

# Aplicación de un sistema de información geoestadística para la evaluación ambiente-corrosión en la degradación de la infraestructura de puentes en México

## The application of a geostatistical information systems used for environmental-corrosion evaluation of bridge infrastructure in Mexico

Andrés Torres Acosta\* \*\*, Gilberto Núñez Rodríguez\*, Miguel Angel Backhoff\*, Miguel Martínez Madrid\*, Mario Aguilar Martel\*\*

\* Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, MÉXICO

\*\*Universidad Marista de Querétaro, Querétaro, MÉXICO  
atorres@imt.mx

Fecha de recepción: 01/ 02/ 2005  
Fecha de aceptación: 17/ 06/ 2005  
PAG. 215 - 222

### Resumen

Este trabajo presenta los avances del grado de deterioro por corrosión que guarda la infraestructura de puentes de la red federal de carreteras en México, en función de factores ambientales relevantes tales como el tipo de clima prevalente, la distancia a la línea de costa, su ubicación sobre un cauce superficial o canal y la localización de actividad industrial en un radio determinado. La información obtenida fue capturada y analizada utilizando sistemas de posicionamiento global (GPS en inglés) de última generación. También se presentan los primeros resultados en cuanto al inventario nacional de daños por corrosión en puentes federales mexicanos.

Palabras Clave: Análisis espacial, concreto, conservación, corrosión, degradación, durabilidad, puentes, SIG, GPS, Sistemas de Información Geográfica

### Abstract

This work presents an innovative method to determine the degree of bridge corrosion deterioration of the Federal Highway Network in Mexico, as a function of environmental factors such as prevailing climate where the bridge is located, bridge geographic positioning (e.g. coastal line, river or lake distance) and the distance from an industrial corridor. The information was obtained and analyzed using last generation Global Positioning Systems (GPS). This work also presents the preliminary results of the corrosion damaged-induced Mexican Federal bridge inventory.

Keywords: Spatial analysis, concrete, maintenance, corrosion, degradation, durability, bridges, GIS, GPS, Geographic Information Systems

## 1. Introducción

La armadura embebida en concreto está normalmente protegida contra la corrosión. Esta protección se debe a la alta alcalinidad del concreto ( $\text{pH} > 12.5$ , Red DURAR 1997), y a la barrera física que el concreto proporciona entre la armadura y los agentes externos del ambiente (Red DURAR 1997). Esta protección produce que el acero se mantenga pasivo hasta que agentes externos penetran y activan la armadura.

Durante los últimos años el deterioro de estructuras de concreto por corrosión se ha incrementado notablemente, provocando serios problemas en países industrializados quienes tienen ya estimado la pérdida económica en función de su producto interno bruto (PIB). Cuando el acero se corroe en el concreto, se consume una capa de la superficie de la armadura y se forma una

capa de productos de corrosión (óxido) en el perímetro de la varilla. El volumen ocupado por el óxido es mayor que el que ocupaba el acero original creando presiones contra el concreto que rodea a la armadura, esto propiciará la formación de grietas y desprendimientos del concreto (Torres-Acosta and Sagüés 2004). Estas grietas además de ser antiestéticas, pueden disminuir el anclaje del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural (Torres-Acosta et al., 2004, 2003; Torres-Acosta y Martínez-Madrid 2003).

La corrosión del acero de refuerzo (o presfuerzo) es una de las causas más comunes del deterioro de las estructuras de concreto que está llevando a elevados gastos de reparación y mantenimiento, con la preocupación que ello supone para las administraciones

que son las propietarias de las obras públicas, y los particulares cuyas viviendas sufren deterioros prematuros. El sistema carretero mexicano cuenta con un sistema de administración de conservación y mantenimiento de su infraestructura, que permite conocer de manera genérica el estado actual (de conservación) que guarda cada obra para así programar reparaciones, dependiendo del nivel de daño cuantificado y calificado. En una publicación previa (Torres et al., 2004) se presentaron las bases de este inventario de puentes federales mexicanos y su utilización para la gestión del mantenimiento de éstos. Se explicó que dentro de este sistema de administración y conservación, desafortunadamente no existía un rubro que permita establecer el nivel de la degradación que por corrosión se ésta llevando a cabo en las estructuras de concreto (hormigón) en general.

