

Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica

Design of a bridge health index for prioritization of technical interventions in Costa Rica

Giannina Ortiz-Quesada¹, César Garita-Rodríguez², Angel Navarro-Mora³, Gerardo Paez-González⁴, Alejandro Alfaro-Acuña⁵

Fecha de recepción: 8 de mayo, 2023

Fecha de aprobación: 2 de octubre, 2023

Ortiz-Quesada, G; Garita-Rodríguez, C; Navarro-Mora, A; Paez-González, G; Alfaro-Acuña, A. Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, Nº 2. Abril-Junio, 2024. Pág. 144-154.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6718>

- 1 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gortiz@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7639-1499>
- 2 Escuela de Ingeniería en Computación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cesar@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4592-3266>
- 3 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ahnavarro@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0539-7014>
- 4 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: bpaez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-3961-2157>
- 5 Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: alfaro@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0009-0005-8035-9914>

Palabras clave

Puentes; índice; evaluación; monitoreo; salud estructural; priorización.

Resumen

Actualmente, Costa Rica no cuenta con una metodología rigurosa que considere las variables requeridas para calificar la condición de la salud estructural de un puente o estructura de paso. Algunas instituciones utilizan criterios diversos para asignar una calificación a la evaluación de una estructura y esto genera que se obtengan resultados diferentes al priorizar intervenciones. La priorización de los proyectos de infraestructura vial es clave para invertir los recursos de la forma más eficiente posible. En este contexto, este artículo presenta una propuesta que busca estandarizar un índice de la condición de la salud estructural de un puente, que permita priorizar y asignar recursos de forma objetiva. Para este índice se utiliza la evaluación de la condición estructural de elementos críticos, así como matrices de riesgo relacionadas con amenazas sísmicas e hidrometeorológicas. Como resultado, el diseño de este índice involucra el análisis de una gran cantidad de variables mediante criterios técnicos y estadísticos.

Keywords

Bridges; index; evaluation; monitoring; structural health; prioritization.

Abstract

Currently, Costa Rica does not count with a rigorous methodology that considers the proper variables required to assess the structural health condition of bridges. Some institutions use different criteria in order to assign a rating to the evaluation of a structure and this generates different results when prioritizing interventions. The prioritization of road infrastructure projects is key to invest resources in the most efficient way possible. In this context, this article presents a proposal that seeks to standardize an index for the structural health condition of bridges, which allows prioritizing and allocating resources objectively. For this index, the evaluation of the structural condition of critical elements is used, as well as risk matrices related to seismic and hydrometeorological hazards. As a result, the design of this index involves the analysis of a large number of variables through technical and statistical criteria.

Introducción

Costa Rica es un país en desarrollo, con recursos limitados y enfrenta problemas económicos que han limitado su crecimiento, lo que exige que se haga una correcta inversión de los recursos disponibles para la solución de los principales problemas que enfrenta.

En estos problemas se encuentra la condición de la infraestructura vial. Según el Reporte de Competitividad Mundial del 2019 (última medición ya que durante el año 2020 no se calculó dicho índice) del Foro Económico Mundial, Costa Rica ocupa la posición 62 del mundo entre 141 economías, sin embargo, en el tema de calidad global de infraestructura se encuentra en la posición 63. De hecho, infraestructura vial es una de las 3 debilidades más fuertes que el país viene arrastrando desde hace más de 15 años según este reporte [1].

Esto implica que la priorización de los proyectos de infraestructura via es clave para invertir los recursos de la forma más eficiente posible. Para realizar la priorización de estas intervenciones, primero es necesario conocer de forma precisa la condición de las vías y el caso particular

de puentes, los cuales son un elemento primordial en el funcionamiento de la infraestructura vial. El uso de indicadores para la toma de decisiones para la intervención de puentes podría convertirse en un factor para el éxito.

Uno de los indicadores más utilizados para la evaluación de estructuras de puentes a nivel mundial y que son generalmente la base para la priorización de estructuras son los denominados índices de condición del puente (BCI, por sus siglas en inglés) o bien los índices de salud de puentes (BHI, por sus siglas en inglés). Ambos se entienden como un índice que evalúa el desempeño de un puente, desde la perspectiva estructural o funcional [2].

