



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Sistema de Información Climática para el Diseño de Infraestructura Carretera

Juan Fernando Mendoza Sánchez
Eduardo Adame Valenzuela
Luz Angélica Gradilla Hernández
Elia Mercedes Alonso Guzmán
Omar Alejandro Marcos Palomares

Publicación Técnica No. 636
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura de Vías Terrestres del Instituto Mexicano del Transporte, por el M en C Juan Fernando Mendoza Sánchez y los Ingenieros Eduardo Adame Valenzuela y Omar Alejandro Marcos Palomares, miembros del Grupo de Investigación en Medio Ambiente, así como por la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández de la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial.

Esta investigación es uno de los productos del proyecto de investigación interna II-01/21 Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras – Fase II. El cual forma parte de una serie de estudios que se realizaran conjuntamente con la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través del Cuerpo Académico Consolidado de la Facultad de Ingeniería Civil (CAC-UMSNH-147), con la participación de la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán y el Dr. Wilfrido Martínez Molina.

Se agradece la colaboración del Dr. Horacio Delgado Alamilla, Dra. Yelitza Ayala del Toro, Dr. Ricardo Solorio Murillo, Dr. Guillermo Torres Vargas, Dr. Paul Garnica Anguas y de la Dra. Natalia Pérez García.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	i
Índice de tablas.....	iii
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Resumen Ejecutivo	ix
Introducción.....	1
1 El clima en el diseño de infraestructura carretera	5
2 Sistema de información climática para el diseño de carreteras	13
3 Programación del SICliC	37
4 Actualizaciones del SICliC	41
Conclusiones.....	43
Bibliografía	45

Índice de figuras

Figura 1.1 Esfuerzos por temperatura en pavimentos rígidos	8
Figura 2.1 Arquitectura del SICliC	14
Figura 2.2 Selección del sitio en SICliC	14
Figura 2.3 Selección de la infraestructura vial en SICliC.....	15
Figura 2.4 Ejemplo: Selección del tramo carretero en SICliC	16
Figura 2.5 Ejemplo: Selección del tramo carretero en SICliC	17
Figura 2.6 Selección de estaciones en SICliC.....	18
Figura 2.7 Selección de una estación meteorológica en SICliC	19
Figura 2.8 Consulta de información detallada de una estación meteorológica en SICliC	19
Figura 2.9 Selección del módulo de gráficos climáticos en SICliC	20
Figura 2.10 Gráficos de temperatura máxima y mínima del SICliC	21
Figura 2.11 Gráficos de precipitación promedio y precipitación máxima del SICliC	21
Figura 2.12 Gráficos de velocidad del viento promedio y máximo del SICliC	22
Figura 2.13 Gráficos de presión atmosférica promedio y humedad relativa promedio del SICliC	22
Figura 2.14 Gráfico de radiación solar promedio del SICliC.....	23
Figura 2.15 Módulo para determinar el PG del asfalto del SICliC	23
Figura 2.16 Determinación del nivel de ajuste del PG del asfalto del SICliC	25
Figura 2.17 Descarga de información climática del SICliC.....	26
Figura 2.18 Vista de un archivo de Excel con la información climática descargada del SICliC	26

Figura 2.19 Selección de escenarios climáticos del SICliC	27
Figura 2.20 Escenario precipitación promedio del SICliC	28
Figura 2.21 Escenario temperatura promedio del SICliC	29
Figura 2.22 Escenario temperatura máxima del SICliC.....	29
Figura 2.23 Escenario temperatura mínima del SICliC	30
Figura 2.24 Escenario aumento del nivel del mar 2.0 metros del SICliC.....	31
Figura 2.25 Escenario aumento del nivel del mar 5.0 metros del SICliC.....	31
Figura 2.26 Menú de mapas adicionales del SICliC	32
Figura 2.7 Mapa climático de Köppen del SICliC	33
Figura 2.28 Visualización de la información en el mapa climático del SICliC.....	33
Figura 2.29 Visualización del mapa para la selección del Grado PG del asfalto del SICliC	34
Figura 2.30 Visualización del mapa para la selección del Grado PG del asfalto del SICliC y límites políticos estatales.....	35
Figura 2.31 Visualización del menú “restaurar”	35

Índice de tablas

Tabla 2.1 Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación... 25

Sinopsis

En esta investigación se presenta la nueva versión del Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC), el cual es una plataforma tecnológica con base en un visualizador Web, mediante la cual los diseñadores/calculistas de carreteras podrán contar con información y datos que les serán útiles en el diseño de los diferentes elementos que integran un activo carretero, tales como un pavimento, obras de drenaje, el nivel de subrasante, las pendientes transversales de la calzada, etc.

SICliC proporciona facilidades para que el diseñador de una carretera pueda ubicar la estación meteorológica más cercana a su proyecto y visualizar la información tanto meteorológica como climática; y, en su caso, descargar la información de referencia.

SICliC integra información del clima geoespacialmente representada, mediante mapas climáticos y escenarios climáticos, que permiten identificar los cambios futuros proyectados del clima que permiten adaptar la infraestructura carretera.

El uso potencial del SICliC puede ser muy amplio, pero también puede tener un crecimiento importante para adaptarse a las necesidades de los ingenieros de carreteras. Actualmente, éste integra dos módulos, el primero permite obtener gráficos dinámicos del clima y el segundo seleccionar el asfalto de acuerdo a su grado de desempeño.

Abstract

This research presents the new version of the Climate Information System for Highway Design (SICliC), which is a technological platform based on a Web Viewer, through which road designers / calculators will be able to have information and data that will be useful to design different elements that integrate a highway asset, such as a pavement, drainage, the subgrade level, the transverse slopes of the road, etc.

SICliC provides facilities so that the designer of a highway can locate the meteorological station closest to the project, and view the meteorological and climatic information, and, where appropriate, download the information.

SICliC integrates geospatially represented climate information, through climate maps and climate scenarios, which allow the identification of projected future climate changes that allow adaptation of the road infrastructure.

The potential use of SICliC can be very broad, but it can also grow significantly to accommodate the needs of highway engineers. Currently, it integrates two modules, the first one allows to obtain dynamic graphs of the climate and the second one to select the asphalt according to its performance grade.

Resumen ejecutivo

Para mitigar los efectos/impactos del clima y el cambio climático se requiere que los tomadores de decisiones en las organizaciones de carreteras actualicen los umbrales de diseño para sus activos, y que con ello puedan enfrentar un clima cambiante y extremo, y que además sean resilientes en el futuro con las diferentes proyecciones/escenarios del cambio climático a pesar de las incertidumbres de los modelos actuales.

Para la incorporación del cambio climático y la variabilidad del clima en los estándares de diseño de la infraestructura carretera, se requiere de mecanismos que permitan a los diseñadores de carreteras obtener información confiable sobre el clima y el cambio climático, la cual pueda servir de insumo para el diseño de la infraestructura carretera.

Para atender esta necesidad se desarrolló el Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC), como una plataforma tecnológica con base en un visualizador Web, mediante la cual los diseñadores/calculistas de carreteras podrán contar con información y datos que les serán útiles en el diseño de los diferentes elementos que integran un activo carretero, tales como un pavimento, obras de drenaje, el nivel de subrasante, las pendientes transversales de la calzada, etc.

SICliC proporciona facilidades para que el diseñador de una carretera pueda ubicar la estación meteorológica más cercana a su proyecto y visualizar tanto la información meteorológica como climática; y, en su caso, descargar la información de referencia.

SICliC integra información del clima geoespacialmente representada, mediante mapas climáticos y escenarios climáticos, donde además se pueden identificar las estaciones meteorológicas cercanas a los proyectos carreteros, las cuales proveen información actualizada de diferentes variables, tales como: la temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, entre otras variables.

El Sistema permite determinar las temperaturas máximas y mínimas del lugar para el diseño de la mezcla asfáltica y, con ello, asegurar un buen desempeño del pavimento; así como establecer las temperaturas máximas y mínimas para un futuro cercano (escenario climático) y, con ello, poder seleccionar el asfalto y los aditivos adecuados para asegurar la durabilidad y el buen desempeño de la carpeta asfáltica durante toda su vida útil.

Una mayor gama de usos potenciales se identificó para este proyecto, tanto para la temperatura como otras variables, tales como la precipitación, humedad, radiación solar, velocidad del viento, etc., para el diseño de los diferentes elementos de la infraestructura carretera, la cual se detalla dentro de la presente publicación.

La plataforma también incluye la ubicación de estaciones hidrométricas y la descarga de información, la cual es de utilidad para el diseño de obras de drenaje mayor y puentes.

SICliC permite además obtener información en relación a las proyecciones del cambio climático sobre la temperatura, la precipitación y el aumento del nivel del mar.

Se han incluido módulos para graficar automáticamente las diversas variables meteorológicas, un módulo para determinar el grado PG del asfalto en función del clima del lugar y, adicionalmente, un mapa nacional para la selección del asfalto, que puede ser útil para gobiernos locales.

Toda la información meteorológica, climática, hidrométrica y del cambio climático, puede ser superpuesta a la red nacional de caminos y de una capa de puentes.

La versión del SICliC 2.0 es una versión mejorada de la versión publicada en enero de 2020, la cual incluye un rediseño de la página web, misma que puede ser consultada en la siguiente liga: <http://SICliC.imt.mx/SICLIC/>.

Esta herramienta consolida información meteorológica, del clima y del cambio climático, la cual es de mucha utilidad para que los diseñadores puedan seleccionar o actualizar las variables del clima para el diseño de los diferentes elementos de las carreteras, y considerar el cambio climático en sus diseños, lo cual permitirá el desarrollo de infraestructura más resiliente al clima.

La página web de la plataforma SICliC se encuentra construida principalmente con dos lenguajes de programación. Ambos lenguajes establecen las respuestas que debe proporcionar el sistema a las distintas acciones/necesidades/demandas del usuario, logrando de esta manera una página interactiva. Un elemento de suma importancia para la página son las capas de información sobre: estaciones/observatorios meteorológicos, estaciones hidrométricas, de la infraestructura vial, capas del clima y de escenarios climáticos, etc.

La plataforma SICliC es dinámica y deberá irse actualizando conforme más información se genere sobre las mediciones de las diferentes variables climáticas, en las estaciones meteorológicas del país, así como conforme se actualicen los escenarios futuros sobre el clima; por lo que, el mantenimiento de la plataforma informática demandará esfuerzos adicionales.

La información meteorológica y climática les permitirá a los tomadores de decisiones implementar acciones con base en datos que permitan diseñar la infraestructura carretera con umbrales actualizados, considerando el clima extremo registrado en el pasado y las proyecciones climáticas futuras, lo cual permitirá aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera ante el clima y su variabilidad, así como también ante el cambio climático.

Los siguientes pasos a seguir serán, por un lado, la constante actualización de la información tanto meteorológica como climática y, por otro lado, incorporar más estaciones meteorológicas a la plataforma, que son operadas y administradas por otras organizaciones.

Introducción

La infraestructura carretera es esencial para el desarrollo económico de los países y para el bienestar social. En México, el 76% de la carga es transportada por carreteras, mientras que el 94% de los pasajeros se moviliza a través del autotransporte en las carreteras del país (SCT, 2019). La red carretera nacional está integrada por alrededor de 397 mil kilómetros, de los cuales el 44.1% se encuentra pavimentada.

El asegurar la integridad de la red vial ha llevado a las organizaciones de carreteras a implementar diversas estrategias, políticas y acciones que permitan aumentar la resiliencia de la red ante cualquier tipo de amenaza, principalmente amenazas naturales, para prolongar la vida útil de los activos carreteros.

Las condiciones climáticas de México han variado considerablemente y esto se ha visto reflejado en los diversos impactos que se han presentado en los últimos años en la infraestructura carretera, resultando en pérdidas parciales o totales de infraestructura.

Esta evidencia hace necesario conocer el comportamiento del clima en el tiempo, y cómo afecta el diseño actual de las carreteras, tales como el cambio de la temperatura media (por regiones), cambios en el ciclo del agua (precipitación, evaporización, etc.), aumento de la temperatura (mayor presencia de sequías, olas de calor prolongadas, etc.), incremento del número de fenómenos hidrometeorológicos extremos, etc., así como conocer las proyecciones de clima futuro, las cuales son necesarias para adaptar la infraestructura al cambio climático.

Para mitigar los efectos/impactos del clima y el cambio climático se requiere que los tomadores de decisiones en las organizaciones de carreteras actualicen los umbrales de diseño para sus activos y que, con ello, puedan enfrentar un clima cambiante y extremo; y que además sea resiliente en el futuro con las diferentes proyecciones/escenarios del cambio climático a pesar de las incertidumbres de los modelos actuales.

Para la incorporación del cambio climático y la variabilidad del clima en los estándares de diseño de la infraestructura carretera, se requiere de mecanismos que permitan a los diseñadores de carreteras obtener información confiable sobre el clima y el cambio climático, la cual pueda servir de insumo para el diseño de la infraestructura carretera.

De esta manera en el año 2019, en el IMT se planteó la necesidad de consolidar una herramienta que permita a los diseñadores actualizar sus variables del clima para el diseño de los diferentes elementos de las carreteras, herramienta que fue desarrollada debido al especial interés de la Dirección General de Servicios Técnicos de la SCT, obteniendo como resultado el denominado SICliC.