En la misma publicación se explicaron las fases o etapas de este proyecto y los avances que a la fecha se tenían, presentando el mapa de los puentes que presentaban daños por corrosión el cual fue obtenido por un análisis espacial de la información del inventario de puentes de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) Federales, pero no se explicó con detalle como se obtuvieron estos mapas para el análisis de la información (Torres et al., 2004). Por tal motivo, este trabajo presenta con más detalle el procedimiento utilizado para generar la información que correlaciona medio ambiente y localización de los puentes, y así priorizar los programas de intervención y rehabilitación de puentes dañados por corrosión que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) está llevando al cabo.

## 2. Metodología

Con este trabajo se intentará proporcionar los lineamientos seguidos para la discriminación de la infraestructura de puentes y pasos a desnivel, que se encuentran en servicio actualmente en la red federal de carreteras libres que presenten deterioro, producto de la corrosión mediante el uso de un sistema de información geoestadística. Para lograr esto se plantearon los siguientes objetivos y metas:

**Objetivo General:** Clasificar la infraestructura de puentes de la red de carreteras federales en México en función del estado de degradación por corrosión, estableciendo los niveles de prioridad para su atención.

**Meta 1:** Generar un inventario, en formato electrónico de la infraestructura de puentes de la red federal definiendo

nombre, número de identificación, estado, carretera, kilometraje, tramo, año de construcción, último año de inspección, longitud, no. de claros, obstáculo que cruza, coordenadas (latitud y longitud) y finalmente calificación del SIPUMEX.

**Meta 2:** Utilizar el Sistema de Información Geoestadística para el Transporte (SIGET) (García Ortega y Backhoff Pohls, 1992), del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en conjunto con el inventario generado en el objetivo específico anterior, para el análisis espacial, la agrupación y la representación cartográfica de los puentes que puedan ser propensos a la corrosión en función de su posición geográfica y las condiciones ambientales a las que se encuentran expuestos.

**Meta 3:** Coordinar las inspecciones visuales de todos los puentes de la red federal carretera en los 31 estados de la república y, en caso de no encontrarse deterioro por corrosión, proyectar los tiempos para la realización de las inspecciones detalladas a realizarse en la siguiente etapa, no contemplada en este estudio.

**Meta 4:** Recabar la información generada por las inspecciones visuales realizada por los Centros estatales SCT, de los puentes que presenten daños por corrosión.

**Meta 5:** Análisis de resultados correlacionando las bases de datos generadas por el SIGET y los levantamientos realizados en campo.

En base a lo anterior se continuó con fases subsiguientes del Plan Nacional de Evaluación y Diagnóstico de Puentes Dañados por Corrosión, las cuales se dieron a conocer en una publicación anterior (Torres et al., 2004).

## 3. Fuentes de información utilizadas

Las fuentes básicas de información están constituidas por los archivos correspondientes a SIPUMEX\_CORR del Plan Nacional de Evaluación y Diagnóstico de Puentes Dañados por Corrosión (Torres et al., 2004), a cargo del IMT y las Direcciones Generales de Servicios Técnicos (DGST) y la DGCC de la SCT, así como los archivos digitales georreferenciados de los siguientes temas:

- Límites estatales y municipales
- Carreteras pavimentadas
- Puentes
- Límites Costeros
- Zonas climáticas
- Municipios

Esta información temática procede de instituciones tales como: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), Instituto Nacional de Ecología (INE), Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) e IMT.

