

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-05-2015

INFORME DE INVESTIGACIÓN

ACTUALIZACIÓN DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN VISUAL DE PUENTES

Preparado por:

Unidad de Puentes



San José, Costa Rica
30 de noviembre de 2015



Documento generado con base en el Art. 6 de la Ley 8114 y lo señalado Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Página intencionalmente dejada en blanco

ACTUALIZACIÓN DE LOS CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN VISUAL DE PUENTES LM-PI-UP-05-2015

Muñoz-Barrantes, Jorge ¹; Vargas-Alas, Luis Guillermo ²; Vargas-Barrantes, Silvia ³;
Agüero-Barrantes, Pablo ⁴; Villalobos-Vega, Esteban ⁵; Barrantes-Jiménez, Roy ⁶ y Loria-
Salazar, Luis Guillermo ⁷

¹ Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

² Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

³ Ingeniera Evaluadora Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

⁴ Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

⁵ Ingeniero Evaluador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

⁶ Coordinador Unidad de Puentes PITRA LanammeUCR

⁷ Coordinador general Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) LanammeUCR

Palabras Clave: PITRA, Puentes, evaluación, inspección visual, metodología, deterioros.

Resumen: La Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR, basado en la experiencia de evaluación de puentes existentes y en un proceso de mejora continua decidió desarrollar e implementar una metodología para evaluar visualmente las estructuras de puentes y reforzar los criterios de evaluación que se han estado utilizando. Para el desarrollo de esta propuesta se analizaron los procedimientos utilizados en 12 países, en un esfuerzo de elaborar a partir de la experiencia internacional una metodología propia, adaptada a las condiciones del país y a las necesidades de la infraestructura nacional. Esto permite uniformizar los criterios y minimizar la subjetividad en las evaluaciones de puentes. De igual forma, esta metodología permite incorporar parámetros asociados a la vulnerabilidad sísmica, importancia estratégica de cada puente, grado del deterioro, antigüedad y el efecto de algunas externalidades tales como impacto hidráulico-hidrológico. Uno de los principales retos de esta metodología fue definir una escala de calificación a las estructuras de puentes que permita comprender claramente, tanto la condición actual del puente, como su condición relativa, es decir, en comparación con otras estructuras de puentes existentes de la Red Vial Nacional. EL presente informe pretende ser un documento de referencia y aplicación práctica para la evaluación de estructuras de puentes en Costa Rica.

Referencias

1. AASHTO (2010). AASHTO Bridge Element Inspection Guide Manual. American Association of State Highway and Transport Officials. 1st Edition, USA.
2. CFIA (2013). Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, San José, Costa Rica.
3. FHWA. (1995). Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges. Department of Transport, Federal Highway Administration. Washington DC, USA.
4. NCHRP. (2014). Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices. Report 782. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C., USA.
5. BRIME. (2001). Bridge Management in Europe, Final Report. European Project under the coordination of TRL Ltd, UK.

Muñoz-Barrantes, J., Vargas-Alas, L. G., Vargas-Barrantes, S., Agüero-Barrantes, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., et al. (2015). *Actualización de los criterios para la evaluación visual de puentes LM-PI-UP-05-2015*. San José, Costa Rica: Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.



1. Informe: LM-PI-UP-05-2015		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: ACTUALIZACIÓN DE LOS CRITERIOS PARA EVALUACIÓN VISUAL DE PUENTES		4. Fecha del Informe 30 de noviembre de 2015
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen La Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR, basado en la experiencia de evaluación de puentes existentes y en un proceso de mejora continua decidió desarrollar e implementar una metodología para evaluar visualmente las estructuras de puentes y reforzar los criterios de evaluación que se han estado utilizando. Para el desarrollo de esta propuesta se analizaron los procedimientos utilizados en 12 países, en un esfuerzo de elaborar a partir de la experiencia internacional una metodología propia, adaptada a las condiciones del país y a las necesidades de la infraestructura nacional. Esto permite uniformizar los criterios y minimizar la subjetividad en las evaluaciones de puentes. De igual forma, esta metodología permite incorporar parámetros asociados a la vulnerabilidad sísmica, importancia estratégica de cada puente, grado del deterioro, antigüedad y el efecto de algunas externalidades tales como impacto hidráulico-hidrológico. Uno de los principales retos de esta metodología fue definir una escala de calificación a las estructuras de puentes que permita comprender claramente, tanto la condición actual del puente, como su condición relativa, es decir, en comparación con otras estructuras de puentes existentes de la Red Vial Nacional. EL presente informe pretende ser un documento de referencia y aplicación práctica para la evaluación de estructuras de puentes en Costa Rica.		
8. Palabras clave PITRA, Puentes, evaluación, inspección visual, metodología, deterioros.	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 48
11. Informe preparado por: Ing. Jorge Muñoz Barrantes, Ph.D. Unidad de Puentes	12. Informe preparado por: Ing. Luis Guillermo Vargas Alas Unidad de Puentes	13. Informe preparado por: Ing. Silvia Vargas Barrantes Unidad de Puentes
Fecha: 30/11/2015	Fecha: 30/11/2015	Fecha: 30/11/2015
14. Revisado por: Ing. Pablo Agüero Barrantes, M.Sc. Unidad de Puentes	15. Revisado por: Ing. Esteban Villalobos Vega Unidad de Puentes	
Fecha: 30/11/2015	Fecha: 30/11/2015	
16. Revisado por: Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR	17. Revisado por: Ing. Roy Barrantes Jiménez Coordinador Unidad de Puentes	18. Aprobado por: Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA
Fecha: 30/11/2015	Fecha: 30/11/2015	Fecha: 30/11/2015

Página intencionalmente dejada en blanco

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	JUSTIFICACIÓN	10
2.1	Situación actual de la evaluación de los puentes en Costa Rica	11
3.	OBJETIVOS	12
4.	ALCANCES	13
5.	RESUMEN DE LOS MÉTODOS PARA DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN EN PUENTES MEDIANTE INSPECCIÓN VISUAL.....	14
6.	MÉTODO PARA LA CALIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN EN PUENTES.....	19
6.1	Descripción de la calificación y variables asociadas	21
6.2	Elementos del puente.....	24
6.3	Pasos para determinar la clasificación.....	26
6.4	Necesidad de intervención en un puente basado en la calificación brindada	36
7.	APLICACIÓN, REPRODUCIBILIDAD Y LIMITACIONES DEL MÉTODO	38
7.1	Reproducibilidad del método.....	40
7.2	Limitaciones de la metodología.....	43
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
8.1	Consideraciones de implementación y mejoramiento de los resultados	45
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

Página intencionalmente dejada en blanco

1. INTRODUCCIÓN

La Unidad de Puentes (denominada de aquí en adelante como UP) del PITRA-LanammeUCR tiene como competencia establecida mediante el artículo 6 de la Ley N°8114 de Simplificación y Eficiencia Tributarias la evaluación de la condición estructural y funcional de puentes ubicados a lo largo de la Red Vial Nacional y de la Red Vial Concesionada. Esta tarea se ha venido ejecutando por medio de la evaluación visual de estructuras de puentes, así como de evaluaciones detalladas en los puentes considerados de más alta importancia para la infraestructura vial del país. A raíz de esta experiencia y en búsqueda de la mejora continua, la UP decidió desarrollar e implementar una metodología para evaluar visualmente las estructuras de puentes y reforzar los criterios de evaluación utilizados hasta la fecha.

La evaluación de condición basada en una inspección visual es una herramienta básica para la Gestión de Puentes. El principal objetivo es velar por la integridad y segura operación de los puentes, alertando de forma temprana sobre deterioros observados y de esta forma salvaguardar la seguridad de los usuarios del sistema de transporte y las inversiones buscando además la optimización de las labores de mantenimiento y rehabilitación. Con esto, un sistema de gestión de puentes involucra todas las actividades necesarias, principalmente de carácter técnico/ingenieril y administrativo, para el manejo seguro y operacional de las estructuras de puentes.

Realizar inspecciones visuales periódicamente y con un método estandarizado propicia la pronta atención de daños incipientes. Por medio de una inspección visual realizada por inspectores calificados, se identifican deterioros que podrían afectar la capacidad de carga del puente o que constituyen evidencia de que un estado límite de diseño fue excedido, dando lugar a que se realicen investigaciones más profundas realizadas por especialistas. Estas inspecciones pueden comprender ensayos no destructivos o destructivos, generación de modelos estructurales, análisis hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos. La profundidad de la investigación depende de la peligrosidad de los daños encontrados, la importancia del puente, la información requerida para el análisis de seguridad estructural o de la existencia de dudas luego de la inspección visual inicial.

La propuesta metodológica desarrollada en esta publicación busca calificar la condición de los puentes no solo desde el punto de vista estructural, sino incluyendo también temas de suma importancia como la seguridad vial, la durabilidad de los elementos y su vulnerabilidad ante amenazas sísmicas e hidrológicas. Todos estos aspectos se analizan en un contexto donde la importancia económica y operativa del puente es también tomada en cuenta.

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 9 de 48
------------------------------	---	----------------

A partir de una calificación global asignada al puente se dan lineamientos generales sobre la urgencia de atención y medidas de mantenimiento, reparación, readecuación o remplazo que se recomiende para un puente específico. Los resultados son útiles para apoyar decisiones administrativas sobre las labores que sean necesarias a realizar en la estructura.

Además de brindar una calificación global al puente, la metodología desarrollada posibilita el análisis específico para múltiples elementos de la estructura evaluando individualmente aspectos como su relevancia estructural dentro del sistema del puente, el grado o nivel de la deficiencia observada producto de daños ambientales, de uso o defectos en el puente, y finalmente las posibles consecuencias que la falla del elemento conlleva para los usuarios y la economía. Al identificar por separado los elementos, se provee información útil para realizar un análisis individual de los componentes del puente que presenten mayores inconformidades con el fin de enfocar los esfuerzos de conservación, rehabilitación e inclusive consideraciones de diseño hacia la prevención del daño; más aún en componentes clave para asegurar la integridad estructural.

Este informe presenta la metodología propuesta para la evaluación visual de la condición de puentes en servicio e incluye: una justificación, objetivos y alcances, un resumen bibliográfico de las técnicas de evaluación visual utilizadas a nivel internacional, el desarrollo y explicación de la metodología, ejemplos prácticos de aplicación y uso de los resultados, un análisis de los resultados y limitaciones, y por último, conclusiones y recomendaciones para su implementación.

2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años el LanammeUCR se ha convertido en un referente en materia de infraestructura de transporte en el país. Por medio de sus aportes en la creación de conocimiento especializado, transferencia de tecnología y soporte técnico a la Administración desde la fiscalización de obras viales, ha adquirido gran proyección nacional e importancia como actor en el desarrollo de la infraestructura vial. Siendo los puentes elementos vitales del sistema de transporte del país y considerando que su colapso puede ocasionar tanto pérdida de vidas humanas como pérdidas económicas considerables, la UP asume la labor de fiscalización de puentes asignada mediante la ley 8114 con gran responsabilidad, buscando siempre la mejora continua y el perfeccionamiento de las técnicas utilizadas. Relativo a esto, la UP, amparada en las competencias asignadas en la ley 8114, busca impulsar el desarrollo de la Ingeniería y la Gestión de Puentes en Costa Rica mediante la creación de conocimiento y difusión de información respecto a las mejores prácticas en el diseño, construcción, evaluación y rehabilitación de estructuras de puentes.

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 10 de 48
------------------------------	---	-----------------

El ejercicio continuo de la evaluación visual de puentes y el estudio de diversas metodologías para la clasificación de su estado de deterioro ha permitido a la UP percibir algunas limitaciones de la metodología que ha venido empleando como criterio de evaluación visual. Si bien se parte del grado de daño observado en los elementos, usualmente no se han tomado en consideración aspectos como las amenazas a las que está expuesta la estructura, su importancia y su edad. La incorporación de estos conceptos en un método de evaluación puede concluir que dos puentes con el mismo nivel de deterioro obtengan resultados distintos en virtud de su importancia, edad y vulnerabilidad, convirtiendo las evaluaciones en una herramienta que permite visualizar de forma más adecuada la necesidad de intervención y con ello de mayor utilidad para los entes encargados de la gestión de puentes. Por otra parte, se identificó que las metodologías de evaluación utilizadas presentan alguna subjetividad según la interpretación que realice el inspector sobre la relevancia estructural y repercusión de los daños. Esto implica que para lograr una evaluación adecuada, el inspector debe contar con experiencia y conocimientos avanzados en estructuras de puentes.

En un proceso de mejora continua, se busca con esta propuesta generar una metodología que enmarque los criterios de relevancia estructural y repercusión de los daños que se puedan observar en los elementos de un puente con el fin de homogenizar los criterios de evaluación, reduciendo el componente subjetivo para obtener resultados con alto grado de reproducibilidad y facilitar que más inspectores se incorporen al proceso de fiscalización de puentes en la red vial nacional y en la red vial cantonal. Todo esto con el fin de brindar información de mayor utilidad para la toma de decisiones por parte de la administración y por ende brindar un mayor apoyo al Sistema de Gestión de Puentes del país.

2.1 Situación actual de la evaluación de los puentes en Costa Rica

Luego de años de pobres prácticas de conservación en puentes, Costa Rica presenta un escenario donde muchos puentes exhiben deterioros serios que requieren de atención pronta. Para enfrentar esta situación, se debe iniciar por conocer el estado de la integridad de cada puente, lo cual parte de una calificación cualitativa de su condición. En el país se busca desde el año 2007 la utilización del SAEP (Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (MOPT 2007)). El SAEP nació de una iniciativa de la Agencia para la Cooperación Internacional del Japón, JICA, y hasta la fecha no se tiene conocimiento de su implementación para la gestión de puentes luego de casi 10 años.

