

PREDICCIÓN DEL DETERIORO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS DE NAVEGACIÓN SOMETIDAS A CARGAS HIDRÁULICAS CON LA CADENA DE MARKOV Y LA SIMULACIÓN LATIN HYPERCUBE¹

Guillermo A. Riveros² y Elías Arredondo³

Resumen: El deterioro de los elementos de estructuras hidráulicas metálicas en el sistema de presas y esclusas del país es causado por los efectos combinados de varios fenómenos complejos: desgaste del sistema protector, corrosión, fatiga y fractura, impacto y sobrecargas. Este artículo presenta ejemplos de deterioro en estructuras metálicas sometidas a cargas hidráulicas. También presenta un método para predecir el futuro deterioro basado en las condiciones actuales. El artículo incluye la metodología para desarrollar curvas de deterioro cuando los datos de las condiciones están disponibles.

Palabras clave: cadena de Markov, deterioro, estados de condición, estructuras metálicas hidráulicas.

PREDICTING DETERIORATION OF NAVIGATION STEEL HYDRAULIC STRUCTURES WITH MARKOV CHAIN AND LATIN HYPERCUBE SIMULATION

Abstract: The deterioration of elements of steel hydraulic structures on the nation's lock system is caused by the combined effects of several complex phenomena: loss of protective system, corrosion, cracking and fatigue, impact, and overloads. This article presents examples of deterioration of steel hydraulic structures. A method for predicting future deterioration based on current conditions is also presented. The article includes a procedure for developing deterioration curves when condition state data is available.

Keywords: condition states, deterioration, Markov chain, steel hydraulic structures.

INTRODUCCIÓN

En la ausencia de un modelo mecánico que requiere una contribución cuantitativa de fenómenos complejos basados en efectos ambientales y limitaciones del mantenimiento, los datos de inspecciones de estructuras hidráulicas metálicas pueden usarse para determinar cuándo se requiere la rehabilitación o el reemplazo de la estructura. Aún más importante, en el caso de la rehabilitación también es necesario definir la designación de fondos para aquellas estructuras que realmente lo ameritan. Esto se puede lograr por medio del uso de modelos de deterioro (Bulusu y Sinha, 1997; Madanat et al., 1995; Madanat et al., 1997; Morcoux et al., 2002)

Es indispensable tener información acerca de las condiciones actuales y futuras de estructuras de navegación para planear el mantenimiento y rehabilitación de este sistema estructural vital para la economía del país. Las condiciones actuales de la infraestructura de navegación se determinan por medio de inspecciones periódicas o detalladas según las recomendaciones de los documentos Engineer Regulation 1110-2-100: Periodic Inspection and Continuing Evaluation of Completed Civil Works Structures (HQUSACE, 1995); ER 1110-2-8157: Responsibility for Hydraulic Steel Structures (HQUSACE, 2009) y EM 1110-2-6054: Inspection, Evaluation, and Repair of Hydraulic Steel Structures (HQUSACE, 2001).

La exactitud en la estimación de la condición depende del tipo de inspección realizada. En ocasiones, inspecciones detalladas se llevan a cabo cuando algún problema es observado por los operarios. En casos donde el deterioro llega a

¹ Artículo recibido el 5 de noviembre de 2010 y aceptado en su forma final el 25 de marzo de 2011.

² Information Technology Laboratory, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi, USA. E-mail: Guillermo.A.Riveros@usace.army.mil

³ Information Technology Laboratory, Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi, USA. E-mail: Elias.Arredondo@usace.army.mil

un nivel crítico, se deben realizar reparaciones de emergencia. Reparaciones de este tipo generalmente resultan más costosas que las reparaciones preventivas (anticipadas). Un modelo de deterioro podría usarse para predecir la condición futura de la estructura, anticipar reparaciones, y evitar reparaciones de emergencia. El modelo puede indicar a qué tiempo futuro la condición de la estructura se encuentra por debajo de un nivel satisfactorio y cuándo se le debe dar mantenimiento preventivo para evitar problemas más serios. Para mantener la infraestructura a un nivel de función íntegro es indispensable disponer de predicciones precisas de la condición de la estructura en el futuro.

Los métodos para predecir el deterioro de la infraestructura pueden dividirse en modelos probabilísticos y modelos determinísticos. Los modelos determinísticos son aquellos que no incluyen la aleatoriedad en el cálculo de deterioro del sistema. Estos tipos de modelos calculan la condición futura del sistema como un valor preciso basado en formulaciones matemáticas del deterioro actual. (Ortiz-García et al., 2006). Los modelos probabilísticos consideran los estados de deterioro del sistema como variables aleatorias. Las variables se modelan mediante la distribución de probabilidad subyacente (Agrawal et al., 2008).