El IMT, a inicios del año 2020, publicó la primer versión del Sistema de Información Climática para el Diseño de Carreteras (SICliC), como una plataforma tecnológica con base en un visualizador Web, mediante la cual los diseñadores/calculistas de carreteras podrán contar con información y datos que les serán útiles en el diseño de los diferentes elementos que integran un activo carretero, tales como un pavimento, obras de drenaje, el nivel de subrasante, las pendientes transversales de la calzada, etc.

SICliC proporciona facilidades para que el diseñador de una carretera pueda ubicar la estación meteorológica más cercana a su proyecto y visualizar la información tanto meteorológica como climática; y, en su caso, descargar la información de referencia.

Tal y como se detalla el capítulo 2, el SICliC integra información del clima geoespacialmente representada, mediante mapas climáticos y escenarios climáticos, donde además se pueden identificar las estaciones meteorológicas cercanas a los proyectos carreteros, las cuales proveen información actualizada de diferentes variables, tales como: la temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, entre otras variables.

El uso potencial del SICliC puede ser muy amplio, pero también puede tener un crecimiento importante para adaptarse a las necesidades de los ingenieros de carreteras. Por ejemplo, para la temperatura, el Sistema permite: determinar las temperaturas máximas y mínimas del lugar para el diseño de la mezcla asfáltica y, con ello, asegurar un buen desempeño del pavimento; y establecer las temperaturas máximas y mínimas para un futuro cercano (escenario climático) y, con ello, poder seleccionar el asfalto y los aditivos adecuados para asegurar la durabilidad y cierto nivel de desempeño de la carpeta asfáltica durante toda su vida útil. Una mayor gama de usos potenciales se identificó para este proyecto, tanto para la temperatura como otras variables, tales como la precipitación, humedad, radiación solar, velocidad del viento, etc. Información más detallada sobre el uso de la información climática para el diseño de los diferentes elementos de la infraestructura carretera se presenta en el capítulo 1.

El capítulo 3 describe brevemente las diferentes herramientas de programación para el diseño y visualización de la plataforma SICliC, cuya información podría ser de interés para el usuario.

Dado que la plataforma SICliC es dinámica y requerirá actualizaciones de datos y mejoras, en el capítulo 4 se describen los requerimientos para actualizar y mejorar el sistema.

Finalmente, se concluye que la información meteorológica y climática permitirá a los tomadores de decisiones implementar acciones con base en datos que permitan diseñar la infraestructura carretera con umbrales actualizados, considerando el clima extremo registrado en el pasado y las proyecciones climáticas futuras, la cual permitirá aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera ante el clima y su variabilidad, así como también ante el cambio climático.

1. El clima en el diseño de infraestructura carretera

Los elementos del clima han formado parte del diseño de la infraestructura carretera, por lo que toman en cuenta las condiciones climáticas del sitio en donde se construirá el proyecto.

La precipitación, la temperatura, el viento, etc., son elementos que comúnmente son utilizados para diseñar y dimensionar los diferentes elementos que integran la infraestructura carretera.

A continuación, se realiza un resumen sobre cómo el diseño de los diferentes elementos de la infraestructura del clima utiliza la información climática directa o indirectamente.

1.1 Pavimentos flexibles

Los métodos de diseño de pavimentos empíricos que se utilizan en México consideran el clima de la siguiente manera:

- El método UNAM establece que las condiciones meteorológicas influyen en la capacidad de soporte del suelo (VRS), por lo que el valor relativo de soporte crítico para diseño considera un coeficiente de variación que incluye la incertidumbre debido al clima (Corro et al, 1981).
- El método AASHTO-93 incluye dos variables que representan los efectos del clima en el lugar, los cuales son el drenaje y la variación estacional de la capacidad de soporte del terreno natural (AASHTO, 1993). Estos aspectos consideran para el diseño a la precipitación como variable, mientras que la temperatura es considerada en la selección del cemento asfáltico para el diseño de la mezcla asfáltica.

En el caso de los métodos empírico-mecanicista para el diseño de pavimentos flexibles, las variables ambientales necesarias son las siguientes:

- El método AASHTO (2008), denominado MEPDG, por sus siglas en inglés de *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*, está integrado por tres etapas. La etapa 1 de “Evaluación” incluye los datos de entrada sobre el clima y el medio ambiente, los materiales y las características del tránsito, así como seleccionar si se trata de un nuevo pavimento o de una rehabilitación. En la etapa 1 de evaluación es donde se establece un análisis

climático/medioambiental, dentro del cual se incluye a la temperatura y la humedad como variables ambientales.

Este método hace uso una plataforma adicional para alimentar la información del clima a través del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM, por sus siglas en inglés de *Enhanced Integrated Climatic Model*).

- El Instituto Mexicano del Transporte desarrolló un método de diseño denominado “IMT-Pave” (Anguas & Hernández, 2013). El IMT-Pave considera el módulo de resiliencia como una propiedad importante de los suelos y de la mezcla asfáltica, cuya variabilidad es influenciada por el clima y el tránsito.

En general, los métodos de diseño de pavimentos deben considerar la temperatura, la precipitación y la humedad. En años recientes se ha recomendado que consideren la radiación solar, ya que los rayos UV influyen en el envejecimiento acelerado del asfalto.

1.1.1 Mezclas asfálticas

El Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP, por sus siglas en inglés) llevó a cabo una investigación para mejorar el diseño y las pruebas para los materiales asfálticos dentro del llamado Programa SUPERPAVE. Uno de los resultados de este programa fue el desarrollo de un sistema de valoración/clasificación/selección denominado Grado de Desempeño (PG, por sus siglas en inglés de *Performance Grade*) para los materiales, tales como el asfalto.

La clasificación por Grado PG propone un sistema de dos temperaturas, las cuales representan la capacidad del cemento asfáltico para resistir la formación de roderas en el pavimento, bajo temperaturas altas, y la capacidad para resistir el agrietamiento térmico por la influencia de bajas temperaturas. El Grado PG representa la temperatura máxima y mínima esperada en el pavimento, según los datos climáticos locales, para las épocas más calurosas y frías del año, de tal manera que el cemento asfáltico pueda presentar un comportamiento satisfactorio bajo dichas condiciones.

La selección del cemento asfáltico según su grado de desempeño (PG) considera la temperatura máxima y mínima del sitio donde se localiza el proyecto carretero, realizando un ajuste debido a la intensidad del tránsito y la velocidad de operación.

En México se utiliza la norma técnica de la SCT “N-CMT-4-05-004/18” para determinar el PG del asfalto y su nivel de ajuste.

1.1.2 Valor Relativo de Soporte (VRS) o Módulo de Resiliencia (MR) del suelo

El valor relativo de soporte utilizado en los métodos empíricos de diseño de pavimentos o el módulo de resiliencia que se utiliza en los métodos empírico-

mecanicista están asociados al contenido de humedad del suelo, el cual varía en función de la precipitación (cambios en la precipitación de acuerdo a la estación del año) o al nivel freático del agua.

Para el diseño de pavimentos y la determinación de la capacidad de carga del suelo, es importante asociarlo a la precipitación del lugar, para obtener el diseño de estructuras de pavimentos adecuadas en función del clima del lugar.

1.1.3 Coeficiente de drenaje

El drenaje es un tema importante a considerar en el diseño de pavimentos carreteros, ya que el exceso de agua en las diferentes capas del pavimento puede conducir a fallas prematuras.

El método AASHTO-93 considera el efecto del drenaje en el desempeño del pavimento, en términos del impacto que la humedad produce a la base y la sub-base, la cual provoca erosión en dichas capas.

De esta manera, la precipitación es un insumo de entrada para determinar el porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento se encuentra expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación.

1.1.4 Índice de congelamiento

El método AASHTO (2008), denominado MEPDG, considera un índice de congelamiento mediante el cual se puede expresar la severidad del congelamiento en ciertas regiones, en términos de la cantidad de días que el sitio se encuentra con temperaturas bajo cero.

Las temperaturas mínimas de un sitio son importantes para determinar este indicador, que se utiliza para el diseño mecánico-empírico de pavimentos flexibles.

1.2 Pavimentos rígidos

Para el diseño de pavimentos rígidos es muy importante considerar la temperatura del aire y la temperatura del pavimento, ya que la diferencia entre éstas produce fenómenos de alabeo (cóncavo o convexo), tal y como se muestran en la figura 1.1.

La pérdida de soporte en el diseño de pavimentos rígidos, de acuerdo al método AASHTO, es una variable importante a considerar, ya que este efecto considera la pérdida potencial de soporte proveniente de la erosión de la sub-base y/o movimientos diferenciales verticales del suelo. La erosión se debe principalmente a la alta presencia de agua en el sitio, la cual no es drenada correctamente por las capas que soportan la losa de concreto.

Se deben considerar los ciclos de congelación y descongelación, a través del índice de congelamiento indicado en el apartado 1.1.4.

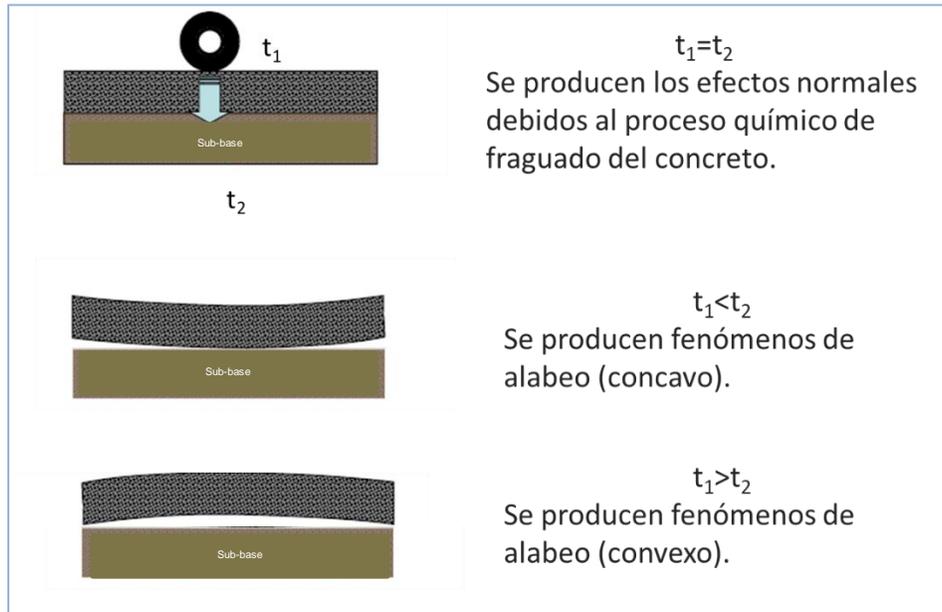


Figura 1.1 Esfuerzos por temperatura en pavimentos rígidos

Fuente: Elaboración propia.

La radiación solar puede ser considerada para estimar la reflectancia (albedo) de la superficie del pavimento.

1.2.1 Módulo de elasticidad y de reacción

El módulo de elasticidad del suelo y de la base granular de un pavimento rígido está asociado a la capacidad de carga del mismo, el cual está relacionado con el contenido de humedad, que para el caso del suelo de cimentación varía estacionalmente, mientras que el de la base granular puede modificarse con el contenido de agua, producto de la precipitación o del congelamiento y descongelamiento.

En el caso del método de la Asociación del Cemento Portland (PCA, por sus siglas en inglés de *Portland Cement Association*), se considera el módulo de reacción de la subrasante para obtener la capacidad de carga del suelo, misma que varía en función de la humedad del suelo.

1.2.2 Coeficiente de drenaje

El proceso mediante el cual el agua de infiltración superficial o agua de filtración subterránea es removida de los suelos y de las rocas por medios naturales o artificiales, se llama drenaje.

El drenaje es uno de los factores más importantes en el diseño de pavimentos rígidos.

El método AASHTO-93 para pavimentos rígidos, al igual que en los pavimentos flexibles, considera el efecto del drenaje en el desempeño del pavimento, en términos del impacto que la humedad produce a la base y la sub-base, la cual provoca erosión en dichas capas.

De esta manera, la precipitación es un insumo de entrada para determinar el porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento se encuentra expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación.

El método PCA considera un criterio por erosión, el cual permite estimar los efectos de la deflexión del pavimento en zonas críticas, orillas y esquinas, inducidos por la erosionabilidad de la capa de apoyo en esquinas y orillas. Aunque no permite introducir una variable asociada a la precipitación para determinar este daño por erosión.

1.2.3 Elementos diversos

La información climática puede ayudar para determinar la temperatura máxima actual del lugar para la selección de elementos, tales como aditivos en mezclas asfálticas o el material para el sello en las juntas de los pavimentos de concreto.

1.3 Obras de drenaje

La precipitación y la intensidad de lluvia son variables del clima que nos permiten determinar el gasto para dimensionar las obras de drenaje menor, tales como tubos o alcantarillas.

Con la información climática se pueden construir curvas de intensidad-duración-frecuencia para el diseño de la capacidad del sistema de drenaje.

Si se considera necesario, se puede determinar el periodo de retorno con el objeto de estimar la cantidad de lluvia y precipitación extrema que se puede presentar en algún sitio en particular.

Adicionalmente, se puede evaluar la tasa de socavación en función de la velocidad de los nuevos flujos de agua debido a una precipitación extrema.