Los usuarios principales de estos índices son los administradores de puentes, para el seguimiento a los objetivos, priorización de proyectos de mantenimiento o reemplazo de puentes y el uso más importante de un BHI es identificar qué estructuras en el inventario están más deterioradas y necesitan urgentemente reparaciones.

Existen varias metodologías para el cálculo de estos índices, basado en el enfoque computacional utilizado, los métodos actuales para desarrollar índices de condición o salud se pueden agrupar en los siguientes cuatro grupos [2] :

Método basado en proporciones

Los métodos basados en proporciones asignan un BCI o número de condición de puente (BCN) basado en el porcentaje de la condición actual a la condición de la estructura cuando era nueva. El objetivo de este método es calcular el valor restante del puente. El BHI de California y el método del índice de salud utilizado por el software de gestión de puentes AASHTOWARETM, BrM (anteriormente Pontis).

Método basado en promedios ponderados

El enfoque de promedio ponderado es adecuado para planificar el mantenimiento del puente y las actividades de rehabilitación. El enfoque estima la condición de toda la estructura combinando las clasificaciones de condición de todos los elementos individuales del puente ponderados por su importancia o contribución a la integridad estructural del puente. Este enfoque es común en sistemas que dependen de datos de inspección a nivel de elemento. Los BCI utilizados en Australia (BCN), el Reino Unido (BCI), Sudáfrica (BCI) y Austria (BCI) son los ejemplos de enfoques de combinación ponderada.

Método de componente en peor condición

El enfoque de componentes en peor condición es común en los sistemas que realizan inspecciones en los componentes clave del puente. Este método se utiliza para extraer los defectos críticos en los componentes del puente. En este enfoque, el BCI se aproxima a la calificación del componente en la peor condición. Algunos estados también usan la peor (más baja) calificación del Inventario Nacional de Puentes (NBI) para informar las condiciones del puente en los paneles de control de desempeño. El Departamento de Transporte de Michigan utiliza la calificación NBI más baja en su Sistema de Pronóstico de Condición de Puente (BCFS). BCFS ayuda a Michigan con las decisiones de selección de proyectos de puentes. Las ICC alemanas y japonesas son ejemplos de este enfoque.

Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos no informan la condición del puente en una escala numérica. Describen una estructura como "Pobre", "Aceptable" o "Buena", según el estado de la condición y la importancia de los elementos bajo investigación. Washington, Florida y otros estados usan las clasificaciones de condición del NBI para clasificar los puentes como "Bueno", "Aceptable" o

“Malo”. El indicador de salud del puente utilizado por Roads and Maritime Services (fusión de Roads and Traffic Authority y New South Wales Maritime) en Sydney, Australia, es un ejemplo de la utilización de este método.

Combinación de métodos

Hay otros BHI que se desarrollaron combinando algunos de los métodos enumerados anteriormente. Un ejemplo, que ya no se usa en los Estados Unidos, son las calificaciones de suficiencia (SR), que combinan el promedio ponderado y los enfoques del componente de peor condición. El SR se utilizó en las decisiones de financiamiento. Además, en este informe también se analiza un método de priorización basado en el riesgo que el Departamento de Transporte de Nueva Jersey (NJDOT) está probando actualmente. Este enfoque combina diferentes estados límite de rendimiento para calcular el riesgo relativo percibido para cada puente.

Existen muchos trabajos científicos recientes que investigan diversos temas relacionados con métodos para cálculo de BCI. Por ejemplo, en [3] se define un marco de referencia para clasificar el nivel de madurez de indicadores de desempeño utilizados en el cálculo de un BCI, pues pueden existir muchos indicadores pero no todos son aptos o relevantes para el índice particular. En la tesis de maestría científica en Ingeniería Civil presentada por [4], se hace una comparación de diferentes BCI para determinar su nivel de adecuación para apoyar escenarios para toma de decisiones asociadas a asignación de financiamiento bajo diferentes niveles de incertidumbre. La resiliencia de un puente (capacidad de recuperación ante un evento que dañe la estructura) incluyendo parámetros como amenazas por región, geología, sismicidad, durabilidad, es un tema actual de investigación[2]. En [5] se presenta una metodología novedosa para cálculo de BCI enfocándose en aspectos de seguridad y confiabilidad de puentes.