Si bien el uso del SAEP constituye un avance en la forma en que se gestionan los puentes en Costa Rica, es importante señalar algunas limitaciones y dificultades de uso identificadas y que vienen a ser solucionadas mediante un análisis específico de la condición para cada puente. Como

ejemplo de esto, en la campaña de inspección de puentes que se realiza en la actualidad para alimentar de datos al SAEP se ha observado que si bien los datos se introducen al sistema, estos también se utilizan directamente para la toma de decisiones, más cuando son requeridas labores prontas de rehabilitación. Este es el tipo de acción propia de una evaluación de condición y no el resultado de una priorización previa para la atención de puentes. Cabe mencionar aquí que la utilidad de un sistema como el SAEP para priorizar inversión es mayor cuando existe un buen conocimiento del estado de los puentes, situación que no corresponde con la realidad actual de Costa Rica en donde apenas se cuenta con información en detalle de pocas estructuras.

Retomando el punto anterior, una de las limitaciones importantes del SAEP es que si bien reporta al administrador información de inventario y daño, no da explícitamente una calificación que describa la condición de suficiencia estructural del puente. Esta es una carencia importante en particular para puentes con daños estructurales serios o alarmantes que requieran atención inmediata y para los cuales otros aspectos que pondera el SAEP, como funcionalidad y obsolescencia, no tienen relevancia desde el punto de vista específico de la seguridad estructural del puente. Por otra parte, el sistema de asignación de pesos del programa puede no priorizar una condición seria o alarmante que ocurre en uno o pocos elementos cuando los demás componentes del puente están en buen estado. Otra carencia importante de señalar es que incluye de forma muy limitada y en ocasiones omite aspectos de gran importancia para evaluar puentes como la seguridad vial y algunas consideraciones propias del diseño sísmico.

Tomando en cuenta estas observaciones, la Unidad de Puentes del LANAMME-UCR desarrolló un método estándar para la determinación de la condición de los puentes para uso en sus informes de fiscalización de puentes en la Red Vial Nacional. Con esto se busca también proporcionar a la administración de información adicional útil que beneficie la gestión de puentes en nuestro país.

3. OBJETIVOS

A manera de respuesta a la problemática que se comenta en los apartados anteriores, se definen de forma puntual los siguientes objetivos necesarios para desarrollar, validar e implementar la metodología propuesta de evaluación de condición de puentes en Costa Rica mediante la técnica de inspección visual:

1. Resumir y comparar las diferentes prácticas internacionales de calificación de daños basadas en evaluación visual de puentes existentes.

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 12 de 48
------------------------------	---	-----------------

2. Desarrollar una metodología de calificación de puentes basada en evaluación visual bajo criterios que consideren la ponderación de los daños, la valoración de la relevancia de los elementos en el puente, la importancia operativa y económica de la estructura y la consideración de amenazas que puedan afectar el puente.
3. Aplicar la metodología en puentes que han sido evaluados visualmente por la Unidad de Puentes para validar los resultados obtenidos.
4. Comparar los resultados de ejemplos de aplicación realizados por evaluadores distintos con la misma información.

4. ALCANCES

Los criterios para calificar el estado de los puentes que se desarrollan en esta metodología son aplicables a evaluaciones visuales y por ende sujetos a las limitaciones que este tipo de valoración conlleva. Por una evaluación visual se entiende como el reconocimiento de los elementos estructurales y no estructurales accesibles del puente por parte de un ingeniero o técnico calificado con el fin de evaluar su estado de deterioro. El resultado de una calificación de la condición depende de una adecuada inspección visual donde obviar daños importantes o sobrevalorados puede producir calificaciones erróneas, en donde son más sensibles aquellos elementos de mayor importancia estructural. Como parte de la evaluación visual se incluye la revisión de los planos de diseño del puente u otros que ayuden a comprender el funcionamiento estructural del puente.

En este método no constituye un análisis de evaluación de la seguridad estructural, verificación de la capacidad de carga, capacidad hidráulica, o las condiciones portantes de los terrenos. Los criterios de calificación del método asumen un análisis íntegro de los hallazgos observados en cada elemento del puente para determinar su condición cualitativamente basándose en el tipo, la severidad y la extensión de los daños en el elemento y las consecuencias de la falla del elemento sobre el sistema del puente. La caracterización del daño se puede homogenizar mediante un catálogo de daños para puentes. El desarrollo o implementación de dicho catálogo de daños está fuera de los alcances de esta metodología. Sin embargo, este catálogo de deterioro está en proceso de ejecución en la UP.

Finalmente, un análisis de la condición brinda parámetros iniciales valiosos para realizar estudios de ciclo de vida, no obstante, este tipo de estudios no son el objetivo prioritario de esta propuesta por lo que no se profundiza en aspectos como estimación de la progresión del daño, tema que requiere el uso de modelos de deterioro y muy posiblemente un análisis de causas del mismo.

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 13 de 48
------------------------------	---	-----------------

5. RESUMEN DE LOS MÉTODOS PARA DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN EN PUENTES MEDIANTE INSPECCIÓN VISUAL

A nivel mundial se pueden encontrar una gran variedad de Sistemas de Gestión de Puentes (denominado de aquí en adelante como BMS, por las siglas *Bridge Management Systems*). Estos sistemas incluyen herramientas informáticas para análisis y almacenamiento de datos, sistemas de calificación de daños y herramientas para ayudar en la toma de decisiones. Los BMS más difundidos son aquellos desarrollados principalmente en los países europeos, los Estados Unidos (PONTIS, BRIDGIT) y Japón (Gatulli 2005).

Uno de los principales insumos de estos BMS es la evaluación de la condición estructural del puente y su entorno. La evaluación visual es el primer paso para el diagnóstico de la condición actual de una estructura (que contempla tanto aspectos de seguridad estructural como de servicio) y la predicción de su deterioro a futuro. Estos son insumos esenciales para definir estrategias de mantenimiento periódico, reparación, readecuación o si fuera el caso de remplazo del puente.

Es importante aquí diferenciar entre una evaluación de condición y una evaluación de seguridad estructural. En la evaluación de condición estructural se indica el estado de conservación del puente y se califica según ese estado. Por otro lado, una evaluación de la seguridad estructural constituye en cambio un análisis en donde se parte de la resistencia actual de los componentes del puente y las condiciones actuales de carga. La seguridad se evalúa en términos de factores parciales de seguridad o índices de confiabilidad. Una evaluación de condición estructural puede incluir un análisis de seguridad.

Comúnmente una evaluación de condición brinda información sobre la severidad y extensión de los daños y defectos observados, incluyendo en algunos casos las posibles causas de las deficiencias, los procesos de deterioro y el impacto de estos en la seguridad y servicio de las estructuras. Los principales objetivos de un informe de evaluación de condición en puentes se pueden resumir en los siguientes (Casas 2007, BRIME 2001):

- Detectar procesos de deterioro, indicando la severidad y extensión de las deficiencias observadas.
- Indicar la condición global del puente y sus componentes.
- Calificar el puente tomando en cuenta la urgencia de su reparación y definir estrategias de mantenimiento.

Existe en la bibliografía diversidad de metodologías para describir la condición estructural de un puente. La mayoría de estos métodos brindan no solo un grado de deterioro de la estructura sino que también dan recomendaciones sobre las medidas de reparación y urgencia de atención. La descripción de 15 metodologías utilizadas en 12 países se resume en el Cuadro 1 (tomadas de BRIME 2001, COST-345 2002, Yanev 2007, Casas 2007, NCHRP 2007, Gattulli 2005, y Tamakoshi & Kobayashi 2006) y se realiza una comparación de los métodos según el número de niveles de calificación (*rating*), el uso de catálogos de daño y de índices que aplican tanto para la evaluación de condición del puente como para su priorización de atención.

En la columna “variables y observaciones” del Cuadro 1 se detallan aquellos aspectos relevantes sobre las consideraciones de cada procedimiento para calificar un puente dentro de alguna categoría. Es importante destacar que para muchos de los procedimientos se analizan múltiples componentes del puente individualmente y luego se pondera su peso para calificar con base en el componente más crítico.

Las metodologías que se presentan en el Cuadro 1 son distintas de un país a otro. En algunos países como Alemania, Noruega y Suecia se establecen ítems de calificación no solo para la seguridad estructural, sino también para la seguridad vial, la durabilidad e inclusive, en el caso de Noruega, para aspectos ambientales y estéticos. En estos países, por lo general, los puentes son sujetos a buenas prácticas de mantenimiento por lo que la evaluación da mayor enfoque a aspectos como la seguridad vial e inclusive la estética.

Para los casos de Japón y Taiwán, se introducen en las calificaciones aspectos relacionados con la protección de las estructuras contra los efectos adversos de las amenazas naturales, en particular consideraciones sísmicas. El método utilizado en California y el método propuesto por Hearn (Yanev 2007) están fundamentados en un análisis de la progresión del deterioro en los componentes y los costos de reparación relacionados con las distintas etapas de deterioro. Esto es congruente con criterios utilizados en la metodología de ciclo de vida (*life cycle*), técnica que va ganando relevancia entre los administradores de puentes. Para el caso del *CoRe element method* utilizado por CALTRANS y detallado por la AASTHO (2010), las etapas de deterioro son: protegido, expuesto, atacado, dañado y falla/colapso.

Finalmente Gattulli (2005) propone una calificación basada en probabilidad de falla de los elementos. Este tipo de análisis por confiabilidad puede ser de utilidad cuando se tienen que ponderar condiciones de carga distintas, principalmente en el caso de eventos extremos con largos periodos de retorno para los cuales es posible asociar probabilidades anuales de ocurrencia de un daño en función de las características de vulnerabilidad del puente analizado.

Cuadro 1. Características de metodologías de análisis de condición estructural en puentes

REGIÓN O AUTOR	ÍNDICE O INSTITUCIÓN	NIVELES DE RATING	GRADOS DE DAÑO	VARIABLES Y OBSERVACIONES
Alemania	RIEBW-PRUF Índice Z_{ges} 1,0 a 4,0	6 niveles	5 grados de daño 0 - 4	Evalúa el daño estructural por componente, seguridad vial y durabilidad. Ecuación incluye factor por extensión del daño y número de ocurrencias de este.
Austria	Índice S	6 niveles 1 - 6	-	Incluye tipo, extensión e intensidad del daño. Destaca la importancia del componente o elemento estructural y urgencia de intervención.
Dinamarca	DANBRO	6 niveles 0 - 5	-	Análisis por componente. La evaluación global no puede ser mayor al componente en peor estado.
Finlandia	FINNRA Índice KTI	5 niveles 0 - 4	4 grados de daño 1 - 4	Da un peso a cada componente estructural. Variables comprendidas: coeficientes de condición estructural, urgencia de reparación, clase de daño. Toma en cuenta todos los componentes para el cálculo del KTI con peso mayor del peor elemento. Utiliza un catálogo de daños para la inspección.
Francia	LCPC SETRA	6 niveles 1, 2, 2E, 2S, 3, 3U	2 a 3 (dependiendo del elemento)	Uso de catálogo de daños y rating asignado a cada parte del puente (3 partes). La condición final depende del elemento crítico evaluado en cada parte.
Noruega	-	4 niveles 1 - 4	-	Catálogo de daños "Inspection Handbook for Bridges". 4 niveles aplicables para 4 condiciones: capacidad de carga (letra B), seguridad vial (T), incremento costo mantenimiento (V) y ambiente/estética (M)
Reino Unido	Índice TA valores entre 8 a 50	5 niveles 5 - 1 1 es peor condición	4 grados A, B, C, D extensión y 1, 2, 3, 4 severidad	4 grados de daños para evaluar severidad y extensión del daño. Evalúa 33 elementos. Da recomendaciones de reparación (código por tipo, ej. P = pintura) y priorización (H, M, L; ej. L = Low)
Suecia	-	4 niveles 0 - 3	-	Evaluación por componentes para capacidad de carga (BC), seguridad vial (S) y durabilidad (D). Se toma el valor máximo obtenido en el componente
Suiza	-	5 niveles 1 - 5	-	Nivel 6: cuando el componente no se inspeccionó. La misma escala se utiliza tanto para todo el puente como para cada elemento.
USA	NBI - FHWA	10 niveles 9 - 0 0= colapso (CoRe : 5 niveles)	3 Condiciones (Bueno, Regular, Pobre)	Escala de 9 - 0 para la condición general del puente, condición del tablero, de la superestructura y la subestructura. Análisis por CoRe elements que da 5 niveles de condición de los elementos (<i>Protegido, Expuesto, Atacado, Dañado y Falla</i>). Sistema de banderas para puentes riesgosos.
California	CALTRANS Health Index HI 100 a 0	5 niveles	-	Deterioro en términos de la pérdida económica. Evalúa valor inicial y actual del componente, número de componentes por condición estructural, costo de la falla del componente (usa análisis por CoRe element).
Japón	MLIT Índice con valor de 0 a 100	6 niveles A, B, C, E1, E2, M	5 grados de daño 1 - 5	Nivel adicional S: se requiere profundizar investigación. La condición está basada en la urgencia del mantenimiento o atención inmediata del puente. La evaluación se realiza en 3 ejes: resistencia a carga, seguridad vial y resistencia a desastres.
Taiwán	Taiwán Central University	4 niveles	-	Da peso a los componentes y relaciona su condición con la extensión y relevancia del daño, así como con la urgencia de atención.
Propuesta "Hearn"		5 niveles	-	Describe 5 estados de avance del deterioro en la vida de servicio: <i>Protegido, Expuesto, Vulnerable, Atacado y Dañado</i> .
Propuesta "Gattulli"		5 niveles I - V	-	Presenta índices de probabilidad de ocurrencia asociada a cada nivel de deficiencia.