1.3.1 Bombeo

La precipitación permite calcular la acumulación de agua en la superficie de rodamiento y así poder evitar las inundaciones de la calzada. Con base en ello se puede establecer adecuadamente la pendiente transversal de la carretera, mejor conocida en México como “bombeo”.

1.3.2 Cunetas

La acumulación de agua calculada en la superficie de rodamiento con base en la precipitación del sitio, permitirá diseñar adecuadamente las cunetas para desalojar rápidamente el agua de la carretera.

1.4 Puentes

La precipitación y la intensidad de lluvia son variables del clima que nos permiten determinar el gasto y los niveles de agua máximo que se utilizan para el diseño de puentes.

Es muy importante determinar un periodo de retorno adecuado para el diseño de puentes, considerando información histórica disponible de la precipitación y de las proyecciones futuras, para evitar inundaciones del puente asociados a una mayor descarga de los ríos.

Adicionalmente, se puede evaluar la tasa de socavación en función de la velocidad de los nuevos flujos de agua debido a una precipitación extrema, los cuales afectan los estribos y las pilas del puente.

1.4.1 Elementos diversos

La información sobre la temperatura máxima actual y futura del sitio en donde se ubique el proyecto, permite la selección de diferentes elementos, tales como cojines en puentes, etc.

Una mayor intensidad y frecuencia de eventos de lluvia extrema, implicará construir instalaciones complementarias para la retención de agua (por ejemplo, presas, embalses) y medidas de protección estructural (diques, terraplenes).

1.5 Taludes

El contenido de humedad puede afectar la integridad estructural de los taludes, ya sean de corte o terraplén, o de las laderas muy cercanas a la carretera. La información climática puede ayudar a evaluar los cambios en el contenido de humedad para la estabilidad de taludes, terraplenes y laderas.

Un correcto diseño de un talud de corte debe considerar la precipitación del lugar para evitar deslizamientos que pueden afectar la operación de la carretera, mediante cierres parciales o totales.

Una mayor intensidad y frecuencia de eventos de lluvia extrema, implicará construir instalaciones complementarias para de retención de agua, tales como contracunetas y trincheras.

Para la precipitación excesiva también se debe considerar un aumento de los flujos de agua, aumento de la velocidad, arrastre de sedimentos, que pueden generar aluviones que impactarán a la infraestructura carretera.

1.6 Dispositivos para el control del tránsito

La información sobre las condiciones extremas de temperatura máxima o mínima, permitirá a los diseñadores seleccionar los circuitos eléctricos de los sistemas de señalización para que estos actúen correctamente bajo estas condiciones de temperatura y sus variaciones.

La velocidad del viento se utiliza para el diseño de la señalización vertical, particularmente el señalamiento elevado, pero también puede ser útil para corroborar datos para el diseño por viento en los puentes.

Los datos como la intensidad de lluvia pueden ayudar a determinar el nivel de visibilidad adecuado para la señalización en la carretera, tanto las marcas en el pavimento como las señales verticales.

2. Sistema de información climática para el diseño de carreteras

El sistema de información climática para el diseño de carreteras (SICliC) es una plataforma tecnológica con base en un visualizador Web, donde el diseñador de una carretera podrá ubicar la estación/observatorio meteorológico más cercana a la ubicación de su proyecto, para visualizar la información meteorológica y climática; y, en su caso, descargar la información de referencia.

La plataforma incluye la ubicación de estaciones hidrométricas y la descarga de información, la cual es de utilidad para el diseño de obras de drenaje mayor y puentes.

SICliC permite además obtener información en relación a las proyecciones del cambio climático sobre la temperatura, la precipitación y el aumento del nivel del mar.

Se han incluido módulos para graficar automáticamente las diversas variables meteorológicas, un módulo para determinar el grado PG del asfalto en función del clima del lugar, y otros desarrollos que se encuentran en proceso.

Toda la información meteorológica, climática, hidrométrica y del cambio climático, puede ser superpuesta a la Red Nacional de Caminos¹ y una capa de puentes.

La figura 2.1 muestra la arquitectura del Sistema desarrollado, el cual está integrado por tres secciones principales y subsecciones, con diversas capas de información georreferenciada, una sección relacionada con la red nacional de caminos y los módulos que permiten generar diversas funciones de manera automática.

La versión del SICliC 2.0 es una versión mejorada de la versión publicada en enero de 2020, la cual incluye un rediseño de la página web, misma que puede ser consultada en la siguiente liga: <http://SICliC.imt.mx/SICLIC/>.

Esta herramienta consolida información meteorológica, del clima y del cambio climático, la cual es de mucha utilidad para que los diseñadores puedan seleccionar o actualizar las variables del clima para el diseño de los diferentes elementos de las carreteras, y considerar el cambio climático en sus diseños, lo cual permitirá el desarrollo de infraestructura más resiliente al clima.

¹ Desarrollada por el INEGI en colaboración con la SCT-IMT.



Figura 2.1 Arquitectura del SICliC

Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes apartados se detallará el contenido y funcionalidad de la plataforma SICliC 2.0.

2.1 Selección del sitio

La plataforma cuenta con una sección para seleccionar el sitio en donde se realizará el proyecto. Para utilizarla basta con localizar en el menú principal la sección “Estado”, y se desplegará un sub-menú donde se podrá seleccionar el Estado de la República de interés, tal y como se muestra en la figura 2.2.

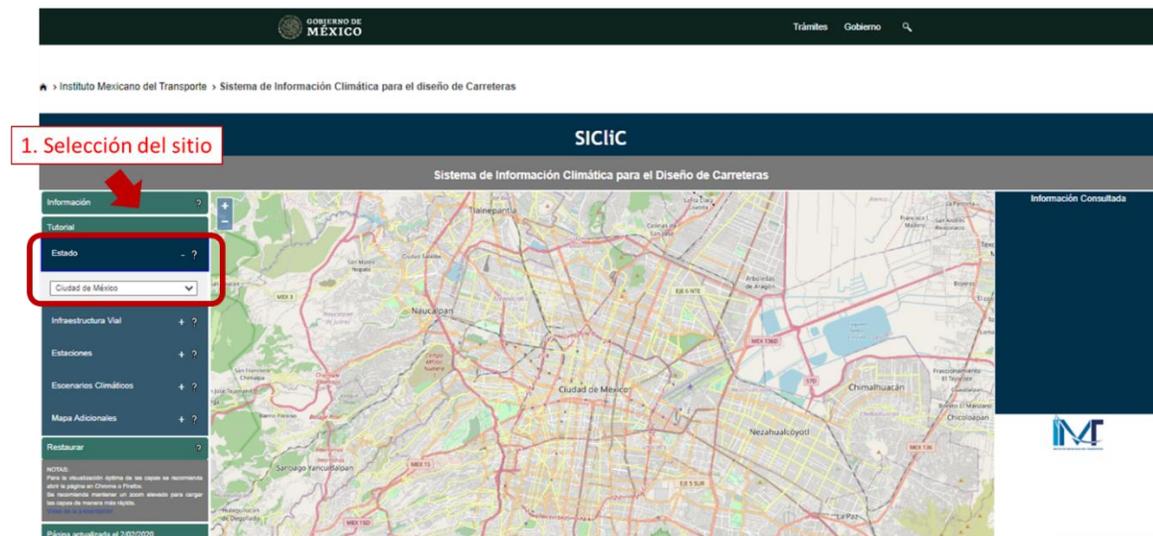


Figura 2.2 Selección del sitio en SICliC

De manera automática el mapa trasladará al usuario a la capital del Estado seleccionado, y con el cursor podrá moverse al sitio del proyecto. Se recomienda mantener el cuadro visualizador en la escala más ampliada (*zoom-in*) que desee el usuario, para que al momento de cargar las capas subsiguientes se carguen más rápidamente.

2.2 Selección de la infraestructura vial

El siguiente paso recomendado es seleccionar la infraestructura vial en el menú indicado en la figura 2.3.

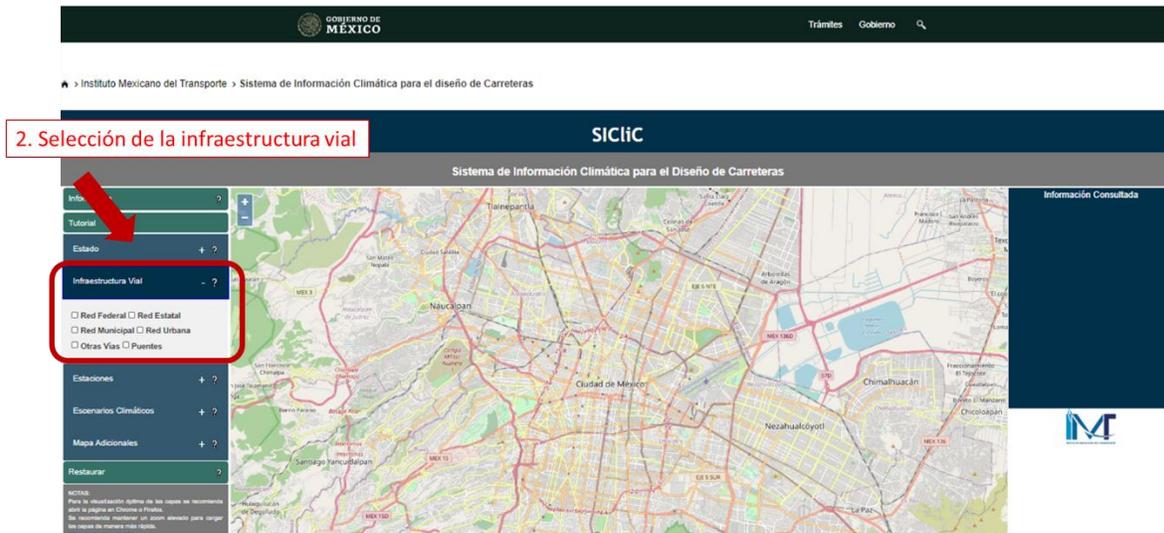


Figura 2.3 Selección de la infraestructura vial en SICliC

En este menú se encuentra cargada la Red Nacional de Caminos (RNC) y el Inventario de puentes de México.

La RNC se encuentra identificada de acuerdo a la “clasificación administrativa”, la cual cataloga a la red carretera en “federal”, “estatal” y “municipal”, para representar los diferentes niveles de responsabilidades gubernamentales en relación al financiamiento para la construcción, la modernización, así como el mantenimiento y conservación de las carreteras.

La red vial urbana, conformada por calles locales, arterias y avenidas que se encuentran a cargo de los municipios, se ha clasificado de manera independiente de acuerdo a la RNC, dicha red es de uso común y conforma la traza urbana de las ciudades.

Dentro de “infraestructura vial” también se encuentran los puentes, que se definen como la “Construcción hecha por el hombre para llevar un elemento de transporte a través de un obstáculo natural o artificial como una barranca, río, etc.”.

Cada una de estas opciones puede ser cargada en el visualizador para identificar el tramo carretero de interés.

Por ejemplo (ver figura 2.4), si en el menú “infraestructura vial” activamos la red federal (ver inciso “a” de la figura 2.4) automáticamente se superpone la capa de carreteras, que se observan en color rojo fuerte, y posteriormente podemos seleccionar con el cursor el tramo carretero de interés, el cual se resalta automáticamente en amarillo (ver inciso “b”) y la información de ese tramo carretero automáticamente se despliega en el menú del lado derecho (ver inciso “c”).

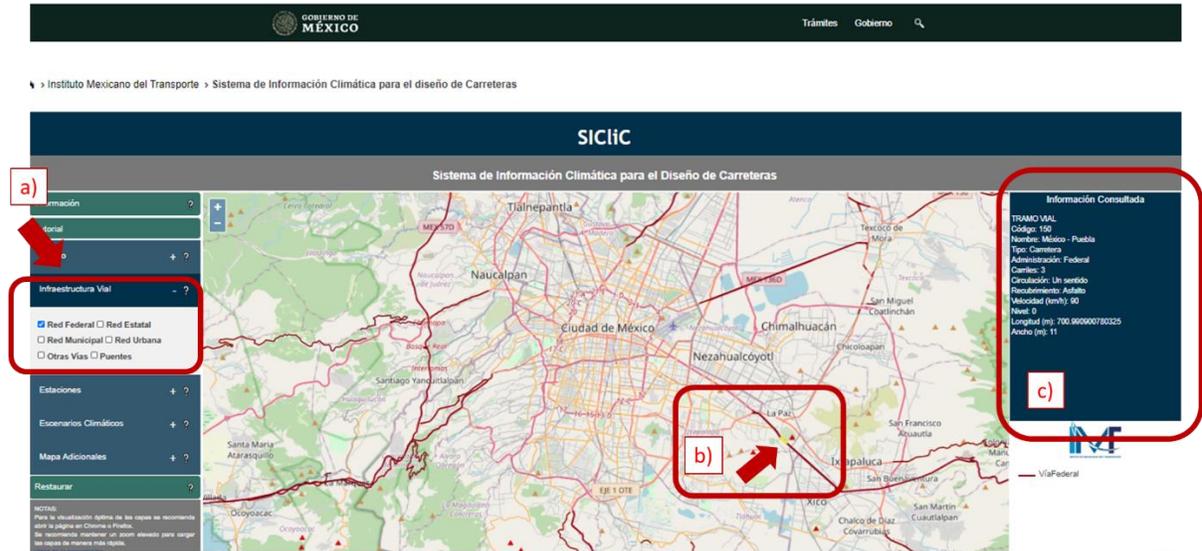


Figura 2.4 Ejemplo: Selección del tramo carretero en SICliC

El menú desplegado, en el inciso “c”, proporciona información del número de ruta, la clasificación administrativa, el número de carriles (por sentido o ambos sentidos), el tipo de pavimento, la velocidad de proyecto y la longitud del tramo.