#### 4. Variables y criterios para el análisis de la información

De acuerdo a las metas señaladas, se definió un universo de 6065 puentes, una vez separados de la base de datos los registros inconsistentes (435 puentes carecen de coordenadas geográficas a la fecha). Se analizó conjuntamente la información básica disponible (por parte de la Coordinación de Equipamiento para el Transporte y la Unidad de Sistemas de Información Espacial del IMT), procediendo a la definición de las siguientes variables y criterios:

1. Año de construcción: al respecto se seleccionaron los puentes que fueron construidos en 1990 y antes, es decir, teniendo en cuenta el factor tiempo, sin incluir información sobre los trabajos de mantenimiento.
2. Puentes sobre ríos permanentes y canales: se consideró como variable el hecho de que los puentes se localicen sobre ríos y canales, dada la influencia permanente de la evaporación sobre ellos, omitiendo los arroyos debido a su caudal insignificante.
3. Distancia a la línea de costa: respecto a la línea de costa se generaron dos buffer (áreas de influencia o radio de acción de un fenómeno), uno a 5 km de la costa; y otro a 20 km de la misma, cuando en esa área se encuentran ríos, buscando captar el efecto combinado de la humedad y la posible presencia de altas concentraciones de cloruros en dichos caudales.
4. Zona climática: En el caso de la corrosión por carbonatación, se consideraron los climas secos y semisecos, o sea, los que tienen temperaturas medias que oscilan alrededor de los 18° C, y el cociente T/P (Temperatura/Precipitación) alrededor de 22.9, sólo superiores al de los climas muy secos y muy áridos.
5. Municipios con actividad industrial: para el caso del proceso de corrosión por carbonatación se incluyeron los municipios donde existen dos o más parques, ciudades y/o corredores industriales, con base en el criterio de que las actividades económicas industriales

generalmente están muy próximas a los grandes centros urbanos del país, donde es mayor la generación de desechos precursores de corrosión por carbonatación.

Derivado de lo anterior, se utilizaron las variables de la siguiente manera (variable/proceso):

1. Año de construcción: cloruros/carbonatación
2. Puentes sobre ríos y canales permanentes: cloruros/carbonatación
3. Distancia a la línea de costa: cloruros
4. Zona climática: carbonatación (climas secos áridos y semisecos semiáridos)
5. Municipios con zonas industriales: carbonatación.

#### 5. Procedimiento y resultados obtenidos

A continuación se relacionan los pasos necesarios para la realización este trabajo. Estos pasos se presentan de una manera gráfica en la Figura 1. De igual manera, al final se incluyen los modelos cartográficos correspondientes a cada paso realizado en el procedimiento.

1. Se uniformizaron los archivos shape (mapas iniciales), siendo referenciados a la proyección geográfica, los datos NAD 27 y WGS 84, así como al esferoide de Clarke 1866 para su correcta sobreposición y análisis espacial.
2. A partir de los mapas fuente de los límites estatales, carreteras y puentes, se generó el mapa de referencia general denominado: Carreteras y puentes de la República Mexicana. Este mapa se presenta en la Figura 2.
3. En cuanto a la variable "año de construcción", se seleccionaron de la base de datos los registros correspondientes para generar el mapa de Puentes Construidos en 1990 y Antes.
4. Respecto a la variable "puentes sobre ríos y canales permanentes", se efectuó la selección de los Puentes Localizados Sobre Ríos y Canales, sin considerar los arroyos. La representación cartográfica es presentada en la Figura 3.
5. Con referencia a la "distancia a la línea de costa", se hizo un buffer (área de influencia) a 5 km de las costas, para incluir solamente los puentes muy cercanos a dicho límite, dando lugar a la generación

del mapa respectivo Puentes Ubicados a 5 km o Menos de la Costa.

De igual manera, se creó un buffer a 20 km de la línea de costa y se seleccionaron los puentes totalmente contenidos en esa franja, que además estuvieran localizados sobre ríos permanente y canales, para después obtener el mapa de puentes en buffer a 20 km de las costas/ubicados sobre ríos y canales denominado Puentes Ubicados Sobre Ríos y a 20 km de la Costa (ver Figura 4).

En lo que se refiere a la variable “zona climática”, se hizo una selección de los climas clasificados como seco y semiseco, y se agruparon los puentes totalmente contenidos en tal zona para la obtención del mapa

correspondiente.

- Se generó en la base de datos SIPUMEX\_CORR una columna correspondiente a los municipios donde se ubican más de dos parques, ciudades y/o corredores industriales. Posteriormente, se seleccionaron los puentes ubicados en tales municipios, dando lugar al mapa de Puentes en Municipios con Parques y Corredores Industriales (ver Figura 5).
- Sobre la base de datos depurada entre los pasos 1 a 6 anteriores, se agregaron los campos necesarios para asignar un valor (entre 1 y 0 a cada puente, si cumple o no con cada condición, respectivamente), y obteniendo en seguida una calificación total.