Materiales y métodos

El Tecnológico de Costa Rica, por medio de sus centros de investigación, Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) y Centro de Investigaciones en Computación (CIC), pertenecientes a las Escuelas de Ingeniería en Construcción e Ingeniería en Computación, respectivamente; desarrolló el proyecto de investigación: “Propuesta de un índice de salud estructural para puentes (BHI) para Costa Rica” (2019-2020). Este proyecto representa una continuación del trabajo realizado en la última década del grupo de investigación multidisciplinario e-Bridge en el área de desarrollo de modelos y herramientas para el monitoreo de salud de puentes en Costa Rica (ver por ejemplo [6-14]).

Para obtener este índice, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de las metodologías aplicadas a nivel mundial, generando una tabla comparativa de los principales métodos, que incluyó: tipo de índice, metodología de cálculo, principales usos, ejemplos, ventajas y desventajas.

Se analizó la situación particular de Costa Rica y la información disponible, siendo elementos claves el Manual de Inspecciones de Puentes publicado por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), el contenido del inventario de puentes, generado por el Programa de Evaluación de Puentes del CIVCO, con información de más de 1600 estructuras, el análisis de indicadores para la priorización de puentes desarrollado para la Municipalidad del Guarco (ver [15]), indicaciones establecidas para el Diseño Sismorresistente de puentes en Costa Rica, publicado por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) e información disponible sobre riesgos de la Comisión Nacional de Atención de Emergencias y Prevención (CNE).

La información disponible, se comparó con los requerimientos de cada metodología de cálculo, con el fin de verificar su aplicación, además, de valorar los posibles usos.

Posteriormente, se estableció una metodología de cálculo específica, por medio de talleres de trabajo de los investigadores y validándola con actores claves del medio como ingenieros del MOPT y el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), así como otros profesores del programa de Ingeniería en Construcción del TEC.

Para establecer el método de cálculo del BHI, se procedió a definir la función de este índice:

- **Definición:** El BHI es un índice de evaluación del desempeño de un puente, que contempla la perspectiva de la condición estructural del puente, basado en una inspección visual, el nivel de riesgo asociado al entorno y la importancia socioeconómica.
- **Posibles usuarios:** Administradores de puentes, en Costa Rica se identifican como posibles usuarios: MOPT, CONAVI, Municipalidades.
- **Posibles usos:** Establecer un nivel de daño de los puentes y priorizar sus necesidades de intervención.

El segundo paso fue definir la técnica o método de cálculo más apropiado, en este caso se propone el método basado en proporciones, esto debido a que actualmente el mayor problema que presenta el país está relacionado con la conservación de las estructuras de puentes y la priorización de los recursos disponibles, la metodología que más podría generar información para priorización de recursos de acuerdo con el estado del puente es la basada en promedios ponderados.

Sin embargo, por las condiciones del país sería de gran utilidad incluir otras variables, como pueden ser el riesgo y el posible costo de las intervenciones, por lo que finalmente, para el cálculo del BHI se proponen formas de cálculo que combinen el método de proporciones combinando con algunas consideraciones del entorno, relacionadas con la amenaza y vulnerabilidad de las estructuras.

Resultados

El BHI propuesto para Costa Rica, se basa en los resultados obtenidos de las evaluaciones de la condición de las estructuras, utilizando el valor de las inspecciones visuales. La estructura propuesta para el índice se muestra en la figura 1.