EJEMPLOS DE DETERIORO DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS METÁLICAS

Los siguientes ejemplos demuestran resultados como consecuencia de la falta de atención al deterioro de varios componentes de estructuras hidráulicas metálicas.

Las Figuras 1 y 2 muestran la corrosión avanzada en una compuerta de inglete en compartimentos que normalmente se encuentran arriba del nivel del agua. El problema en la estructura de la Figura 1 es que el revestimiento ha sido descuidado y como consecuencia ocurrió corrosión generalizada.



Figura 1: Corrosión en una compuerta.

La Figura 2 ilustra los efectos adversos de la corrosión dentro de un compartimento en una compuerta de un sistema de esclusas. Este caso demuestra las consecuencias de no aplicar protección catódica a la compuerta durante muchos años. Si el sistema de protección no se preserva y no se llevan a cabo reparaciones periódicamente, la corrosión puede causar una pérdida considerable de la sección, resultando en la disminución de la capacidad estructural. A su vez esto puede resultar en clausuras de emergencia para efectuar reparaciones.

Un análisis del deterioro de un bloque de cuña (Figura 3) llevado a cabo por Riveros et al. (2009) indica que el deterioro puede afectar drásticamente el estado de los esfuerzos en los miembros que transfieren las cargas al perno y a su conexión.



Figura 2: Corrosión en un compartimiento de una compuerta de inglete.



Figura 3: Falla de un bloque de cuña.

Si el deterioro es significativo, los esfuerzos pueden llegar a un nivel inaceptable. La concentración de los esfuerzos ocurre alrededor de la zona inferior del deterioro. Esto puede resultar en la sobrecarga de los miembros afectados debido a la redistribución de esfuerzos. Se han observado fallas a pandeo cuando ha ocurrido deterioro severo.

Adicionalmente, el impacto de barcazas es una de las principales preocupaciones con respecto a la infraestructura de navegación (Figura 4) por el nivel de daños que puede ocasionar súbitamente.



Figura 4: Impacto de barcaza en la presa y reclusa Belleville.

La Figura 5 demuestra el brazo de una compuerta radial dañado por una barcaza antes y después de las reparaciones.



Figura 5: Brazo de compuerta antes y después de reparaciones.

Las fallas en los sistemas operativos de presas y esclusas debido a impactos de barcazas pueden resultar en compuertas inoperables, demoras en el tráfico fluvial, o derrames. Fallas catastróficas pueden resultar en derrames incontrolables, pérdida del canal de navegación y en casos extremos podría resultar en pérdidas de vida (véase por ejemplo, ER 1110-2-8157 (HQUSACE, 2009)).

Las vías navegables continúan siendo el mayor método de transporte de una infinidad de productos cruciales para el comercio y la economía de muchos países como los Estados Unidos. A diario se transporta carbón, derivados de petróleo, granos y químicos, entre otras cosas, que son esenciales en todo el mundo. Si las reparaciones necesarias para corregir estas fallas son de larga duración, ocasionando la suspensión del tráfico fluvial, habría que encontrar rutas

alternas y diferentes métodos de transporte para las cargas. Esto puede resultar en pérdida de ventas y de empleos, además de los gastos de reparación que se requerirían.

Las fallas de estructuras metálicas de navegación también pueden ser causadas por fatiga y fractura. Las fracturas debido a fatiga se pueden atribuir a detalles inadecuados durante el diseño, deficiencias en soldadura durante la fabricación, y deficiencias en reparaciones (Figuras 6 y 7).



Figura 6: Ejemplo 1 de una fractura debido a fatiga.



Figura 7: Ejemplo 2 de una fractura debido a fatiga.

CONDICIONES DE ESTRUCTURAS METÁLICAS SOMETIDAS A CARGAS HIDRÁULICAS

La condición del sistema estructural normalmente se clasifica usando números discretos llamados *estados de condición* (Madanat et al., 1995). Los estados de condición han sido usados para clasificar componentes de puentes y tuberías de desagüe (Agrawal et al., 2008; FHWA, 1995; AASHTO, 2002; Thomson y Shepard, 2000). El Departamento de Transportación del Estado de Nueva York usa un sistema de clasificación (estados de condición) del 1 al 7, donde el 7 representa un estado casi perfecto y el 1 representa un estado de falla (Agrawal et al., 2008). AASHTO (2002) recomienda un sistema de clasificación de 1 al 5, donde el 1 representa un estado casi perfecto y el 5 representa un estado de falla.