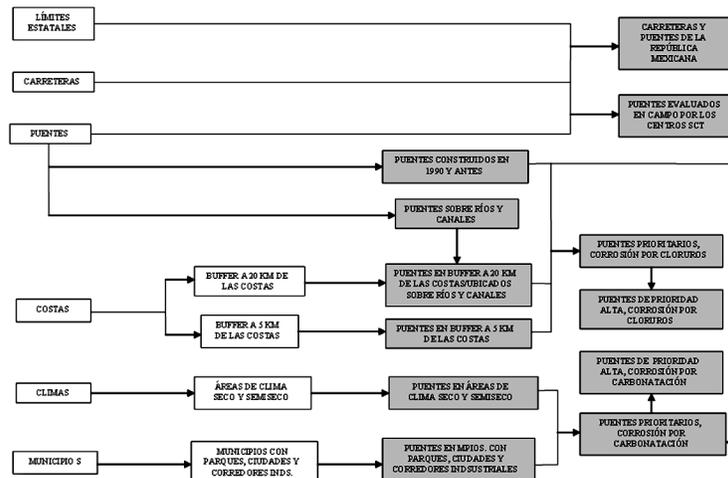


Figura 1. Metodología para generar los mapas para la discriminación de los puentes potencialmente dañados por corrosión.

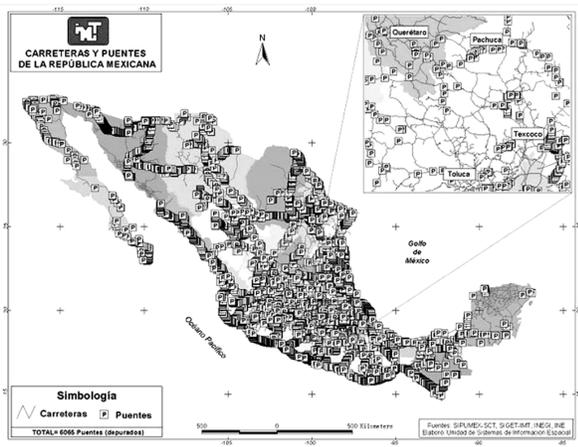


Figura 2. Mapa de carreteras y puentes del inventario utilizado en esta investigación

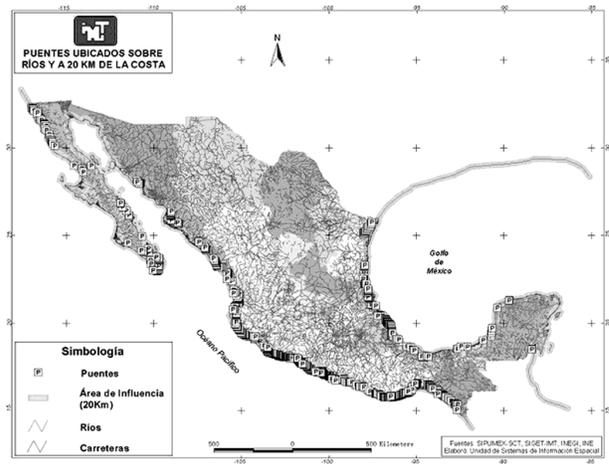


Figura 4. Mapa de puentes ubicados sobre ríos y a 20 Km de las costas del inventario utilizado en esta investigación

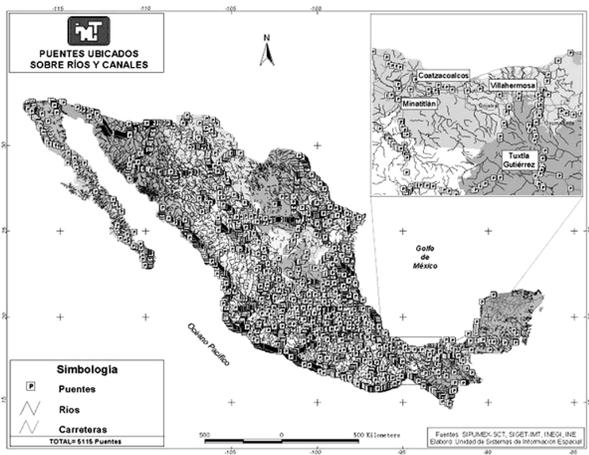


Figura 3. Mapa de puentes ubicados sobre ríos y canales del inventario utilizado en esta investigación

