de un sistema, consta del uso de dos camiones clase 09 según FHWA, de los cuales uno está completamente cargado y el otro parcialmente. Los camiones son medidos y pre-presados y entonces se hace circular los vehículos sobre el sistema de pesaje en movimiento con un mínimo de 20 pasadas a diferentes velocidades. Hasta un máximo de 3 sesiones de validación es necesario en el primer año del sistema de pesaje y recomienda que en caso que las condiciones climáticas cambien demasiado en un año, existan dos calibraciones al año, en cambio si no hay una importante variabilidad, basta con una sola calibración.

B.7.2. Red de Pesajes en Movimiento para Control de Norma en Francia

En Francia debido a la alta importancia del transporte en este país se decidió la instalación de una red de pesajes en movimiento que tiene los siguientes objetivos (Jacob y Van Loo, 2008):

- Pre-selección e identificación de sobrecarga o exceso de velocidad en camiones, los sistemas de pesaje en movimiento apoyan las actividades de oficiales de policía ubicados aguas debajo de la estación de pre-selección y equipados con instrumentos de medición de carga aprobados.
- Identificación de compañías y transportistas que comúnmente violan la ley. La identificación es hecha mediante el procesamiento de fotografías al camión y otros datos obtenido en un periodo de tiempo.
- Datos estadísticos de tránsito para desarrollar estrategias costo-efectivas para el control de la vía, considerando las secciones más sobrecargadas y los días o periodos del día donde se forme.

De la red de más de 170 sistemas WIM, 10 sitios de pesaje en movimiento están equipados con 3 elementos principales, un pesaje en movimiento de alta velocidad, el cual está equipado con sensores piezo-cerámicos (que deben cumplir los requerimientos C (15) de COST 323 y dos lazos inductivos, dos cámaras de video, de las cuales una de ellas fotografía el vehículo completo y la otra se enfoca en obtener la

placa patente y un área de control que posee un pesaje en movimiento de baja velocidad (clasificación 5 OIML R134) ubicado a unos kilómetros aguas abajo del pesaje de alta velocidad donde se puede llevar a cabo la ejecución de la norma de sobrecarga.

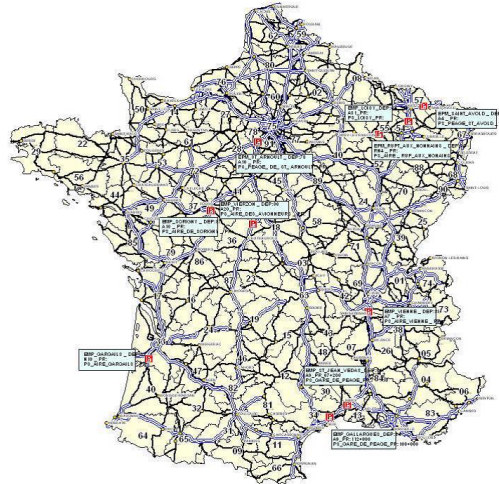


Figura B.7.1: Red de pesajes en movimiento para control de norma en Francia (Jacob y Van Loo, 2008)

Para la ubicación del sitio donde se emplazará el sitio de pesaje en movimiento, se consideraron las siguientes características (Jacob y Van Loo, 2008):

- Pesaje estático o de baja velocidad debe estar disponible a unos pocos kilómetros aguas abajo.
- Condiciones del pavimento deben ser tipo 1 o 2 según COST 323. La deflexión, el ahuellamiento y la regularidad longitudinal deben estar medidas antes de la instalación, ya que, no se deben realizar trabajos en el pavimento en los próximos años.
- Redes de comunicación y energía estar disponibles para suplir las necesidades de la estación.
- Si es una autopista concesionada, aprovechar que el pesaje en movimiento de alta velocidad se encuentre aguas arriba de la plaza de peaje.
- La elección del sitio debe ser aceptada por todas las partes.

Una vez instalado el sistema completo, el pesaje de baja velocidad debe ser validado por el Legal Metrology Service, como un sistema con exactitud del tipo 5 [OIML], mientras que el de alta velocidad como C (15).

B.7.3. Red de Pesajes en Movimiento para Control de Norma en los Países Bajos

El puerto más importante de Europa y número 10 a nivel mundial se encuentra en Róterdam, ciudad muy importante en los Países Bajos, la cual genera una importante carga sobre las carreteras de Los Países Bajos y la necesidad de reducir lo más posible la sobrecarga se vuelve fundamental. Es por ello que, en

el año 2000 el Ministerio de Transportes y Trabajos Públicos del país levantó el proyecto “Overloading”, que busca reducir la sobrecarga en las carreteras. Para este proyecto se desarrolló el sistema llamado WIM-VID (unión de las palabras WIM y Video), la cual contiene dos líneas de sensores piezoeléctricos de cuarzo junto a dos lazos inductivos, sumándole además, una cámara al lado de la vía que fotografía al vehículo y cámaras sobre cada carril que buscan obtener la placa patente. Es importante mencionar que las cámaras tienen la capacidad de fotografiar vehículos durante día y noche, y que el sistema WIM-VID se encuentra en las dos pistas más externas, mientras que en la tercera (o interiores) más en la berma, existen clasificadores automáticos de vehículos, que son similares a las espiras inductivas (FHWA, 2007).



Figura B.7.2: Vista general sistema WIM-VID en Holanda (FHWA, 2007)

Con esta tecnología es posible generar una base de datos para clasificar a las empresas, de esta se produce un informe con una lista roja, que contiene a las 50 compañías que más violen las normas de peso. Estas compañías reciben la visita de un agente que revisa el proceso dentro de la misma empresa, lo cual le va a significar a la empresa un monitoreo constante de al menos dos meses. Esto hasta que el nivel de violaciones disminuya, en al menos un 75 %. Este método tiene una gran ventaja, ya que al generar una revisión en la empresa, su efecto es más amplio y directo que a un solo conductor detenido en la vía.

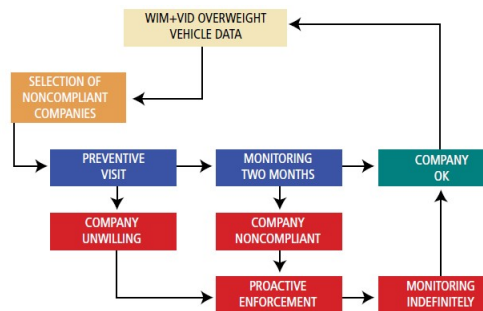


Figura B.7.3: Proceso seguimiento a empresas transportistas en Holanda (FHWA 2007)

Hasta el año 2013, existen 8 WIM-VID en Holanda que controlan las vías más importantes que salen del puerto de Róterdam, aunque ya está en curso la construcción 3 sitios iguales, que vienen a fortalecer la red, aunque se espera que en futuro poder llegar a 30 de estas instalaciones.



Figura B.7.4: Red de WIM-VID en Países Bajos, se observan las estaciones en construcción (Jacob y Van Loo, 2008)

B.7.4. Chile

En Chile es posible encontrar sistemas de pesaje en movimiento en algunas concesiones como Américo Vespucio Norte y también encontrar información del tránsito que circula por las carreteras, a través de los vehículos que circulan por las estaciones de pesaje punitivas, aquí, se revisaran ambas situaciones

B.7.4.1. Sistemas de pesaje en Austopista Vespucio Norte

En la región Metropolitana, en específico en la carretera urbana concesionada Américo Vespucio Norte, se encuentra instalado un sistema de pesaje en movimiento. Este sistema WIM, se puede clasificar según ASTM E-1318 como del tipo II, esto se puede evidenciar en la figura B.7.6, ya que los sensores solo miden la mitad de los ejes (no hay posibilidad de comparar rueda izquierda con derecha) y la concesionaria lo desplaza con cierta frecuencia entre los cuatro puntos rojos con centro blanco de la siguiente imagen:



Figura 3-6 Ubicación del Sistema WIM en la Autopista Vespucio Norte

Figura B.7.5: Ubicación del sistema WIM en la Autopista Vespucio Norte (Concesionaria AVN)

En este caso la concesionaria ha decidido instalarlos junto a los pódicos de cobro de TAG, con el fin de validar sus mediciones mediante la comparación de imágenes con los resultados del WIM, además, con la potencialidad de conocer empresas que puedan estar constantemente sobrepasar los límites establecidos por norma (Iturriaga, 2013). Esto, ya que, al ser una carretera urbana, es incompatible el uso de sistemas de pesajes que permitan una acción punitiva con la naturaleza de esta carretera.



Figura B.7.6: Sistema WIM en América Vespucio Norte junto al pódico TAG (Google Maps)

Con respecto a la información emanada por estos sistemas WIM, esta es del tipo binario, sin embargo, mediante el uso de software de la misma empresa que los instala, estos se transforman a archivos de texto en formato ASCII que incluyen la información de peso, velocidad, pista de pasada, día, hora, clasificación, distancia entre ejes de todos los vehículos, incluyendo los vehículos livianos.

B.7.4.2. Estaciones de pesaje punitivas

Por muchos años la información del peso de los vehículos de carga se han obtenido de las balanzas punitivas. Al día de hoy en Chile estas siguen siendo una fuente muy importante de información, es por ello que en el Plan de Mantenimiento y Modernización de Estaciones de Pesaje Fijas-Automáticas, se destaca que las estaciones de pesaje de su balanza selectiva deberán tomar y procesar la siguiente información:

- Estadística diaria de vehículos controlados, con y sin sobrepeso, total vehículos y cantidad de toneladas separadas por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipos de vehículos controlados con y sin sobrepeso, total vehículos y cantidad de toneladas, separadas por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipo de vehículos, separadas por región, plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráficos por tipo de vehículo, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráficos por toneladas, separados por plazas de pesaje, estación, mes y año.
- Los puntos anteriores, deberán ser entregadas separados para buses, camiones y total general.

En el caso de las balanzas punitivas, la información procesada a entregar debe ser la siguiente:

- Estadística diaria de vehículos controlados, con y sin sobrepeso, total de vehículos y cantidad de toneladas, separados por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipo de vehículos controlados, con y sin sobrepeso, total de vehículos y cantidad de toneladas, separados por estación, plaza de pesaje, mes y año.
- Estadística por tipo de vehículos, separados por región, plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Listado de vehículos infraccionados, separados por estación y plaza de pesaje.
- Gráfico de vehículos controlados, con sobrepeso e infraccionado, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráfico de vehículos controlados, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráfico de vehículos con sobrepeso, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.
- Gráfico de vehículos infraccionados, separados por plaza de pesaje, estación, mes y año.

Claro está, que para verificar si un vehículo cumple o no con la normativa de pesos y dimensiones, por cada camión que entre en la estación de pesaje se genera una medición de su peso bruto, el peso por cada eje, sus dimensiones, la distancia entre ejes, su altura, largo y todo otro requisito exigido por norma.

Apéndice C

Variables climáticas y sensores

C.1. Temperatura

La Organización Mundial de Meteorología (OMM) define la temperatura como la magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio medio de las moléculas en un cuerpo físico (Wylie y Lalas, 1992). Este movimiento es transmisible a otro y ocurre cuando dos cuerpos se encuentran en contacto térmico. Esto produce que luego de un tiempo, estos terminan obteniendo la misma temperatura. Por lo tanto, la temperatura representa el estado termodinámico de un cuerpo y su valor está determinado por la dirección de flujo neto de calor entre dos cuerpos.