Esta acción se puede repetir para seleccionar cualquier tramo de la RNC, ya sea federal, de la red estatal o municipal. El objetivo es localizar la carretera o tramo carretero donde se pretenda realizar algún proyecto de reconstrucción, modernización, ampliación, o de conservación. Dentro de la información de “infraestructura vial” disponible se encuentra la red de puentes carreteros del país, la cual también puede ser utilizada para estudio y análisis.

Las capas de información georreferenciada se pueden seleccionar simultáneamente, ya sea para incluir toda la red carretera o, por ejemplo, sólo un tramo carretero federal y los puentes que lo conforman (ver figura 2.5). En el inciso “a” se selecciona la infraestructura de interés, la cual es desplegada como se muestra en el inciso “b”, sólo requiere moverse hacia el área de estudio y la simbología se despliega como se muestra en el inciso “c”.

Finalmente, se puede dar clic sobre el puente de interés y se despliega automáticamente la información disponible del puente, como tamaño, material de construcción, etc.

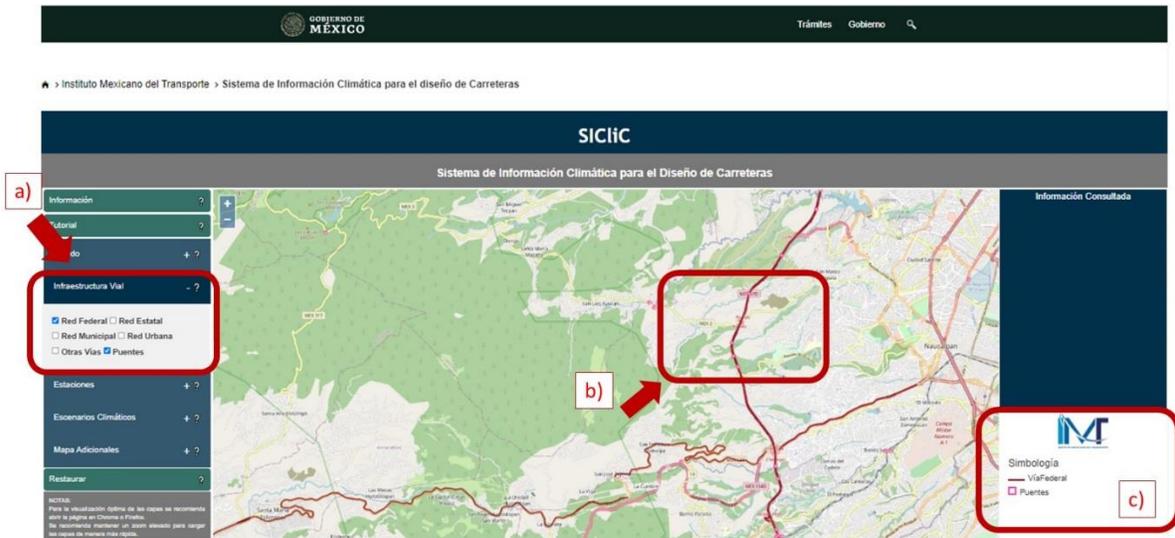


Figura 2.5 Ejemplo: Selección del tramo carretero en SICliC

2.3 Selección de estaciones

La siguiente opción es la selección de las estaciones meteorológicas, las cuales se encuentran en el menú “estaciones”, tal y como se indica en la figura 2.6.

Se despliegan cuatro opciones, las cuales se explican a continuación:

- Estaciones meteorológicas. Son estaciones automáticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), las cuales proporcionan información climática de variables, tales como: temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa y radiación solar.
- Observatorios meteorológicos. Son estaciones automáticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las cuales solo proporcionan información climática de temperatura y precipitación.
- Estaciones suspendidas. Son estaciones que actualmente no están operando, pero que tienen registros históricos de potencial interés de diversas variables climáticas.
- Estaciones hidrométricas. Estas estaciones son reglas graduadas colocadas escalonadamente en un río, arroyo, laguna o embalse, que miden la cantidad de agua disponible en estos cuerpos de agua originados por las lluvias y los escurrimientos. La información se obtiene de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), quienes actualizan el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional.

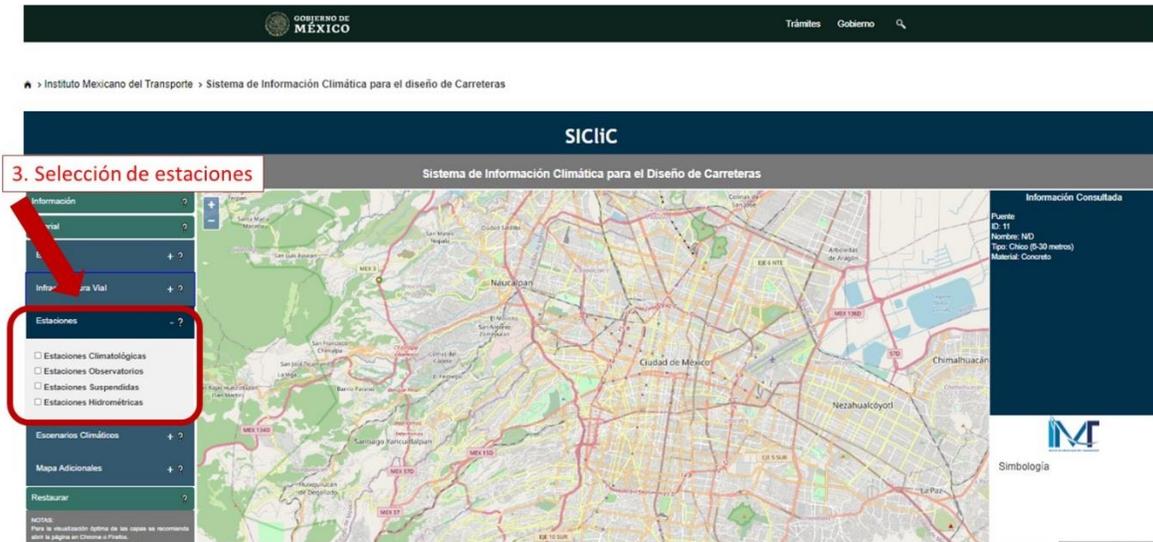


Figura 2.6 Selección de estaciones en SICliC

Se pueden seleccionar las cuatro opciones al mismo tiempo, o únicamente una de ellas. El objetivo en cualquier caso es seleccionar la estación meteorológica más cercana al proyecto carretero o la estación hidrométrica más cercana a un puente.

A continuación, ilustraremos un ejemplo para la obtención de la información climática de una estación meteorológica (ver figura 2.7).

El primer paso es seleccionar el tramo carretero de interés (ver inciso “a”), posteriormente activar el menú “estaciones meteorológicas” (ver inciso “b”) donde automáticamente aparecerán los puntos georreferenciados que representan a las estaciones (ver inciso “e” donde aparece la simbología). Se debe ubicar la estación más cercana al tramo de estudio y seleccionarla, la cual automáticamente cambiará de color (ver inciso “c”), y de inmediato se desplegará en el menú lateral derecho la información de la estación, tal como las coordenadas geográficas para ubicarla geoespacialmente y el nombre de la misma (ver inciso “d”). El siguiente paso es consultar la información climática, para ello se debe hacer clic en el cuadro verde con la leyenda “consulta información detallada” (ver inciso “d”), y automáticamente se abrirá una nueva pestaña para navegar sobre la información de la estación, tal y como se ilustra en la figura 2.8.

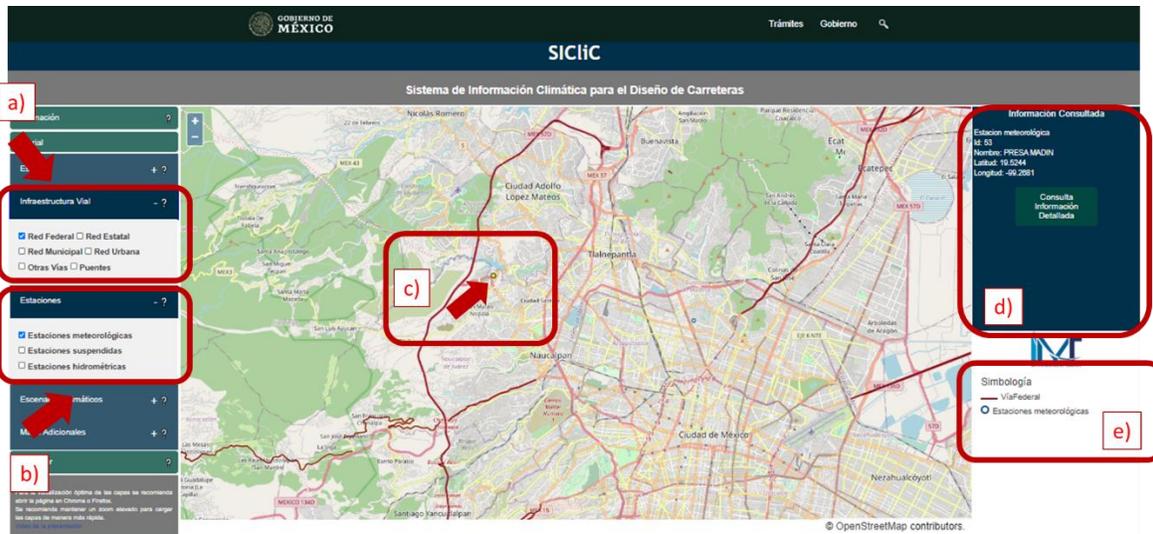


Figura 2.7 Selección de una estación meteorológica en SICliC

En la figura 2.8 se observa la información de la estación consultada para una estación de ejemplo. El inciso “a” muestra el nombre de la estación, en el inciso “b” se puede observar el despliegue de la información de la estación y de la carretera cercana. Para poder ver la información con mayor detalle, se debe explorar el menú lateral izquierdo marcado en el inciso “c”.



Figura 2.8 Consulta de información detallada de una estación meteorológica en SICliC

2.4 Módulo de gráficos climáticos

En la nueva página que muestra la “información de estación” que se indicó anteriormente en la figura 2.8, se encuentran habilitadas las funciones para utilizar el módulo que permite obtener los gráficos climáticos, mismo que se ilustra en la figura 2.9.

4. Módulo de gráficos climáticos



Figura 2.9 Selección del módulo de gráficos climáticos en SICliC

Para consultar el módulo de gráficos climáticos, se debe localizar en el menú lateral izquierdo la sección “información climática”, donde al dar un clic se despliega un submenú para establecer el periodo de consulta, que puede ir desde el año 2000 a la fecha. Una vez seleccionado el periodo, se debe dar clic en el recuadro “Generar gráficos”, donde automáticamente se generarán diferentes gráficos climáticos de: temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar, lluvia promedio, lluvia máxima, humedad relativa, viento promedio, viento máximo y presión atmosférica.

2.4.1 Gráficos climáticos

Los gráficos climáticos son un instrumento adecuado para interpretar las variables climáticas en el tiempo, ya que permiten visualizar la temperatura o la precipitación y cómo éstas se comportan a lo largo del tiempo.

Los gráficos climáticos son una representación gráfica de los valores mensuales de la temperatura, precipitación o cualquier otra variable climática de un lugar en específico.

En el SICliC se construyeron gráficos de dispersión con líneas suavizadas y marcadores, en los cuales se representan los valores de la variable climática seleccionada en el eje vertical y, en el eje horizontal, la distribución temporal (mensual).

En la plataforma se podrán encontrar diferentes gráficos climáticos de temperatura, precipitación, intensidad de lluvia, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa, radiación solar, entre otras variables.

A continuación, se muestran algunos de los gráficos climáticos dinámicos, que serán actualizados periódicamente para contar con la información meteorológica más reciente. Los gráficos se pueden manipular para seleccionar los años de interés o mostrar toda la información para cada una de las variables climáticas.