Sausser y Riveros (2009) desarrollaron un sistema de clasificación semejante al sistema de AASHTO (2002) que usa una escala de 1 al 5. Este sistema indica la condición relativa de los miembros de la estructura con respecto a las cuatro causas más comunes de deterioro: desgaste del sistema protector, corrosión, fractura y fatiga, e impactos o sobrecargas. La condición total de la estructura se calcula usando un promedio ponderado de las condiciones de los miembros individuales. La condición total es una función de los factores de ponderación aplicados a cada miembro. Los factores de ponderación se aplican según la importancia relativa de los miembros.

Para el caso de corrosión, el deterioro ocurre en las siguientes etapas:

1. El miembro está protegido por una capa protectora o de otra manera, o no ha sido sujeto a alguna acción corrosiva. El miembro está en condición perfecta y no se ha deteriorado.
2. El miembro ha perdido parte de su protección o ha sido sujeto a acción corrosiva y se empieza a deteriorar pero no hay pérdida significativa de sección. El deterioro no afecta su función. Las picaduras y la pérdida de sección son insignificantes.
3. El deterioro del miembro continúa y la pérdida de sección es apreciable pero no afecta su función. Las picaduras tienen una profundidad de menos de 1.5 milímetros o el miembro tiene una pérdida de espesor de menos de 3 milímetros.
4. El deterioro del miembro continúa y la pérdida de sección aumenta al punto que puede afectar su función. Es necesaria una evaluación para determinar si la estructura puede seguir funcionando como se requiere, si es necesario efectuar reparaciones, o si debe restringirse su uso. La pérdida de sección es alrededor de 10%.
5. El deterioro del miembro continúa y la pérdida de sección aumenta al punto que el miembro ya no puede funcionar sin riesgo. Es necesario una evaluación para determinar la seguridad de la estructura.

Los estados de condición generales asociados con estas etapas están enumerados y descritos en la Tabla 1.

Tabla 1: Estados de condiciones generales.

Número	Condición	Descripción
1	Protegido	El miembro está sano, funcionando propiamente y no tiene ninguna deficiencia.
2	Expuesto	El miembro muestra señales de deficiencia pero aún está sano y funciona apropiadamente.
3	Atacado	El miembro aún funciona pero la deficiencia ha avanzado. Si el deterioro continúa, su función se verá afectada.
4	Dañado	La deficiencia ha avanzado al punto de impedir la función del miembro.
5	Fracasado	El miembro ya no puede cumplir su función y su seguridad ha sido severamente afectada.

Para cada una de las causas de deterioro (desgaste del sistema protector, corrosión, fractura y fatiga, impactos o sobrecargas) Sausser y Riveros (2009) definen detalladamente los estados de condición.

MODELO DE PREDICCIÓN PARA ESTRUCTURAS METÁLICAS SOMETIDAS A CARGAS HIDRÁULICAS USANDO LA CADENA DE MARKOV

Los modelos de predicción usando la cadena de Markov se han utilizado extensamente para predecir el deterioro de la infraestructura (Madanat et al., 1995; Micevski et al., 2002; DeStefano y Grivas, 1998). Estos modelos se han utilizado principalmente para puentes, pavimentos, y tuberías de desagüe (Ortiz-García et al., 2006; Micevski 2002; Baik et al., 2006). La cadena de Markov es un proceso estocástico discreto que usa el estado actual para describir probabilísticamente el estado futuro.

Para aplicar el modelo de Markov a estructuras de navegación se van a considerar las siguientes suposiciones y observaciones.

- El proceso de deterioración es continuo. Sin embargo, para hacerlo discreto el deterioro se analiza a periodos específicos. Para las estructuras, estos periodos coinciden con las inspecciones periódicas y detalladas.
- La condición de la estructura pasa por un número infinito de estados. Sin embargo, la condición se clasifica con números discretos, por ejemplo usando el sistema de Sauser y Riveros (2009) con una escala de 1 al 5.
- La condición futura de la estructura depende solamente del estado actual. Su estado actual resume toda la información relevante para describir probabilísticamente su estado futuro.