Sucede que dada la transferencia de calor entre los cuerpos, definir la magnitud de la temperatura con respecto a un cuerpo se vuelve demasiado difícil, es por ello que internacionalmente, se determinó que las referencias con respecto a la cuales se mide la temperatura son puntos de congelación y puntos triples universales.

La medición de la temperatura se puede llevar a cabo en dos tipos de escalas, las absolutas y las relativas. Las primeras se caracterizan por no depender de las propiedades de las sustancias y entre ellas se encuentran las escalas Kelvin (K) y Rankine (R o Ra), mientras que las segundas se basan en puntos característicos de cierta sustancia, como por ejemplo la escala Celsius que se basa en el punto de congelación del agua, punto de 0 grados Celsius y el punto de ebullición, punto de 100 °C, todo esto a una presión de 1 atmósfera.

Una de los aspectos que tienen injerencia sobre la temperatura en la superficie, es el relieve ya que a mayor relieve tiende a existir una disminución de la temperatura. De hecho ya sobre los 3000 metros sobre el nivel del mar, ya se considera una variable determinante (Zanolli, 2011). En Chile y según los datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile, es posible observar gradientes térmicos por elevación:

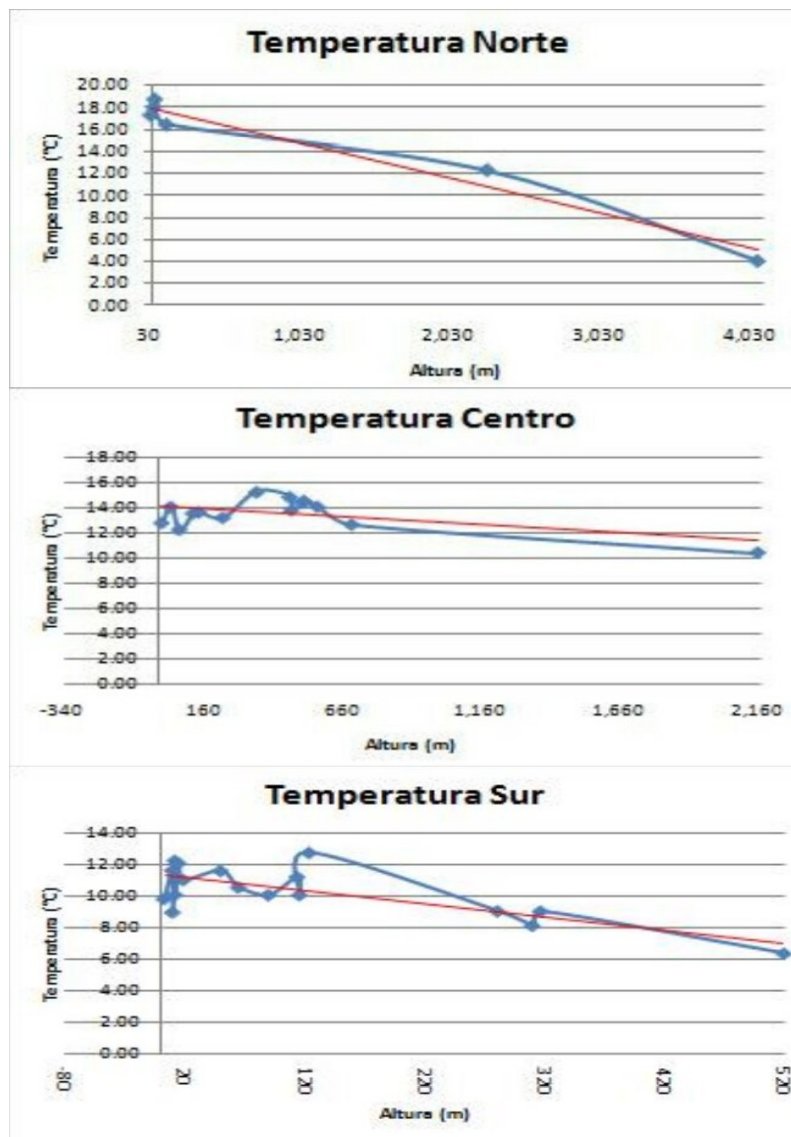


Figura C.1.1: *Temperatura media en función de la elevación para el norte, centro y sur de Chile (Zanolli, 2011)*

C.1.1. Equipos de medición

- Termómetros de líquido en cápsulas de vidrio

Estos termómetros son los más comunes y aun cuando la tecnología ha avanzado mucho, estos siguen utilizándose de manera frecuente incluso en estaciones meteorológicas, por otro lado, estos pueden ser termómetros de máxima, mínima (termómetro que queda fijado en la temperatura mínima), termómetro húmedo, el cual sirve para conocer la temperatura en el tiempo.

El funcionamiento de estos termómetros, se basa en que aprovechan el cambio de volumen que sufre un líquido cuando este cambia de temperatura. Así, el líquido que se encuentra en un bulbo tiene una pequeña perforación que conecta con una columna de vidrio y cuando se eleva la temperatura (o baja) el líquido aumenta (o reduce) su volumen y sale por el orificio entrando a la columna. Por lo tanto, para cada temperatura el líquido llenará hasta cierto punto la columna. Este líquido con el cual se rellena el bulbo depende de las condiciones que se requieren, los cuales pueden ser mercurio, alcohol etílico u otros compuestos orgánicos. Por ejemplo, el termómetro con mercurio dentro, funciona de manera adecuada en la toma de temperatura corporal en las personas, aunque debido al peligro del mercurio para la salud humana, en algunos países desarrollados estos han comenzado a ser prohibidos.

■ Termógrafos mecánicos

Se les considera instrumentos baratos, portátiles y confiables. El funcionamiento de estos instrumentos se basa en una gráfica rotatoria común a los sistemas clásicos. Existen dos tipos de termógrafos.

- Bimetálico: una plumilla que registra los datos se controla por el cambio de curvatura de una cinta de metal, dicha curvatura cambia producto de la variación de temperatura. En ambientes húmedos se requiere que el material no sufra corrosión y por lo tanto materiales como el níquel o el cobre son preferidos.

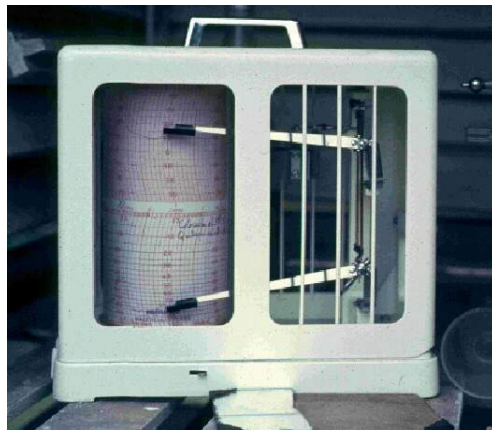


Figura C.1.2: Esquema de funcionamiento de un Termógrafo Bimetálico (EcuRed)

- Tubo de Bourdon: el sistema es semejante al bimetálico, sin embargo el elemento sensible a la temperatura tiene una forma de tubo metálico curvo, de sección plana y elíptica y tiene alcohol dentro de él.
- #### ■ Termómetro eléctrico
- Los termómetros eléctricos están siendo muy utilizados en la actualidad, debido a su seguridad, facilidad de instalación y la capacidad para entregar una señal de salida mucho más clara que los anteriores. De este tipo existen tres familias principales:

- **Termómetros de Semiconductor:** si bien se basa en el cambio de la resistencia con la temperatura, este se aprovecha de utilizar un material con una resistencia bastante menor que un material no conductor, pero bastante más elevada que un conductor. Entre las ventajas que estos tienen, se puede mencionar que debido a sus propiedades térmicas, el voltaje utilizado es muy bajo lo que permite desprestigiar la resistencia de los conductores y sus variaciones. Por otro lado, también sus componentes tienen la facilidad de fabricarse en pequeños tamaños, por lo tanto pueden reducir su constante de tiempo (tiempo de retardo del instrumento en mostrar el resultado, en este caso la temperatura).
- **Termopares:** su principio de funcionamiento se basa en que si se construye un circuito eléctrico con dos materiales distintos, en el punto de unión de estos materiales se generará una fuerza electromotriz, siempre y cuando ambos materiales estén a distintas temperaturas. Por lo tanto bastará con fijar la temperatura en uno de los materiales y midiendo la fuerza electromotriz para conocer la variación de temperatura, sumando dicha variación a la temperatura fija, se obtiene la temperatura desconocida. Su uso es especial, ya que tiende a ser usado en tareas de investigación
- **Termómetros de Resistencia Eléctrica:** se basan en que la resistencia de un material se ve afectada por los cambios en la temperatura. Si bien son muy comunes, para fines meteorológicos requieren ser fabricados con buenos materiales debido a la afectación que los efectos ambientales pueden generar sobre ellos. De especial cuidado se debe tener con la humedad y la corrosión, ya que, pueden afectar su resistencia, es por ello que se tienden a construir cobre, platino o níquel y están cubiertos por una capa de cerámica.

C.2. Presión Atmosférica

C.2.1. Definición y escalas

Se puede definir la presión atmosférica como el peso de una columna de aire sobre una proyección horizontal de la superficie. Debido a que la densidad de aire en la atmósfera disminuye con la altura, la obtención del valor de la presión no proporciona grandes utilidades, sin embargo, cuando se obtiene la variación de esta en un tiempo determinado y la tendencia de esta, es decir, si desciende y luego aumenta o viceversa, se vuelve un factor fundamental en la caracterización del tiempo atmosférico.

C.2.2. Equipos de medición

■ Barómetros de mercurio

Su funcionamiento base es que una columna de mercurio en un tubo de vidrio cerrado por la parte superior, va a bajar lo suficiente para compensar la presión ejercida por la atmósfera. Pese a ser del tipo más antiguo de barómetro, al igual que con los termómetros de mercurio estos están en retirada, principalmente por lo peligroso que puede volverse el mercurio para la salud humana, el hecho que el mercurio es corrosivo de las estructuras de aluminio, la dificultad para transportarlo, mantenciones más complicadas y el hecho que el avance de la tecnología ha traído al mercado instrumentos más fiables y menos peligrosos.

- Barómetros electrónicos

Estos se basan en el uso de transductores que transforman la respuesta de un sensor en una magnitud eléctrica relacionada con la presión. Pueden ser con señales analógicas como el voltaje y la corriente o señales digitales como la frecuencia de impulsos. Por ejemplo, en algunos barómetros se utilizan sensores de presión piezorresistivos, algunos de ellos tiene la forma de un diafragma el cual al estar sometido a una presión este se flexa, lo cual genera un cambio de corriente que es traducido por el transductor y este proporciona el valor de presión. En meteorología los barómetros electrónicos deben ser insensibles a los cambios de temperatura, ya que puede verse afectado su lectura de presión. Por otro lado, se les debe tener un suministro de energía constante para su correcto funcionamiento.