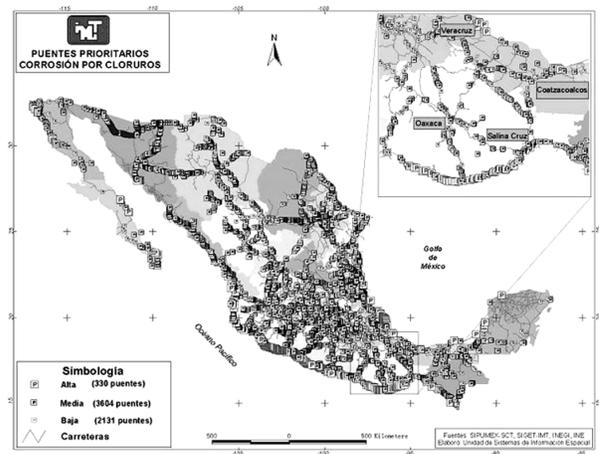


Figura 5. Mapa de puentes ubicados en municipios con parques industriales del inventario utilizado en esta investigación

Es importante precisar que, en esta parte del procedimiento se consideró la calificación asignada por SIPUMEX (de 0 a 5) a cada puente obtenida en el año 2000 durante el programa bianual de inspección de puentes de los centros SCT en cada estado. El valor asignado a esta variable fue de 2 para los puentes con calificación SIPUMEX igual a 4 y 5; un valor de 1 para los puentes con calificación de 2 y 3; y finalmente un valor de 0 para aquellos con calificación de 0 y 1.

8. Con base en la revisión de los resultados preliminares, los valores numéricos totales se transformaron en categorías, de la siguiente manera:

Para Cloruros:

- 0 y 1 = prioridad baja
- 2 y 3 = prioridad media
- 4 y 5 = prioridad alta

Para Carbonatación:

- 0, 1 y 2 = prioridad baja
- 3 y 4 = prioridad media
- 5 y 6 = prioridad alta

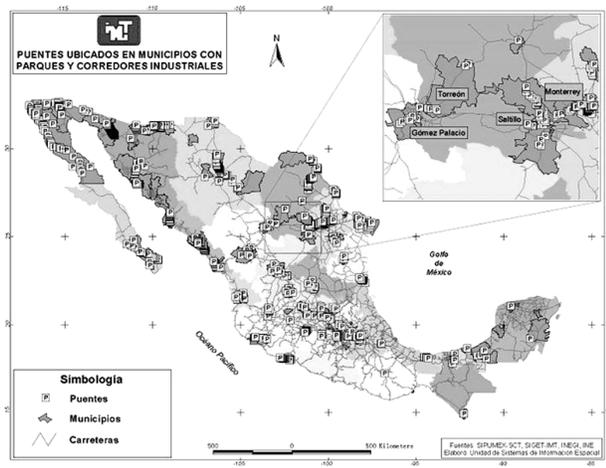


Figura 6. Mapa de puentes priorizados para programa de inspección detallada – corrosión por cloruros

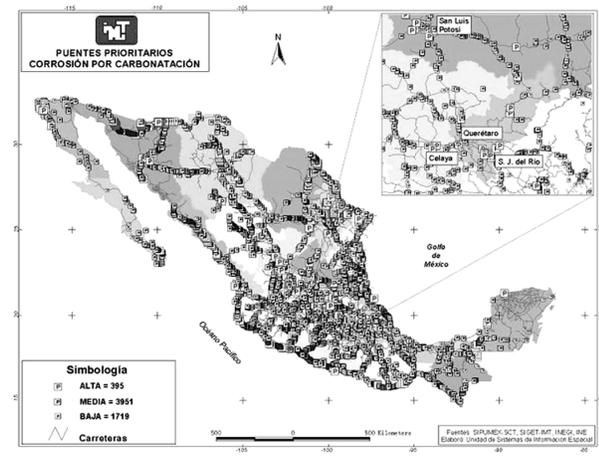


Figura 7. Mapa de puentes priorizados para programa de inspección detallada – corrosión por carbonatación del concreto