También, es de interés analizar cuáles componentes del puente se evalúan en cada metodología. En el Cuadro 2 se detallan los componentes principales que son evaluados para algunas de las metodologías expuestas en el Cuadro 1. El Cuadro 2 fue elaborado en algunos casos filtrando elementos particulares para el análisis de alcantarillas y siguiendo la información proporcionada por AASTHO (2010), Yanev (2007), Casas (2007), Tamakoshi & Kobayashi (2006), FHWA (1995) y el formulario BE11/07 (HA 2007). Además están resaltados aquellos componentes del puente que han sido nombrados en tres o más ocasiones como elementos de valoración explícitos con el fin de observar con facilidad mayor cuales son más frecuentes. En ocasiones, el uso de términos como superestructura o subestructura contempla evidentemente una serie de elementos que, al pertenecer todos al mismo componente, no requieren de un análisis especial por separado.

En el Cuadro 2 se puede observar una amplia gama de elementos que se analizan de forma distinta en cada método. Esto indica que si bien los tipos de puentes que se construyen a nivel mundial siguen características y técnicas constructivas similares, el enfoque específico e importancia que se le da a cada uno de los elementos son distintos, según la experiencia propia de cada país.

Por ejemplo, para países del norte de Europa como Suecia o Dinamarca, donde la cantidad de puentes a evaluar no es grande y las condiciones de mantenimiento son buenas, el enfoque del método profundiza en aspectos y labores de mantenimiento antes que en reparaciones o sustituciones. Por otro lado, el método utilizado por el CALTRANS se enfoca principalmente en la estructura del puente y no en aspectos circundantes como el estado de los rellenos de aproximación, obras de protección de impacto o erosión y drenajes.

Los métodos de Japón, Suecia, Finlandia y Taiwán sugieren un peso que destaca la relevancia del elemento dentro del sistema estructural del puente. Estos índices se pueden comparar con algunas propuestas como la de Rashidi & Gibson (2011) con su *Structural Significance Factor* (factor de relevancia estructural), que tiene como objetivo dar un mayor peso en el método a aquellos componentes cuya falla pueda incurrir en graves consecuencias desde el punto de vista estructural.

Cuadro 2. Listado de elementos principales evaluados por metodologías

Elemento	Elementos principales evaluados por país										Factor SSF ^Y 1-4
	US ^V CoRe	DK	GB ^I	JP ¹ 0-1	JP ² 0-1	SE* 1-4	DE	FI* 0-1	TW* 2-8		
Relleno aproximación			x							3	
Losa aproximación	x										
Barrera aproximación										2	
Subestructura	x			0.2	1.0		x	0.7			
Aletones y muros		x	x			3				5	2
Protección de talud		x				3				3	
+ Bastiones	x		x							6	2
- Cuerpo		x									
- Pedestales		x				4					
- Cimiento	x	x							6		
+ Pilas	x	x	x								4
- Protección pilas									6		
- Cimiento pilas	x								8		
- Columna	x		x								
- Viga cabezal	x						x				4
Cimientos General	x		x			4	x				2
Anclajes							x				
Cuerdas y cables	x						x				
Apoyos	x	x	x	0.2	0.8	4	x			5	3
Superestructura	x						x	1.0			
+ Tablero	x	x		0.6	0.2	4				7	3
- Losa concreto	x		x								
- Placas o rejilla	x		x								
Impermeabilización	x	x	x			1	x				
Elemento 1 ^{er} de carga						4					
Cerchas superiores	x		x								
Placas Gusset	x										
Elemento 2 nd de carga						4					
+ Vigas	x										4
- Principales	x	x	x	1.0	0.4				8		
- Vigas de piso	x	x		0.2	0.2						
Diafragmas	x	x	x						6		
Arriostres	x	x	x	0.2	0.2						
Refuerzo sísmico										5	
Viga de borde						4		0.2			
Elementos Preesforzados	x						x				
Barreras vehiculares	x	x		1.0 ^I		2		0.4	3		1
Superficie de ruedo	x	x	x			1	x	0.3	3		
Otras obras superficiales								0.5			
Acera y bordillo		x							2		1
Juntas de expansión	x	x	x	0.8 ^I		1		0.2	6		1
Sistema de drenaje		x	x			1	x		4		
Obras de protección			x				x				
Obras canalización									4		
Ductos de servicio			x								
Maquinaria			x								
Ubicación puente								0.1			
Otros		x					x	0.2			

*: indica el peso o relevancia asignada al elemento

^I: Para evaluación de seguridad vial.

^Y: Structural Significance Factor propuesto por Rashidj & Gibson (2011);

^I: No incluye información sobre arcos y mampostería; ^V: No incluye todos los elementos

¹²: Para Japón se incluyen los componentes analizados para Load Resistance (1) y Resistance to Disaster (2)

6. MÉTODO PARA LA CALIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN EN PUENTES

La metodología que se presenta a continuación para evaluar puentes en la Red Vial Nacional toma en cuenta los muchos aspectos mencionados en las secciones anteriores. El método sintetiza las consideraciones de interés para el contexto costarricense según el análisis realizado de los métodos extranjeros estudiados y la experiencia propia de la UP obteniendo un método propio, capaz de describir el estado de progresión del deterioro y sus posibles consecuencias sobre la estructura. El conjunto de aspectos incluidos en el desarrollo del procedimiento se resumen en la Figura 1.

En la Figura 1 se puede observar que en muchos casos existe una interrelación entre distintos elementos evaluados; por ejemplo, un tipo de deterioro particular puede afectar a un componente del puente y recíprocamente la mala conceptualización o funcionamiento del componente puede promover la ocurrencia de daño en el mismo componente o en otros. El método propuesto busca también profundizar en consideraciones particulares para condiciones de carga distintas a aquellas de uso (como el tránsito) y de deterioro ambiental, tomando en cuenta los aspectos sísmicos e hidrológicos que comúnmente han afectado a los puentes de Costa Rica. En el esquema se introduce el concepto de consecuencia de falla, gracias al cual se incorporan modificaciones relacionadas con la importancia estructural de los componentes del puente en función del tipo de falla, sus repercusiones (económicas y pérdidas de vidas) y la importancia funcional del puente.

En la metodología se debe determinar la importancia estratégica del puente según las recomendaciones de los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013) y se debe investigar o estimar la fecha de construcción de la estructura. Estos dos aspectos son de importancia ya que la magnitud de eventos como sismos o inundaciones varía según la vida útil remanente de la estructura y su importancia describe el nivel de desempeño mínimo requerido.

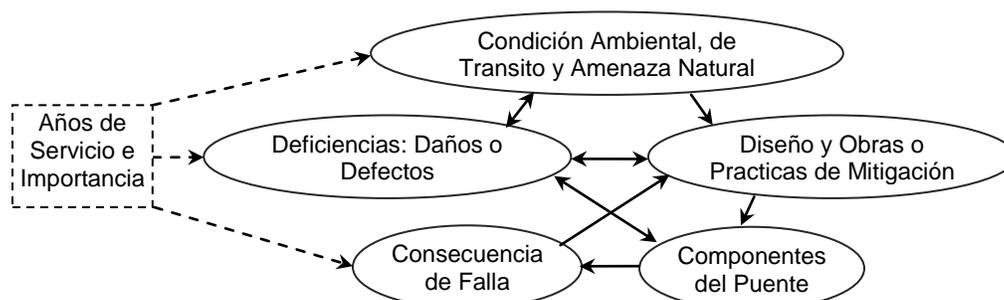


Figura 1. Aspectos involucrados en esta propuesta de calificación de la condición de puentes

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 19 de 48
------------------------------	---	-----------------

También desde el punto de vista de la afectación ambiental y por tránsito, el deterioro guarda una relación incremental lógica relacionada con el envejecimiento del puente. Para el caso de la importancia, esta categorización podría indicar también una mayor o menor exposición a fenómenos como la fatiga ya que los puentes de mayor relevancia están sujetos a un mayor número de ciclos de carga por su condición de operación.

La propuesta contempla no solo aspectos estructurales enfocados a salvaguardar la integridad de la estructura, sino también aspectos relacionados con la seguridad de los usuarios (seguridad vial) y labores de conservación que promueven puentes durables. En la metodología se ponderan en conjunto aspectos estructurales con otros ítems mediante la consideración de las consecuencias de falla o funcionamiento inapropiado del componente; por ejemplo un aspecto de seguridad vial grave para los usuarios, como la ausencia de barreras vehiculares en el puente, se califica de forma severa tomando en cuenta el riesgo alto de pérdida de vidas. Es importante recordar que otras variables que se podrían tomar en cuenta para la calificación del puente y que no se incluyen en este estudio son la calidad de las labores de inspección y las prácticas de mantenimiento.

La valoración de la condición del puente depende inicialmente de una apropiada inspección visual objetiva, llevada a cabo siguiendo un procedimiento estandarizado. Obviar daños importantes durante la inspección o sobrevalorar los daños conlleva calificaciones erróneas. Adicionalmente, la práctica de labores de inspección periódicas ayuda a detectar daños incipientes y propiciar su pronta atención. Las inspecciones periódicas efectivas afectan de forma positiva la condición del puente y ayudan a comprender las necesidades de conservación y causas del deterioro.

En esta calificación de condición se incluyen recomendaciones asociadas a la urgencia de atención de la estructura, labores de reparación y mantenimiento, o estudios adicionales necesarios de realizarse. Dentro del alcance de la metodología propuesta se contempla, como se detallará posteriormente, una serie de recomendaciones generales mínimas necesarias según el estado en que se encuentra la estructura. Es preciso profundizar en este aspecto a futuro con el fin de generar una serie de prácticas estandarizadas y codificadas (ej: evaluación en Reino Unido (HA 2007)) vinculadas a un manual de conservación de estructuras de puentes.

A continuación se detallan los niveles de calificación propuestos en este estudio para los puentes costarricenses. Esta calificación se obtiene sintetizando los conceptos mencionados en la Figura 1 a través del uso de una serie de variables. Es importante señalar, previo a la explicación detallada de la calificación, que si bien esta busca brindar información útil a la administración para la toma de decisiones, no está concebida como una herramienta suficiente para la priorización de inversiones en puentes.

6.1 Descripción de la calificación y variables asociadas

Previo al desarrollo de esta metodología, en la UP se utilizaba el sistema de calificación resumido en el Cuadro 3. Para determinar la calificación, el inspector elegía según su experiencia y conocimientos los elementos que presentaban mayor daño y los categorizaba dentro de una de las calificaciones mostradas. En informe, el inspector resumía los daños observados que permitían calificar el puente. En algunos puentes, se presentaba el caso de que la calificación en alguna categoría se daba solamente por uno o dos daños.

Cuadro 3. Niveles de calificación utilizados desde el 2010 en la UP para evaluación de la condición

Clasificación	Descripción del estado de conservación
Mantenimiento general	No se han observado daños importantes. Podrían existir daños mínimos en elementos no estructurales. Estos daños no implican un riesgo para la seguridad de los usuarios del puente. Los daños requieren ser reparados durante los trabajos de mantenimiento rutinario que se debería realizar. Por ejemplo: acumulación de maleza y sedimentos sobre la calzada y en los accesos al puente, obstrucción de los drenajes del puente y sus accesos, daños menores en las barandas existentes y falta de señalización.
Regular	Se han observado daños en elementos no estructurales y daños mínimos en elementos principales. Estos daños implican un riesgo bajo para la seguridad de los usuarios. Se requiere brindar mantenimiento y realizar reparaciones mínimas lo antes posible. Por ejemplo: daños mayores en barandas, decoloración o pérdida de la señalización del puente (líneas de centro o de borde), faltante de captaluces o delineadores verticales, oxidación localizada y baches en los accesos del puente.
Deficiente	Se observan daños en elementos principales como vigas, losas, bastiones y pilas. Estos daños no implican una reducción en la capacidad del puente. Además existen daños que afectan la funcionalidad del puente. Es necesaria la intervención inmediata para evitar que el daño se extienda o empeore y se convierta en crítico. Por ejemplo: daños en juntas de expansión que requieren su sustitución, ausencia de barandas, refuerzo expuesto, corrosión en elementos de acero, inicio de erosión del cauce, comienzos de socavación, falta de mantenimiento en dispositivos de amortiguamiento y rotura o pérdida de pernos en conexiones de elementos secundarios.
Crítico	Se observan daños severos en elementos principales como vigas, losas, bastiones y pilas. Estos daños podrían implicar una reducción en la capacidad del puente y podría ser necesario colocar una restricción de carga. Cuando el puente se encuentra en este estado puede requerir de una intervención inmediata y la realización de estudios para determinar la capacidad de carga. Entre los daños que implican este estado se pueden mencionar: agujeros en losas, grietas en una y dos direcciones en losas, grietas estructurales en elementos principales (grietas por cortante y flexión), pérdida importante de sección en los elementos de acero por corrosión, longitud de asiento insuficiente, socavación avanzada en pilas y bastiones, rotura o pérdida de pernos en conexiones entre elementos principales y grietas en placas de conexión.

La calificación propuesta consta de 6 niveles como se muestra en el Cuadro 4. Luego del estudio de otras metodologías internacionales como las descritas en el Cuadro 1 y un análisis profundo sustentando en los años de experiencia acumulados en la Unidad de Puentes del LANAMME-UCR, se determinó que el uso de 6 niveles es apropiado para reflejar la condición general de los puentes en Costa Rica. En cada uno de estos niveles se parte del supuesto que para todo puente en la Red Vial Nacional se cuenta con programas de mantenimiento rutinario. La decisión de aumentar los grados de daño con respecto a los 4 niveles que se utilizaban anteriormente (ver cuadro 3) responde al hecho de que muchos de los puentes eran evaluados como críticos desde el punto de vista de conservación debido a que requieren de una atención pronta para evitar los futuros daños, pero no necesariamente presentan una condición muy riesgosa desde el punto de vista estructural, lo que puede llevar a incorrectas interpretaciones del estado del puente. Esta situación se solventó incrementando en 3 los niveles que corresponden aproximadamente al estado crítico anterior.