- Barómetros Aneroides

Este instrumento no utiliza mercurio, sino que su funcionamiento se basa en una caja de metálica (de cobre con berilio o acero) muy elástica, que se ve deformada producto de la presión atmosférica. En algunos casos se requiere utilizar un sistema de palancas con el fin de multiplicar las deformaciones y con ello amplificar las lecturas, aunque, en los últimos años se utiliza un micrómetro manual cuyo contador indica directamente la presión. La principal desventaja de este sistema es que la caja metálica con cada deformación pierde su elasticidad, generando que las lecturas pierdan exactitud con el paso del tiempo.

- Barógrafo

Su sistema de funcionamiento es muy similar al aneroide, pero su diferencia es que se le agrega una plumilla que registra la presión continuamente.



Figura C.2.1: Barógrafo (Raig)

C.3. Humedad

C.3.1. Definición y Escalas

Se puede establecer que la humedad es la cantidad de agua que impregna algún cuerpo. Esto puede ser en estado líquido, sólido o gaseoso. En el caso de la que se encuentra en la atmósfera, esta proviene de la evaporación y evotranspiración. La humedad es posible caracterizarla mediante los siguientes conceptos:

- Razón de Mezcla, r : razón entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco.
- Humedad Específica, q : razón entre la masa de vapor de agua y la masa de aire húmedo.
- Temperatura Punto de Rocío, T_d : Temperatura a la cual el aire húmedo, saturado con respecto al agua a una presión dada, tiene una razón de mezcla saturante igual a la razón de mezcla dada.
- Humedad Relativa, U : coeficiente, expresado en porcentaje entre la tensión de vapor (tensión parcial de vapor de agua en el aire) observada y la tensión saturante del vapor (presiones de vapor en el aire en estado de equilibrio con la superficie de agua o hielo) con respecto al agua a la misma presión y temperatura.

C.3.2. Equipos de Medición

- Higrómetro de Punto de rocío

Estos utilizan la temperatura de punto de rocío, ya que, cualquier enfriamiento adicional resultará en una condensación de agua. Comúnmente se fija un espejo enfriado y mediante un sistema opto-electrónico se verifica la presencia de agua condensada en el espejo. Debido a la posibilidad de que dicha agua se vuelva a evaporar el espejo requiere estar enfriado por medio de un sistema que lo mantenga justo en el punto de condensación evaporación. Se les considera un equipo muy preciso pero requiere mantención experta y el polvo puede acumularse en el espejo generando mediciones menos certeras.

- Higrómetro de Cabello

El cabello humano, así como el pelaje u otras partes de los animales, son higroscópicos, es decir, tienden a retener la humedad lo que genera un cambio en su longitud. Este fenómeno fue aprovechado, ya que al conectar el cabello a un sistema amplificador mecánico o a un transductor que proporcione una señal eléctrica, se pueden generar lecturas de humedad. Se considera que este tipo de instrumento no es apto para situaciones donde la humedad llegue a extremos (cercanos al 0% y 100%) y a situaciones donde se requiera medir la humedad de manera a tasas muy altas (menores a 2 minutos).

- Higrómetros de Resistencia y Capacitancia

Los de resistencia, se basan en el uso de instrumento de plástico cubierto de una capa superficial conductora de electricidad. Dado que la resistencia de la superficie va a variar en función de la humedad externa, se generará un proceso de adsorción (atracción de un material sólido o líquido de moléculas a la superficie del cuerpo) por lo tanto de la variación de la resistencia, se obtendrá el valor de la humedad, mientras que, el sensor basado en la capacitancia, fundamenta su funcionamiento en el cambio de la capacitancia en función de los parámetros ambientales. En general se utiliza un material de polímero el cual ante la presencia de humedad modifica sus propiedades dieléctricas, ya que, se genera un importante momento dipolar de la molécula de agua

- Higrómetro de absorción de Radiación Electromagnética

Debido a que las moléculas de agua son capaces de absorber la radiación electromagnética en ciertos intervalos de longitudes de onda. Los más utilizados con este fin son los de infrarrojo y el de ultravioleta, por lo tanto, al medir la atenuación de la radiación en uno de estos intervalos en cierto periodo, se puede obtener el valor de la humedad. Existen dos tipos de principales:

- Transmisión de radiación en dos longitudes de onda: se generan dos radiaciones una de las cuales muy absorbida por el vapor de agua, mientras que la otra muy levemente. Dado que se puede conocer la relación entre la radiación emitida y la radiación atenuada, puede obtenerse con seguridad el valor de la humedad. Por lo general, en este caso se utiliza radiación del tipo infrarrojo.
- Transmisión de radiación de banda estrecha: se emite una radiación fija a un receptor ya calibrado y con la atenuación de la radiación, se obtiene la humedad.

Estos tipos de instrumentos requieren calibraciones muy frecuentemente y por lo general, se utilizan en situaciones donde la variabilidad de la humedad es muy alta, por lo tanto, son comunes en estudios de investigación y no tanto en su uso meteorológico.

■ Psicrómetro

Su funcionamiento se basa en dos termómetros, uno que se mantiene seco y el otro húmedo, mediante el uso de agua destilada. Por lo tanto, la humedad relativa se obtiene de la diferencia entregada por ambos termómetros (en temperaturas sobre los 0°C el termómetro seco entrega valores mayores, lo que cambia en temperaturas bajo cero), mediante el uso de tablas psicrométricas. Cuando la diferencia de temperaturas aumenta, se puede decir que el aire se está “secando” mientras que si ambos termómetros se encuentran a la misma temperatura, el aire está totalmente saturado.



Figura C.3.1: *Psicrómetro (Raig)*

C.4. Viento de Superficie

C.4.1. Definición y Escalas

Se define según OMM que la velocidad del viento es una magnitud vectorial tridimensional que experimenta fluctuaciones aleatorias de pequeña escala en el espacio y en el tiempo, que se superponen a un flujo de mayor escala. Sin embargo, para la mayoría de los casos, el viento se puede definir como un vector de dos dimensiones, siendo la dirección y la velocidad sus componentes (OMM, 2017). Sobre el comportamiento del viento, se pueden definir:

- **Magnitudes Medias:** como el promedio de una variable en un tiempo determinado, en el caso del viento por lo general va de 10 hasta 60 minutos.
- **Ráfagas:** se le denomina así a la desviación de la velocidad del viento en un cierto periodo.
- **Rafagosidad:** variabilidad o tasa de cambio experimentada por el viento.

El viento debe ser medido en metros sobre segundos con una resolución de hasta 0.5 m/s y siempre redondeando a la unidad más próxima. En los informes sinópticos la información debiera estar en promedios de 10 minutos.

Con respecto a cómo se reporta la dirección, en los medios tradicionales se utiliza el sistema de claves que van desde 01 hasta 36, en el cual la clave 05 significa viento con dirección entre 45° y 55° , mientras que la clave 36 significa viento con dirección entre 355° y 5° . Por otro lado, el sistema BUFR, la resolución de la dirección es hasta 1° y se describe desde el norte geográfico hasta la dirección desde donde sopla el viento.

C.4.2. Equipo de Medición

- **Anemómetros de Cazoleta y Hélice**

Los anemómetros son instrumentos que miden la velocidad del viento, los más comunes son los de cazoleta y hélice, estos se componen de dos partes el rotor y el generador de señales. La obtención de la velocidad se basa en el hecho que la velocidad angular del rotor o hélice es directamente proporcional a la velocidad del viento, por lo tanto, mientras más rápido gire la hélice, significa que el viento es más rápido. Estos tienen la desventaja que debido a la inercia de la hélice, proporcionan datos de forma más rápida en aceleración que en desaceleración, lo que implica que requieren un mayor tiempo para obtener lecturas fiables, por otro lado, tienen la desventaja que muchas veces el viento tiene una componente vertical que puede afectar las lecturas.



Figura C.4.1: Anemómetro de cazoleta (abajo) y veleta (arriba) (SENSOVANT)

- Veleta

Es un instrumento utilizado para obtener la dirección del viento. Esta se debe observar desde su parte inferior y en el caso que el viento fluctúe su dirección, se reportará su dirección media. Los principales problemas de una veleta, es que debe estar perfectamente equilibrada y por otro lado el efecto que un coeficiente de amortiguamiento pueda tener en ella, es decir, si el coeficiente es muy bajo la veleta capturará cualquier variación del viento aun por pequeño que sea el tiempo que dure dicha variación, y si es muy alto demorará en conseguir la dirección media del viento. Se considera que los coeficientes de amortiguamiento comprendidos entre 0.3 y 0.7 son adecuados, no presentan una sobreoscilación excesiva y tienen una respuesta razonablemente rápida (Wieringa, 1967).

- Anemómetro sónico

Utilizan el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de un impulso ultrasónico que se desplaza a lo largo de una distancia fija (Kaimal, 1980). Su principal ventaja es que a diferencia de los anteriores, estos no utilizan el movimiento para obtener las mediciones, por lo tanto el tiempo de vida de los instrumentos es por mucho superior.



Figura C.4.2: anemómetro sónico (SENSOVANT)

C.5. Precipitación

C.5.1. Definición y Escalas

Se define precipitación como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes y del aire y se deposita en el suelo. Se puede entonces generalizar que en la precipitación se encuentra la lluvia, el granizo, la nieve, la escarcha, y la humedad entregada por la niebla.

La intensidad de precipitación, se calcula como la precipitación que llega al suelo en un tiempo determinado, por lo tanto la obtención de este parámetro puede realizarse con el mismo instrumento que se utiliza para obtener la precipitación total. La unidad de medida más común en el caso de las precipitaciones líquidas es el milímetro, que por lo general se realiza con una resolución de 0.2 milímetros, aunque es deseable que se use con 0.1 milímetros. En el caso de precipitación sólida, la unidad de medida más corriente es el centímetro y con resoluciones de 0.2 cm. En el caso de la intensidad de precipitación, la unidad de medida es milímetros por hora y por lo general, se mide por cada debido a que rápidamente puede variar.

C.5.2. Instrumentos de Medición

- De Pesada

Este instrumento es muy útil, ya que es capaz de medir la precipitación líquida y sólida, esto se debe a que tal como lo dice su nombre, se compone de un depósito en el cual cae la precipitación y luego es pesada (como la pesa no requiere el volumen). Es importante mencionar que antes de la elección de un instrumento como este, debe revisarse bien si la capacidad de la báscula o del recipiente es suficiente para los niveles de precipitación del lugar, por otro lado, es conveniente el uso de ya sea aceite u otro elemento que permita disminuir al máximo la evaporación.

- Cubeta Basculante

El funcionamiento se basa en que un embudo deposita la precipitación en uno de los dos cubos, cuando uno de estos cubos se llena y producto del cambio del centro de masa se genera un movimiento giratorio que resulta en el depósito de agua en uno de los lados. Este depósito finalmente permite el medir la cantidad de precipitación caída (León et al, 2013).