La definición matemática de la cadena de Markov es:

$$P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t, X_{t-1} = i_{t-1}, \dots, X_1 = i_1, X_0 = i_0) = P(X_{t+1} = i_{t+1} | X_t = i_t) \quad (1)$$

donde P es una función de X que representa la probabilidad de pasar del estado i al estado j en el periodo $t + 1$, para todo estado de deterioración $i_0, i_1, i_2, i_{t-1}, i_t, i_{t+1}$ y todo tiempo $t \geq 0$.

La cadena de Markov se considera homogénea si la probabilidad p_{ij} de pasar de un estado i a un estado j en un periodo, no depende del tiempo t en el que se encuentra la cadena. Para todo estado i, j , y todo tiempo t ,

$$P(X_{t+1} = j | X_t = i) = p_{i,j} \quad (2)$$

Las probabilidades de transición se expresan como una matriz cuadrada de dimensión $m \times m$ llamada matriz de probabilidad de transición P .

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,m} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & \cdots & p_{m,m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La probabilidad de que el estado pasa de i a j después de t periodos puede obtenerse multiplicando la matriz P por si misma t veces. Es decir:

$$P_t = P^t \quad (4)$$

Si Q_0 es el vector representando el estado inicial:

$$Q_0 = [q_1, q_2, \dots, q_m] \quad (5)$$

donde q_1, q_2, \dots, q_m representan la distribución de probabilidades de condición, el vector Q_t representando el estado después de t periodos se expresa como:

$$Q_t = Q_0 \cdot P^t \quad (6)$$

Si la condición se encuentra en el primer estado al tiempo inicial, Q_0 se expresa como:

$$Q_0 = [1, 0, 0, 0, 0] \quad (7)$$

lo que está indicando la probabilidad de que la condición que se encuentra en el primer estado es igual a 1 y la probabilidad de cualquier otro estado es igual a 0.

Similarmente, si la condición se encuentra en el segundo estado al tiempo inicial, Q_0 se expresa:

$$Q_0 = [0, 1, 0, 0, 0] \quad (8)$$

Esto indica la probabilidad de que la condición que se encuentra en el segundo estado es igual a 1 y la probabilidad de cualquier otro estado es igual a 0.

Definiendo un vector de condiciones como:

$$R = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5] \quad (9)$$

la condición después de t periodos se puede calcular de acuerdo a:

$$R_{p,t} = Q_t \cdot R' \quad (10)$$

donde

$$R' = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Cuando el proceso se aplica al deterioro, existe la siguiente condición:

$$p_{ij} = 0 \quad \text{cuando } i > j \quad (12)$$

Esta condición ocurre ya que el proceso de deterioro no puede regresar a su estado anterior (de mejor condición) sin intervención externa. O sea, la probabilidad de que el deterioro se mejore (sin intervención) siempre es cero.

Cuando el deterioro llega al estado de falla existe la siguiente condición:

$$p_{m,m} = 1 \quad (13)$$

En este punto el deterioro ha llegado a un estado máximo y ya no puede continuar. La cadena termina en un estado absorbente y la matriz de probabilidades de transición tiene la forma:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & p_{1,3} & \cdots & p_{1,m} \\ 0 & p_{2,2} & p_{2,3} & \cdots & p_{2,m} \\ 0 & 0 & p_{3,3} & \cdots & p_{3,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Los modelos de deterioro típicamente permiten que la condición de deterioro cambie solamente un estado por periodo. En tal caso, la matriz P toma la forma:

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_{2,2} & p_{2,3} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & p_{3,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

En el caso de las estructuras de navegación metálicas, debido a que su inspección requiere vaciar el canal e interrumpir el tráfico fluvial, etc., las inspecciones no se llevan a cabo muy a menudo. Algunas estructuras solamente se inspeccionan cada 25 años o cuando se percibe un problema. Consecuentemente, la condición puede cambiar más de un estado por periodo de inspección. En este caso debe utilizarse la matriz de probabilidad de transición presentada en la ecuación (14).