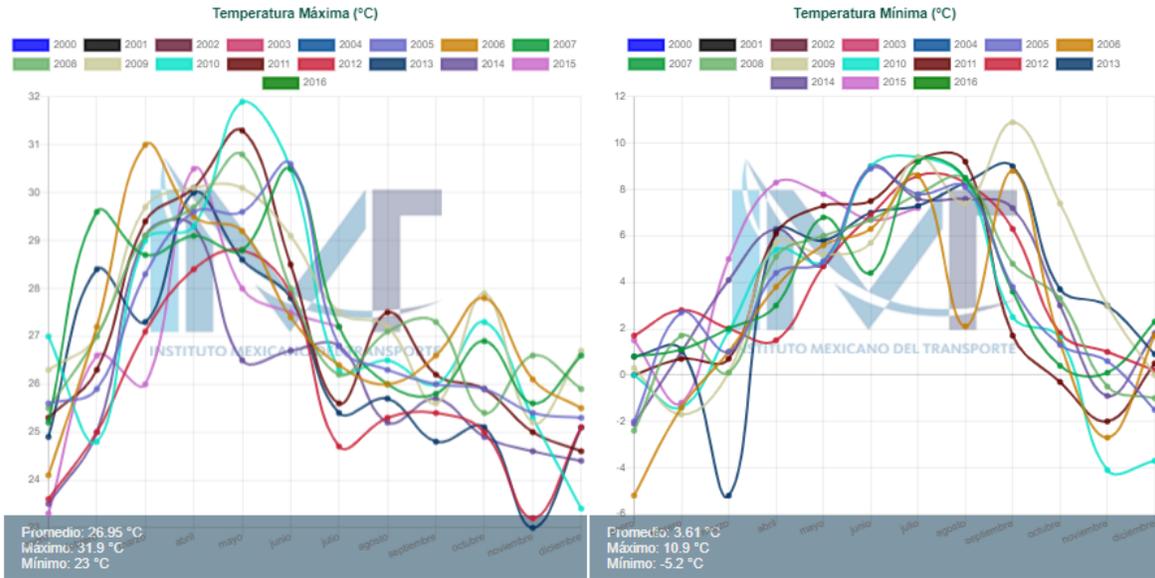


Figura 2.10 Gráficos de temperatura máxima y mínima del SICliC

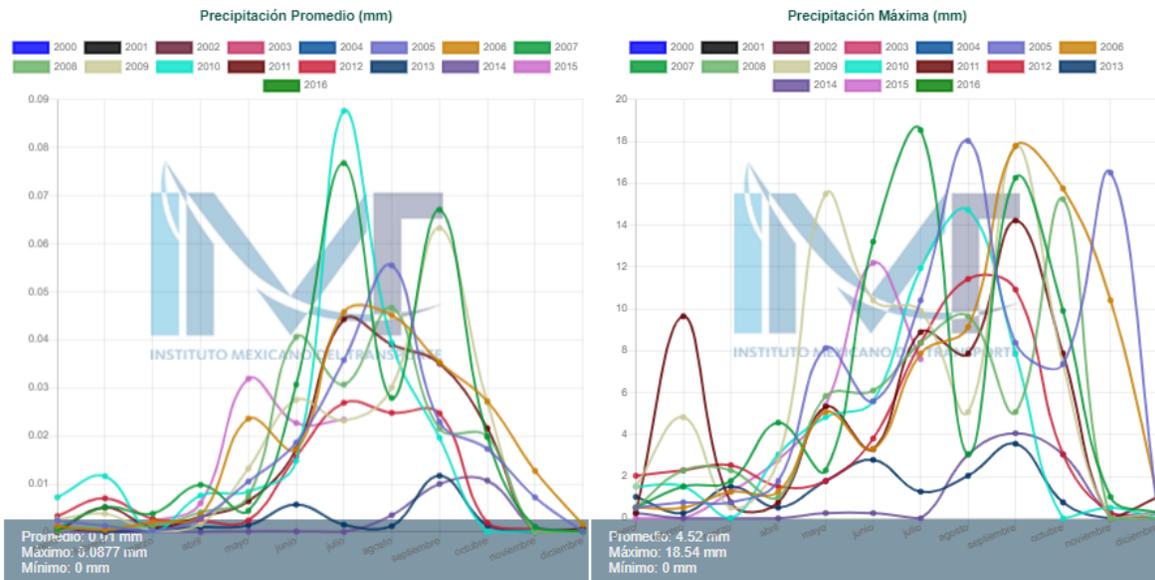


Figura 2.11 Gráficos de precipitación promedio y precipitación máxima del SICliC

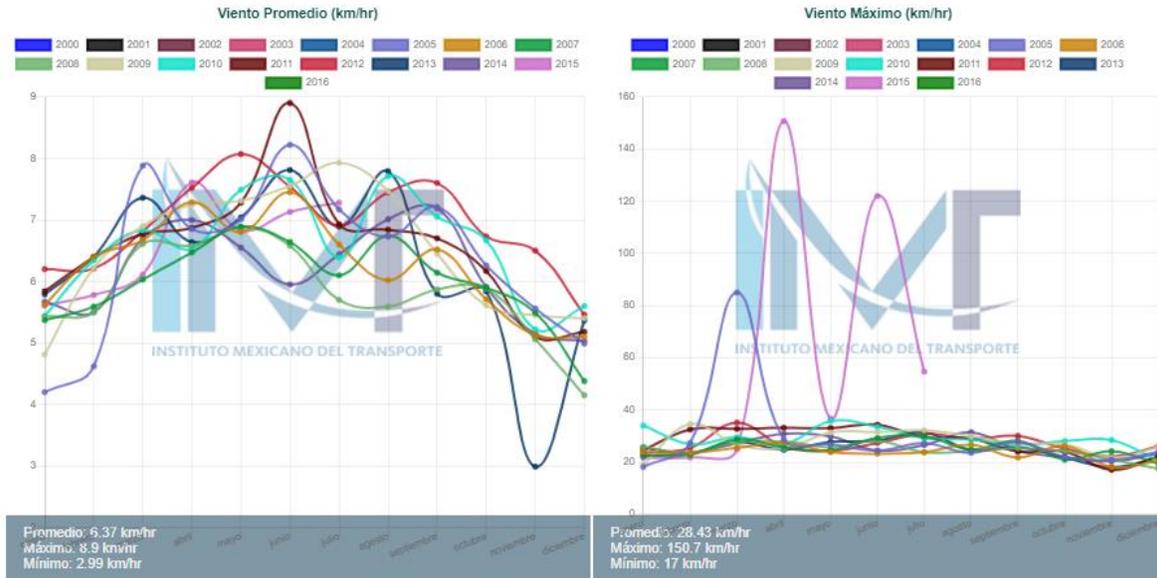


Figura 2.12 Gráficos de velocidad del viento promedio y máximo del SICiC

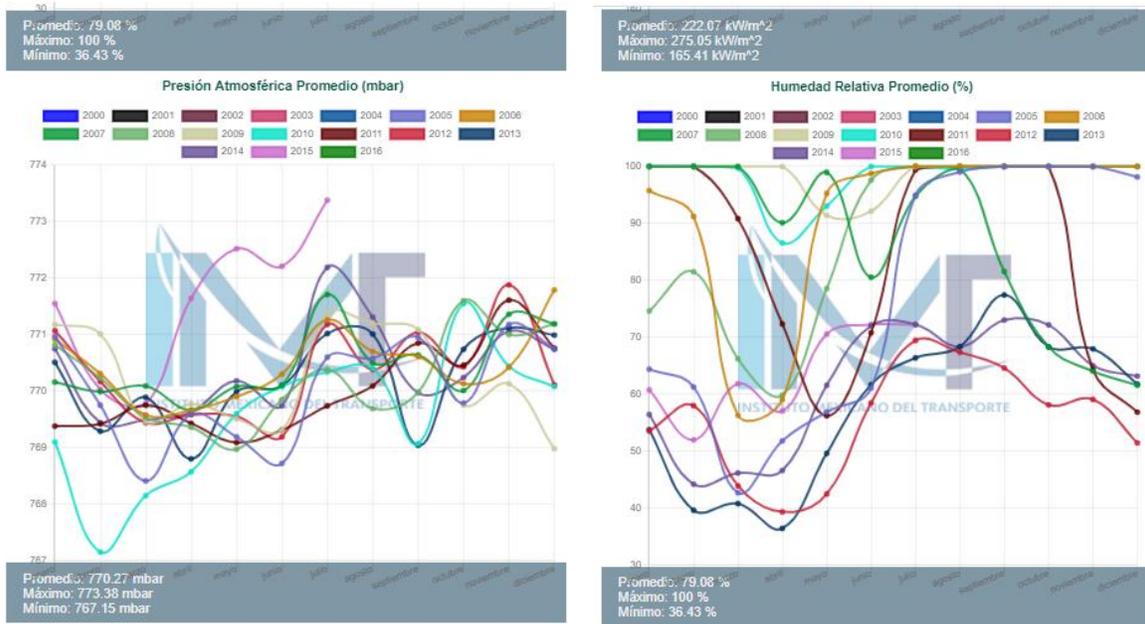


Figura 2.13 Gráficos de presión atmosférica promedio y humedad relativa promedio del SICiC

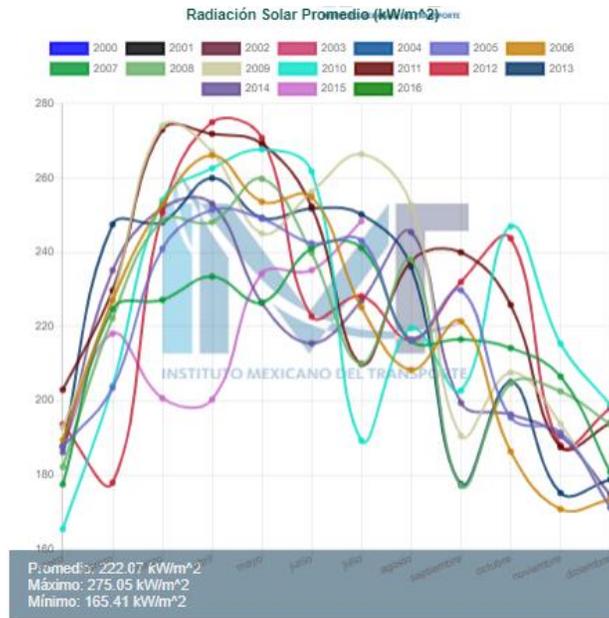


Figura 2.14 Gráfico de radiación solar promedio del SICliC

2.5 Módulo para determinar el PG del asfalto

El Grado de Desempeño (PG, por sus siglas en inglés de *Performance Grade*) para un asfalto especifica un rango de temperaturas (máxima y mínima) dentro de las cuales se espera un comportamiento adecuado en función de lo proyectado.

La plataforma SICliC permite generar de manera automática el grado PG, solo basta hacer clic en el cuadro “Calcular PG asfalto” (ver inciso “a”), tal y como se muestra en la figura 2.15, y automáticamente aparecerá el grado PG del asfalto sugerido (ver inciso “b”) para las carreteras que se encuentren cercanas a esa estación.

5. Módulo para determinar el PG del asfalto

Información estación

PRESA MADIN

Mostrar datos estación

Período de consulta
 Año inicial: 2000
 Año final: 2016

Generar gráficas

Temperatura mínima Temperatura máxima Radiación solar
 Precipitación promedio Precipitación máxima Humedad relativa
 Viento promedio Viento máximo Presión atmosférica

Infraestructura Vial

Grado PG Asfalto

a) Calcular PG asfalto

Velocidad del proyecto (km/hr):

Intensidad del tránsito (ejes equivalentes):

Calcular nivel de ajuste

Descargar información histórica

Ids: 83
 Latitud: 19.5244
 Longitud: -99.2681
 Altitud: 2364
 Carreteras: 570
 Operador: SMI EMAS
 Origen: TOLUCA
 Destino: ACapulco
 Datos históricos actualizados hasta el 2016

GradoPG sugerido: 58-16.
 Templa: 30.44°C
 Talm: -2.33°C
[Ver información sobre el cálculo](#)

b)

Figura 2.15 Módulo para determinar el PG del asfalto del SICliC

La forma de determinar el PG del asfalto se basa en la normativa N.CMT·4·05·004/18, con algunas variantes que se muestran a continuación:

La fórmula para determinar la temperatura máxima es la siguiente:

$$T_{m\acute{a}x_i} = 54.32 + 0.78T_{airM} - 0.0025Lati^2 - 15.14 \log(H + 25) + Z(9 + 0.61\sigma_{TairM}^2)^{0.5}$$

Donde:

$T_{m\acute{a}x_i}$, es la temperatura máxima calculada debajo de la superficie del pavimento en el sitio $i=1$ donde inicia el tramo, o $i=2$ donde termina el tramo por construir, (°C).

T_{airM} , es el promedio de las temperaturas máximas anuales de acuerdo con el registro histórico disponible en la plataforma SICliC, (°C).

$Lati$, es la latitud, en el sitio $i=1$ donde inicia el tramo o $i=2$ donde termina el tramo por construir, (°, con aproximación de 5 decimales).

H, es la profundidad, (mm) (se recomienda usar 20 mm).

Z, representa el valor para el nivel de confiabilidad (distribución normal, se recomienda usar 2.055 para una confiabilidad de 98%).

σ_{TairM} , es la desviación estándar de las temperaturas máximas anuales del registro histórico disponible en la plataforma SICliC, (°C).

La fórmula para determinar la temperatura mínima es la siguiente:

$$T_{m\acute{i}n} = -1.56 + 0.72T_{airm} - 0.004Lat^2 + 6.26 \log(H + 25) - Z(4.4 + 0.52\sigma_{Tairm}^2)^{0.5}$$

Donde:

$T_{m\acute{i}n}$, es la temperatura mínima esperada del pavimento asfáltico debajo de la superficie, (°C).

T_{airm} , es el promedio de las temperaturas mínimas anuales del aire, registradas en al menos los últimos 20 años en la zona, (°C).

Lat , es la latitud del tramo de diseño, (°).

H, es la profundidad, (mm) (se recomienda usar 20 mm).

Z, representa el valor para el nivel de confiabilidad (distribución normal, se recomienda usar 2.055 para una confiabilidad de 98%).