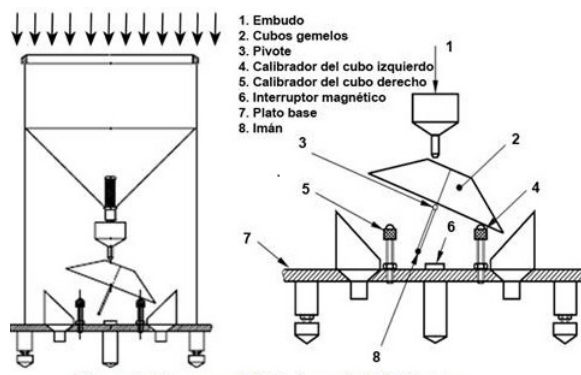


Figura C.5.1: Esquema de funcionamiento de un pluviógrafo de cubeta basculante (León et al, 2013)

La gran ventaja de este instrumento es que debido al uso de imanes y los interruptores magnéticos (que en algunos modelos puede variar) cada pasada queda registrada, por lo tanto, se puede medir la intensidad de precipitación de forma autónoma. Esto los cataloga como elementos muy aceptables en casos de estaciones meteorológicas automáticas.

■ Nivómetro

Es un instrumento capaz de medir la altura de nieve caída, de este hay dos tipos principales:

- Acústico: funciona muy similar a un sonar, desde una altura prefijada envía una onda de sonido y mediante el tiempo que demora en retornar dicha onda, es capaz de medir cuando ha variado la altura de la superficie, esto proporciona la altura de nieve caída.
- Láser: a diferencia del acústico que no toca la nieve, este se deja clavado en la nieve y funciona mediante un sistema de envío de una señal láser que al chocar con la nieve regresa y permite obtener la altura de nieve.

Debido a que muchas veces la nieve se encuentra en zonas de alta montaña y por lo tanto la altura de nieve caída varía notablemente, la medición de nieve muchas veces es muy poco representativa, es por ello que muchas veces la medición se basa en estacas que se instalan cada ciertos periodos y se registra la nieve caída, lo cual es una solución más barata, pero debido a la poca representatividad que los instrumentos significan, suele ser adoptada.

C.6. Radiación

C.6.1. Definición y Escalas

La radiación según su origen puede dividirse tanto en Solar (onda corta) como Terrestre (onda larga), la primera tal como dice su nombre proviene del sol y se define como la energía electromagnética que este nos emite, mientras que la segunda se puede definir como la energía electromagnética que la tierra emite. Dado que el rango de longitudes de onda que nos emite el sol y el que emite la tierra casi no se superponen, se puede tratar como radiaciones completamente separadas.

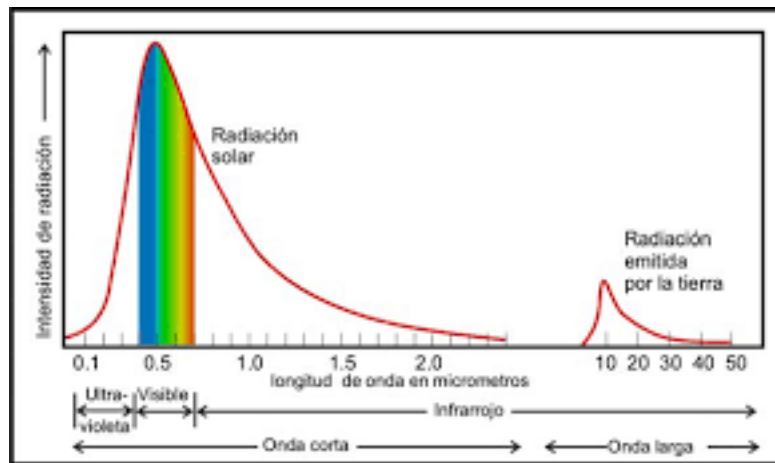


Figura C.6.1: Rango de Longitudes de Onda de las radiaciones solar y terrestre (UdeC)

Lo anterior es muy relevante porque frente al hecho que en promedio la temperatura de la Tierra se ha mantenido constante, indica que existe un equilibrio entre la radiación que entra con respecto a la que sale. Sin embargo, cuando se contrastan los valores de radiación de entrada y salida, se obtiene que entra más de lo que sale, pero este valor neto es adoptado como calor en la atmósfera generando vientos y otros procesos naturales.

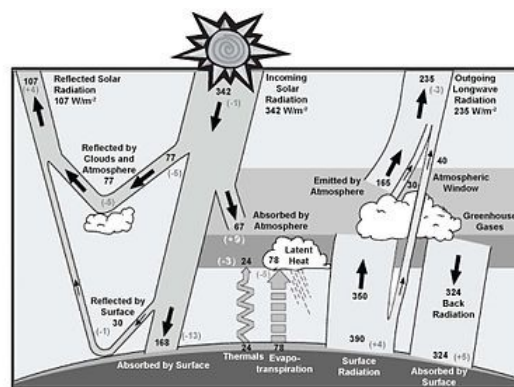


Figura C.6.2: Equilibrio radiativo de la tierra (NASA)

La radiación que emite el sol y que llega a la superficie no es igual a la que se encuentra fuera de la atmósfera, ya que, durante su paso en esta el vapor de agua y los aerosoles generan una dispersión de la radiación. Por lo tanto, se puede mencionar que mientras mayor sea el camino que recorre la radiación por la atmósfera mayor será su atenuación. Esto es importante porque se define la radiación global como la suma de la radiación directa, la cual es aquella que viaja directamente desde el sol hasta cierto punto y la radiación difusa, siendo esta la radiación que se ha desviado de su camino recto producto de efectos atmosféricos.

C.6.2. Instrumentos de Medición

■ Piránómetros

Es un instrumento de que mide la radiación solar global, de estos los más relevante son:

- Fotovoltaico: su funcionamiento se basa en un fotodiodo que al recibir la radiación y al hecho que este es capaz de diferenciar aquella radiación que proviene del sol (mediante el rango de longitud de onda). Según la lectura de voltaje que se obtiene producto del efecto fotoeléctrico se puede conocer la radiación que incide sobre este.
- Térmico: su funcionamiento se basa en el uso de una termopila cuyos extremos se encuentran soldados a barras de cobre. Cuando al sistema se le pinta de negro (para aumentar la radiación absorbida) la variación de temperatura en la termopila genera un voltaje que es proporcional a la diferencia de temperatura y con ello obtener la radiación. Una ventaja de este instrumento es que si se tapa con una pantalla, este puede medir la radiación difusa.

■ Pirheliómetros

Es un instrumento utilizado para medir la radiación solar directa. Su funcionamiento se basa en una termopila a la cual le llegan la luz del sol a través de una ventana, al igual que en el piranómetro térmico la variación de temperatura genera un voltaje y este se vincula con el nivel de radiación directa que existe en el ambiente.



Figura C.6.3: Pirheliometro (*SENSOVANT*)

■ Pirorradiómetros o Radiometro Neto

Diseñado para medir la radiación global. También se puede utilizar para medir el balance neto radiativo de una superficie horizontal, a través, de la combinación de dos pirorradiómetros en un solo equipo de medición, con uno expuesto hacia arriba y el otro hacia la superficie (Radiometro Neto).



Figura C.6.4: *pirorradiometro (U. de Chile)*

C.7. Duración de la Insolación

C.7.1. Definición y Escala

OMM define la duración de la insolación como la suma del tiempo durante la cual la irradiancia solar directa que se puede definir como cuanta energía o radiación incide sobre un área determina en un periodo determinado, supera los $120W/m^2$. Dado que es una variable que se mide con tiempo, se utiliza ya sea la unidad de medida hora o segundo.

C.7.2. Instrumentos de Medición

Para este fin, se utilizan los instrumentos descritos en el punto C.6 y básicamente establecen los tiempos mientras la irradiancia es superior a $120W/m^2$

C.8. Visibilidad

C.8.1. Definición y Escala

Debido a la alta subjetividad de la visibilidad, se presenta el concepto de Alcance Óptico Meteorológico (MOR por su sigla en inglés) el cual se define como la longitud del trayecto en la atmosfera, necesario para reducir el flujo luminoso de un haz colimado procedente de una lámpara de incandescencia, a una temperatura de color de 2700 K, hasta el 5% de su valor inicial evaluándose el flujo luminoso por medio de la función de luminosidad fotométrica de la Comisión Internacional de Iluminación (CII).

Es importante mencionar que las siguientes magnitudes fotométricas son claves:

- Flujo Luminoso: usa la unidad Lumen y es una medida de la potencia luminosa percibida
- Intensidad Luminosa: su unidad es la candela y se define como la cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por cada unidad de ángulo sólido.
- Luminancia: su unidad es candela por metro cuadrado y se define como la densidad angular, rectangular y superficial de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie.

- **Illuminancia:** es la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área y su unidad es el lux que es igual a lumen/m².

La visibilidad puede estar influenciada por diversos efectos atmosféricos, como por ejemplo la existencia de niebla, humo o lluvia y para el caso de la seguridad vial es un factor determinante, ya que en muchas situaciones la visibilidad de vuelve nula. La unidad de medida de la visibilidad es kilómetros o metros y depende mucho de la finalidad de esta observación, ya que, en lugares como aeropuertos donde la visibilidad es crítica.

C.8.2. Instrumentos de Medición

Existen dos tipos de instrumentos para la visibilidad, aquellos que miden el coeficiente de dispersión de la luz en un volumen de aire y aquellos que miden el coeficiente de extinción en un cilindro horizontal de aire. Los primeros establecen que el aporte de la absorción hacia el coeficiente de extinción es muy bajo en comparación al aporte de la dispersión, mientras que los segundos obtienen al coeficiente de extinción agrupando la absorción y la dispersión.

- **Dispersión de la luz en un volumen de aire**

Se basan en un haz de luz en un pequeño volumen de aire y determinando con ello, a través del uso de medio fotométricos la parte de la luz que fue dispersada en un ángulo sólido suficientemente grande. Estos debido a lo pequeño de su espacio son muy utilizados en estaciones meteorológicas automáticas y si bien ese mismo pequeño espacio significa poca representatividad, la capacidad de llevar a cabo muchas mediciones permite mejorar los datos obtenidos. Existen tres tipos importantes en los equipos de dispersión de luz en un volumen de aire y que se basan en la posición del transmisor y receptor:

- Retrodispersión
- Dispersión Frontal
- Dispersión en un ángulo de gran abertura

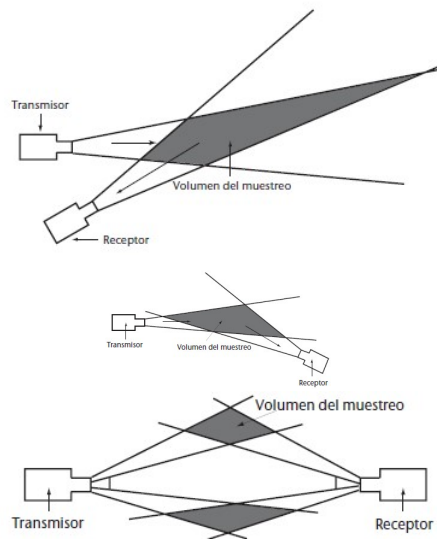


Figura C.8.1: *Retrodispersión, Dispersión frontal y dispersión en un ángulo de gran abertura (OMM, 2017)*

■ Coeficiente de Extinción en un cilindro de Aire

- Medidor de extinción Visual: este se utiliza ampliamente en la noche, su uso se basa en utilizar una luz distante que tiene un filtro neutro grabado, el cual puede ajustarse hasta que la luz deje de apreciarse. Si bien es un elemento muy sencillo depende de la subjetividad del observador, lo cual atrae errores, aunque entrega valores relativamente correctos a distancias entre 100 metros y 5 kilómetros.
- Transmisómetros: este es el método más común y se basa en un foco luminoso modulado de potencia media constante y un observador provisto de un fotodetector. El valor de salida del fotodetector permite obtener el valor del coeficiente de extinción

Apéndice D

Cargas y sensores de medición para puentes

D.1. Cargas y Acciones Ambientales

D.1.1. Cargas de vehículos

D.1.1.1. Sistemas Weigh in-motion (WIM).