DERIVACIÓN DE PROBABILIDADES DE TRANSICIÓN

Existen varios métodos para derivar la matriz de probabilidad de transición. Los métodos incluyen opiniones de expertos, regresión lineal, y regresión de Poisson (Madanat et al., 1995). Debido a la actual limitación de datos en condiciones de estado de estructuras de navegación, se propone el uso de un método sintético probabilístico que pueda ser actualizado a medida que estén disponibles más datos para derivar las probabilidades de transición. El objetivo principal del modelo propuesto es que se pueda verificar con datos actualizados. Esto permitirá que el modelo se pueda utilizar con confianza para predecir deterioro futuro de estructuras de navegación. Los datos actuales usados para desarrollar el modelo provienen del Departamento de Transportación del Estado de Nueva York. Se usaron estos casos, no solo por su accesibilidad, sino también porque representan estados de condición de miles de elementos de puentes metálicos a través de 80 años de inspecciones. Además, el deterioro de elementos de puentes metálicos es causado por los mismos efectos que causan el deterioro en estructuras de navegación (desgaste del sistema protector, corrosión, fatiga y fractura, e impacto o sobrecargo). Los casos estudiados se presentan en la Figura 8.

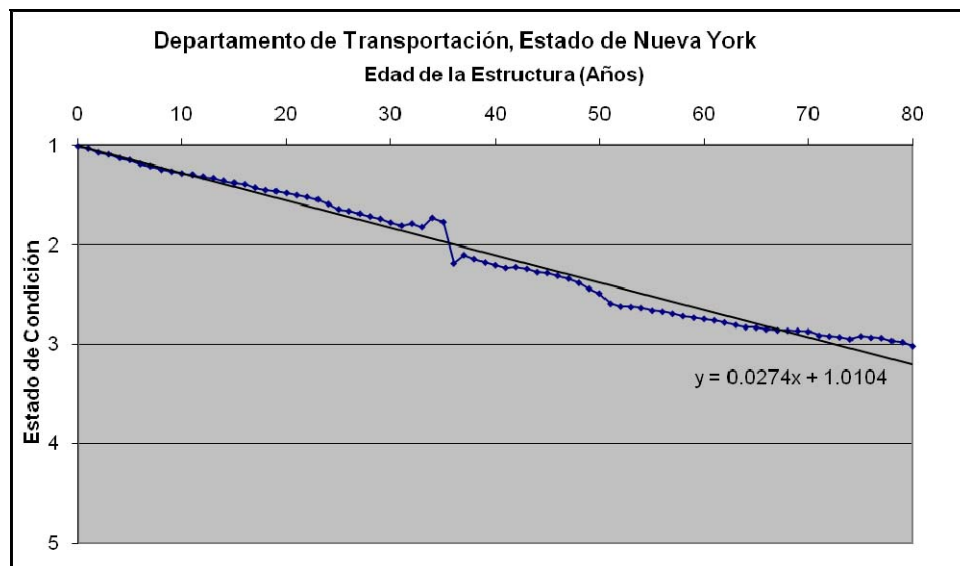


Figura 8: Estados de condición de estructuras del Departamento de Transportación del estado de Nueva York.

Las fluctuaciones en los valores, como se aprecia entre los 30 y 40 años, se deben a que los puntos representan el promedio del estado de condición de varios elementos. Para eliminar las fluctuaciones y reducir los casos de tal manera que su manipulación fuera más manejable, se calculó la línea de regresión presentada en la Figura 8 con la siguiente ecuación:

$$y = 0.0274 x + 1.0104 \quad (16)$$

Usando un intervalo de 10 años, se escogieron puntos a lo largo de la línea de regresión. Los valores correspondientes a estos puntos se calcularon usando la ecuación (16), donde y es el estado de condición y x es la edad de la estructura en años. Estos valores se usaron como el promedio del estado de condición a intervalos de 10 años. Usando una distribución Weibull y el método de simulación "Latin Hypercube", se generaron valores sintéticos aleatorios para representar rangos de estados de condición cada 10 años. Los parámetros de la distribución Weibull se escogieron en cada periodo de 10 años, de tal manera que la distribución de los datos sintéticos tuviera aproximadamente el mismo promedio que los datos reales de la Figura 8.

La Figura 9 muestra los valores sintéticos generados para simular estados de condición a intervalos de 10 años. En cada intervalo se generaron 1,000 valores aleatorios (puntos verticales) que simulan el rango de estados de condición. Los puntos en la línea diagonal en la Figura 9 representan los promedios de estos valores.