Cuadro 4. Niveles de calificación propuestos para puentes en Costa Rica

Categoría	Condición	Descripción	
		Integridad Estructural y Seguridad Vial	Necesidad de Atención
1	SATISFACTORIA	Estado bueno. Sin daño o daños son leves. La estabilidad estructural, seguridad vial y durabilidad están asegurados	Mantenimiento rutinario (Debe estar programado para todos los puentes de la Red Vial Nacional)
2	REGULAR	Deterioros ligeros que deben ser tratados por aspectos de durabilidad o progresión del daño. Deficiencias en aspectos de seguridad vial	Reparaciones se programan en conjunto con el siguiente mantenimiento rutinario del puente
3	DEFICIENTE	Deficiencia importante pero los componentes del puente funcionan aún de forma adecuada. Daño o defecto en seguridad vial peligroso	Es necesario programar la reparación previo al próximo mantenimiento rutinario
4	SERIA	Puente estable pero con deterioro significativo en uno o varios elementos estructurales primarios, o falla en secundarios. Si no se trata la proliferación del deterioro, este podría conducir a una situación inestable a futuro. Deficiencia en seguridad vial muy riesgosa para los usuarios	<u>Atención pronta.</u> Se debe atender pronto el puente para detener la progresión del daño. Se debe atender una situación peligrosa en la seguridad vial de forma prioritaria incluyendo el señalamiento de la situación vial riesgosa
5	ALARMANTE	Situación crítica. La estabilidad del puente puede estar comprometida en un periodo de tiempo corto gracias a la progresión del daño. Procurar reparación o tratamiento inmediato para asegurar estabilidad y evitar daños irreversibles en los elementos	<u>Atención prioritaria.</u> Se debe señalar la condición estructural peligrosa del puente y los trabajos de reparación son prioritarios. Evaluar la capacidad estructural residual del puente para juzgar si es necesario restringir la carga permitida
6	RIESGO INACEPTABLE o FALLA INMINENTE	Condición de deterioro inaceptable en puentes de importancia muy alta o situación de puente inestable con riesgo alto de colapso de la estructura. Daño severo en un elemento crítico o daños severos extendidos sobre varios elementos principales. Daño irreversible que posiblemente requiera el cambio del puente o la sustitución de elementos dañados	<u>Atención inmediata.</u> Cerrar el puente o restringir el paso de vehículos pesados (según criterio de la Administración). Evaluar necesidad de colocación de soportes temporales o un puente temporal. Estudio estructural del puente y propuesta de reparación o cambio del puente

Cabe mencionar que los sistemas de evaluación modernos tienden a reducir los niveles de calificación a 4 o 5 (ej. CoRe element method (FHWA 2005)). Esto ocurre debido a que en países como los Estados Unidos el principal enfoque de la Gestión de Puentes ha evolucionado hacia labores de mantenimiento y conservación. De forma separada, para daños potencialmente peligrosos, algunos estados Estadounidenses utilizan el sistema de banderas, como el utilizado por el New York State DOT (Yanev 2007), donde se etiquetan los puentes según el nivel de riesgo de colapso en Naranja o Rojo, y en donde existen además banderas para valorar condiciones peligrosas de seguridad vial.

Para calificar el puente dentro de alguna de las categorías de condición mostradas en el Cuadro 4, se evalúan tres variables, las cuales son:

- **Grado de Daño (GD):** Esta es posiblemente la variable de mayor importancia en la metodología. Ésta cuantifica el daño observado en una escala del 0 al 3. En este ítem se incluyen una serie de deficiencias que pueden ser causadas por efecto de las cargas, condiciones ambientales, defectos constructivos comunes (como insuficiente recubrimiento) o defectos de diseño del puente.
- **Relevancia Estructural (RE):** Relacionado con el nivel de importancia del elemento respecto en el sistema del puente. Aplica a todos los componentes del sistema del puente y no solo a aquellos con una función estructural explícita. Los valores para esta variable *RE* van del 1 al 4. El método de cálculo del *RE* varía según se trate de componentes regulares del puente o de aquellos cuya función es la protección de la estructura en caso de sismos o eventos hidrológicos, como crecidas o inundaciones. Su valor depende no solo de la función del componente, sino también de las posibles consecuencias de la falla del elemento.
- **Factor de Consecuencia de Falla (FCF):** Esta variable toma en cuenta los efectos de la falla de alguno de los componentes del puente en términos económicos, de pérdida de vidas o lesiones a los usuarios y de la importancia del puente para el funcionamiento adecuado de la carretera a la cual pertenece. El valor de esta variable se determina tomando en cuenta la importancia operacional del puente, la Relevancia Estructural (*RE*) y el tipo de falla probable de los elementos. El uso de parámetros como el *FCF* es consistente con la filosofía de diseño e inspección de estructuras basado en análisis de confiabilidad (*reliability-based*) propuesta por la NCHRP (2014).

6.2 Elementos del puente

Luego de un análisis de los elementos del puente como el realizado mediante el uso del cuadro 2 y observando aquellos de los aspectos del puente en que se busca enfatizar mediante el uso de esta metodología, se presenta en los cuadros 5 y 6 un listado de elementos del puente que se evalúan en este método. Muchos de los elementos nombrados en los cuadros se muestran esquemáticamente en la figura 2. En los cuadros se clasifican los elementos según estos formen parte de la superestructura, subestructura, seguridad vial/accesorio/acceso, o si su función es de protección ante eventos como sismos o crecidas de los cuerpos de agua.

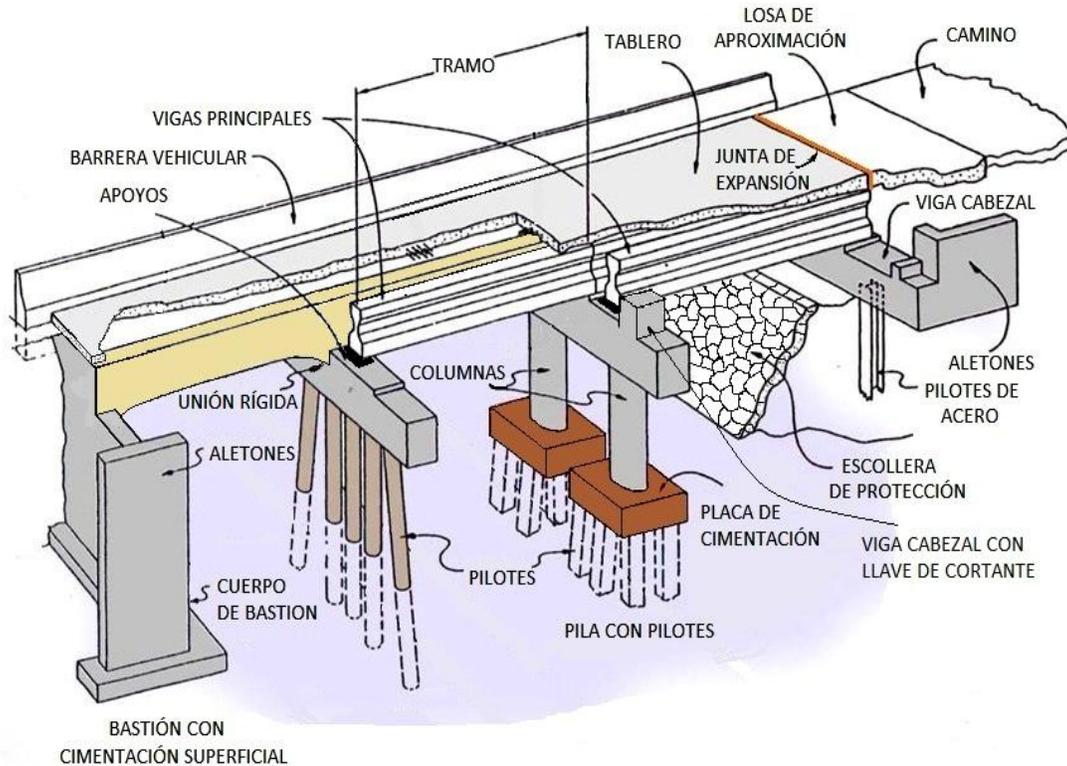
El análisis de los elementos en esta metodología se debe realizar para cada unidad de subestructura y superestructura en concordancia con el Manual de Inspección y Evaluación de Puentes del MOPT (2007) o de acuerdo con la especificación más actualizada y vigente.

Cuadro 5. Listado de componentes de los puentes

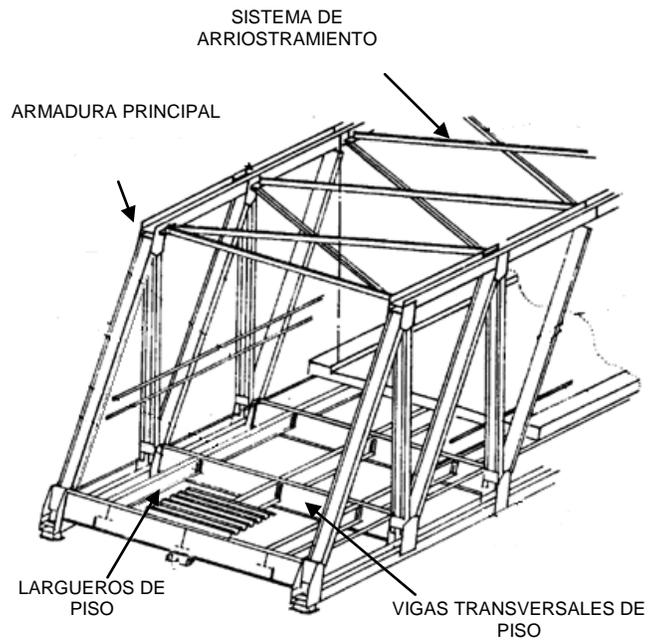
Seguridad Vial, Accesorios y Accesos	Superestructura	Subestructura
<i>Seguridad Vial</i>	<i>Elementos primarios</i>	<i>Apoyos</i>
- Señalización	- Tablero	- Elastomérico
- Iluminación	- Puente con vigas de concreto o acero	- Apoyo Expansivo (rodillo, pin, etc)
- Rotulación altura y carga máxima	- Puente tipo cajón	- Apoyo fijo
- Barreras vehiculares (en puente y en accesos)	- Arcos de mampostería, concreto o acero	
- Aceras	- Unión rígida (puente tipo marco)	<i>Bastiones</i>
<i>Accesorios</i>	- Estructura de madera	- Cabezal/Pared del cabezal
- Juntas de Expansión	- Puente tipo cercha	- Cuerpo
- Sistema de drenaje en Puente	- Cables, anclajes y torres	- Cimiento
- Superficie de rueda del puente	<i>Elementos secundarios</i>	<i>Pilas</i>
<i>Accesos</i>	- Diafragma	- Cimientos
- Relleno de aproximación	- Arriostres (superior o inferior)	- Viga cabezal
- Losa de aproximación	- Vigas transversales y largueros de piso	- Cuerpo: Muro o marco con pantalla, marco y columna
- Muros de contención	- Armadura/viga rigidizadora (colgantes o atirantados)	

Cuadro 6. Elementos de protección del puente contra amenazas naturales

Aspectos sísmicos	Aspectos hidráulicos
Cadenas/anclajes/post-tensión externa	Protección de taludes de rellenos
Dispositivos especiales (ej.: aislamiento sísmico)	Escollera protección del bastión
Pedestales (Longitud de asiento)	Protección de socavación en pilas
Llaves de corte	Llaves de corte



Fuente: http://mac.blog.construim-romania.ro/wp-content/uploads/2015/07/Elemente_Pod.jpg (Modificada por autores)



Fuente: <https://wiryanto.files.wordpress.com/2010/11/austrian.gif> (Modificado por autores)

Figura 2. Esquema de algunos de los componentes de puentes

6.3 Pasos para determinar la clasificación

Para determinar la calificación de la condición estructural del puente mediante la inspección visual se propone seguir una serie de seis pasos sencillos con el propósito de uniformizar y estandarizar criterios a la hora de determinar la condición del puente.

1) Información preliminar e inspección visual del puente

Se realiza una búsqueda de información básica del puente como los planos constructivos, la fecha de construcción, el historial de inspecciones y mantenimiento y características varias del tránsito como el valor del tránsito promedio diario TPD. Con estos se determina la importancia operacional (crítico *CR*, esencial *E* y convencional *CO*) y el rango de vida remanente del puente *ASL* según la clasificación definida en los Lineamientos de Diseño Sismorresistentes de Puentes (2013) para el diseño y rehabilitación sísmica de puentes. Los aspectos relacionados con la importancia y vida residual del puente se detallan en el Cuadro 7. Esta información se puede encontrar disponible en el sitio web del LanammeUCR: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>

Cuadro 7. Calificativos del puente según su importancia operacional y vida residual (LDSP 2013)

Importancia Operativa y Económica del Puente	Vida Remanente del Puente ASL (vida útil entre 50 y 75 años)
Convencionales (CO)	ASL 1 (menor a 15 años)
Esenciales (E)	ASL 2 (15-50 años)
Críticos (CR)	ASL 3 (mayor a 50 años)

2) Componentes del puente y grado de daño *GD*

Con la inspección visual e información de planos se realiza un listado de los componentes del puente basados en la información de los Cuadros 5 y 6. Para cada uno de los tramos de la superestructura y subestructura se catalogan los daños por elemento y se asigna un valor de grado de daño *GD*. La caracterización de la magnitud y peligrosidad del daño se ve reflejada en el valor de *GD*, que se calcula tomando en cuenta la extensión y la severidad del daño. La severidad responde a la ubicación, tipología e intensidad (nivel de progresión) del deterioro en el elemento.