A partir de estas tablas de valores por proceso se generaron los mapas sobre prioridades (alta, media y baja) para cloruros (Figura 6) y para carbonatación (Figura 7). Como resultado se obtuvo, para cada proceso analizado (cloruros y carbonatación) un desglose de los puentes según su prioridad para ser inspeccionados en forma detallada y que a continuación se enumera:

- Puentes con Potencialidad a la Corrosión por cloruros:  
Prioridad Alta = 330 puentes, Prioridad Media = 3604 puentes, Prioridad Baja = 2131 puentes
  - Puentes con Potencialidad a la Corrosión por carbonatación:  
Prioridad Alta = 395 puentes, Prioridad Media = 3951 puentes, Prioridad Baja = 1719 puentes
- Cabe aclarar que estos productos (Figuras 2 a

7) fueron sometidos a un proceso final de control de calidad y edición (inclusión en un sistema de coordenadas geográficas, escalamiento, ampliación de áreas representativas, diseño de simbología, etc.), conforme a las normas de diseño cartográfico.

## 6. Evaluación de campo

Como parte de la primera etapa del plan presentado en este estudio, se incluyó el capacitar a todos los residentes de puentes de la DGCC en cada uno de los 31 estados para que ellos realicen una inspección visual en los 6500 puentes que conforman la red de carreteras federales. Sin entrar en mucho detalle el curso impartido se basó en el manual de la Red DURAR (1997) de CYTED.

Cada estado hizo llegar a las oficinas de la DGCC, ubicada en la ciudad de México, un listado de los puentes que presentaban daños por corrosión, como por ejemplo grietas paralela al refuerzo, manchas de óxido en la superficie del concreto y delaminaciones donde mostraran a la armadura corroída. Las oficinas centrales de la DGCC mandaron el listado de estos puentes divididos por estado y proporcionando la clave, nombre y ubicación de cada puente en esta lista. Personal del IMT recabó esta información y generó una base de datos electrónica con únicamente los puentes que tuvieren esta característica (daño visible por corrosión). A estos puentes se le incluyeron los otros campos que con anterioridad se obtuvieron de los resúmenes de SIPUMEX y se realizaron análisis adicionales. Para identificar y priorizar estos puentes se seleccionó a la calificación de SIPUMEX como parámetro principal para dividirlos según estado de la corrosión. Para ello se definió una prioridad de Inspección de los Puentes Dañados por Corrosión en Función de la Calificación SIPUMEX como sigue:

- 0 y 1 = prioridad baja
- 2 y 3 = prioridad media
- 4 y 5 = prioridad alta

Como resultado se presenta en la Figura 8 los puentes que fueron catalogados como “Puentes Prioritarios para ser Inspeccionados en Detalle” a más tardar en un par de años. Este espacio muestra reducido está siendo evaluado en estos momentos por las direcciones DGST y DGCC de la SCT para programar la segunda fase del “Plan Nacional de Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión” en el cual se realizarán las inspecciones

detalladas de los puentes de más alta prioridad. Cabe aclarar que los resultados de campo proporcionaron un espacio más reducido en prioridad alta que los obtenidos por el método descrito anteriormente y que se base en la ubicación geográfica del puente y el entorno que lo rodea. En estos momentos se está realizando una depuración de la información dándole diferentes valores a los parámetros utilizados para así darle más importancia a ciertos parámetros que a otros. La finalidad es que el trabajo de gabinete sea comparable al levantamiento realizado en campo.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados hasta ahora obtenidos indican que el uso de un SIG en la programación de las inspecciones en puentes tiene un enorme potencial. Esta aplicación está sirviendo como base para que las autoridades de conservación de puentes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México incluyan el parámetro de degradación por corrosión y el efecto del medio ambiente en las inspecciones realizadas a su infraestructura. En la actualidad, las bases de datos de agresividad ambiental y los resultados obtenidos en otros proyectos similares como el de MICAT (Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica) están siendo utilizadas para mejorar ésta discriminación de puentes dañados por corrosión. Además se están obteniendo otras bases de datos geoespaciales así como fotografías satelitales, propiedad del INEGI, para incluir parámetros más exactos sobre contaminantes medidos en las ciudades más importantes de México y así delimitar las zonas donde se presenten las concentraciones críticas de  $\text{CO}_2$  y/o  $\text{SO}_2$  que generar corrosión por carbonatación del concreto.