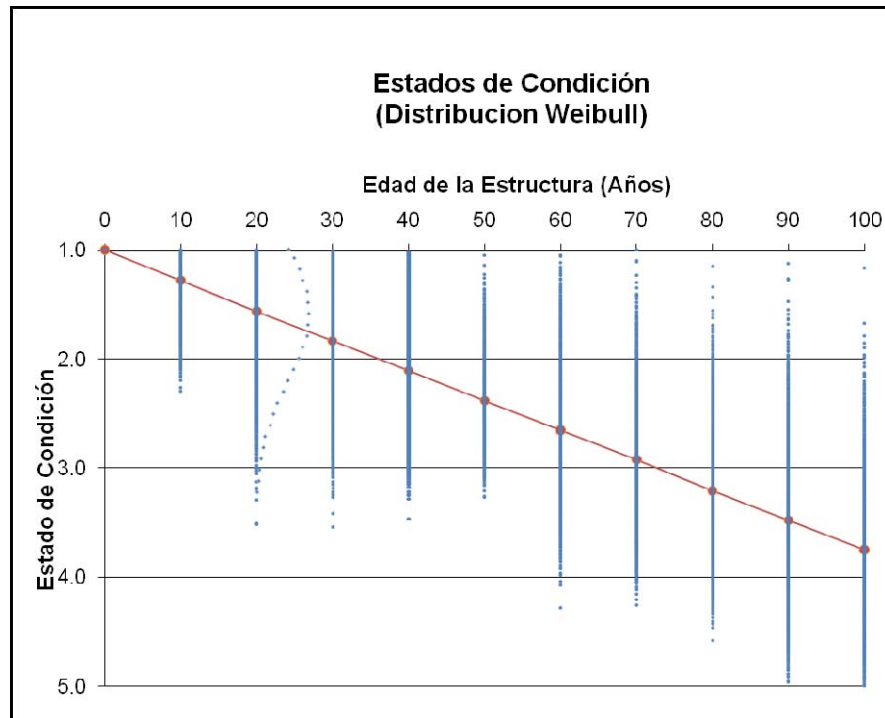


Figura 9: Valores sintéticos de estado de condición.

La Figura 10 muestra la distribución de los valores que se generaron para el intervalo de 20 años. Estos valores también están superpuestos en la Figura 9. Se generaron distribuciones similares para cada intervalo representado en la Figura 9.

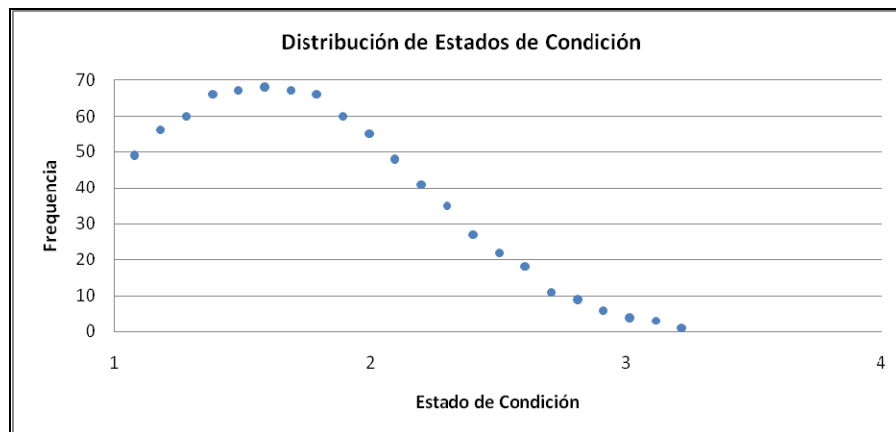


Figura 10: Valores aleatorios para intervalos de 20 años.

Usando los valores de cada intervalo, las probabilidades de transición se calcularon como:

$$P_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{N_i} \quad (17)$$

donde N_{ij} es el número de elementos que cambian de condición i a condición j durante un intervalo, y N_i es el número de elementos que empezaron el intervalo en condición i .

Los valores de probabilidad de transición están enumerados en la Tabla 2.

Tabla 2: Probabilidades de Transición

Estado de Condición	1	2	3	4	5
1	0.973	0.027			
2		0.972	0.028		
3			0.972	0.028	
4				0.973	0.027
5					1.000

Aplicando la cadena de Markov se tiene:

$$P = \begin{bmatrix} 0.973 & 0.027 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.972 & 0.028 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.972 & 0.028 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.973 & 0.027 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix} \quad (18)$$