Los detalles para la determinación del *GD* pueden estar previamente definidos en un catálogo de daños, aunque, si este catálogo no existiera se puede utilizar el criterio del inspector basado en la experiencia y contrastación con otros inspectores. En el catálogo se buscará incluir deficiencias

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 26 de 48
------------------------------	---	-----------------

relativas a defectos constructivos, de diseño y fabricación, daños típicos producto de incidentes no ordinarios como eventos hidrológicos, sísmicos e impacto vehicular, y finalmente deterioros producto del uso y envejecimiento de la estructura como corrosión del acero, carbonatación, agrietamiento, desprendimientos, etc. Las deficiencias a su vez se pueden agrupar según su efecto en la estructura del puente, los cuales se pueden resumir en siete tipos básicos de daño descritos por Bieñ (2007) para la práctica europea (resumidos en el Cuadro 8). Esta división es útil ya que evidencia, según sea el efecto, la influencia del daño desde el punto de vista estructural.

Tomando como referencia los parámetros iniciales observados en la práctica internacional (ver Cuadro 1), se propone para este estudio una escala de daño del 0 al 3, donde 0 corresponde a ningún daño o un daño muy leve, 1 a un daño ligero, 2 a un daño moderado y 3 a un daño severo. Esta clasificación es acorde con los estados de progresión del deterioro comentados anteriormente: *protegido*, *atacado* (o *expuesto* para durabilidad), *dañado* y *fallado*, cuyo uso es práctico en la definición de estrategias de intervención (Ref. CoRE, Hearn). Por ejemplo, para un elemento muy dañado o fallado ($GD = 3$) es muy posible que sea necesario un cambio o reconstrucción del elemento. Los daños sobre la estructura del puente se pueden clasificar como daños que afectan la durabilidad, la función/operación o la capacidad estructural del puente.

Los daños en componentes no estructurales, es decir que no afectan la capacidad estructural del puente directamente sino que afectan su adecuado servicio/uso, se clasifican como funcionales y corresponden a todo tipo de daños o defectos sobre los siguientes componentes específicos: superficie de ruedo, junta de expansión, seguridad vial, accesos y drenajes. Un daño que afecte la estructura del puente y que tenga consecuencias funcionales se clasifica como estructural; por ejemplo un agujero en losa del puente.

Cuadro 8. Daños y defectos típicos en puentes definidos por la Bieñ (2007) en la práctica europea

Tipo de Efecto (Daño)	Descripción
Deformación	Cambio geométrico incompatible con el diseño o condiciones de servicio, ej.: deflexión, torsión o dilatación
Destrucción del Material	Cambio desfavorable de las características físicas o químicas del material como una reducción de la resistencia, pérdida de tenacidad por endurecimiento (fragilidad) e incremento de la permeabilidad.
Discontinuidad del Material	Corte en la continuidad del material incompatible con el diseño, ej.: grietas, fracturas, delaminación, etc.
Perdida de Sección	Deterioro que produce la pérdida de sección transversal del elemento
Daños en Protección	Pérdida o mal funcionamiento de la protección, ej.: pérdida/insuficiencia del recubrimiento, reflexividad en pinturas, desprendimiento de pintura, etc.
Desplazamiento/Rotación	Cambio permanente de la ubicación del componente no asociado a una deformación.
Contaminación	Impurezas o contaminantes no deseados como vegetación, sales, aceites, etc.

Un daño estructural se asocia como mínimo con un $GD = 1$ ya que los daños generan afectaciones estructurales evidentes, como destrucción del material o discontinuidad (usualmente asociados a agrietamiento $> 0,3$ mm de espesor), desplazamientos o deformaciones excesivas y pérdida de sección. La valoración del agrietamiento del concreto requiere de atención particular para valorar si se considera un daño estructural o una afectación a la durabilidad, tomando en cuenta si se trata de concreto reforzado o preesforzado.

Los daños a la durabilidad son aquellos que afectan la protección o tienden a incrementar la exposición al daño. Un daño que afecta la durabilidad puede estar vinculado con daños estructurales como agrietamiento, corrosión o pérdida de sección por descascaramiento, sin embargo el efecto debe ser evaluado por separado. Daños comunes que afectan la durabilidad son: recubrimiento insuficiente (inclusive con acero expuesto), pintura deteriorada o inapropiada, nidos de piedra, micro agrietamiento y oxidación.

El puntaje máximo para defectos por durabilidad es de $GD = 1$, regla que aplica para todos los componentes del puente; el valor máximo de $GD = 1$ previene que un defecto severo de durabilidad no sea sobrevalorado si aún no se derivan consecuencias estructurales evidentes. Los rangos de valores posibles de GD según las consecuencias estructurales, funcionales o por durabilidad en la estructura del puente se resumen en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Rango de posibles valores de GD según las consecuencias estructurales, funcionales o de durabilidad en la estructura del puente.

Consecuencia del daño	GD			
	0	1	2	3
DURABILIDAD				
FUNCIONAL				
ESTRUCTURAL				

3) Asignación de la relevancia estructural RE

La Relevancia Estructural RE es una variable que incorpora la importancia de un componente o elemento según su función en el sistema global del puente. Sopesa no solo el aspecto estructural sino también aspectos de seguridad vial, durabilidad, protección del entorno y accesibilidad, como se puede observar en el Cuadro 10. La designación de la categoría de cada elemento se determinó con base en un análisis de los pesos atribuidos en la bibliografía internacional descritos en el Cuadro 2 y en la experiencia adquirida de las inspecciones de puentes existentes en la UP.

Cuadro 10. Relevancia Estructural (*RE*) para varios componentes del puente

<i>RE</i> = 1	<i>RE</i> = 2	<i>RE</i> = 3	<i>RE</i> = 4
Juntas de Expansión*	+Superestructura: - Diafragma [†] - Arriostres (superior o inferior)	Tablero +Superestructura: - Puente con 4 o más vigas de concreto o acero - Puente tipo cajón - Vigas transversales y largueros de piso - Armadura/viga rigidizadora (colgantes o atirantados) - Cuerpo de arco mampostería	+Superestructura: - Estructura de madera - Puente con 3 o menos vigas de concreto o acero - Puente tipo cercha - Cuerpo del arco concreto y acero
+Seguridad Vial*: - Señalización - Iluminación - Rotulación de altura y carga máxima	+Seguridad Vial*: - Barreras vehiculares (en puente) - Aceras	+Pila: - Cuerpo Muro o marco con pantalla - Viga cabezal	+Pila: - Columna - Cuerpo tipo marco - Cimientos
+Accesos*: - Barrera vehicular	+Accesos*: - Relleno de aproximación - Losa de aproximación - Muros de contención	+Bastión: - Cabezal/Backwall - Cuerpo - Cimiento	Cables, anclajes y torres (puentes colgantes y atirantados)
Superficie de ruedo* +Protección Durabilidad - Sistema de drenaje* - Pintura estructural	Aletones y muros +Rehabilitación: - Refuerzo con fibras - Refuerzo/adición de vigas - Postensión externa - Recalce o pilas adicionales	Unión rígida (puente tipo marco) +Apoyos: - Elastomérico - Apoyo Expansivo (rodillo, pin, etc) - Apoyo fijo	- -

* Componentes no estructurales del puente cuyos daños afectan su operación

[†] En puentes con curvas o sesgos pronunciados los diafragmas podrían calificarse como *RE* = 3

La importancia de incorporar aspectos relacionados con la mitigación del efecto de las amenazas naturales en los BMS es discutida en estudios como el de Mayet (2002) y Minchin et al. (2006). Los elementos del puente que cumplen la labor específica de proteger la estructura de eventos sísmicos o hidrológicos son sujetos a una evaluación especial en este método. Tomando en cuenta que la frecuencia y la magnitud de estos eventos varía en el tiempo, evaluar un puente antiguo, pronto a cumplir su vida útil, como si fuera nuevo no es correcto. Los requisitos de desempeño son distintos en cada caso, por lo tanto para estos elementos se incluye además la variable de importancia. La designación del *RE* en estos casos se obtiene mediante el uso del Cuadro 11.

En el Cuadro 11 se introducen primero parámetros de ocurrencia. Para sismo se utiliza el concepto de periodo de retorno, aplicado en la práctica común de diseño de estructuras sismorresistentes. En el caso de eventos hidrológicos, se utiliza la frecuencia de *overtopping*. El *overtopping* se da cuando el agua sobrepasa o golpea la superestructura del puente, situación que ocurre cuando el área hidráulica es insuficiente. Este fenómeno se puede correlacionar con la probabilidad de que la cimentación sufra daños por socavación (NCHRP 2006). A diferencia del cálculo de avenidas para

el cauce del río en un determinado periodo de retorno, el *overtopping* puede ser aproximado con base en el conocimiento de los pobladores del entorno del puente, lo cual lo convierte en un parámetro útil para la evaluación.

El Cuadro 6 presenta los elementos típicos en puentes para la protección contra inundaciones y sismo. La consideración de los elementos del Cuadro 6 debe ser definida por el inspector con ayuda del Cuadro 11 ya que, por ejemplo, en ocasiones las escolleras podrían no ser necesarias en sitios montañosos o, en caso de los elementos sísmicos, no todos los componentes detallados en el cuadro son aplicables para el puente. Los grados de daño *GD* en estos elementos podrían ser evaluados mediante el uso del catalogo de daños. La longitud de asiento se puede determinar mediante el uso de las ecuaciones provistas por la FHWA (2006) ó AASHTO LRFD (2014).

La Relevancia Estructural *RE* para elementos de protección sísmica e hidrológica se define en el Cuadro 11 de la siguiente manera: primero se determina cuáles elementos aplican para el puente (inclusive cuando estos no existan) y la frecuencia de *overtopping* (Cuadro 11). Seguidamente se busca la importancia operacional del puente (Crítico *CR*, Esencial *E* ó Convencional *CO*) y la vida de servicio remanente (*ASL 1*, *ASL 2* o *ASL 3*). Cuando se han definido estos parámetros se busca la casilla correspondiente con la frecuencia, la importancia y la *ASL* y se encuentra en la columna de la izquierda la relevancia estructural *RE* asignada para esas condiciones. Para la amenaza por sismo no es necesario encontrar el período de retorno dado a que este trabajo ya se realizó en la elaboración del Cuadro 11.

Cuadro 11. Determinación de *RE* para elementos de protección sísmica e hidráulica según la frecuencia de amenaza, la vida remanente y la importancia operacional

<i>RE</i>	Amenaza hidrológica				Amenaza por sismo		
	Frecuencia de amenaza natural " <i>Overtopping</i> "				Periodo de retorno(PR) de amenaza natural		
	Frecuente (F)	Ocasional (O)	Una vez en la Vida (V)	Remota (R)	Ocasional (O)	Una vez en la Vida (V)	Remota (R)
	< 3 años	≈ 10 años	≈ 50 años	≈ 100 años	PR = 500 años	PR = 1000 años	PR = 2500 años
1	CO: ASL1 y 2	E: ASL1 CO: ASL1 y 2	CR: ASL1 E: ASL2 CO: ASL3	CR: ASL3	E: ASL1 CO: ASL2		
2	CR: ASL1 y 2 E: ASL 1,2 y 3 CO: ASL3	CR: ASL 1,2 y 3 E: ASL2 y 3 CO: ASL3	CR: ASL2 y 3 E: ASL3			CR: ASL1 y 2 E: ASL2 y 3 CO: ASL3	
3	CR: ASL3						CR: ASL3

Según Lineamientos para diseño sismorresistente de puentes 2013

Importancia operacional: CR= Crítico / E= Esencial / CO= Convencional

Vida de servicio remanente: ASL1 (Menor a 15 años) / ASL2 (Entre 15 años y 50 años) / ASL3 (Mayor que 50 años)

4) Tipo de falla y grado de consecuencia de falla *FCF*

Una vez identificados los elementos y asignados los valores de *RE* y *GD*, sería solo necesario determinar el valor del denominado Factor de Consecuencia de Falla *FCF*. Este factor se escoge para cada elemento según sean las consecuencias de su falla sobre el puente (según lo descrito en el Cuadro 12) y la forma en que se esperaría ocurra la falla del puente como sistema, debido a los daños en el elemento (como se denota en el Cuadro 13). Este tipo de análisis es propio del diseño y evaluación de estructuras por factores de confiabilidad (consultar Schneider (1997)).

Características particulares de falla están asociadas a distintos tipos de estructuras de puentes; por ejemplo, la estructuración de los puentes de dos cerchas de acero es no redundante ya que ante la falla de una de las cerchas es muy posible que colapse todo el puente. Diverso es el caso de puentes con 4 o más vigas en donde la falla de un elemento difícilmente conlleva el colapso total del sistema. Para los componentes del Cuadro 11, los valores de *FCF* son constantes, iguales a 1.

En el Cuadro 13 se introduce un nuevo nivel de importancia denominado *CR+*, específicamente ideado para los puentes de la red vial nacional de importancia estratégica, con gran importancia económica y cuyo colapso presenta un alto riesgo de pérdida de vidas humanas debido a su alta ocupación ($TPD > 50\,000$). Para este caso, se pondera con un factor *FCF* de 1,25 únicamente para aquellos componentes del puente que además de tener un grado de Relevancia Estructural de $RE = 4$ también podrían presentar un tipo de falla no redundante. Para estos elementos, inclusive un grado de deterioro moderado se considera como una situación riesgosa e inaceptable tomando en cuenta las consecuencias económicas y posible pérdida de vidas humanas que se derivan de su falla. Es recomendable mantener para estos puentes prácticas de conservación adecuadas y un plan de monitoreo continuo.

Cuadro 12. Definición de niveles de consecuencias de falla y tipos de puentes clasificables según su importancia operacional

Consecuencia	Descripción
Nivel 1: BAJA	Consecuencias leves sin riesgo de pérdida de vidas o lesiones, molestias a usuarios, servicio puede ser afectado en periodos cortos.
Nivel 2: MODERADA	Consecuencias moderadas. Riesgo leve de pérdidas de vida o lesiones. Consecuencia económica considerable.
Nivel 3: ALTA	Consecuencias altas. Riesgo moderado de pérdidas de vida o lesiones. Consecuencia económica alta.
Nivel 4: SEVERA	Consecuencias muy altas. Riesgo alto de pérdidas de vida o lesiones. Consecuencia económica muy alta.