Los sistemas WIM tienen la gran capacidad de proporcionar el peso, la velocidad y clasificación de los vehículos que circulan sobre ellos. Es decir, son sistemas que permiten obtener la masa del vehículo sin la necesidad de detenerlos. Para el caso de los puentes, un WIM sería un elemento a instalar muy útil, ya que permitiría obtener el historial de cargas que atraviesan el puente y con ello obtener un registro de las sobrecargas, mejorando los niveles de cálculo sobre la vida remanente del puente.

En el caso de los puentes existen dos principales opciones, la primera es instalar un sistema BWIM y el segundo es instalar un sistema WIM de alta velocidad (HSWIM) cercano al puente. El sistema BWIM, es un sistema de pesaje en movimiento el cual utiliza las deformaciones que sufre las partes de un puente para determinar la masa del vehículo que circula sobre este. En general, se les encuentra anclados al tablero o a las vigas de los puentes y han ganado popularidad, ya que, al encontrarse protegidos por la estructura, los requerimientos de mantención son más simples y además no requieren el cierre de tránsito. Sin embargo, su principal problema ocurre cuando dos vehículos circulan en el mismo vano y en igual sentido, generan problemas en el algoritmo de clasificación y pesaje, y es por ello que principalmente se utilizan en puentes cortos o en alcantarillas, llamándose Culway (Koniditsiotis et al, 1995).

Instalar HSWIM, sería una forma indirecta de conocer el tránsito sobre un puente, ya que deben ser instalados a cierta distancia de cualquier elemento que genere un cambio en el comportamiento del conductor, tal y como lo hace un puente. Sin embargo, su instalación no dependería del puente, por lo tanto, se podría monitorear la carga y la velocidad de cualquier puente de la red.

D.1.1.2. Cámaras

Si bien no permiten obtener la masa de un vehículo, con la instalación de estas se pueden monitorear:

- Vehículos que excedan las normas de dimensiones.
- Patentes de vehículos que violen las normas en la concesión.
- Esclarecer casos de accidentes automovilísticos
- Conteo de tránsito

En Chile, existe la instalación de sistemas de pesaje en movimiento de alta velocidad junto a los pódicos de cobro de TAG (Iturriaga, 2013), lo que da la oportunidad de además de registrar la carga con la que pasa el vehículo, poder conocer si dicho vehículo pertenece a alguna empresa y el comportamiento de sobrecarga es habitual.

D.1.2. Carga de viento

Para los puentes de grandes vanos el efecto del viento y el tránsito puede ser el más crítico. Zholgradi al comparar diferentes factores operacionales y ambientales, en un puente en suspensión de 642 metros con un vano principal de 335 metros, mostró que los efectos del tránsito y el viento fueron los más significantes (Zolghadri, 2017). Tal es la importancia de conocer la fuerza del viento sobre la estructura del puente en caso de grandes vanos, que en China de los 20 puentes más largos e instrumentados, 15 tienen anemómetros instalados (Ko y Ni, 2005). En general para medir la carga de viento sobre los puentes, se utilizan anemómetros similares a los vistos en C.4 que permitan conocer la velocidad y la dirección de este.

D.1.3. Movimientos sísmicos

Cada 15 a 25 años en Chile se genera un sismo de magnitud importante, es decir, en Chile los movimientos sísmicos es un riesgo constante para las estructuras, incluidos los puentes. Conocer el registro de un sismo en las cercanías del puente, permitirá mejorar los análisis sobre el estado del puente y cualquier cambio en las propiedades de este, podrán verse correspondida con la presencia de un sismo relevante. Para medir los movimiento sísmicos se utilizan los sismómetros.

- Sismómetro

Instrumento que mide las ondas originadas por las perturbaciones del terreno. De acuerdo a la configuración y número de estaciones disponibles, permite extraer información sobre el origen de las señales sísmicas como su energía, localización y modelo de fuente productora de la actividad. La unidad de medida generalmente se expresa en velocidad (micrómetros/segundo, $\mu\text{m/s}$).

En el caso de los sismómetros de banda ancha, estos miden un rango de frecuencias desde los mili-hertz hasta segundos, lo que demuestra su alta sensibilidad, sin embargo, dado que tienden a ser saturados frente a sismos de alta magnitud, es necesario que estos vengán acompañados por acelerómetros o sistemas de posicionamiento global (GPS).

Hoy en Chile existe más de un centenar de sismómetros instalados junto a acelerógrafos y sensores de posicionamiento global. Estas estaciones se encuentran bajo la administración y cuidados de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (Onemi).



Figura D.1.1: *Sismógrafo (SERNAGEOMIN)*

D.1.4. Temperatura y humedad

La temperatura y la humedad son factores muy relevantes a la hora de instrumentar puentes. La medición de humedad nos puede dar luces de problemas en el puente como situaciones de corrosión, pérdida de material u otros. Mientras que la temperatura, especialmente en casos de puentes de vanos cortos y medianos es el factor más considerado (Zolghadri, 2017), ya que, los cambios en temperatura generan cambios en las propiedades geométricas de la estructura distorsionando esfuerzos, deformaciones, puntos de apoyo y las propiedades fundamentales del puente, pudiendo en los peores casos encubrir daños sufridos (Kulprapha y Warnitchai, 2012). En este sentido en (Zolghadri, 2017), se evidenció hasta un 25 % de diferencia en las frecuencias naturales de un puente de hormigón de vano mediano producto de los cambios de temperatura.

Sobre los instrumentos para la humedad, estos son similares a los vistos en C.3, al igual que en el caso de la temperatura, ya revisados en C.1.

D.1.5. Vibraciones

Todas las estructuras sufren vibraciones, algunas producidas por sismos, tránsito, viento, etc. La forma más común de poder caracterizar estas vibraciones es mediante la obtención de registros de aceleración. Para medir la aceleración se utilizan acelerómetros, los cuales dependiendo de su sistema de funcionamiento varían mucho en su capacidad, precio y posibilidades de uso

- **Acelerómetros mecánicos**

Estos son aquellos que utilizando una masa inerte, resortes elásticos, medidores de deformación y sistemas de amortiguación. Los medidores de deformación se unen a la masa inercial por ambos extremos y al instrumento, cuando se percibe una aceleración, estas galgas se deforman generando una corriente eléctrica, siendo el valor de la aceleración proporcional a la deformación medida.

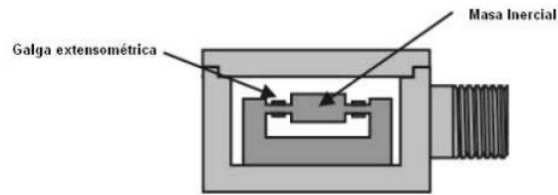


Figura D.1.2: *Acelerómetro mecánico (U. de Sevilla)*

- Acelerómetro piezoeléctrico

El funcionamiento de este sistema, es mediante el uso de una masa inercial que solicitada por las aceleraciones captadas, esta carga sobre un material piezoeléctrico cambiando las propiedades de los cristales y generando una corriente eléctrica. Este tipo de sensor se puede encontrar en diferentes gamas, por lo tanto, mediante la misma tecnología puede variar mucho su campo de acción.

- Acelerómetro piezorresistivo

Son bastante similares al anterior, sin embargo la principal diferencia es que este sistema tiene un circuito por el cual circula corriente eléctrica. Cuando la masa inercial capta una aceleración, esta ejerce fuerza sobre el circuito cambiando el voltaje. La gran ventaja sobre la anterior, es que debido a su naturaleza, esta es capaz de medir cuando la aceleración es igual a 0 Hz.

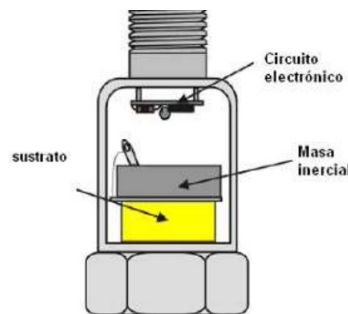


Figura D.1.3: *Acelerómetro piezorresistivo (U. de Sevilla)*

- Acelerómetro capacitivo

Todos aquellos instrumentos capacitivos, se caracterizan por tener dos placas paralelas y separadas por un material dieléctrico. Estos acelerómetros no son la excepción y se basan en que teniendo una de las placas fijas a la carcasa del instrumento y la otra pegada a una masa inercial, en el momento en que la aceleración, mueva a la masa, la distancia entre ambas placas variará, y en función de dicho cambio es que es posible obtener el valor de la aceleración.

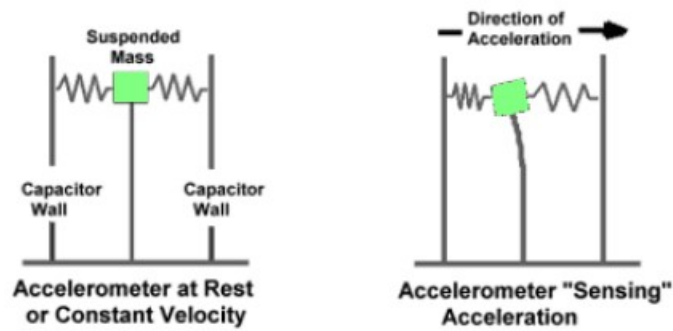


Figura D.1.4: Explicación de funcionamiento de un acelerómetro capacitivo (Villaluenga, 2011)

- MEMs

Este tipo de acelerómetro está enfocado en su uso como sensor de impacto, es por ello que se utiliza en airbag y sistemas antibloqueo de frenos o cualquier situación que se asemeje a un impacto.

- Comparación acelerómetros

A manera de resumen, se presenta una tabla con las principales características de cada tipo de acelerómetro (Villaluenga, 2015). Es importante mencionar que el constante desarrollo de la industria genera que los valores de las tabla se desactualicen y que tecnologías que antes no podían trabajar en cierta área, hoy o en el futuro si puedan.