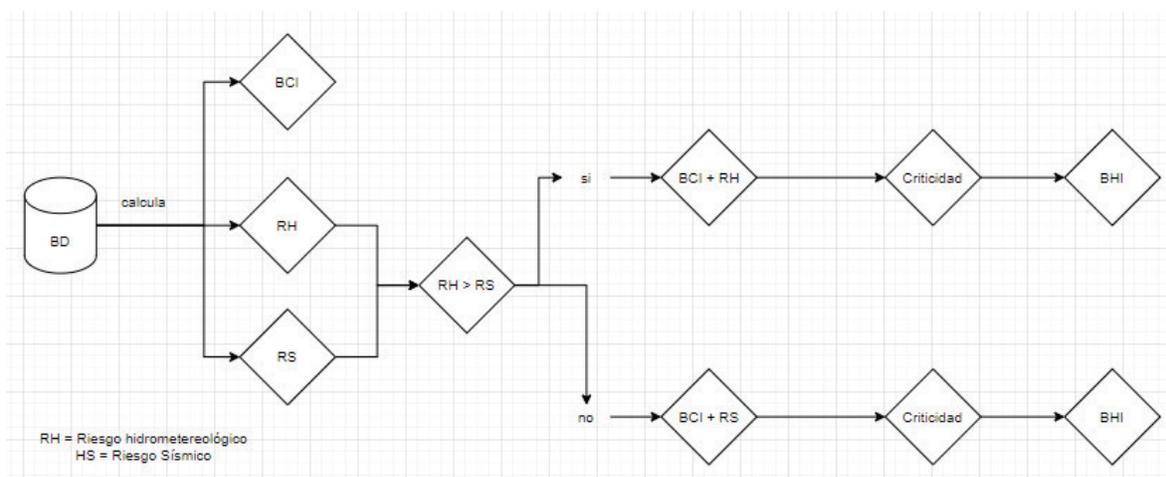


Figura 1. Esquema general para el cálculo del BHI

La base de datos (BD), es el resultado de la inspección visual de daños realizada por el inspector de puentes, adicionalmente se incluye información del entorno del puente.

En el primer nivel el BHI está compuesto por un índice de condición estructura (BCI), una estimación de la amenaza hidrometeorológica (RH) identificada de acuerdo con la ubicación del puente y una combinación entre la vulnerabilidad sísmica de la estructura y la amenaza sísmica identificada (RS).

Cálculo del BCI

La condición estructural del índice se calculó con base en los resultados de la inspección visual de daños realizada en cada puente, esta evaluación se realiza de acuerdo con el Manual de Inspección de Puentes del MOPT [16] y las mejoras propuestas por este grupo de investigación como la evaluación de los apoyos.

La evaluación de la condición estructural se refiere a la evaluación de la seguridad estructural de cada componente y elemento del puente de forma visual. Tiene una escala de 1 a 5, donde 1 es una condición excelente y 5 una condición deficiente.

Para la evaluación se utilizó estructuración indicada en el cuadro 1.

Cuadro 1. Estructuración utilizada para el cálculo del BCI.

Sistema	Componente	Elemento
Puente	Accesorios (*)	Pavimento Juntas de expansión
	Superestructura (**)	Losa Elementos principales Elementos secundarios
	Subestructura (***)	Apoyos Bastiones Pilas

(*) En los accesorios, no se consideró la evaluación de las barandas, ya que estas se evalúan en la condición de seguridad vial.

(**) En la superestructura se está agrupando a evaluar elementos principales (vigas de acero y vigas de concreto) y elementos secundarios (elementos de arrioste y vigas diafragmas).

(***) En la subestructura, se analizaron los apoyos, para lo cual se propuso una escala de valoración, bastiones y pilas.

Basándose en la BD, se calcularon los siguientes indicadores de condición: Índice de Condición de los Accesorios (BCI-Acc), Índice de Condición de la Superestructura (BCI-Sup), Índice de Condición de la Subestructura (BCI-Sub) y finalmente el Índice de Condición del puente (BCI) el cual contempla los anteriores.

El índice está concebido para mostrar valores finales en un rango de 1 a 5 como evaluación de un puente. El índice está compuesto por una estructura jerárquica de: componentes, elementos, y daños.

- **Daño:** En el nivel más bajo del índice, existe un conjunto de valores asociados al nivel de daño de variables asociadas al estado de un elemento particular. Los valores se definen en una escala de 1 a 5 de acuerdo con rúbricas establecidas en tablas de inspección de daños que se utilizan en las inspecciones técnicas de los puentes.