σ_{Tairm} , es la desviación estándar de las temperaturas mínimas anuales del aire, registradas durante al menos los últimos 20 años en la zona, (°C).

Con los valores calculados de temperatura máxima y mínima se selecciona el grado PG del asfalto conforme lo establece la normativa N·CMT·4·05·004/18.

Después de seleccionar el grado de desempeño (PG), el valor se puede ajustar de acuerdo a la intensidad del tránsito y a la velocidad de operación de la carretera en donde se diseñará la mezcla asfáltica.

Para determinar el nivel de ajuste, se deben realizar los siguientes pasos que se ilustran en la figura 2.16. En la estación meteorológica de interés, se debe abrir el menú izquierdo “Grado PG Asfalto”, donde previamente se debe calcular el Grado PG haciendo clic en el cuadro “calcular PG asfalto” (ver inciso “a”) y automáticamente aparecerá el Grado PG en el menú lateral derecho (ver inciso “b”). Posteriormente, se deben llenar los datos de “velocidad” e “intensidad del tránsito” (ver inciso “a”) y después hacer clic en el cuadro “calcular nivel de ajuste”, automáticamente se calculará el nivel de ajuste como se indica en el inciso “c”.

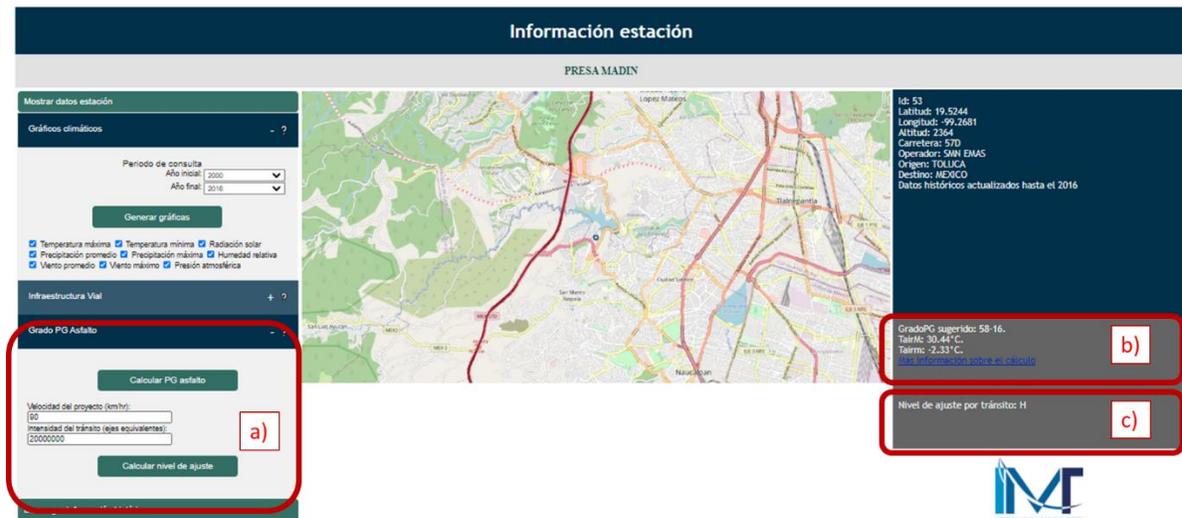


Figura 2.16 Determinación del nivel de ajuste del PG del asfalto del SICliC

La tabla 2.1 muestra los valores de referencia para calcular el nivel de ajuste de acuerdo a la normativa N·CMT·4·05·004/18.

Tabla 2.1 Nivel de ajuste de los requisitos de calidad para el grado de desempeño (PG) de acuerdo con la intensidad del tránsito y con la velocidad de operación

Nivel de ajuste			
Intensidad del tránsito (ΣL)	Velocidad de operación Km/h		
	$V > 70$	$20 \leq V \leq 70$	$V < 20$
$\Sigma L < 10^6$	Normal (S)	Alto (H)	Muy alto (V)
$10^6 \leq \Sigma L \leq 30 \times 10^6$	Alto (H)	Alto (H)	Muy alto (V)
$\Sigma L > 30 \times 10^6$	Muy alto (V)	Muy alto (V)	Extremadamente alto (E)

Nota: ΣL es el número de ejes equivalentes de 8,2 t acumulados durante el periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño que en ningún caso será menor de diez (10) años; obtenido con el método del Instituto de Ingeniería de la UNAM para la condición de daño superficial

2.6 Descarga de información

La plataforma SICliC permite la descarga la información climática, la cual se puede realizar en la ventana generada para la estación meteorológica de interés. El esquema para la descarga de información se ilustra en la figura 2.17, donde solo se debe dar clic en el cuadro “descarga de información histórica” y automáticamente se podrá descarga un archivo de Excel que contiene la información histórica de las diferentes variables meteorológicas.



Figura 2.17 Descarga de información climática del SICliC

Una vista del archivo de Excel descargado se puede ver en la figura 2.18.

id	MES	AÑO	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitación media mensual	Precipitación mínima	Duración de la lluvia	Velocidad media	Velocidad máxima	Humedad relativa	Presión atmosférica	Radiación solar	ESTADO	OPERADOR	HOMBRE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	CARRETERA	ORIGEN	DESTINO
	PROMEDIO		25.55	3.61	0.0126	4.52	6.37	28.43	73.08	770.27	222.07	MEXICO	SMN EMAS	PRESA MADIN	19°31'28"	99°16'05"	2364	57D	TOLUCA	MEXICO	
	MAX		31.30	10.30	0.0077	15.54	8.30	150.70	900.00	773.38	215.05										
	MIN		23.00	-5.20	0.0000	0.00	2.53	17.00	36.43	167.15	155.41										
4	200001	ENERO	2000																		
5	200002	FEBRERO	2000																		
6	200003	MARZO	2000																		
7	200004	ABRIL	2000																		
8	200005	MAYO	2000																		
9	200006	JUNIO	2000																		
10	200007	JULIO	2000																		
11	200008	AGOSTO	2000																		
12	200009	SEPTIEMBRE	2000																		
13	200010	OCTUBRE	2000																		
14	200011	NOVIEMBRE	2000																		
15	200012	DICIEMBRE	2000																		
16	200101	ENERO	2001																		
17	200102	FEBRERO	2001																		
18	200103	MARZO	2001																		
19	200104	ABRIL	2001																		
20	200105	MAYO	2001																		
21	200106	JUNIO	2001																		
22	200107	JULIO	2001																		
23	200108	AGOSTO	2001																		
24	200109	SEPTIEMBRE	2001																		
25	200110	OCTUBRE	2001																		
26	200111	NOVIEMBRE	2001																		
27	200112	DICIEMBRE	2001																		
28	200201	ENERO	2002																		

Figura 2.18 Vista de un archivo de Excel con la información climática descargada del SICliC

2.7 Escenarios climáticos

Otra funcionalidad del sistema es proporcionar información climática futura sobre las variables meteorológicas, tales como la temperatura (máxima, mínima y promedio) y la precipitación promedio. Adicionalmente, se incluyen escenarios sobre el aumento del nivel del mar.

Para seleccionar los escenarios climáticos, se debe buscar en la página principal del SICliC en el menú lateral izquierdo la opción “escenarios climáticos” y, posteriormente, seleccionar el escenario de interés (ver figura 2.19).



Figura 2.19 Selección de escenarios climáticos del SICliC

Para el Reporte 5 del IPCC (2013), se han definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, basados en las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m².

Las cuatro trayectorias RCP comprenden diferentes escenarios futuros:

- RCP 8.5, es un escenario con alta concentración de emisiones (posible desarrollo para poblaciones numerosas, alto uso de energía fósil / carbón).
- RCP 6.0, es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario base de bajo a mediano o escenario de alta mitigación).
- RCP 4.5, es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario con una alta mitigación).
- RCP 2.6, es un escenario de baja concentración de emisiones.

Los escenarios utilizados fueron desarrollados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), quien es responsable de las políticas de cambio climático en México. Los escenarios tuvieron como base las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), en tres escenarios

futuros: el RCP4.5 y RCP6.0 (escenarios de estabilización) y el RCP8.5 (escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero).

Los periodos de análisis son: futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). Estos corresponden a lapsos de 25 años para cada uno.

Esta información permitirá al diseñador identificar zonas de riesgo, donde la infraestructura carretera ha estado expuesta y cuya integridad continuará peligrando en el futuro, basados también en los análisis de escenarios climáticos.

2.7.1 Escenario – Precipitación promedio

Para obtener el escenario climático “Precipitación promedio”, en el menú lateral izquierdo se deben desplegar las opciones como se mostró en la figura 2.19, y seleccionar “precipitación promedio” (ver inciso “a” de la figura 2.20), ahí el usuario podrá elegir el escenario de concentración de emisiones 4.5 o 6.0; solo basta con deslizar la barra azul, así como seleccionar si se desea conocer un escenario cercano o lejano, y el mes del año. Una vez que se selecciona lo deseado, se desplegará todo el mapa, el cual se podrá superponer a la red vial para seleccionar la zona de interés como se muestra en el inciso “b” de la figura 2.20. En la misma figura se puede observar cómo se presenta la variación porcentual mensual del aumento o disminución de la precipitación (ver inciso “c”), así como la simbología de color mostrada en el inciso “d”.



Figura 2.20 Escenario precipitación promedio del SICliC

Como se puede observar en el ejemplo de la figura 2.20, en el sitio seleccionado, la variación de la precipitación indica que, en promedio, en el año se tendrá una disminución del 11.9% de la precipitación; la cual debe ser tomada en cuenta para el diseño de las obras de drenaje menor y mayor.

2.7.2 Escenario – Temperatura promedio

Para obtener el escenario climático “Temperatura promedio”, se realiza de la misma manera como se indicó en el apartado 2.7.1. Los resultados se ilustran en la figura 2.21.



Figura 2.21 Escenario temperatura promedio del SICliC

2.7.3 Escenario – Temperatura máxima

Para obtener el escenario climático “Temperatura máxima”, se realiza de la misma manera como se indicó en el apartado 2.7.1. Los resultados se ilustran en la figura 2.22.



Figura 2.22 Escenario temperatura máxima del SICliC

2.7.4 Escenario – Temperatura mínima

Para obtener el escenario climático “Temperatura mínima”, se realiza con el mismo procedimiento que se explicó en el apartado 2.7.1. Los resultados se ilustran en la figura 2.23.



Figura 2.23 Escenario temperatura mínima del SICliC

2.7.5 Escenario – Aumento del nivel del mar

El escenario del aumento del nivel del mar fue evaluado con dos contextos, uno con un aumento de dos metros y, el segundo, con un aumento de cinco metros.

La estimación de las áreas afectadas se obtuvo a partir de la información ráster que ofrece el CReSIS (*Center of Remote Sensing of Ice Sheets*), en este caso para una elevación del nivel del mar.

El aumento del nivel del mar está asociado a tres principales factores:

- Dilatación térmica. Aumento del volumen del agua debido a su cambio en la temperatura (temperaturas más calientes).
- Deshielo de los glaciares. Las altas temperaturas registradas están derritiendo las grandes formaciones de hielo, tales como los glaciares.
- Pérdida de hielo en Groenlandia y la Antártida occidental. El aumento del calor está provocando que las placas de hielo que cubren Groenlandia y la Antártida se estén derritiendo a un ritmo acelerado.

Las figuras 2.24 y 2.25 muestran las zonas que se estima que serían afectadas por la elevación del nivel del mar.

Para ambas figuras, en el inciso “a” se muestra cómo seleccionar cada uno de los escenarios del nivel del mar y el inciso “b” muestra cómo se visualiza la red de carreteras federales así como la capa del aumento del nivel del mar.



Figura 2.24 Escenario aumento del nivel del mar 2.0 metros del SICliC



Figura 2.25 Escenario aumento del nivel del mar 5.0 metros del SICliC

En ambos casos, se pueden identificar las zonas potencialmente expuestas al aumento del nivel del mar, lo que implicará para los planeadores de infraestructura carretera evaluar la localización de esa red carretera para que -cuando sea el momento de reconstrucción- se trate de alejar el eje del camino de las zonas de peligro.

2.8 Mapas adicionales

En el menú “mapas adicionales” se han incluido tres submenús para seleccionar el mapa climático, el mapa nacional del grado PG y un mapa que indica los límites políticos de los estados que conforman el país, tal y como se muestra en la figura 2.26.