El estado inicial de una estructura nueva, estando en condición 1 es:

$$Q_0 = [1, 0, 0, 0, 0] \quad (19)$$

y el vector de condiciones es

$$R = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5] \quad (20)$$

Aplicando la cadena de Markov para calcular la condición en el periodo 2 se obtiene

$$P_2 = P^2 \quad (21)$$

$$P^2 = \begin{bmatrix} 0.9469 & 0.0524 & 0.0007 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9456 & 0.0536 & 0.0008 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9447 & 0.0545 & 0.0008 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9460 & 0.0540 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Usando la ecuación (6), el vector Q_t representando el estado después de 2 periodos es

$$Q_2 = Q_0 \cdot P^2 = [0.9469 \quad 0.0524 \quad 0.0007 \quad 0 \quad 0]$$

Y usando la ecuación (10), la condición resulta:

$$R_{P,2} = Q_2 \cdot R' = 1.0539$$

Similarmente se aplicó la cadena de Markov para calcular todos los puntos de la curva de deterioración presentada en la Figura 11.

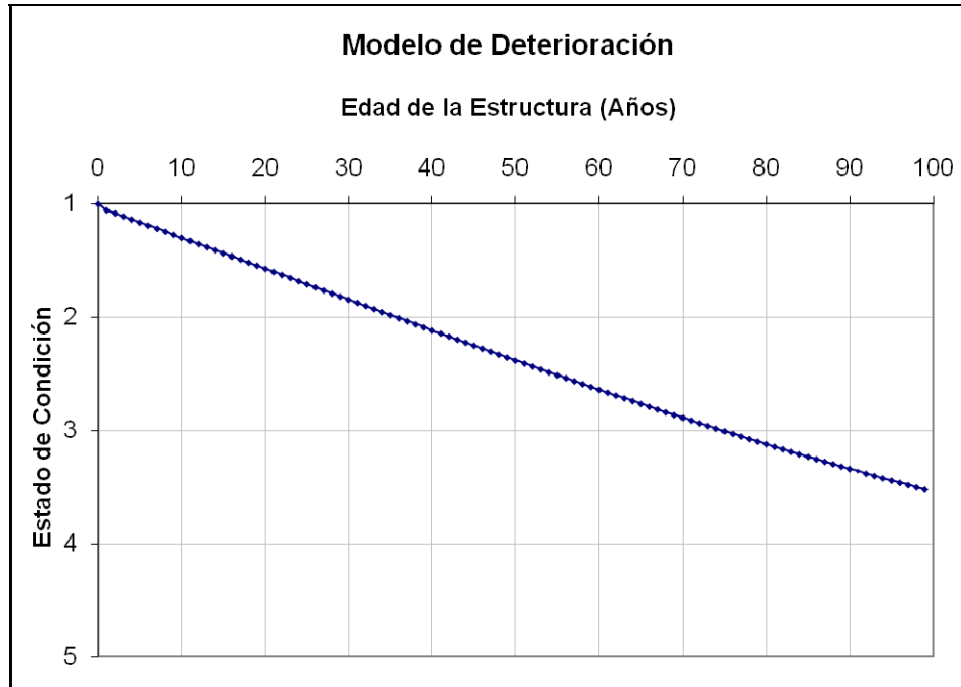


Figura 11: Modelo de deterioro usando la cadena de Markov.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue presentar ejemplos de deterioración de estructuras de navegación y desarrollar un modelo basado en resultados de inspecciones actuales. Consecuentemente, como resultado se desarrolló un modelo de deterioro usando datos reales provenientes de inspecciones del Departamento de Transportación del Estado de Nueva York. Los resultados presentados en la Figura 11 indican que hay una correlación notoria entre el modelo de deterioro y los datos actuales presentados en la Figura 8. Por ejemplo, el modelo indica que el estado de condición llega a nivel 2 a los 35.71 años y a nivel 3 a los 74.79 años. Si comparamos con la Figura 8, ésta indica que el estado de condición llega a nivel 2 a los 36.12 años y a nivel 3 a los 72.61 años. La diferencia entre el modelo y los datos reales es aproximadamente 1%.

Estos resultados sugieren que usando el método presentado en este artículo, es posible desarrollar un modelo de deterioro que refleje resultados reales. Por consiguiente, el mismo puede utilizarse para predecir el deterioro futuro de estructuras. Este modelo representa un punto de partida en la predicción de deterioro, que se puede continuar actualizando y recalibrando a medida que más datos estén disponibles.

Para este estudio se utilizó la distribución Weibull para generar datos sintéticos de estados de condición. Sin embargo, si la curva de datos actuales tuviera diferente morfología, podrían ser utilizadas otras distribuciones (como la normal, logarítmica-normal, etc.).