- **Elemento:** Los elementos corresponden con partes estructurales específicas de un puente. Cada elemento considera cierta cantidad de variables de daño con respectivo valor y peso. La suma de los pesos de los daños para un elemento es igual a 1. Algunos elementos pueden estar o no presentes, o variar su ponderación, según el tipo de puente que se está analizando.

$$elemento_i = \sum_{k=1}^n valor\ da\~{n}o_k * peso\ da\~{n}o_k \tag{1}$$

- **Componente:** Los componentes representan una clasificación o agrupación conceptual de los elementos de un puente. Cada componente a su vez considera una ponderación de los elementos que incluye, considerando la evaluación y peso de cada elemento. La suma de los pesos de los elementos es igual a 1.

$$componente_i = \sum_{k=1}^n evaluacion\ elemento_k * peso\ elemento_k \tag{2}$$

Para definir la ponderación de los elementos de cada componente, se utilizó el criterio experto e información obtenida en talleres realizados. Para la ponderación de cada uno de los elementos se utilizó el método Delphi- El primer estudio de Delphi fue realizado en 1950 por la Rand Corporation para la fuerza aérea de Estados Unidos, y se le dio el nombre de Proyecto Delphi, su objetivo era la aplicación de la opinión de expertos a la selección de un sistema industrial norteamericano óptimo y la estimación del número de bombas requeridas para reducir la producción de municiones. La capacidad de predicción de la metodología Delphi se basa en la utilización sistemática de un juicio intuitivo emitido por un grupo de expertos.

Como ejemplo de la utilización del Método Delphi, se presenta el análisis de los daños por evaluar en el elemento pavimento del componente accesorios. Se evalúan ondulación, surcos, baches y sobrecapas de asfalto, no se evaluará el agrietamiento. En la figura 2 se presenta el análisis.

Pavimento	Ondulación	Surcos	Baches	Sobrecapas de asfalto	Sumatoria	Peso
Ondulación		1	0	0	2	0.2000
Surcos	0		0	0	1	0.1000
Baches	1	1		0	3	0.3000
Sobrecapas de asfalto	1	1	1		4	0.4000
					10	1.0000

Figura 2. Ejemplo de utilización Método Delphi para asignar ponderación de daños al pavimento.

El peso de cada elemento en la estructura dependerá de la tipología de cada puente, para este cálculo se han definido 4 tipos de puentes:

- **Tipo 1.** Puente de concreto, con apoyos y pilas. (Caso 01)
- **Tipo 2.** Puente de acero, con apoyos y pilas. (Caso 02)
- **Tipo 1.** Puente de concreto, con apoyos y sin pilas. (Caso 03)
- **Tipo 1.** Puente de acero, con apoyos y sin pilas. (Caso 04)

- **Finalmente**, se obtiene un valor de BCI con un valor numérico entre 1 y 5, utilizando la siguiente fórmula:

$$5\% BCI_{Acc} + 45\% BCI_{Sup} + 50\% BC_{Sub} \quad (3)$$

Riesgo sísmico (RS)

Para determinar este riesgo se calcula la amenaza sísmica y la vulnerabilidad de la estructura valorando su ancho de asiento mínimo, para calcular finalmente la criticidad por sismo.

Para calcular la amenaza sísmica, se requiere determinar la aceleración pico efectiva (Ca), esta se obtiene de los Lineamientos para el Diseño Sismoresistente de Puentes [17]. Una vez calculado el Ca , se calcula la aceleración pico efectiva modificada por presencia de fallas activas cercanas, esta se calcula de la siguiente forma:

$$CaM = Coeficiente \times Ca \quad (4)$$

El valor del coeficiente es 1.2 si hay fallas activas cercanas y 1 si no hay fallas activas cercanas, la fuente para determinar la existencia de fallas es la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención, publicada en sus mapas de amenazas y el Código de Cimentaciones de Costa Rica. Posteriormente se calcula la amenaza sísmica con la siguiente fórmula:

$$Amenaza \ sísmica = \frac{CaM}{0,588} \times 4 - 1 \quad (5)$$

Por otra parte, se determina si el ancho de asiento que tiene el puente cumple con los requerimientos mínimos, para ello se mide el ancho de asiento en sitio (dato tomado de la inspección) y se compara con la fórmula establecida en los Lineamientos para el diseño sismoresistente de puentes [17]. Esta ecuación es una simplificación para estimar el ancho de asiento en un puente de un solo tramo. Sin embargo, se utiliza esta de forma generalizada, como una estimación preliminar de la vulnerabilidad del puente asociada a esta variable.