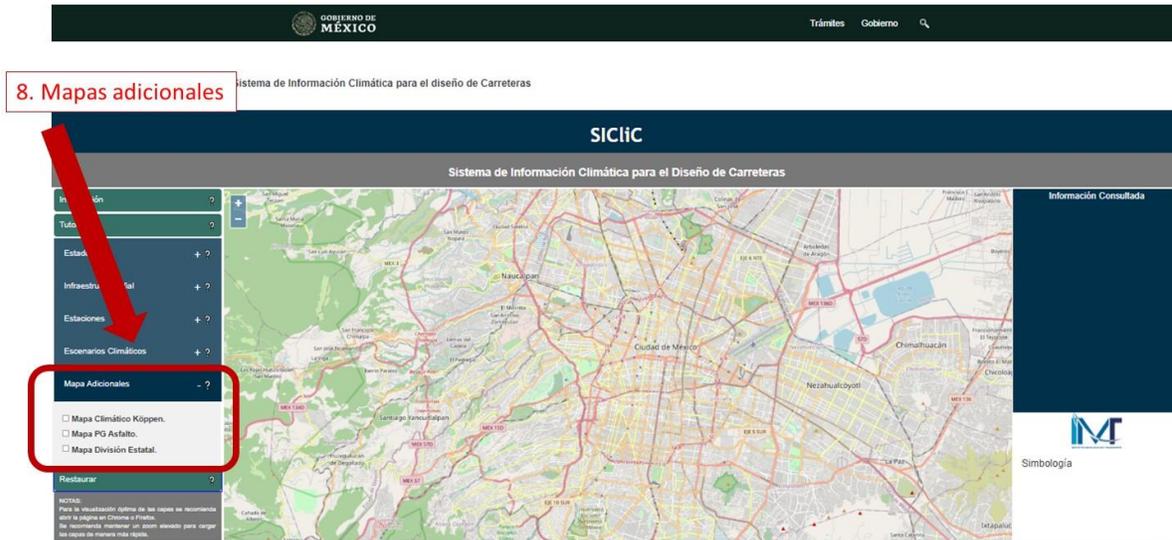


Figura 2.26 Menú de mapas adicionales del SICliC

2.8.1 Mapa climático

Esta sección está compuesta por el mapa del clima del país, desarrollado por García (1998), para la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

El mapa estaba basado en la clasificación climática de Köppen, el cual fue adaptado debido a la diversidad de microclimas en escalas espaciales muy pequeñas con que se cuenta en el país.

Algunas de las modificaciones más importantes es la posibilidad de considerar la altitud como un factor importante en la distribución de climas, así como incluir otras divisiones al sistema de Köppen con nuevos criterios de clasificación.

Este mapa permite al diseñador contar con información del clima base de la zona donde se realizará el proyecto carretero.

La figura 2.27 muestra la visualización del mapa climático, solo basta identificar en el menú lateral izquierdo la sección “mapas adicionales” y seleccionar el mapa climático de Köppen.

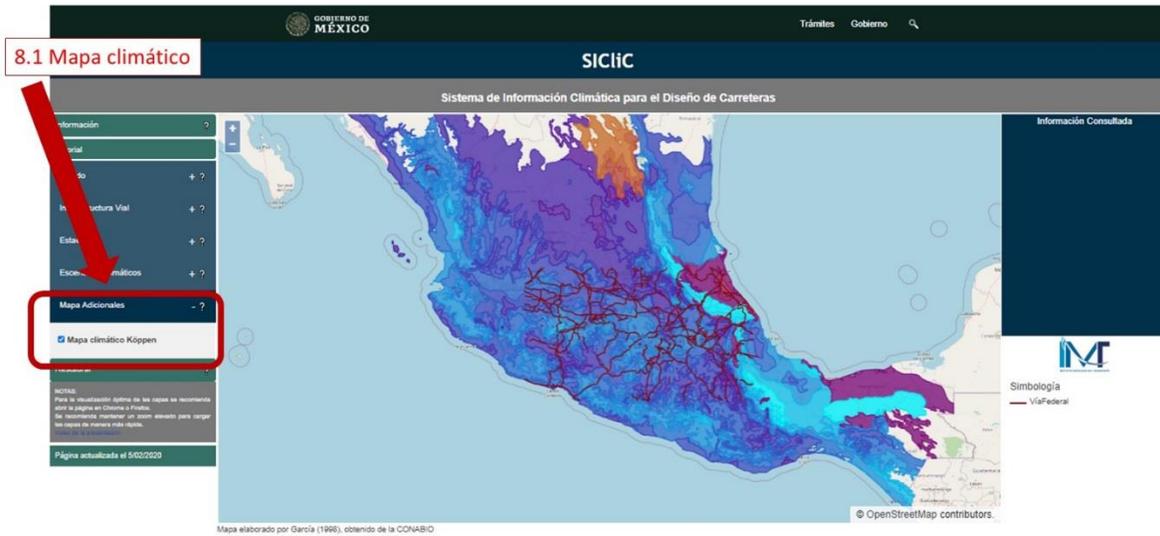


Figura 2.7 Mapa climático de Köppen del SICiC

En este mapa se puede utilizar la información climática y superponer la información de las capas de carreteras, para identificar en qué zona del clima se encuentra el tramo de carretera.

Esta información es especialmente útil para los programas de conservación de carreteras, los cuales utilizan la información climática para los modelos de deterioro de los pavimentos.

Para visualizar la información se han ilustrado una serie de pasos en la figura 2.28.

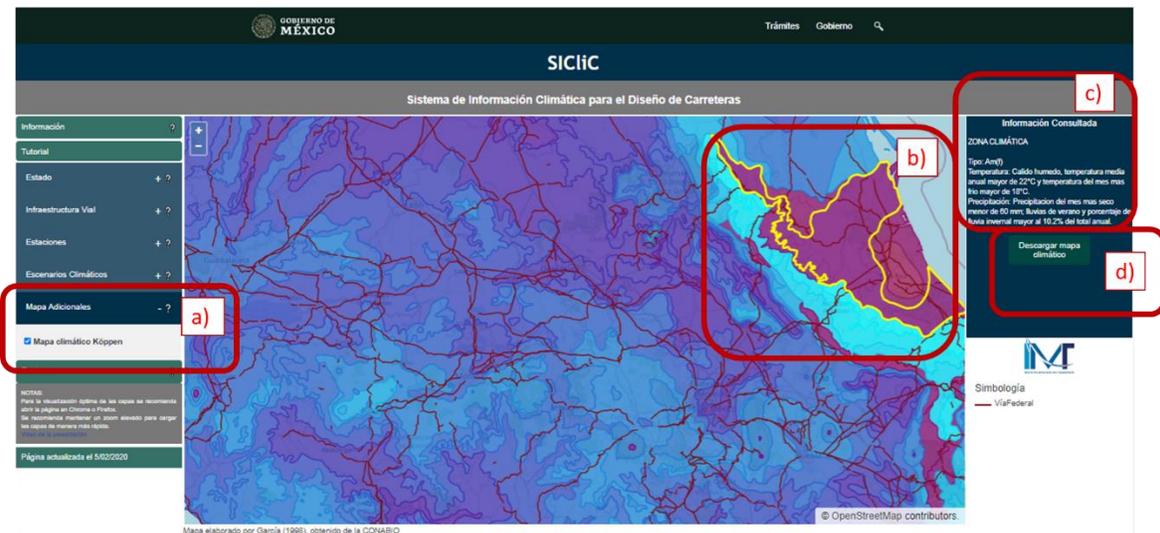


Figura 2.28 Visualización de la información en el mapa climático del SICiC

El primer paso es seleccionar la capa de información del clima (ver inciso “a”) tal y como se indicó en párrafos anteriores, posteriormente se debe cargar la capa de vialidades para seleccionar la zona de interés, para lo cual basta con hacer un clic en el área cercana a la carretera y se resaltará toda la zona climática (ver inciso “b”), donde la información detallada se describe en el menú lateral derecho (ver inciso “c”). Si se desea descargar el mapa, se puede hacer como se indica en el inciso “d”, haciendo clic en el recuadro “descargar mapa climático”.

2.8.2 Mapa Grado PG del Asfalto

En función de los datos que se obtienen en el módulo para la determinación del Grado PG del asfalto por estación se construyó un mapa nacional que se muestra en la figura 2.29.

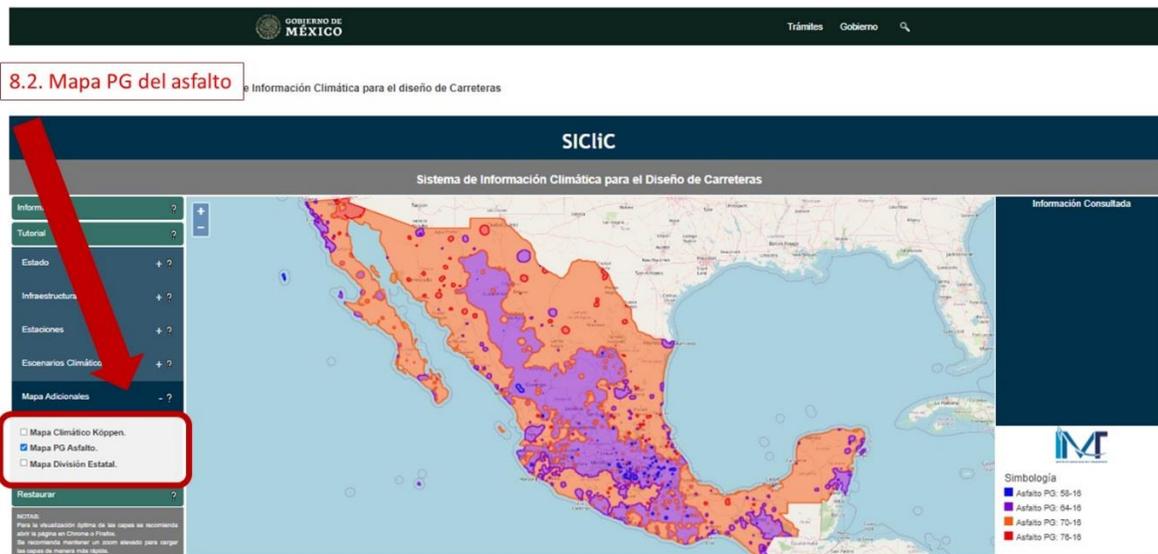


Figura 2.29 Visualización del mapa para la selección del Grado PG del asfalto del SICiC

De acuerdo a la normativa N-CMT-4-05-004/08 de la SCT, se construyó un mapa para la selección del cemento asfáltico y, con ese mismo fin, la plataforma SICiC uso la información para modelar un mapa², que permita una revisión rápida para la selección del grado PG del asfalto; el cual será muy útil para los diseñadores de mezclas asfálticas y pavimentos, particularmente para diseños en ciudades o poblaciones pequeñas que no cuenten con mucha información para elaborar sus propios diseños.

² El mapa fue desarrollado mediante una interpolación espacial de los datos en un Sistema de Información Geográfica.

2.8.3 Mapa con límites políticos

Para un análisis regional a nivel de red, el uso de los límites políticos es muy útil para seccionar el área de estudio.

La figura 2.30 muestra la capa del grado PG con límites políticos estatales.



Figura 2.30 Visualización del mapa para la selección del Grado PG del asfalto del SICliC y límites políticos estatales

2.9 Restaurar

La plataforma cuenta con el botón “Restaurar”, que al darle clic elimina toda la información de visualización para dejar la página en las condiciones originales y así poder realizar otro análisis, consulta o visualización.

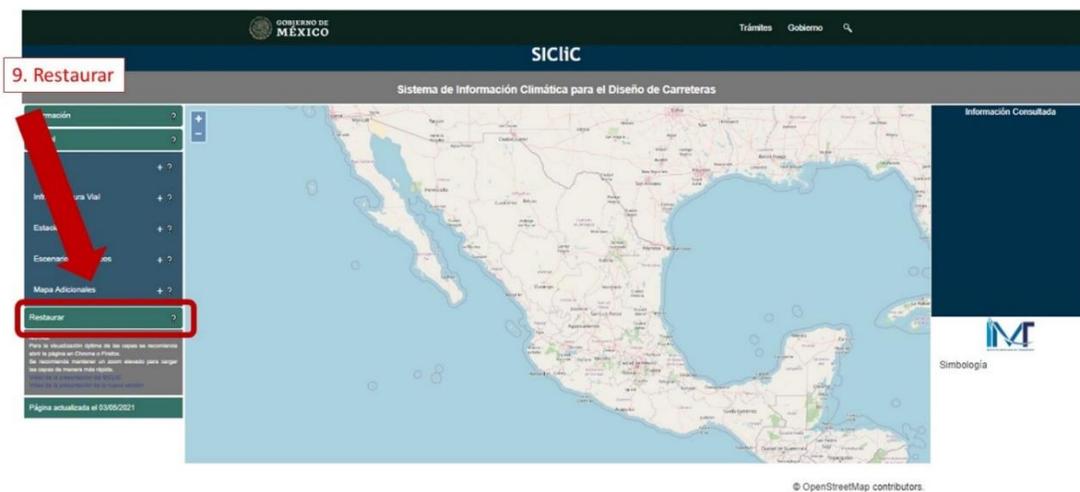


Figura 2.31 Visualización del menú “restaurar”

3. Programación del SICliC

La página web de la plataforma SICliC se encuentra construida principalmente con dos lenguajes de programación. El primero está escrito en lenguaje *HTML* (el lenguaje “*hypertext markup language*” se utiliza para el desarrollo y creación de páginas web), el cual define donde aparecen los distintos elementos, sus colores, formas y funciones. El segundo lenguaje utiliza *JavaScript* (es el único lenguaje de programación que funciona en los navegadores de forma nativa “lenguaje interpretado sin necesidad de compilación”, por lo que se utiliza como complemento de HTML y CSS para crear páginas webs), el cual permite darle dinamismo a la página.

Ambos lenguajes establecen las respuestas que debe proporcionar el sistema a las distintas acciones/necesidades/demandas del usuario, logrando de esta manera una página interactiva y no una simple presentación inmóvil, inmodificable o pasiva.