Cuadro 13. Relación entre la Relevancia Estructural RE , tipos de falla y niveles de consecuencias

Tipo de falla probable del puente como sistema	Consecuencias según tipo de Falla							
	Nivel 1 $FCF = 0,6$	Nivel 2 $FCF = 0,8$			Nivel 3 $FCF = 1,0$		Nivel 4 $FCF = 1,25$	
	Todos	CO	E	CR	E	CR	CR +	CR +
A: Servicio	$RE = 1$	-	-	-	-	-	-	-
B: Falla elemento secundario o de entorno	-	$RE = 2$	$RE = 2$	$RE = 2$	-	-	$RE = 2$	-
C: Redundante: Falla de elemento no causaría colapso del puente	-	$RE = 3$ o 4	$RE = 3$	-	$RE = 4$	$RE = 3$ o 4	$RE = 3$ o 4	-
D: No redundante: Falla de elemento causaría colapso del puente	-	$RE = 3$ o 4	$RE = 3$	-	$RE = 4$	$RE = 3$ o 4	$RE = 3$	$RE = 4$

5) Calificación de los elementos del puente CE

Los tres factores calculados anteriormente se combinan para determinar la calificación de cada uno de los elementos del Cuadro 5 y 6. El valor de CE , que se encuentra en el rango de 1 a 6, se encuentra al calcular la Ecuación 1 y redondeando al valor entero más próximo.

$$CE_i = \begin{cases} 1 & \text{si } GD = 0 \\ \text{Entero}\{[(FCF * RE) - 1] + GD\} \leq 6 & \text{si } GD \neq 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Como se puede observar, si $GD = 0 \rightarrow CE_i = 1$, $CE_{min} = 1$ y $CE_{max} = 6$. CE_i corresponde a la calificación de un componente "i" del puente.

La deducción de esta ecuación corresponde a un simple arreglo en la escala de 1 a 6 de la suma de efectos $RE + GD$, el cual presenta un buen ajuste a los resultados esperados para el puente según el criterio experto de la UP. La variable GD se asume independiente del factor de consecuencia de falla FCF , no obstante este último sí modifica el peso del factor RE en la ecuación.

Aquí es importante recalcar de nuevo la importancia del cálculo de un adecuado valor de GD . En particular, el grado $GD = 3$ corresponde específicamente a un estado en que el deterioro tiene implicaciones serias en el elemento o que inclusive ya ha fallado (por ejemplo el desprendimiento de arriostres en cercha).

En el Cuadro 14a y Cuadro 14b se resumen todas las posibles permutaciones resultantes del uso de la Ecuación 1. Allí se observa con mayor claridad que los valores de FCF se aplican de forma distinta y no para todos los valores de RE . En los cuadros se evidencia de forma clara que la calificación aumenta con el incremento tanto del daño como de los valores de relevancia estructural. Por facilidad, se puede utilizar conservadoramente un valor de FCF igual a 1 para todos los puentes menos los CR+; los resultados se muestran para este caso específico en el Cuadro 14b.

Cuadro 14a. Calificación por componente CE_i según los valores de FCF , RE Y GD

FCF	RE	GD			
		0	1	2	3
0,6	1	1	1	2	3
	2	1	2	3	4
0,8	3	1	2	3	4
	4	1	3	4	5
1	2	1	2	3	4
	3	1	3	4	5
1,25	4	1	4	5	6
	4	1	5	6	6

Cuadro 14b. Calificación por componente CE_i según los valores de RE Y GD . $FCF = 1$

RE	GD			
	0	1	2	3
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	1	3	4	5
4	1	4	5	6

6) Clasificación global del puente para el mayor CP

En esta metodología la calificación global del puente se asigna en función del elemento con mayor puntaje obtenido. Lo cual se describe también mediante la Ecuación 2:

$$CP = \max_i(CE_i) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Al hacer este tipo propuesta, se asume que el puente está formado por elementos independientes entre sí y se concibe, por lo menos para el caso de falla completa, el sistema global del puente

como un sistema en serie. En una formulación en serie se asume que la falla del elemento más débil provoca la falla de todo el sistema por lo que es considerada una formulación conservadora siempre y cuando (desde un punto de vista probabilístico), la probabilidad de falla total esté gobernada por la probabilidad de falla de ese elemento específico. No obstante, se debe mencionar que al tomar en cuenta la redundancia para algunos elementos de la superestructura se alcanza en algún grado el efecto indirecto de una formulación en paralelo del sistema, en donde la falla se da luego de la falla del componente más fuerte.

La formulación del sistema como elementos mutuamente independientes, si bien no corresponde con la situación real, es una simplificación conveniente. Encontrar las matrices de correlación entre los elementos es una tarea difícil, ya sea que se enfrente desde el punto de vista estadístico, empírico o mediante simulaciones numéricas, debido a que las matrices son diferentes para distintos niveles de daño y tipos de puentes. Un ejemplo sobre la obtención de matrices de correlación para puentes de concreto simplemente apoyados se explica en Song y Kang (2009).

Con un valor asignado de CP , se obtiene finalmente la condición del puente a utilizar en el Cuadro 4 para calificar el estado del puente. Vale la pena recordar que esta metodología provee información tanto de la condición global del puente como de los grados de daño específicos de los elementos. Esta información es de utilidad para realizar un análisis estadístico de los componentes del puente que presentan mayores problemas con el fin de enfocar los esfuerzos de conservación, rehabilitación e inclusive consideraciones de diseño hacia la prevención del daño; más aún en componentes clave para asegurar la integridad estructural del puente.

La secuencia de la metodología propuesta, con los pasos del 1 al 6, se resume esquemáticamente en la Figura 3.

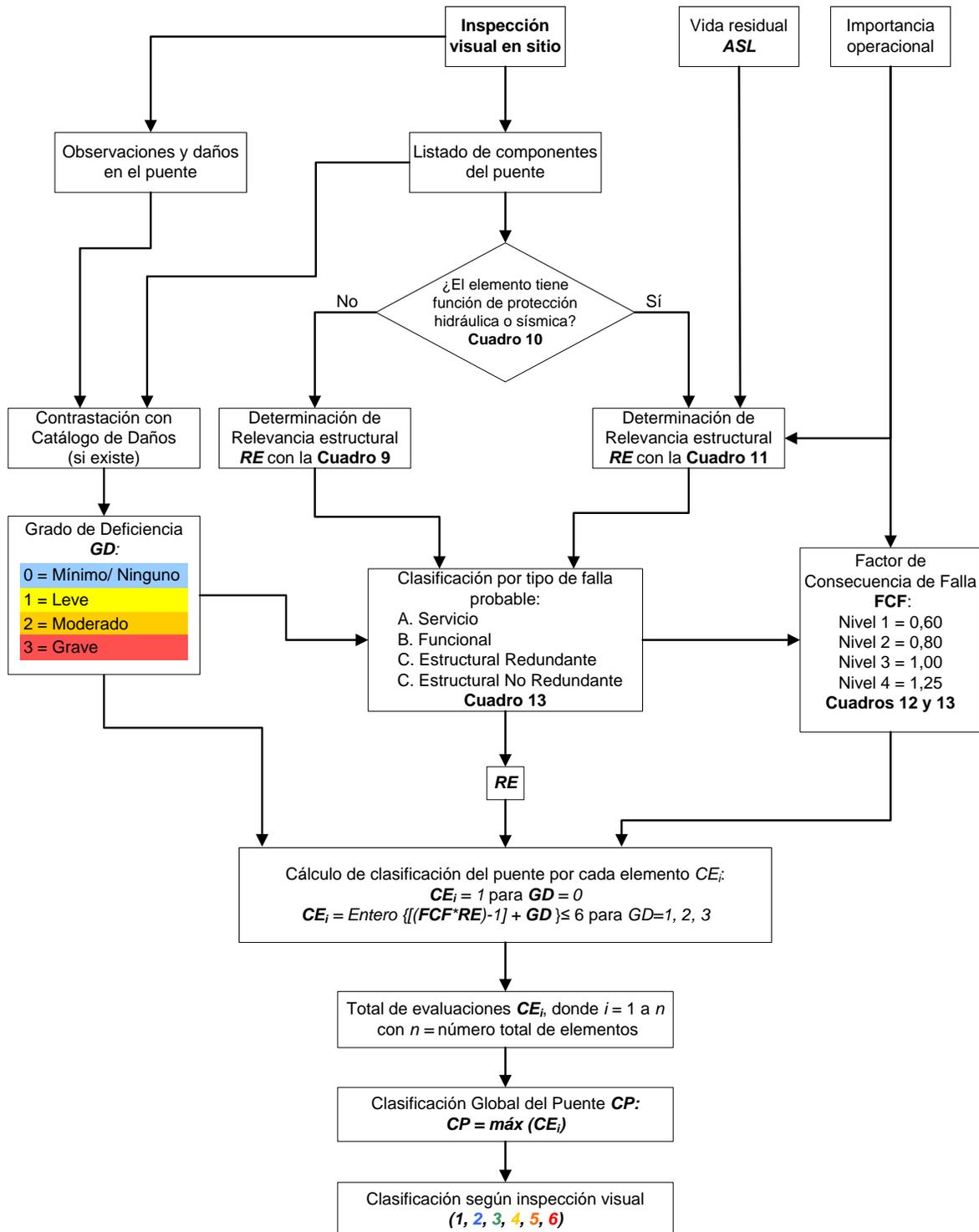


Figura 3. Esquema de la metodología propuesta de evaluación de condición de puentes en Costa Rica

6.4 Necesidad de intervención en un puente basado en la calificación brindada

Una vez establecida la condición del puente se recomienda seguir las indicaciones para la atención del puente resumidas en el cuadro 4. El esquema de la figura 4 podría permitir tomar acciones de forma sistemática y objetiva, empezando por responder a la pregunta si es necesario o no realizar una investigación en profundidad.

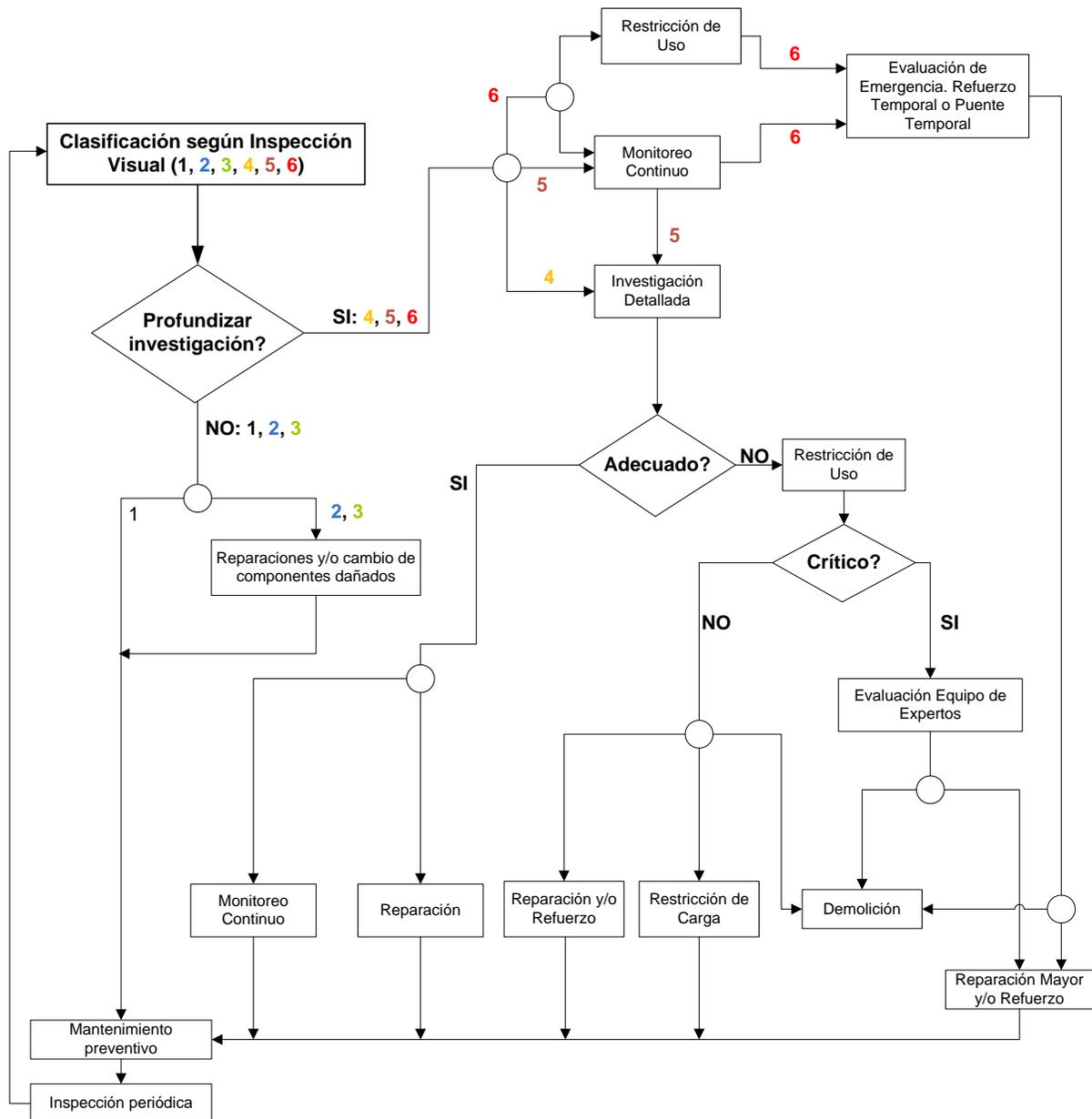


Figura 4. Esquema de atención de puentes propuesto

La necesidad de efectuar investigaciones en detalle no solo debe responder directamente a lo descrito en la figura 4, ya que estas también corresponden a recomendaciones del equipo inspector luego de realizar una inspección visual básica. En general, las estructuras de puentes deben estar sujetas a algún estudio en detalle cada cierto período de tiempo, en especial para estructuras de importancia crítica (según lo estipulado por los Lineamientos para diseño sismorresistente (2013)) con el fin de detectar de forma temprana deficiencias que podrían poner en riesgo la estructura, aspectos funcionales o que disminuyan su vida útil, y que no son típicamente sujetos a detección mediante una inspección visual básica. Para el caso específico de calificación 4, profundizar los estudios cuando la deficiencia sea de carácter de seguridad vial requiere de un análisis distinto, no relacionado directamente con un aspecto de la seguridad estructural del puente (excepto de la altura máxima para pasos a desnivel).

