

**SISTEMA COMPUTACIONAL DE
ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD
EN PUENTES DE LA RED VIAL
NACIONAL EN COLOMBIA
UTILIZANDO EL MODELO DE
JERARQUIZACIÓN ANALÍTICA**

COMPUTATIONAL SYSTEM OF
ANALYSIS OF VULNERABILITY IN
NATIONAL VIAL NETWORK
BUTTONS IN COLOMBIA USING THE
ANALYTICAL JERARQUIZATION
MODEL

SISTEMA
COMPUTACIONAL
PARA A ANÁLISE DA
VULNERABILIDADE EM
PONTES DA REDE
RODOVIÁRIA
NACIONAL NA
COLÔMBIA USANDO O
MODELO DE
HIERARQUIA
ANALÍTICA

111

Jhonny A. Rodriguez B.

Facultad Ingeniería Civil, Programa
Maestría en Infraestructura Vial,
Universidad Santo Tomas de Aquino,
jhonnyarb@mail.com

Oscar Celis F.

Facultad, Programa Maestría en
Infraestructura Vial Universidad Santo
Tomas de Aquino,
leonardo_celisy@hotmail.com

Fecha de Recepción: 1 de septiembre de 2018

Fecha aprobación: 13 de agosto de 2019

Resumen

Utilizando el modelo de procesos de decisión de Saaty (1), aunque la metodología permite generar valores de los pesos, a través de expertos o juicio de valores de un centro decisor; en el presente proyecto se generaron los pesos de manera cualitativa midiendo su consistencia, los cuales se tomaron en base a las tres evaluaciones de puentes realizadas por el INVIAS en los años 1996-1997, 2001-2002 y 2008-2009(16), estos pesos podrían ser modificados por el administrador, experto del programa en caso de requerirse criterios o "juicios subjetivos realizados por los expertos" (2), se realiza una matriz de comparación por pares de factores en una escala de valoración de acuerdo a las preferencias, utilizando la escala de valores de Saaty (3) de igual o extrema importancia o sea de 1 (uno) cuando es débil la comparación y hasta 10 (diez) cuando la comparación es fuerte; se ejecuta el proceso de normalización de la matriz para la obtención de los pesos relativos para cada criterio, realizando el cálculo de la relación de congruencia con la finalidad de verificar la consistencia de los juicios individuales, obteniendo el vector de prioridad para cada par de criterios y en el ordenamiento de las prioridades para la toma de decisiones en la intervención para administración de puentes. Este proyecto crea una herramienta computacional de evaluación de puentes tomando criterios de decisión y muchas más variables que se involucran en la toma de decisiones para su inmediata intervención, utilizando criterios más definidos de los daños estructurales, hidráulicos y geotécnicos, indicadores de riesgo ponderado del puente y

indicadores de consecuencia, se utilizó los criterios de nivel de tránsito y valor estratégico del puente, con los respectivos subcriterios como elementos funcionales, infraestructura y superestructura, socavación del puente en pilas, estribos y aletas, grado de importancia dentro de la red vial, tránsito promedio diario - TPDS, importancia de la vía, impacto por cierre, dificultad de recuperación de la vía, pendiente del tramo, fecha de construcción del puente, configuración estructural del puente, vías alternas y sensibilidad ambiental; abarcando en su gran mayoría los criterios técnicos-político y socio-ambiental que intercedan en la toma de decisión para una intervención en la evaluación de los puentes.

Palabras clave: Gestión en puentes, Análisis de vulnerabilidad, métodos para toma de decisiones, procesos de jerarquización analítica, herramientas computacionales para evaluación en puentes

Abstract.

This project creates a computational bridge assessment tool taking decision criteria and many more variables that engage in decision-making for immediate intervention, using more defined criteria of damage structural, hydraulic and geotechnical, bridge weighted risk indicators and consequence indicators, the criteria of transit level and strategic value of the bridge were used, with the respective subcriteria as functional elements, infrastructure and superstructure, undermining of the bridge in piles, stirrups and fins, degree of importance within the road network, daily average transit - TPDS, importance of the track, impact by closure,

difficulty of recovery of the track, slope of the section, date bridge construction, bridge structural configuration, alternating tracks and environmental sensitivity; covering the vast majority of the technical-political and socio-environmental criteria that intercede in decision-making for an intervention in the evaluation of bridges Using Saaty's decision-making process model (1), although the methodology allows to generate weight values, through experts or the judgment of values of a decisor; in this project, weights were generated qualitatively by measuring their consistency, which were taken on the basis of the three bridge assessments carried out by INVIAS in 1996-1997, 2001-2002 and 2008-2009(16), these weights could be modified by the administrator, program expert in case criteria or "subjective judgments made by experts" (2) are required, a peer-to-peer comparison matrix of factors is made on a rating scale according to preferences, using the scale of Saaty values (3) of equal or extreme importance i.e. 1 (one) when the comparison is weak and up to 10 (ten) when the comparison is strong; the process of normalizing the matrix is carried out to obtain the relative weights for each criterion, performing the calculation of the congruence relationship in order to verify the consistency of the individual judgments, obtaining the vector of priority for each pair of criteria and in the ordering of priorities for decision-making in bridge management intervention.