Además de predecir el deterioro, el modelo puede ser de utilidad en la programación de inspecciones. Actualmente, las inspecciones se programan sin estar correlacionadas con el deterioro anticipado. Con un modelo de deterioro como referencia, estas inspecciones se pueden programar a intervalos sugeridos por el modelo para una mejor anticipación de cuando la estructura debe recibir mantenimiento y evitar reparaciones de emergencia.

El modelo de deterioro se puede aplicar en combinación con un análisis de ciclo vital en la predicción de costos y reparaciones óptimas. Adicionalmente, se puede determinar el punto óptimo cuando las inspecciones sean necesarias para mantener el sistema estructural en un estado de condición confiable.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta investigación fue financiado por el programa de investigación de sistemas navegables del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y el Laboratorio de Tecnología de la Información (ITL, por sus siglas en inglés). Los autores ofrecen su más sincero agradecimiento a la Profesora Doris M. Ramírez del Distrito Escolar de Aguada, Puerto Rico y a Evelyn Villanueva, del Laboratorio de Geotecnia y Estructuras, Centro de Investigación y Desarrollo, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, por sus revisiones editoriales durante la preparación del manuscrito, las cuales fueron fundamentales para la publicación del artículo.

REFERENCIAS

- Agrawal, A. K., Kawaguchi, A. y Qian, G. (2008). "Bridge Deterioration Rates", Transportation Infrastructure Research Consortium, New York State Department of Transportation, Albany, New York.
- AASHTO (2002). "Guide for Commonly Recognized Structural Elements and its 2002 Interim Revisions", American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, D.C.
- Baik, H. S., Jeong, H. S. y Abraham, D. M. (2006). "Estimating transition probabilities in Markov chain-based deterioration models for management of wastewater systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 132, No. 1, pp. 15-24.
- Bulusu, S. y Sinha, K. C. (1997). "Comparison of methodologies to predict bridge deterioration", Transportation Research Record, *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1597, pp. 34-42.
- DeStefano, P. y Grivas, D. (1998). "Method for estimating transition probability in bridge deterioration models", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 4, No. 2, pp. 56-62.
- FHWA (1995). "Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges", Report No. FHWA-PD-96-001, Federal Highway Administration (FHWA), Office of Engineering, Bridge Division, Bridge Management Branch, Washington, D.C.
- HQUSACE (1995). "Periodic Inspection and Continuing Evaluation of Completed Civil Works Structures", Engineer Regulation 1110-2-100, Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers (HQUSACE), Washington, D.C.
- HQUSACE (2001). "Inspection, Evaluation, and Repair of Hydraulic Steel Structures", Engineer Manual 1110-2-6054, Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers (HQUSACE), Washington, D.C.
- HQUSACE (2009). "Responsibility for Hydraulic Steel Structures", Engineer Regulation 1110-2-8157, Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers (HQUSACE), Washington, D.C.
- Madanat, S., Karlaftis, M. G. y McCarthy, P. S. (1997). "Probabilistic infrastructure deterioration models with panel data", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 4-9.
- Madanat, S., Mishalani, R. y Ibrahim, W. H. W. (1995). "Estimation of infrastructure transition probabilities from condition rating data", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 1, No 2, pp. 120-125.
- Micevski, T., Kuczera, G. y Coombes, P. (2002). "Markov model for storm water pipe deterioration", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 49-56.
- Morcous, G., Rivard, H. y Hanna, A. M. (2002). "Modeling bridge deterioration using case-based reasoning", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 8, No 3, pp. 86-95.
- Ortiz-Garcia, J. J., Costello, S. B., y Snaith, M. S. (2006). "Derivation of transition probability matrices for pavement deterioration modeling", *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 141-161.
- Riveros, G. A., Ayala-Burgos, J. L. y Pérez, J. (2009). "Numerical Investigation of Miter Gates", ERDC/ITL-TR-09-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC), Vicksburg, Mississippi.
- Sausser, P. y Riveros, G. (2009). "A System for Collecting and Compiling Condition Data for Hydraulic Steel Structures for Use in the Assessment of Risk and Reliability and Prioritization of Maintenance and Repairs", Report 1, Miter gates, ERDC/ITL TR-09-04, U.S. Army Engineer Research & Development Center, Vicksburg, Mississippi.
- Thomson, P. D. y Shepard, R. W. (2000). "AASHTO commonly-recognized bridge elements: Successful applications and lessons learned", *National Workshop on Commonly Recognized Measures for Maintenance*, June 2000, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.