Tabla D.1.1: Características por tecnología (Villalunga, 2011)

Tipo	Margen de medida	Ancho de Banda (Hz)	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
MEMS	1.5 a 250g	0.1 a 1500	-Alta sensibilidad -Coste medio -Uso sencillo -Bajas temperaturas	-Impacto -ABS -Airbag -Uso en automoción
Piezoeléctricos	0 a 2000g	10 a 20000	-Sensibilidad media -Uso complejo -Bajas temperaturas -No funcionan en continua	-Vibración -Impacto -Uso industrial
Piezoresistivos	0 a 2000g	0 a 10000	-Respuesta en continua y alterna -Prestaciones medias -Bajo coste -Tamaño y peso mínimo -Alta sensibilidad	-Vibración -Impacto -Automoción -Biodinámica -Ensayos en vuelo -Test en túneles de viento
Capacitivos	0 a 1000g	0 a 2000	-Funciona en continua -Bajo ruido -Baja potencia -Excelentes características -Bajo coste	-Uso general -Uso industrial -Sistemas de alarma y seguridad -Mediciones sísmicas
Mecánicos	0 a 200g	0 a 1000	-Alta precisión en continua -Lentos -Alto coste	-Navegación inercial -Guía de misiles -Herramientas -Nivelación

D.1.6. Desplazamiento

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Normalmente el sistema de posicionamiento global (GPS) solo se utiliza para estructuras con bajos rangos de frecuencia modal, sin embargo el uso de esta tecnología en el monitoreo de salud estructural de un puente es muy importante porque permite mediciones tanto dinámicas, cuasi-estática y estáticas (Beem et al, 2013). En el caso de un monitoreo estructural, existen dos enfoques para aplicarlo: Como red fija o un sistema móvil:

- Sistema de red fija

Este sistema requiere la toma de datos de posición durante algunas horas y mediante el uso de dos receptores y la diferencia entre sus mediciones, este es capaz de obtener el cambio en la posición de la estructura. Este sistema de red fija es capaz de evaluar cambios del corto plazo en un puente y tiene dos métodos para lograrlo. El método Estático Rápido (FS) y luego el método GPS-RTK, el cual es capaz de monitorear movimientos dinámicos del puente. Algunos estudios han demostrado

que la resolución de las técnicas de GPS para medir desplazamiento de baja amplitud, se encuentran en los niveles de milímetros (Roberts et al, 2004; Watson et al, 2007).

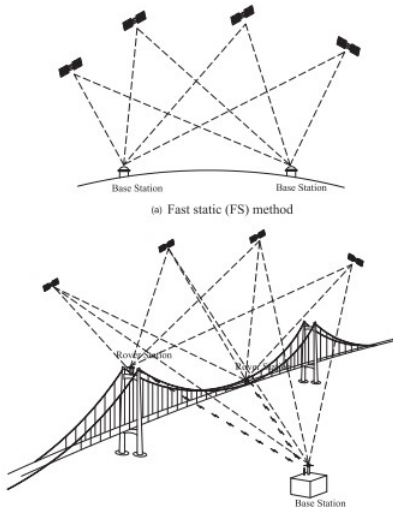


Figura D.1.5: Esquema de funcionamiento de un sistema FS y GPS-RTK (Beem et al, 2013)

- Sistema Móvil:

Este método no es capaz de medir cambios en el corto plazo, sin embargo su función radica en obtener desplazamientos en el largo plazo como asentamiento o curvaturas por flexión.

- Transductores de posición lineal

La principal característica de este sistema es que la salida eléctrica del sensor es proporcional a la distancia que se extiende un cable. Cuando el transductor es instalado, el cable de acero es fijado en el lugar a medir, luego cuando se genera un desplazamiento en la estructura el cable sufre un alargue, siendo dicho alargue el proporcional a la salida eléctrica. El sensor que mide la deformación puede ser un potenciómetro que busque obtener la deformación absoluta o un encoder incremental para posicionamiento digital. Dentro de las grandes ventajas es que estos sistemas son muy simples de instalar, de hecho en el puente Amolanas 4 de estos instrumentos se instalaron para medir el desplazamiento estático en el sentido longitudinal del puente (Márquez et al, 2017) .



Figura D.1.6: Celesco modelo PT510 (Celesco)

D.1.7. Deformación

- Fibras de rejilla de Bragg (FBG)

Las fibras ópticas que se basan en la modulación de la longitud de onda de luz son denominadas “fibras de Rejilla de Bragg” (Fiber Bragg Grating, FBG en sus siglas de inglés). El sensor FBG actúa como un filtro selectivo de longitud de onda de luz que refleja únicamente aquella parte del espectro de luz que satisface las condiciones de la Rejilla de Bragg dada (refleja la longitud de onda correspondiente a la reflectividad máxima de la rejilla) (Rodríguez et al, 2010). Por lo tanto, cuando la fibra óptica sufre una deformación producto de las deformaciones y esfuerzos que sufre la estructura, el filtro selectivo cambia generando que distintas longitudes de onda sean reflejadas. Dentro de las ventajas de este sistema destacan que, permite la conexión en serie con otras rejillas de Bragg, la posibilidad de que la fibra óptica se encuentre embebida o adherida a la estructura, no se ve afectada por pulsos electromagnéticos, no sufre interferencia frente a rayos y su capacidad de medición no disminuye en el tiempo (Majumder et al, 2008).

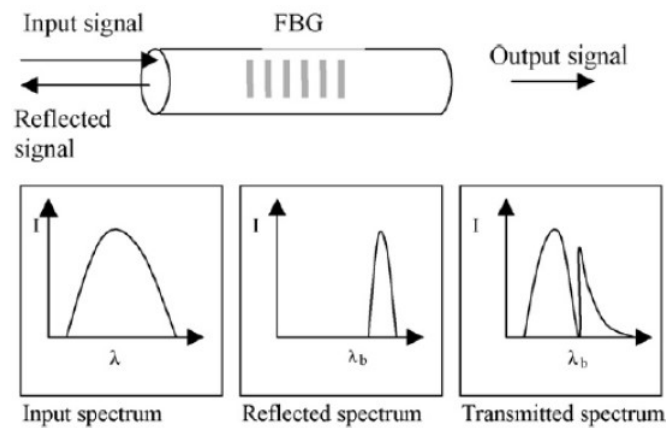


Figura D.1.7: Ilustración funcionamiento rejilla de Bragg (Majumder et al, 2008)

Sin embargo, la rejillas de Bragg también tienen inconvenientes, en primer lugar su instalación requiere mano de obra bastante calificada, no se le recomienda adherirla porque existen casos donde roedores acaban con esta, requieren fuentes de poder muy estables y su compra e instalación es sumamente costosa (Lui-kan et al, 2013).

- Strain Gauge eléctrico

Son medidores de deformación que pueden ser adheridos a la estructura y adoptan las mismas deformaciones que sufre esta. Su uso es bastante común dada su facilidad de instalación y su relativo bajo costo. Dentro de sus desventajas, es que su capacidad de medición disminuye en el tiempo debido a su desgaste, además sufren interferencia debido a las tormentas eléctricas, sin embargo su simpleza y costo siguen siendo muy utilizados. Por lo general, estos sensores tienden a ser de tecnologías piezorresistivas o capacitivas y pueden ser instalados en las distintas materialidades del puente.



Figura D.1.8: *Strain gauge inalámbrico instalado sobre una viga de acero (Resensys)*

D.2. Socavación

La socavación puede ser definida como la excavación y remoción del material del lecho del río como un resultado de la acción erosiva del flujo de agua (Hamill, 1998). Lo anterior define lo que es el proceso de socavación y de él se desprende que para que ocurra dicho proceso en una magnitud importante, debe existir un cambio importante en el comportamiento del río, cambio que por lo general se producen durante las crecidas. Si además de las crecidas el flujo de agua choca con obstáculos que lo alteren como angostamientos u obstáculos como las pilas de un puente, este puede generar que el proceso de socavación aumente de manera significativa. De hecho, en los Estados Unidos el proceso de socavación es tan relevante que es la causa número uno de colapsos (Briaud et al, 2005). En el caso de Chile, esta también es una de las situaciones de colapso más comunes, ya sea por crecidas de ríos o lahares (Dagá et al, 2018; Valenzuela y Peña-Fritz, 2019).

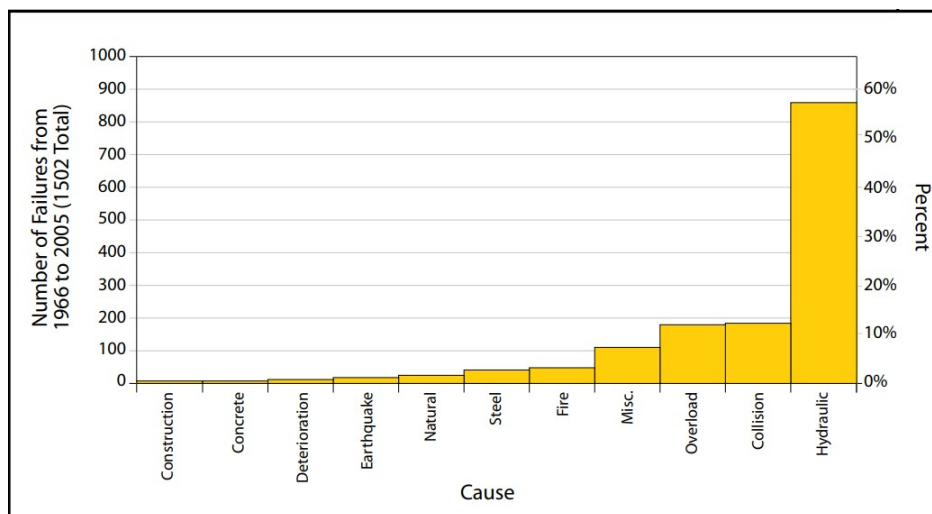


Figura D.2.1: *Causa de falla de puentes en los Estados Unidos (New York State DOT and Texas AM University).*

D.2.1. Componentes de la Socavación

La socavación que se mide luego de pasada la crecida, es la suma de sus tres componentes, las cuales son:

D.2.1.1. Agradación y degradación del lecho

La agradación y degradación del lecho son cambios en la elevación del cauce en un largo plazo, debido a factores naturales o por intromisión humana, la cual puede afectar el río sobre el que se localiza el puente u obstáculo considerado (San Juan, 2013). Claro está que este proceso no es uniforme a lo largo del río, sino que depende de las pendientes que sortea, la cantidad de sedimentos que el flujo arrastra, el caudal, etc. y que por lo tanto, su efecto en la socavación total se vuelve dudoso, al además ser un proceso acumulativo y de largo plazo.

D.2.1.2. Socavación general

La socavación general consiste en el descenso transversal del lecho en una sección de interés, lo que a menudo se asocia a efectos de una contracción del cauce (natural o artificial), esto es, el angostamiento del cauce puede producirse en la sección emplazamiento de un puente (por la presencia de terraplenes de acceso y estribos), en obras de encauzamiento, o bien, en secciones naturalmente más angostas de un río, o bien de otras alteraciones de las condiciones hidráulicas, tal como el flujo en las curvas del cauce, todo lo cual provoca un aumento local del arrastre producto de una aceleración del flujo, con el consecuente desbalance entre la salida y entrada de sedimento en el tramo considerado (San Juan, 2013).

El punto hasta donde se produce socavación general, es aquel en que debido al flujo de agua el arrastre de material genera una disminución del lecho del río hasta el punto en que debido al consiguiente aumento

del área de flujo, este disminuye su velocidad y con ello también disminuyendo su capacidad de arrastre de material.