Los códigos fueron enlazados y comprimidos con el uso de *Node JS* (este entorno de tiempo de ejecución en tiempo real incluye todo lo que se necesita para ejecutar un programa escrito en JavaScript). Se hace notar que se utilizaron librerías, las cuales son recopilaciones de módulos de códigos ya escritos que pueden ser llamados por un tercero, para realizar funciones importantes dentro del visualizador.

Una de estas librerías es *Openlayers*, la cual es de código abierto; es decir, no tiene costo alguno y se enfoca en códigos para presentar mapas dinámicos con los que el usuario puede interactuar, mismos que están escritos en *JavaScript*. El uso de esta librería se presenta en el mapa desplegado en la página principal del SICliC.

A través de los códigos de *Openlayers* se permite mostrar en la página principal un mapa base a través de *Open Street Map* (es un proyecto colaborativo para crear mapas editables y de uso libre). Estos mapas permiten dar estilos y colores diferentes a las proyecciones, así como extraer información de la capa para mostrarlo en la pantalla, establecer el orden de las capas, las fuentes de las mismas y como se desea proyectarlas.

Otra librería utilizada fue la llamada *Chartjs* (es una biblioteca *JavaScript* gratuita de código abierto para la visualización de datos, que admite 8 tipos de gráficos: barra, línea, área, circular, burbuja, etc.), cuyos módulos se utilizaron en el visualizador para cada estación, en la pestaña que se abre al seleccionar cada estación meteorológica desde la página principal.

Los códigos de *Chart* toman la información guardada dentro de los mapas y la despliegan en una gráfica de líneas. A través de *Chart* se les dio estilo, tamaño y títulos a las gráficas de las distintas variables meteorológicas. Este sistema permite agregar nuevos datos a los mapas y no se requiere generar nuevas gráficas, evitando hacer uso de imágenes estáticas y cargarlas a la página para ser visualizadas. Además, ello significaría que el usuario no podría interactuar con ellas y que con la actualización constante de las imágenes se podría colar información obsoleta y tendrían que ser reemplazadas manualmente. Por lo que, al utilizar estos códigos, cualquier modificación en la información de las capas será representada de forma automática en las gráficas de la página.

Un elemento de suma importancia para la página son las capas de información. La capa principal es la que representa las estaciones meteorológicas, en ella se encuentra la información sobre la localización de las estaciones, su nombre, operador y los valores mensuales registrados, a través de los años, de las siguientes nueve variables meteorológicas:

- Temperatura máxima.
- Temperatura mínima.
- Precipitación promedio.
- Precipitación máxima.
- Velocidad de viento promedio.
- Velocidad de viento máximo.
- Presión atmosférica.
- Humedad relativa.
- Radiación solar.

Otra de las capas relevantes son las relacionadas con la información de la infraestructura vial, la cual se ha dividido en:

- Red carretera federal
- Red carretera estatal
- Red carretera rural
- Red vial urbana
- Puentes

Adicionalmente, se tienen capas que utiliza el sistema para representar información, tales como distintos escenarios climáticos que describen la temperatura máxima, mínima y promedio, así como la precipitación promedio y máxima, que se espera en un futuro cercano o lejano, o el aumento del nivel del mar.

Los formatos de las capas de información se encuentran en formato *Shape* (el formato ESRI Shapefile "SHP" es un formato de archivo informático propietario de datos espaciales), los cuales se transformaron en tablas *PostgreSQL*.

La información de estas capas se encuentra guardada en tablas. Además de lo ya descrito, también contiene la información geoespacial de las estaciones codificada.

Para guardar, modificar y controlar estas tablas se utiliza *PostgreSQL*, que es un sistema de gestión de base de datos de código abierto. Adicionalmente, se instaló una extensión llamada *PostGIS*, la cual permite agregar información geoespacial a las tablas. Sin embargo, el código de la página no puede desplegar la información que existe en las tablas guardadas en *PostgreSQL* sobre un mapa; para esto es necesario presentar toda esa información de las tablas en otro formato.

Por esta razón, el sistema utiliza un servidor de información espacial llamado *Geoserver*. Este servidor está conectado con la base de datos en *PostgreSQL* y trabaja como *Web Feature Service* (WFS, facilita la descarga de capas de información geográfica vectorial completa, es decir, la descarga de su geometría y de su tabla de atributos asociada).

En resumen, el código de la página pide, a través de un URL, los archivos de los mapas a *Geoserver*, posteriormente *Geoserver* analiza el pedido y busca la información entre las tablas guardadas en *PostgreSQL*. Cuando obtiene la información, la guarda en un formato *GeoJSON* (es un formato estándar abierto diseñado para representar elementos geográficos sencillos, junto con sus atributos no espaciales, basado en *JavaScript Object Notation*), el cual explica en un código que el navegador web pueda entender, cómo debe desplegarse la información sobre el mapa.

Debido a este sistema, cada vez que se desee actualizar la información que se tiene en las estaciones o corregir un dato, no será necesario eliminar los archivos de la capa existente o crear una nueva con la corrección y subirla, solo bastará con modificar el número en la celda o agregar las nuevas columnas y filas en la tabla de *PostgreSQL*, y el sistema desplegará, la siguiente vez que se cargue la página, la capa en la página web con la nueva información.

Estos programas, códigos y servidores fueron seleccionados por dos razones, la primera es facilitar el proceso de actualización de datos al no tener que desarrollar los archivos cada año, con ello se reduce el tiempo que se le debe dedicar a este proceso y la posibilidad de presentar un error humano entre actualizaciones. La segunda razón es que todos son de código abierto, por lo que son gratuitas y no requieren contar con una licencia que implicaría una inversión para el proyecto.

El uso de programas, códigos y servidores de código abierto o libre, reduce notablemente los costos para el mantenimiento de la página y evita una posible suspensión de los servicios que proporciona la página SICliC por dificultades financieras para la adquisición de tecnologías de información y comunicaciones.

4. Actualizaciones del SICliC

La plataforma SICliC es dinámica y, por lo tanto, continuará con trabajos de mejora en cuanto a su operación, pero también en la actualización de los datos y la incorporación de más información climática.

4.1 Actualización de los datos

Los datos de la información meteorológica requieren actualizaciones periódicas. La información pública disponible del Servicio Meteorológico Nacional se actualiza diariamente en las estaciones automatizadas, sobre las cuales conviene descargar el histórico cada 3 meses aproximadamente.

El proceso de descarga de la información se realiza manualmente, la cual es colocada en las plantillas que permiten obtener los máximos, mínimos o promedios por mes para que sean incorporados al SICliC.

4.2 Incorporación de estaciones

El proyecto busca ampliar el número de estaciones meteorológicas, para que el diseñador de carreteras pueda contar con más insumos, por lo que se busca integrar la red de estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Esto requerirá negociaciones de alto nivel que esperamos resulten favorables para el presente proyecto.

Existen redes adicionales, como la que maneja Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), así como aquellas que administran gobiernos estatales y municipales, las cuales podrían ampliar la cobertura.

4.3 Temperaturas bajo cero

En el país se ha detectado que se ha incrementado el número de sitios con registros de temperaturas bajo cero, creciendo el número de días con temperaturas bajo cero.

Para ello se pretende construir un indicador “Índice de congelamiento”, el cual representa la suma de las temperaturas bajo cero de todos los días que se presentaron durante un año con esta consideración.

El resultado permitirá conocer las regiones que actualmente en el país son propensas a las bajas temperaturas, y que requerirán eventualmente adaptar los diseños de los elementos de las carreteras para que puedan comportarse adecuadamente antes, durante y después de un ciclo de congelamiento.

5. Conclusiones

En México se cuenta con una red para la observación de datos meteorológicos que ha integrado el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), adicionalmente existen otras redes de medición aisladas que, por su tipo de administración, no es posible integrarlas en una sola base de información más robusta y completa.

La información del SMN sobre la meteorología y el clima es muy valiosa, la cual puede ser de gran utilidad para los diferentes sectores y usuarios que la requieran, misma que en los últimos años ha sido automatizada para obtenerla en tiempo real.

Para el diseño de la infraestructura carretera es necesario contar con información del clima, para lo cual los ingenieros diseñadores recurren a diversas fuentes para realizar los análisis necesarios.

De esta manera surgió la idea de desarrollar un sistema integrado de gestión de datos meteorológicos y climáticos, diseñado específicamente para satisfacer la necesidad de mejorar la investigación del clima en las carreteras, el cual permitirá fortalecer las capacidades de planeación, de diseño y operativas de cualquier organización de carreteras y, por otro lado, aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera mediante diseños que incluyan la variabilidad climática y el clima futuro.

La plataforma desarrollada fue denominada Sistema de Información Climatológica para el diseño de Carreteras (SICliC), el cual es una herramienta que ha permitido integrar en un solo sistema la información y los datos disponibles del clima pasado, actual y futuro, de tal manera que pueda ser de utilidad para los diseñadores de carreteras.

Esta plataforma es dinámica y deberá irse actualizando conforme más información se genere sobre las mediciones de las diferentes variables climáticas, en las estaciones meteorológicas del país, así como conforme se vayan actualizando los escenarios futuros sobre el clima; por lo que, el mantenimiento de la plataforma informática demandará esfuerzos adicionales.

El SICliC permite conjuntar la información meteorológica y climática disponible en el país, la cual se espera sea de amplia utilidad para el sector carretero y el académico, ya que el diseño de los diferentes elementos que integran una carretera demanda datos específicos sobre las diferentes variables del clima que podrán ser consultadas en una fuente específica.

Esta segunda versión considera mejoras en el diseño de la página web, incluye mejoras de las consultas y en la presentación de la información, e incluye dos módulos, cuyas herramientas permiten obtener gráficos climáticos o calcular el grado PG del asfalto, para este último además se agregó un mapa zonificado para la selección de asfaltos de acuerdo a las variables de clima, tales como la temperatura máxima y mínima.

La información meteorológica y climática permitirá a los tomadores de decisiones implementar acciones con base en datos que permitan diseñar la infraestructura carretera con umbrales actualizados, considerando el clima extremo registrado en el pasado y las proyecciones climáticas futuras, la cual permitirá aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera ante el clima y su variabilidad, así como también ante el cambio climático.

Los siguientes pasos a seguir serán, por un lado, la constante actualización de la información tanto meteorológica como climática y, por otro lado, incorporar más estaciones meteorológicas a la plataforma, que son operadas y administradas por otras organizaciones.

Bibliografía

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). Guide for design of pavement structures. ISBN 1-56051-055-2. Washington, DC.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2008). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A manual of practice. ISBN 978-1-56051-423-7. Washington, DC.

Anguas Garnica, Paul; Hernández Domínguez, Roberto I. (2013). Manual de Usuario "IMT-PAVE 1.1". Documento Técnico No. 53. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Cavazos, Teresa; Salinas, José Antonio; Martínez, Benjamín; Colorado, Gabriela; De Grau, Pamela; Prieto González, Ricardo; Conde Álvarez, Ana Cecilia; Quintar Isaías, Arturo; Santana Sepúlveda, Julio Sergio; Romero Centeno, Rosario; Maya Magaña, María Eugenia; Rosario de la Cruz, José Guadalupe; Ayala Enríquez, Ma. del Rosario; Carrillo Tlazazanatza, Heriberto; Santiesteban, Oscar; Bravo, María Elena. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. México, DF.

Corro, Santiago; Magallanes, Roberto; Prado, Guillermo. (1981). Instructivo para el diseño estructural de pavimentos flexibles para carreteras. Series del Instituto de Ingeniería No. 444. UNAM. México, DF.

García, E. (1998). Catálogo de Climas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, DF.

Gradilla Hernández, Luz Angélica; Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Orantes Olvera, Héctor; Marcos Palomares, Omar Alejandro (2018). Aproximación Geoespacial para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México. Publicación Técnica No. 523 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Köppen, W. P. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. Petermanns Geog. Mitt. 64. 193–203; 243–248.

Köppen, W. P.; R. Geiger. (1930–1939). Handbuch der Klimatologie. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 6 vols.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro; Mobayed Vega, Nabil Jorge; Orantes Olvera, Héctor (2017b). El clima y las carreteras en México. Publicación Técnica No. 498 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro; Adame Valenzuela, Eduardo; Gradilla Hernández, Luz Angélica. (2020). Sistema de información meteorológica y climática para el diseño y operación de las carreteras en México. Publicación Técnica No. 575 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Anuario Estadístico Sector Comunicaciones y Transportes 2019. México, DF. (2019) [SCT, 2019]

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2018). Norma técnica: N-CMT-4-05-004/18. Calidad de Cementos Asfálticos según su Grado de Desempeño (PG). Ciudad de México. Recuperado de: <https://normas.imt.mx/>

Strategic Highway Research Program. (1994). Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. SHRP-A-410. Washington, DC. Recuperado de: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-410.pdf>

Ligas consultadas:

American Meteorological Society. http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page (recuperada en enero 2021).

Climate Adapt. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/adaptation-options/climate-proofed-standards-for-road-design-construction-and-maintenance> (recuperada el 4 de febrero de 2021)

National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/el-aumento-del-nivel-del-mar> (recuperada el 15 de febrero de 2021)

Ligas de interés:

<https://smn.cna.gob.mx/es/observando-el-tiempo>

<https://smn.cna.gob.mx/es/estaciones-meteorologicas-automaticas>

<https://www.redesclim.org.mx/>

<http://clicom-mex.cicese.mx/malla/>



COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>