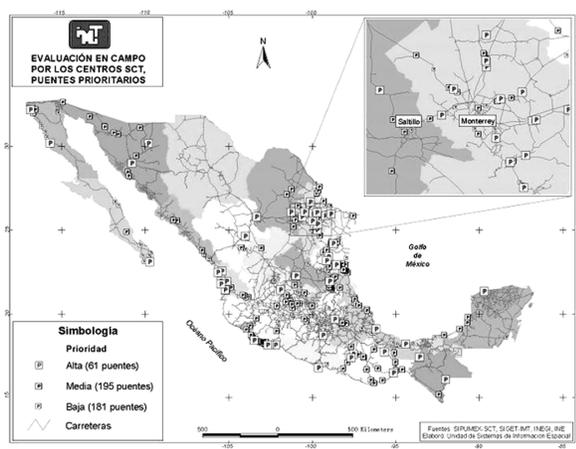


Figura 8. Mapa de puentes priorizados según los resultados de las inspecciones visuales realizadas en campo

## 8. Agradecimientos

Los autores agradecen a las Dirección General de Servicios Técnicos (Ing. Juan Manuel Orozco y Orozco e Ing. Ignacio E. Hernández Quinto) y la Dirección General de Conservación de Carreteras por apoyar económicamente y en la logística para la realización de este proyecto a nivel Nacional, y haber autorizado la divulgación de esta información. También se agradece el apoyo económico parcial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología con el proyecto de Colaboración Interamericana de Materiales (CIAM 2002) No. 42362 para la realización de las actividades de capacitación y difusión del Plan Nacional de Evaluación y Diagnóstico de Puentes Dañados por Corrosión de la SCT durante el periodo 2004-2005.

## 9. Referencias

- García Ortega G., Backhoff Pohls M.A. (1992), "Los sistemas de información geográfica y el transporte," Publicación Técnica No. 32, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Qro., México, ISSN 0188-7297.
- RED DURAR (1997), "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado," Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales, Maracaibo, Venezuela, ISBN 980-296-541-3.
- Torres Acosta A.A. y Sagüés A.A. (2004), "Concrete Cracking by localized Steel Corrosion - Geometric Effects," ACI Materials Journal, V. 1, No. 6, pp. 501-507.
- Torres Acosta A.A., Fabela Gallegos M.J., Muñoz Noval A., Vázquez Vega D., Hernández Jiménez J.R. y Martínez Madrid M. (2004), "Influence of Corrosion on the Structural Stiffness of Reinforced Concrete Beams," Corrosion, V.60, No. 9, pp. 862-872.
- Torres Acosta A.A. y Martínez Madrid M. (2003), "Residual Life of Corroding Reinforced Concrete Structures in Marine Environment," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 15, no. 4, July-August, pp. 344-353.
- Torres Acosta A.A., Martínez Madrid M. y Muñoz Noval A. (2003), "Remaining Structural Capacity of Concrete Beams with localizad Corrosion of the Embedded Reinforcing Steel," Materiales de Construcción, vol. 53, No. 271-272 (Julio-septiembre/octubre-diciembre), pp.125-133.
- Torres A., Martínez M., del Valle A. y Pérez J. (2004), "El Uso de Nuevas Tecnologías en el Mantenimiento,

Conservación en la Infraestructura de Puentes en México que Presenta Daños por Corrosión," Revista Ingeniería de Construcción, V. 19, No. 2, Agosto, pp. 65-72.