Para el cumplimiento se compara el ancho de asiento real con el mínimo requerido, se anota 1 si cumple y 5 si no cumple.

Finalmente, el RS será el máximo valor entre el cumplimiento de ancho de asiento y la amenaza sísmica.

Amenaza hidrometeorológica (RH)

Para determinar la amenaza hidrometeorológica, se analiza la amenaza de inundación, la relación del ancho del cauce aguas arriba y aguas abajo del puente, para finalmente calcular la criticidad hidrometeorológica.

En primer lugar, se define si la zona donde se encuentra la estructura es inundable, la fuente utilizada es la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención o la información establecida en el Plan GAM 2030. Si la zona es inundable se asigna un valor de 5, si no se asigna un valor de 1.

Posteriormente se calcula el estrechamiento del cauce, este cálculo se toma del informe del proyecto de extensión "Priorización de estructuras de puentes utilizando indicadores de desempeño. Plan piloto Municipalidad de El Guarco. 2018-2019", realizado por este grupo de investigación, realizando una adaptación a las condiciones que el inspector pueda observar durante la inspección visual de daños.

$$Estrechamiento \ del \ cauce = \frac{Ancho \ del \ cauce \ aguas \ arriba}{Ancho \ del \ cauce \ aguas \ abajo} \quad (6)$$

Con base en este valor se analiza la vulnerabilidad de la estructura, de acuerdo con los valores definidos en el cuadro 2, estos valores fueron establecidos por el grupo de investigadores.

Cuadro 2. Escala de calificación para el estrechamiento del cauce.

Valor del estrechamiento del cauce (E)	Calificación
$1.5 < E$	5
$1.3 < E \leq 1.5$	4
$1.1 < E \leq 1.1$	3
$0.9 < E \leq 1.1$	2
$E \leq 0.9$	1

El otro elemento que se analiza es la altura libre inferior de la estructura, esto permite analizar la capacidad hidráulica de la misma. Este dato es medido durante la inspección en campo. En el cuadro 3 se observa la escala de valoración.

Cuadro 3. Escala de calificación para el estrechamiento del cauce.

Altura libre inferior (h) en m *	Calificación
$h \leq 1.5$	5
$1.5 < h \leq 3.0$	4
$3.0 < h \leq 4.5$	3
$4.5 < h \leq 6.0$	2
$0.0 < h$	1

* Medición en campo, este valor se divide entre 2 cuando no hay evidencia del nivel de agua.

Con estos datos, se calcula el RH, escogiendo el mayor valor entre el estrechamiento del cauce, amenaza de inundación y altura libre inferior.

Cálculo BHI

Para el cálculo de BHI, se toman en consideración el BCI (estructural) y los BCI por sismo e hidrometeorológico (BS y BH), escogiendo el valor más crítico de estos dos, a este valor se le denomina criticidad.

Posteriormente, se introduce una variable relacionada con la importancia socioeconómica, esta se hace utilizando lo indicado en el cuadro 4.

Cuadro 4. Escala para la definición de la importancia económica del puente.

Importancia	Descripción	Características
1	Importancia socioeconómica baja	Otras rutas
2	Importancia socioeconómica media	Ruta terciaria o TPD mayor a 5 mil vehículos
3	Importancia socioeconómica media - alta	Ruta secundaria o TPD mayor a 20 mil vehículos
4	Importancia socioeconómica alta	Ruta primaria o TPD mayor a 50 mil vehículos
5	Importancia socioeconómica extrema	Ruta primaria estratégica con TPD mayor a 50 mil vehículos

Finalmente, para el cálculo del BHI, se utiliza la matriz mostrada en la figura 3, se introduce el valor de la importancia socioeconómica en importancia (columna) y la criticidad de la estructura (fila) que es el valor mayor entre el BCI, BS y BH.

		Criticidad				
		1	2	3	4	5
Importancia	1	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
	3	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	4	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
	5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

Figura 3. Matriz para cálculo del BHI.

Este valor del BHI tiene una escala entre 1 y 5. Con base en los colores observados en la figura 3, se puede decir que los valores en verde se consideran satisfactorios, los amarillos aceptables, los naranjas inaceptables y los rojos deficientes.