Con el uso de los resultados obtenidos en estudios más detallados de la estructura en donde pueden estar involucrados el uso de otros ensayos no destructivos y destructivos así como el criterio de otros evaluadores, se puede definir si el puente es o no adecuado. Con adecuado se entiende que cumple con los requisitos mínimos que requiere la normativa para las condiciones de uso del puente. Por ejemplo, se pueden seguir lineamientos establecidos en el Manual para Evaluación de puentes de AASHTO (2011) y los Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes (2013). Para puentes en donde la evaluación resulte en estructuras no adecuadas que no cumplen los requisitos de seguridad se debe como mínimo colocar una restricción temporal de carga sobre el puente hasta que se realicen los trabajos de rehabilitación, se cambie el puente o se decida restringir definitivamente la capacidad de carga. Para el caso de puentes críticos (más aún los descritos como CR+ en este trabajo) se recomienda además en caso de ser encontrados inadecuados profundizar los estudios, incorporando expertos de las distintas disciplinas que están involucradas en la evaluación de puentes, incluyendo un análisis de obsolescencia. Para estos puentes no es factible muchas veces en la práctica restringir su capacidad de carga, por lo que no se recomienda como estrategia definitiva.

Para los puentes con calificación de 6 se recomienda aparte del monitoreo continuo realizar una restricción de carga inmediata o cierre en caso de una situación de falla inminente y para el caso de riesgo inaceptable se pasa directamente a una evaluación de emergencia realizada por especialistas en puentes.

Al fin del ciclo en todos los casos los puentes deben estar sujetos a mantenimiento e inspecciones periódicas. La administración debe definir los periodos de inspección visual de condición e inspecciones en detalle de los puentes así como los intervalos de mantenimiento.

7. APLICACIÓN, REPRODUCIBILIDAD Y LIMITACIONES DEL MÉTODO

Una vez definida la metodología de evaluación conviene realizar una serie de ejemplos de aplicación en distintos puentes. Como casos de estudio se eligieron al azar tres puentes que fueron inspeccionados visualmente en el pasado por parte del personal de la Unidad de Puentes del LanammeUCR. Para cada puente evaluado existe un informe de inspección visual donde se pueden consultar los detalles de las observaciones realizadas en el momento de la inspección y los deterioros registrados en los elementos. En el Cuadro 15 se muestran los informes relacionados con los puentes elegidos, los cuales se pueden consultar en la página web <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>, y en la figura 4 se muestra uno de los ejemplos de aplicación de la metodología mediante el uso de una hoja con programación en MS-Excel.

Cuadro 15. Puentes seleccionados aleatoriamente como casos de estudio

No.	Puente	No. de Informe
1	Paso superior Aeropuerto sobre Ruta 153 - Ruta Nacional No. 1	LM-PI-UP-PC01-2013
2	Puente sobre el Río Barrigones - Ruta Nacional No. 245	LM-PI-UP-PN16-2014
3	Puente sobre el Río Blanco de Limón - Ruta Nacional No. 32	LM-PI-UP-PN09-2015

El uso de informes de puentes como casos de estudio se realizó con el fin de homogenizar las observaciones con que se calificaría el puente y no incluir la variabilidad que podría introducir la inspección visual in-situ. Con esto, se garantiza que los inspectores que participaron en la evaluación tienen la misma información disponible al utilizar la metodología para calificar el puente. Lo anterior, permite analizar la reproducibilidad del método entre las distintas calificaciones realizadas por varios inspectores.

El ejercicio de evaluación de la metodología desarrollada fue realizado por cinco inspectores de puentes. Cada inspector llenó una hoja de cálculo por puente, como la que se muestra en la figura 5. Los inspectores asignaron en las hojas de cálculo a cada elemento del puente los valores de Relevancia Estructura (RE) y el tipo de falla que está relacionado con el Factor de Consecuencia de Falla (FCF) (basados en borrador de este informe de investigación) y el Grado de Deficiencia (GD) (basado en las observaciones del informe de inspección respectivo).

CALIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DEL PUENTE SEGÚN LA EVALUACIÓN VISUAL							
Nombre del puente	Puente Río Blanco de Limón-RN32	Importancia Operacional (LDSP 2013)	Crítico	Código Importancia	CR		
Fecha Evaluación	12/11/2014	TPD (veh/día)	13471	Edad (años)	46		
Año de construcción o diseño	1968	Vida de diseño según código (años)	50	Vida de servicio remanente (LDSP 2013)	4 ASL1		
ELEMENTO	RE	GD	DESCRIPCIÓN DE DAÑOS	TIPO DE FALLA	FCF	CE _i	
SEGURIDAD VIAL	Barrera vehicular (puente)	2	2	Remate de barrera destruido	B	0,8	3
	Barrera vehicular (accesos)	1	3	Reducción de altura por daños en subestructura	A	0,6	3
	Aceras	2	2	Aparenta no cumplir con especificaciones actuales	B	0,8	3
	Señalización Vial	1	3	Faltante de guardavías	A	0,6	3
	Rotulación Carga/Altura Máxima	No Insp.	3	Hay tránsito peatonal frecuente y el puente solo tiene un bordillo de ancho menor que el requerido. El bordillo desaparece bajo una sobrecapa	A	0,6	3
	Iluminación	1	3	Señalización en mal estado. Ausencia de captaluces y marcadores de objeto	A	0,6	3
ACCESORIOS	Superficie de rodamiento (puente)	1	3	El puente no posee iluminación y podría ser requerida	A	0,6	3
	Sistema de drenaje del puente	1	2	Sobrecapa de espesor considerable (0,43 m) sobre la superestructura	A	0,6	2
	Juntas de expansión	1	3	Bordillos y ductos obstruidos. Extensión insuficiente de ductos y descarga sobre vigas	A	0,6	3
ACCESOS	Superficie de rodamiento (acceso)	1	2	Junta bajo sobrecapa, junta con abertura considerable, desprendimientos y faltante de sello	A	0,6	2
	Relleno de aproximación	2	0	Bache y agrietamiento	A	0,6	1
	Losa de aproximación	No Insp.	0	No se observaron daños	B	0,8	1
	Muros de contención en accesos	No Aplica	0				
SUPERESTRUCTURA TIPO VIGAS	Tablero	3	1	Agrietamiento en dos direcciones. La losa cruje	C	1	3
	Vigas principales de concreto	3	3	Superestructura 1: Desplazamiento de vigas. Desprendimientos de concreto.	C	1	5
	Vigas diafragma de concreto	2	0	Superestructuras 2 y 3: No se observaron daños	B	0,8	1
	Sistema de arriostamiento de acero	No Aplica	0				
SUBESTRUCTURA	Apoyos	3	3	Desvinculados del pedestal. Desplazados. Corrosión, pernos deformados y cortados. Perdida de contacto parcial de almohadillas con pedestales de pilas	C	1	5
	Aletones	2	2	Grietas por cortante en aletones de gran espesor	B	0,8	3
	Bastiones: Viga cabezal	3	2	Agrietamiento de gran espesor y desprendimientos de concreto	C	1	4
	Bastiones: Cuerpo	3	3	Rotación y grietas por cortante	C	1	5
	Bastiones: Cimentación	3	3	Bastión 1: Pilotes expuestos y agrietamiento de pilotes	C	1	5
	Pilas: Viga cabezal	3	0	No se observaron daños	C	1	1
	Pilas: Cuerpo tipo columna	No Aplica	0				
	Pilas: Cuerpo tipo marco	No Aplica	0				
	Pilas: Cuerpo tipo muro o marco con pant	3	0	No se observaron daños	C	1	1
	Pila: Cimentación	No Insp.	0	No se tuvo acceso visual a las cimentaciones de las pilas			
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	Longitud de asiento (pedestales)	2	3	Reducción de longitud de asiento debido a desprendimientos en pedestales. La longitud de asiento era insuficiente	C	1	4
	Llaves de corte	2	3	Ausencia de llaves de corte	C	1	4
	Cadenas/ anclajes/ postensión externa	No Aplica	0				
	Dispositivos especiales	No Aplica	0				
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN HIDRÁULICA	Protección de taludes de rellenos	2	0	No se observó protección, pero no se observaron daños en los taludes de los rellenos	C	1	1
	Escollera de protección	2	1	Ausencia de elementos de protección del talud frente al bastión pero no se observaron daños en taludes	C	1	2
	Protección de socavación en pilas	2	2	El río erosiona material alrededor de pilas y se acumulan escombros. No se observó protección	C	1	3
					CP =	5	Condición Alarmante

Figura 5. Ejemplo de hoja de cálculo utilizada para aplicar la metodología de evaluación al caso de aplicación del Puente sobre el Río Blanco de Limón en la Ruta 32.

Cuadro 16. Resultados de condición global (CP) obtenidos por cada inspector para cada puente

Inspector No.	Puente 1	Puente 2	Puente 3
	Paso superior Aeropuerto sobre Ruta 153 - Ruta Nacional No. 1	Puente sobre el Río Barrigones - Ruta Nacional No. 245	Puente sobre el Río Blanco de Limón - Ruta Nacional No. 32
1	3- Condición Deficiente	2- Condición Regular	5- Condición Alarmante
2	4- Condición Seria	3- Condición Deficiente	5- Condición Alarmante
3	4- Condición Seria	2- Condición Regular	5- Condición Alarmante
4	4- Condición Seria	3- Condición Deficiente	5- Condición Alarmante
5	4- Condición Seria	2- Condición Regular	5- Condición Alarmante

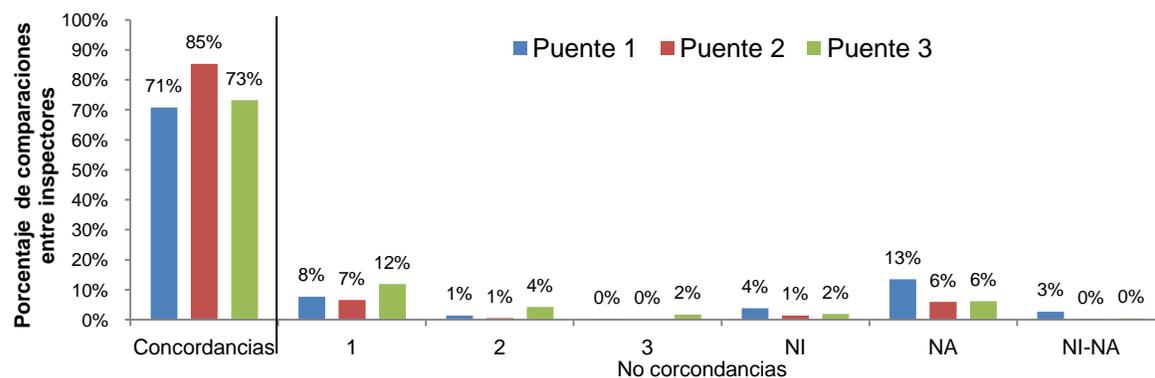
En el cuadro 16 se muestran las calificaciones de condición global del puente (*CP*) obtenidas por cada inspector para cada puente. Como se puede observar del cuadro 16, se encontraron diferencias entre las calificaciones para los puentes 1 y 2. Estos resultados se analizan posteriormente en detalle en el apartado de reproducibilidad del método. En resumen, se identificó una falta de uniformidad en la percepción que tienen los inspectores del daño cuando este no necesariamente afecta la integridad de la estructura o la funcionalidad del puente, lo que lleva a algunas diferencias en las calificaciones. En particular para el puente 2 se encontraron algunas diferencias en la calificación de daños en elementos no estructurales que fueron la fuente de las discrepancias. Las discrepancias encontradas en esta primera prueba del método brindan información útil para detectar fuentes de errores y malinterpretaciones de los evaluadores a la hora de aplicar el método. Muchas de las observaciones ya han sido tomadas en cuenta para la mejora de las plantillas utilizadas para la evaluación, la definición conceptual clara de algunos elementos del puente y la creación o adaptación de un catálogo de deterioro, aspecto en el cual la Unidad de Puentes ya ha iniciado a trabajar, como complemento al desarrollo de esta metodología.

7.1 Reproducibilidad del método

La evaluación de reproducibilidad del método se realizó comparando resultados entre inspectores para encontrar y analizar tanto las consistencias como las inconsistencias. Los resultados porcentuales de las consistencias e inconsistencias se muestran en la figura 6. Para las diferencias de calificación identificadas las inconsistencias se agrupaban en cuatro tipos:

1. Los inspectores asignaron valores de *RE*, *GD* o *FCF* que resultan en calificaciones distintas para el elemento en análisis, para este caso se calculó el rango de diferencia de las calificaciones entre cada uno de los inspectores.

2. Un inspector consideró que el elemento no aplicaba para el tipo de puente en evaluación mientras que el otro si brindó alguna calificación al elemento.
3. Un inspector consideró que el elemento no fue inspeccionado, por lo cual el informe no tenía observaciones, mientras que otro si brindó alguna calificación al elemento.
4. Un inspector consideró que el elemento no fue inspeccionado, por lo cual el informe no tenía observaciones, mientras que otro consideró que el elemento no aplicaba para el tipo de puente en evaluación.



Concordancias:

No se presentaron diferencias entre las calificaciones de dos inspectores comparados.