D.2.1.3. Socavación local al pie de pilas y estribos

La socavación local consiste en la remoción del material en forma localizada al pie de obras, tales como pilas, estribos, espigones y terraplenes. Es causada por una aceleración del flujo debido a la disminución de la sección del mismo, y por los torbellinos o vórtices locales generados con la obstrucción al escurrimiento, los cuales aumentan la capacidad erosiva del flujo en torno a estas estructuras. Así, la socavación originada por estos dos procesos ocurre en un espacio y lugar específico dentro del lecho, teniendo así la denominación de local (San Juan, 2013).

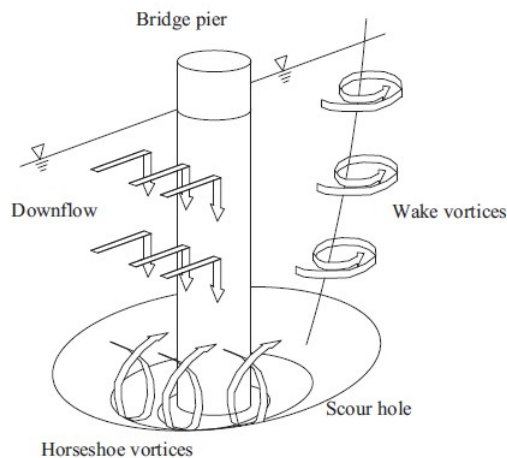


Figura D.2.2: Esquema de flujo durante la socavación en una cepa (Prendergast y Gavin, 2014)

D.2.1.4. Razones Para Instalar un sistema de Monitoreo de Socavación

En una encuesta en Estados Unidos (Hunt, 2009), se determinó que la razón principal (39 de 56 encuestados) para instalar un sistema de monitoreo de socavación es que sus puentes se consideraron en clasificación crítica con respecto a la socavación, luego 16 de ellos respondieron que la instalación se debe a proyectos, 7 a reemplazo del puente y 3 respondieron que observaron un hoyo de socavación en una cepa, repentino asentamiento y otro que existe la posibilidad de un repentino arrastre de escombros aguas arriba del puente. De todo modos, las respuestas anteriores no responden por si solas el porqué la instalación de sistemas de monitoreo y sumándole a sus respuestas estos son los factores que también gatillaron la decisión de instalar sistemas de monitoreo en los puentes:

- La importancia en la red el puente en que instalar.
- Evaluaciones de socavación
- Historial de socavación

- Falla de cepas
- Pilas cortas en las cepas
- Fundaciones desconocidas
- Altas velocidades de agua
- Preocupación de seguridad pública
- Necesidad de monitoreo continuo durante tormentas
- Observación durante inspecciones de rutina
- Puente está programado para ser reemplazado
- Requerimientos de etapa de construcción
- Dificultados involucradas con contramedidas hidráulicas o estructurales
- Tránsito relativamente bajo
- Equipo de investigación insistió sobre monitorear

D.2.2. Instrumentación mediante dispositivos de uso simple

En esta área de los instrumentos para medir o monitorear la socavación, se encuentran dos instrumentos. Ambos tienen la capacidad de ser enterrados en algún punto de interés (cercano a una pila o estribo) a cierta profundidad. Cuando la crecida genera un nivel de socavación, tal que se remueve el lecho que entierra estos instrumentos se activan.

- Dispositivo Float-out

Cuando la socavación libera este elemento este flota lo que gatilla el sistema de adquisición de datos. La gran ventaja que tiene es que tiene un funcionamiento e instalación muy simple, sin embargo su instalación es costosa y solo me entrega hasta que punto y el momento en que la socavación llegó al nivel del dispositivo.

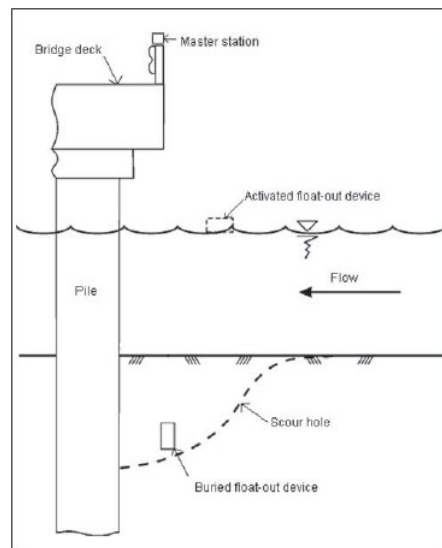


Figura D.2.3: *Funcionamiento de un dispositivo Float-out. (Hunt, 2009)*

- Tethered buried switches

Funcionando con bajo los mismo paradigmas del dispositivo anterior, este cuando flota este tiene la capacidad de de generar tres tipos de mensajes, “en posición”, es decir, cuando aun la socavación no llega a su nivel, “Flotando afuera” (la socavación llegó a su nivel y “No operativo”. Como desventaja general para ambos sistemas, cuando el elemento flota es muy probable y aun más en caso de crecidas es que, sean golpeados por escombros que traen los ríos, lo que claramente trae dudas acerca de su eficacia.

D.2.3. Instrumentación mediante dispositivos de pulsos o radar.

Dispositivos de señales de radar o pulsos electromagnéticos para determinar cambios en las propiedades del material que ocurren cuando una señal es propagada a través de un medio físico cambiante (Forde et al. 1999). En este campo existen dos principales dispositivos, el Time Domain Reflectometer (TDR) y el Ground Penetrating Radar (GPR).

- TDR

Es un método que usa cambios en la constante de permitividad dieléctrica entre materiales para determinar la profundidad de socavación en un lugar particular (Yu y Yu, 2010). Este sistema se instala mediante una barra bastante larga con un arpón en su extremo en un punto de interés para conocer la socavación y esta envía pulsos electromagnéticos los cuales viajan a través del suelo y el agua. Cuando se envía el pulso y este choca con zonas donde existen cambios en la constante dielectrica, parte de la energía regresa permitiendo obtener estas distancias. Es es una gran ventaja porque permite obtener la socavación en el tiempo (Hussein, 2012). Por el lado de sus desventajas existe la necesidad de instalar barras de un largo que permita conocer la altura de una cepa, lo cual puede llegar a ser costoso y sumado al hecho que su capacidad de determinar el nivel de socavación puede verse afectada por la temperatura, hasta en un 5 % (Fisher et al, 2013).

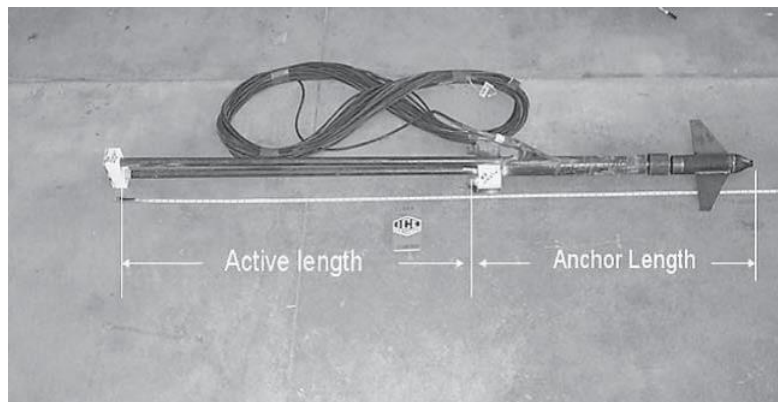


Figura D.2.4: *Time Domain Reflectometer (U.S. Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory)*

- GPR

Utilizando principios similares al anterior el GPR envía pulsos de radar hacia el agua y este es capaz de obtener la profundidad de la interface agua-sólido y por lo tanto, la profundidad de socavación. La gran diferencia con el TDR es que este funciona fuera del agua lo que es una gran ventaja entendiendo que estando en el agua puede sufrir el choque de escombros y que se puede utilizar para generar un mapa de la profundidad de socavación de todo el largo del puente, sin embargo su desventaja es que requiere operación manual, lo que en casos de crecidas puede ser dificultoso e incluso peligroso si el puente a monitorear está en estado crítico y por lo tanto, menos se puede utilizar para fines de monitoreo continuo.

- Instrumentación mediante dispositivos de Fiber-Brag gratting

Este tipo de dispositivo, se basa en el anclado en el lecho del río de una barra a la cual se instalan una serie de medidores de deformación, en especial mediante sensores de fibra óptica. El funcionamiento está basado en que cuando el flujo descubre parte de la barra del lecho que la tapa, este mismo flujo genera fuerzas sobre la barra que la hacen flectarse (doblarse). Relacionando la deformación de la barra con el largo con las propiedades de esta, es posible obtener el largo de barra descubierta y desde allí obtener la profundidad de socavación. Su principal ventaja, es que es barata de construir y es capaz de medir la socavación en el tiempo, aunque su resolución va a depender de cuantos sensores medidores de deformación tenga.

D.2.4. Instrumentación mediante dispositivos de barras enterradas o conducidas

Estos instrumentos trabajan en función de un manual o movimiento descendente a medida que se desarrolla la socavación. Básicamente estos son barras que contienen otro elemento que a medida que la socavación la descubre, la lectura de socavación aumenta. Los principales son tres el Magnetic Sliding Collar, el “Scoubamouse” y el Wallingfor “TellTail”.

- Magnetic Sliding Collar

Este sistema se basa en que a medida que se descubre la barra insertada en el lecho del río, un anillo desciende el cual acciona switches magnéticos dentro de la barra pudiendo conocerse su descenso que es igual al nivel de socavación. Sus ventajas es que se puede tomar datos continuamente y que es capaz de obtener el momento y máxima socavación, sin embargo dentro de sus desventajas está que solo permite la máxima socavación y por lo tanto, luego de la crecida requiere volver a instalarlo (en algunos casos no se puede) y que debido a que está instalado en lecho es posible que este sea dañado por escombros.



Figura D.2.5: *Instalación de un magnetic sliding collar (Hunt, 2009)*

- Scubamouse

Es un sistema muy similar al anterior, con la única diferencia que la ubicación del collar es determinada por un elemento sensible a la radiactividad.

- Wallingfor “TellTail”

Este consiste de un set de sensores de movimiento omnidireccionales montados sobre “colas” y conectados a una barra que puede ser enterrada en el lecho a un rango de profundidades. Este dispositivo trabaja sobre el principio que el sensor de movimiento detecta movimientos del lecho como la socavación alcance la profundidad a la que está embebido el sensor.

D.2.5. Instrumentación mediante dispositivos de ondas de sonido

Utilizando principios similares a los que utilizan ondas electromagnéticas (D.2.3) , estos dispositivos envían ondas de sonido que al momento de cambiar de medio una parte de regresa lo que permite obtener la distancia desde el instrumento al cambio de medio.

- Sonar (Sonic fathometer)

Este dispositivo es capaz de generar un perfil continuo del lecho del río, por lo que tiene la importante ventaja de capturar el nivel de socavación en el tiempo. Con respecto a su ubicación, por lo general, se instala adosado a la pila de un puente y desde allí envía los pulsos de sonido. Otra ventaja es que debido a su uso en la pesca, este dispositivo siempre se encuentra en constante mejora

en su resolución y desempeño. Dentro de sus desventajas, está que en casos de flujos turbulentos, es decir, en casos donde producto de la turbulencia ingresan burbujas de aire en el agua, las lecturas comienzan a verse afectadas y otra desventaja, es que la medición solo va a reconocer el lugar más superficial del hoyo de socavación (Fisher et al, 2013).