Conclusiones

La mayoría de los índices de salud están diseñados para ayudar a las partes interesadas a planificar el mantenimiento del puente y actividades de rehabilitación. Esto es típico en el enfoque de promedio ponderado y los enfoques basados en razones, que calculan el índice de salud general combinando todos los defectos identificados a nivel de elemento.

El índice de salud de puentes BHI propuesto, se puede calcular con información proveniente de las inspecciones visuales de los puentes recopilada en campo y utilizando información existente a nivel nacional como la generada por la Comisión Nacional de Emergencias y Prevención y los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes del CFIA. Esto permitirá un uso mayor del BHI en los procesos de toma de decisiones iniciales, específicamente en la priorización inicial de las posibles intervenciones a realizar en los puentes.

El método propuesto se basa en promedios ponderados, con el fin de exponer la realidad del puente en cuanto a su condición estructural y agrega un análisis del entorno identificando los principales riesgos presentes en Costa Rica, como lo son la sismicidad y las condiciones hidrometeorológicas.

Incluye, además, un análisis básico de la importancia socioeconómica, relacionada con la cantidad de usuarios del puente, basado en el tránsito promedio diario (TPD).

El método es aplicable para los cuatro casos descritos, sin embargo, este puede extenderse a otros casos, realizando un ajuste en la ecuación que pondera los daños por componente presente en el puente.

Referencias

- [1] WEF, Annual Report 2019-2020, World Economic Forum, 2020.
- [2] S. B. Chase, Y. Adu-Gyamfi, A. Aktan, and E. Minaie, Synthesis of national and international methodologies used for bridge health indices, United States. Federal Highway Administration, 2016.
- [3] Maria Pina Limongelli, André Orcesi, and A. Vidovi, "The Indicator Readiness Level for the classification of Research Performance Indicators for road bridges," in Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018, Ghent, Belgium, 2018.

- [4] C. Zhang, "A Comparison among Three Bridge Performance Measures for Allocating Funds," Ohio State University, 2018.
- [5] M. G. Limongelli, Chatzi, E. and Anzllin, A., "Condition assessment of roadway bridges: from performance parameters to performance goals," *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 345-356, 2018.
- [6] G., and C. Garita, "A Business Intelligence Approach to Prioritize Bridge Maintenance Activities," 2022.
- [7] R. Cespedes-Deliyore, A. Ruiz-Barquero, C. Garita, and G. Ortiz, "General Design of a Power-Saving Strategy for a Collaborative Wireless Sensor Network," in XL IEEE Convention of Central America and Panama (CONCAPAN 2022), Panama, Panama, 2022.
- [8] A. Ruiz-Barquero, C. Garita, and G. Ortiz, "Collaborative Sensors Networks for Structural Health Monitoring of Bridges," in XLVI Conferencia Latinoamericana de Informática - CLEI 2020, Loja, Ecuador, 2020.
- [9] C. Garita, G. Ortiz, and J. Mora-Mora, "Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes," *Tecnología en Marcha*, vol. 31, no. 4, pp. 63-72, Octubre, 2018.
- [10] C. Garita, and G. Ortiz, "Development of a Business Intelligence Prototype for Bridge Health Monitoring," in 3rd International Conference on Information Systems and Computer Science - INCISCOS 2018, Quito, Ecuador, 2018.
- [11] C. Garita, and G. Ortiz, "Integrando Información Estratégica para Monitoreo de Puentes Nacionales."
- [12] C. Garita, and G. Ortiz, "e-Bridge 3.0: A Strategic Approach to Structural Health Monitoring of Bridges in Costa Rica."
- [13] G. Ortiz, and C. Garita, "The e-Bridge 2.0 Approach for SHM of Bridges in Costa Rica," 2015.
- [14] C. Garita, and G. Ortiz, "Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges." pp. 489-497.
- [15] G. Ortiz, C. Garita, A. Navarro-Mora, and G. Paez, "Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores," *Tecnología en Marcha*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, Julio-Setiembre, 2021.
- [16] MOPT, Manual de Inspección de Puentes, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007.
- [17] CFIA, Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes, Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2013.