No concordancias:

- 1 - Diferencia de 1 puntos entre calificaciones
- 2 - Diferencia de 2 puntos entre calificaciones
- 3 - Diferencia de 3 puntos entre calificaciones
- NI - Un inspector consideró que no se inspeccionó (NI) y otro calificó el elemento
- NA - Un inspector consideró no aplica (NA) y otro calificó el elemento

Figura 6. Grafico de concordancias y no concordancias entre las calificaciones que brindaron los inspectores a cada elemento del puente que reflejan la reproducibilidad del método.

Del gráfico de la figura 6 se puede observar que en general las concordancias que se encontraron fueron altas, de hasta un 85 por ciento. Esto indica que el uso del método permite resultados reproducibles aún tomando en cuenta la variabilidad individual de los inspectores al reconocer los elementos del puentes y determinar un grado de daño, inclusive sin el uso de un manual de deterioros. El puente 1 fue para el cual se encontraron mayores no concordancias, lo cual se debe a las consideraciones que toman los inspectores al evaluar los elementos de un paso a desnivel tipo marco de concreto.

También, en la figura 6 se puede observar que un gran número de no concordancias se

encuentran cuando un inspector considera que el elemento no fue inspeccionado o que no aplica y otro si califica al elemento. Esto se puede deber a diferentes interpretaciones del tipo de elementos que posee un puente por parte de los inspectores. La posible causa de estas diferencias de interpretación se pueden deber a deficiencias de las guías para inspección de puentes que definen los elementos que posee un puente, descuido o suposiciones de los inspectores al calificar un elemento o desconocimiento del tipo de puente evaluado (ej.: evaluación del tipo de estructura por primera vez). El análisis y comentario grupal de los resultados permitio proponer recomendaciones y oportunidades de mejora por incluir en las guías para inspección de puentes, reforzando así la necesidad de promover las revisiones entre inspectores donde se discutan los elementos que deben ser calificados en la evaluación, los elementos que no son aplicables al tipo de puentes y los que no pudieron ser inspeccionados. Las recomendaciones están sintetizadas en el apartado de recomendaciones de implementación al final de este documento.

Cuando los inspectores comparados brindaron una calificación de condición distinta a un elemento se evaluó el rango de diferencia de la calificación. Como se mostró en la figura 6, el rango de diferencia más frecuente entre los inspectores se da cuando las calificaciones son distintas en un punto de calificación. El puente en donde se encontraron el mayor numero de discrepancias corresponde también al que presenta grados de daños más severos, lo que indica que con el aumento de la cantidad y tipos de daño también van en aumento las discrepancias de criterio. Las diferencias se dieron principalmente en elementos no estructurales del puente, como por ejemplo en aceras donde se encontró que existen dudas de en donde se debe o no aplicar la ley 7600, y en muy pocas ocasiones en elementos estructurales principales. Los resultados de este ejercicio refuerzan la necesidad de desarrollar o adaptar un catálogo de deterioros para puentes, incluyendo una descripción clara de los requisitos de los elementos no estructurales como los aspectos de seguridad vial, de protecciones, operación y durabilidad.

En general los resultados de la comparación entre los resultados obtenidos por los distintos inspectores demuestran que las causas de las no consistencias generalmente son externas al método utilizado y pueden ser reducidas mediante una capacitación del uso de esta metodología (a los inspectores se les dio copia del método sin ninguna capacitación o explicación previa de cómo utilizarlo) y un catálogos de daños en puentes. Adicionalmente, se recomienda realizar revisiones internas entre los inspectores para homogenizar criterios de inspección y evitar posibles errores por descuidos o malinterpretaciones de una situación.

7.2 Limitaciones de la metodología

El método de evaluación visual no se puede desvincular enteramente del criterio del evaluador. La ponderación de aspectos descrita mediante el conjunto de variables propuesto es un recurso para aumentar la objetividad, sin embargo puede ser necesario que el evaluador recurra al criterio experto propio o de otro evaluador con más experiencia en deterioro de elementos de puentes para determinar con certeza el grado de deterioro.

Por otra parte, es importante reforzar la idea de que las calificaciones globales del puente no son lo mismo que una evaluación de la capacidad de carga o un análisis de seguridad estructural. Tal y como se indicó en el alcance, el resultado de la condición puede tomarse como insumo para realizar investigaciones para determinar aspectos como la seguridad estructural del puente evaluando la capacidad de carga viva y otras condiciones de carga.

Además es importante recordar en este punto que si bien este método da recomendaciones sobre acciones de atención de puentes como las descritas en la tabla 4 y figura 4, esto no significa que se provee con un método de priorización de atención de puentes o que este procedimiento sugerido deba ser seguido estrictamente ya que las circunstancias que envuelven a las estructuras de puentes son muy variables.

Finalmente también hay que mencionar que si bien se realiza una estimación de la condición tomando en cuenta algunas consideraciones sísmicas e hidráulicas, esto no significa que se esté realizando una evaluación rigurosa de riesgo para estas amenazas naturales. Sin embargo, las deficiencias generales encontradas en estos aspectos para el puente podrían justificar la necesidad de profundizar en este tipo de estudios para la estructura, más aún cuando se estén analizando puentes con importancia crítica.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se resumen las principales ideas y resultados obtenidos a través del desarrollo de esta propuesta metodológica para la determinación de la condición de puentes por medio de la técnica de inspección visual:

- a) En el ámbito internacional se encontraron diferentes metodologías de evaluación de la condición de puentes basados en inspección visual. En la mayoría de las metodologías analizadas se evalúan los elementos del puente individualmente. Posteriormente, realizan una ponderación a partir de la importancia de los elementos o brindan la calificación del puente con base en el elemento con mayor severidad de daño.
- b) Observando los métodos utilizados en cada país se encontró que aunque los puentes presentan técnicas constructivas muy similares a nivel mundial, los elementos considerados y sus pesos relativos en la evaluación de condición son distintos entre las metodologías. Esto podría deberse a las diferencias entre países respecto a las prácticas de mantenimiento, y a distintos grados de daños experimentados ante amenazas naturales y de exposición de las estructuras a factores ambientales.
- c) Se desarrolló una metodología para evaluación de la condición de puentes analizando los aspectos discutidos en las metodologías empleadas a nivel internacional y la experiencia en evaluación de estructuras de puentes que posee la Unidad de Puentes del LanammeUCR. Con esto se logró obtener una metodología que busca ajustarse mejor al contexto costarricense en materia de estructuras de puentes
- d) La metodología desarrollada considera, para cada elemento del puente, aspectos como relevancia estructural, grado de deficiencia observado y posibles consecuencias de falla para los usuarios, la economía y el sistema vial. Además, se toma en cuenta el impacto de amenazas naturales recurrentes, como sismos o crecientes de ríos, en los elementos de protección del puente.
- e) La metodología desarrollada podría ser aplicable en una amplia gama de tipos de estructuras de puentes. Para realizar esto en estructuras con elementos complejos, como puentes colgantes, atirantados o de construcción segmentada, se deben analizar cuidadosamente los factores de relevancia estructural de cada elemento y determinar el grado de deficiencia basándose en alguna referencia o criterio experto donde se establezcan los tipos de daño más comunes en los elementos complejos que serán evaluados. Contrario a esto, el sistema de

evaluación de uso actual en el país está enfocado a evaluar puentes tipo losa sobre vigas, por lo cual se logra abarcar más estructuras de puentes.

- f) La metodología es sensible a la variable Grado de Deterioro *GD*. El evaluador debe prestar especial atención a su determinación con base en lo observado en sitio. Una ayuda para reducir el riesgo de asignar un *GD* erróneo es desarrollar un catálogo de deterioros para puentes donde se definan claramente los rangos de aplicación de cada valor de *GD* según se trate de daños que afecten la durabilidad, la función o directamente el comportamiento estructural. La Unidad de Puentes trabaja en el desarrollo de un catálogo de deterioros para puentes.
- g) La metodología permite identificar por separado y toma en cuenta los daños en todos los distintos elementos existentes en el puente. Al identificar por separado los elementos, se provee información útil para realizar un análisis individual de los componentes del puente que presentan mayores problemas con el fin de enfocar los esfuerzos de conservación, rehabilitación e inclusive consideraciones de diseño hacia la prevención del daño; más aún en componentes clave para asegurar la integridad estructural del puente.
- h) Aunque esta metodología no está desarrollada para la priorización de intervenciones, se puede utilizar como punto de partida para identificar los elementos de un puente que requieran atención y tomar acciones basados en la condición e importancia del puente de forma rápida, ya que permite obtener recomendaciones de intervención basados en una calificación individual de la estructura. El sistema SAEP está creado con el objetivo de priorizar intervenciones mediante comparación de puntajes, esto no brinda al Administrador de información “cualitativa” sobre la condición de los puentes y requiere de los datos comparativos de una población de puentes evaluados para realizar una priorización.

8.1 Consideraciones de implementación y mejoramiento de los resultados

Para el usuario de esta metodología se indican a continuación algunas recomendaciones de implementación para la determinación de la condición de puentes mediante inspección visual de puentes existentes según la praxis de la Unidad de Puentes del LanammeUCR:

1. Modificar el informe de evaluación incorporando las variables requeridas para la determinación de la condición de los elementos, las cuales son: Relevancia Estructural (*RE*), Grado de Deficiencia (*GD*) y Factor de Consecuencia de Falla (*FCF*).
2. Desarrollar un catálogo de daños en puentes donde se muestren los daños más comunes encontrados en puentes y su respectivo valor de *GD*.

Informe No. LM-PI-UP-05-2015	Fecha de emisión: 30 de noviembre de 2015	Página 45 de 48
------------------------------	---	-----------------

3. Incorporar en el catálogo de daños conceptos como tipo, severidad y extensión de los daños con el fin de guiar al inspector en la evaluación visual de los elementos del puente.
4. Brindar a la Administración una propuesta de actualización del sistema SAEP donde se incorporen los conceptos para evaluación de la condición estructural a partir de una inspección visual que se desarrollaron en la metodología presentada.
5. Para resultados aún más estables, es recomendable que la evaluación sea revisada por al menos otro evaluador con el fin de reducir errores por interpretación, omisión o descuidos. Así mismos se recomienda también fijar los valores de RE en las hojas de cálculo con el fin de evitar errores a la hora de introducir este parámetro. Esto no aplica en los elementos en donde el RE debe ser calculado o cuando el evaluador considere que su valor debe ser distinto.
6. Realizar capacitaciones sobre el uso del método con el fin de reducir la variabilidad de los resultados, procurar dar una calificación adecuada y realista, y asegurarse de que el evaluador comprenda los aspectos evaluados así como la filosofía y consideraciones utilizadas en el desarrollo del método.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2010).** *Bridge Element Inspection Guide Manual*. 1st Edition. American Association of State Highway and Transport Officials, USA.
- AASHTO. (2011).** *The Manual for Bridge Evaluation*. American Association of State Highway and Transport Officials. 2nd Edition, USA.
- Bieñ, J. Rawa, P. Jakubowshi, T. Kamiñshi T. (2007).** *Sustainable Bridges Project, Possibilities of Unification of Bridge Condition Evaluation, Sustainable Bridges Project*. Background document SB3.3. WUT, 2007.
- BRIME. (2001).** *Bridge Management in Europe, Final Report*. European Project under the coordination of TRL Ltd, UK.
- Casas, J.R. (2007).** *Updated inventory on condition assessment procedures for bridges, Sustainable Bridges Project*. Background document SB3.2. Universidad Politécnica de Cataluña.
- CFIA. (2013).** *Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes*. Colegio Federado de Ingenieros de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- COST-345. (2002).** *Procedures Required for Assessing Highway Structures*. European Co-operation in the field of Scientific and Technical Research "COST", European Commission. United Kingdom.
- FHWA. (1995).** *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges*. Department of Transport, Federal Highway Administration. Washington DC, USA.
- FHWA. (2006).** *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 Bridges*. U.S. Department of Transport, Federal Highway Administration. Virginia, USA.
- Gattulli, V. & Chiaramonte, L. (2005).** "Condition Assessment by Visual Inspection for a Bridge Management System". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. Vol. 20, pp. 95-107.
- HA. (2007).** *Design Manual for Roads and Bridges, Vol. 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance Inspection, Part 4: Formulary BE11/07*. The Highways Agency, United Kingdom.
- Mayet, J. & Madanat, S. (2002).** "Incorporating of Seismic Considerations in Bridge Management Systems". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. Vol. 17, pp. 185-193.
- Minchin, R.E. Zayed, T. Boyd, A.J. & Mendoza, M. (2006).** "Best Practices of Bridge System Management – A Synthesis". *Journal of Management in Engineering*, Vol 22, No. 4.
- MOPT. (2007).** *Manual de Inspección de Puentes*. Dirección de Puentes. Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica.
- NCHRP. (2006).** *Risk-Based Management Guidelines for Scour at Bridges with Unknown Foundations. Report-107*. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Virginia, USA.
- NCHRP. (2007).** *Bridge Inspection Practices. A Synthesis of Highway Practice*. Synthesis 375. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Colorado, USA.

- NCHRP. (2014).** *Proposed Guideline for Reliability-Based Bridge Inspection Practices*. Report 782. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C., USA.
- Rashidi, M & Gibson, P. (2011).** "Proposal of a Methodology for Bridge Condition Assessment". *Australasian Transport Research Forum 2011, Proceedings 28-30*, Adelaide, Australia.
- Schneider, J. (1997).** *Introduction to Safety and Reliability of Structures*. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Zürich, Switzerland.
- Song, J & Kang, W. (2008).** "System reliability and sensitivity under statistical dependence by matrix-based system reliability method". *Structural Safety*. Vol. 31, pp. 148-156.
- Tamakoshi, T. & Kobayashi, H. (2006).** "Study of Efficiency Strategies for Road Bridge Maintenance". *22th US-Japan Bridge Engineering Workshop*. Seattle, United States, 23-25.
- Yanev, B. (2007).** *Bridge Management*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.