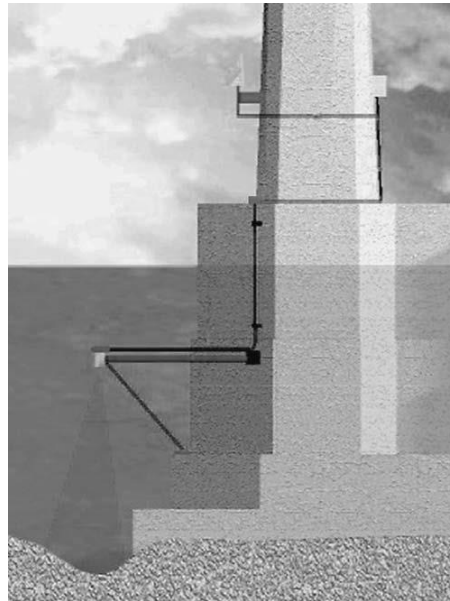


Figura D.2.6: *Esquema de un sistema de monitoreo de socavación mediante un sonar (Hardesty and Hanover, LLP)*

- Perfilador de reflexión sísmica

Este dispositivo típicamente emplea entre una fuente acústica y un transductor receptor que son ubicados inmediatamente bajo el nivel del agua. Como el sistema es remolcado manualmente a lo largo de la superficie, la fuente produce señales acústicas de bajo periodo a intervalos regulares de distancia o tiempo. Este dispositivo puede construir perfiles del lecho en función de la energía que se refleja desde la interface agua-sedimento. Entre sus desventajas se encuentra ruido en sus mediciones en los casos de lechos variables, dado que tanto la fuente como el receptor deben estar sumergidos se vuelve imposible obtener datos de forma continua sobre lechos de arena y lo principal es que el instrumento requiere valores de entrada manuales (Prendergast y Gavin, 2014).

D.2.6. Instrumentación mediante dispositivos de conductividad térmica

Basado en la disipación del calor Ding (Ding et al, 2016), propone un sistema de sensores que se confecciona de acero inoxidable al cual se le agrega una fuente calor, luego estos dispositivos se instalan en una cepa del puente, asegurándose que algunos quede en el agua y otros en la zona del sedimento. Cuando ocurra una crecida que mediante socavación genera el descubrimiento de la pila y con ello de los sensores, estos comenzarán a tener un nivel de disipación mayor producto que ahora, ya que, tiene contacto

directo con el flujo de agua. Dentro de las ventajas está que son sencillos de fabricar y que pueden discernir de buena manera el material que los rodea. Dentro de su desventajas está que su exactitud depende de cuantos sensores instalar en una pila y el hecho que se encuentran en fase de pruebas de laboratorio.

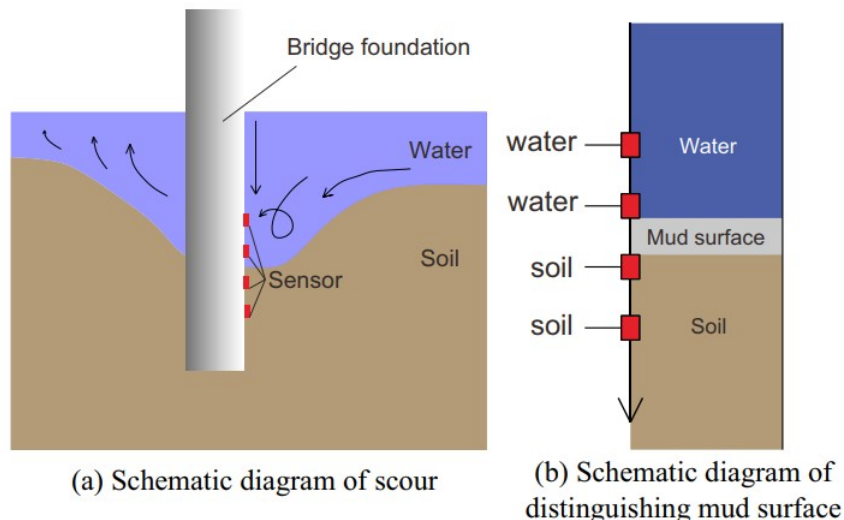


Figura D.2.7: Principio de trabajo del sensor (Ding et al, 2016)

D.2.7. Costos de sistemas de monitoreo de socavación

Mediante una encuesta llevada a cabo en los Estados Unidos el NCHRP 396 determinó los siguientes costos de instrumentar para socavación según la tecnología a instalar. Claro es que estos costos son referenciales y que a once años de esta publicación algunos costos pudieran haber descendido, por otro lado, se deben considerar elementos como disponibilidad en el país, repuestos, personal calificado para su instalación, etc.

Tabla D.2.1: Costo estimado por tecnología (Hunt, 2009)

Typed of Fixed Instrumentation	Instrument Cost with Remote Technology (\$)*	Instrument Cost for Each Additional Location (\$)	Installation Cost	Maintenance/ Operation Costs
Sonar	12,000–18,000	10,000–15,500	Medium to high; 5- to 10-person days to install	Medium to high
Magnetic Sliding Collar	13,000–15,500	10,500–12,500	Medium, minimum 5-person days to install	Medium
Tilt Sensors	10,000–11,000	8,000–9,000	Low	Low
Float-Out Device	10,100–10,600	1,100–1,600	Medium; varies with number installed	Low
Sounding Rods	7,500–10,000	7,500–10,000	Medium; minimum 5-person days to install	High
Time Domain Reflectometers	5,500–21,700	500	Low	Medium

*Cost per device will decrease when multiple devices share remote stations and/or the master station.

D.2.8. Monitoreo de la socavación basado en vibraciones

Debido a la socavación las fundaciones del puente (pilas/cepas) pierden contacto con el suelo. Cuando se genera esta pérdida de contacto, la zona aún en contacto sufre un mayor esfuerzo y, dado que la rigidez del suelo depende de dicho esfuerzo, el puente al socavarse pierde parte de su rigidez inicial (Prendesgast et al, 2016), es decir, sufre daño.

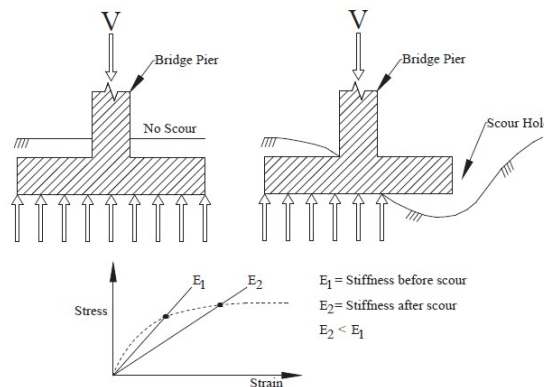


Figura D.2.8: *Perdida de rigidez debida a la socavación (Prendergast and Gavin 2014)*

Dada esta pérdida de rigidez en la estructura, es posible capturar cambios en las propiedades fundamentales de esta. Por lo tanto mediante la instalación de acelerómetros o sensores de desplazamiento o velocidad en las fundaciones de la estructura, se puede localizar aquella fundación en que la socavación haya generado daño.

(Prendesgast et al, 2016) muestra la aceleración medida en una fundación para cero y diez metros de socavación. Como es evidente, la socavación genera el incremento en el periodo de vibración de la estructura o dicho de otra forma, una pérdida de rigidez. Esto se hace más evidente en el recuadro de la siguiente figura.

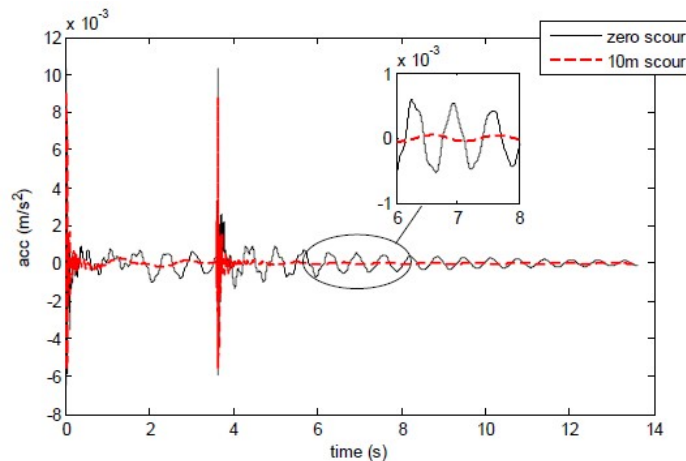


Figura D.2.9: Respuesta de aceleración de un puente frente al paso de un vehículo con 0 y 10 metros de socavación (Prendegast et al, 2016)

La desventaja de este método, consiste en primero la cantidad de información que los sensores continuamente generan, luego está que diversos factores dificultan la tarea de encontrar una pérdida de rigidez como el tipo de fundación, propiedades propias de la estructura, las no linealidades del suelo, las limitaciones de los sensores, incluso las condiciones climáticas que puedan afectar las propiedades fundamentales de la estructura.

En Chile, en la ruta 146 que une Concepción y Cabrero, se está llevando a cabo el proyecto DM-SCOUR, el cual mediante acelerómetros e inclinómetros, busca desarrollar una solución que permita el control y monitorización del comportamiento estructural de puentes en servicio de modo que el sistema sea capaz de detectar el nivel de socavación al que se ven sometidas las cepas de los puentes detectando si existe daño, su localización exacta y su grado de severidad .

D.2.9. Monitoreo de socavación general

Una manera simple de lograr medir la socavación general en el lecho del río es utilizar pesos muertos enterrados, los cuales estén amarrados a cadenas (Figura D.2.10). Dada su simpleza y facilidad de construcción, son una buena opción siempre y cuando periódicamente se registren los datos de socavación y que durante el relleno (luego de la construcción) se utilice el mismo material del lecho.

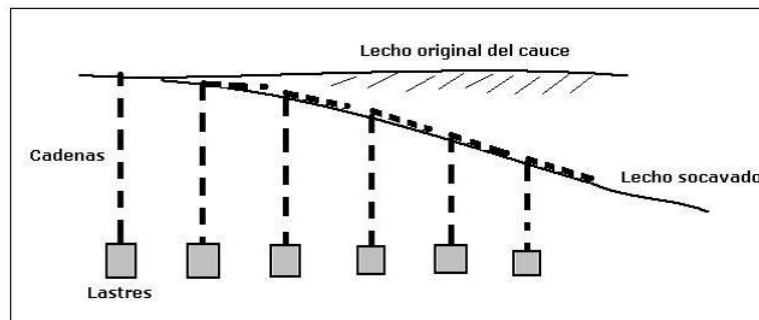


Figura D.2.10: *Esquema de instalación de las cadenas de socavación (San Juan, 2013)*

En Chile este sistema se utilizó en el río Lontué, cuando se decidió pasar una tubería de ENAP por este río. Como forma de monitoreo de socavación cadenas se amarraron a la tubería (San Juan, 2013).