Keywords: Bridge management, Vulnerability analysis, decision-making methods, analytical hierarchy processes, computational tools for bridge evaluation.

Resumo.

Este projeto cria uma ferramenta computacional de avaliação de ponte tomando critérios de decisão e muitas outras variáveis que estão envolvidas na tomada de decisões para intervenção imediata, utilizando critérios mais definidos de danos estruturais, hidráulicos e geotécnicos, indicadores de risco de ponte ponderados e indicadores de consequências, os critérios de nível de trânsito e valor estratégico da ponte foram utilizados, com os respectivos subcritérios, tais como elementos funcionais, infraestrutura e infraestrutura superestrutura, minar a ponte em pilhas, estribos e barbatanas, grau de importância dentro da rede rodoviária, trânsito diário médio - TPDS, importância da pista, impacto pelo fechamento, dificuldade de recuperação da pista, inclinação da seção, data de construção da ponte, configuração estrutural da ponte, alternância de estradas e sensibilidade ambiental; abrangendo a grande maioria dos critérios técnico-políticos e socioambientais que intercedem na tomada de decisões para uma intervenção na avaliação de pontes Usando o modelo de processo de tomada de decisão da Saaty (1), embora a metodologia permita gerar valores de pesos, por meio de especialistas ou julgamento de valores de um centro de tomada de decisão; neste projeto, os pesos foram gerados qualitativamente medindo sua consistência, que foram tomadas com base nas três avaliações de pontes realizadas pelo INVIAS nos anos 1996-1997, 2001-2002 e 2008-2009(16), esses pesos poderiam ser modificados pelo administrador, especialista em programa se critérios ou "julgamentos subjetivos feitos por

especialistas" (2), uma matriz de comparação é feita por pares de fatores em uma escala de avaliação de acordo com preferências, utilizando a escala de Valores saaty (3) de igual ou extrema importância, ou seja, 1 (um) quando a comparação é fraca e até 10 (dez) quando a comparação é forte; o processo de normalização da matriz é realizado para a obtenção dos pesos relativos para cada critério, realizando o cálculo da relação de congruência, a fim de verificar a consistência dos julgamentos individuais, obtendo o vetor prioritário para cada par de critérios e na ordenação de prioridades para a tomada de decisões na intervenção para a gestão da ponte.

Palavras chave: Gerenciamento de pontes, análise de vulnerabilidade, métodos de tomada de decisão, processos de hierarquia analítica, ferramentas computacionais para avaliação de ponte.

Introducción

En la actualidad las herramientas computacionales de uso institucional para la gestión en la administración de puentes utilizan sistemas operativos desactualizados, metodologías de evaluación de la vulnerabilidad con pocas variables que incluyen solamente daños estructurales, por lo que los ordenadores del gasto público se ven abocados a realizar intervenciones en los puentes en la medida que estos son reportados como afectados por acción de lluvia intensa, de la sobrecarga por sobrepeso en los vehículos, socavación en la cimentación, sismos, etc. Esta

toma de decisiones en la mayoría de los casos se ejecuta de manera reactiva, atendiendo los puentes en la medida que se van afectando, por lo que el proyecto pretende ser el inicio de una planeación efectiva para priorizar el daño en las estructuras viales y en especial, los puentes.

La metodología a implementar tiene en cuenta variables como por ejemplo la tipología de puentes o la importancia del mismo dentro de la red vial, que conjugadas con los factores de riesgo y vulnerabilidad por agentes sísmicos y de lluvia, tipo de carreteras, asociados al grado de importancia o peso relativo de cada variable; son los conceptos que se tomarán para desarrollar este proyecto y apoyado con el modelo de análisis de decisión multicriterio desarrollado por Thomas Saaty en la Universidad de Pennsylvania(1), como herramienta en la toma de decisiones y en la jerarquización para la intervención de los puentes, ya que se pretende realizar una herramienta computacional, que permita priorizar la atención oportuna de los puentes bajo el modelo de análisis de decisión multicriterio, dando con esto un aporte a la Gestión y Administración en el mantenimiento de puentes en Colombia.

La base de datos utilizada y que facilitaba el cargue de base de datos y las muchas variables que contempla una estructura de un puente, se desarrolló en el programa en Oracle V8, el cual registra las características más relevantes de naturaleza técnica y de inspección visual de los puentes en una red vial y con las características de la zona de influencia.

Esta base de datos de cada puente que podrá ser consultado y actualizado en cada inspección para ejecutar una política de reparación de daño y una herramienta computacional que sea ágil, de fácil manejo para el usuario de seguimiento de las estructuras y su comportamiento tanto estructural como hidráulico y ambiental. Adicionalmente, y con la facilidad del programa se podrían generar diferentes priorizaciones, reportes por puente y/o puentes con sus respectivas características, datos de la evaluación con imágenes fotográficas que visualizarían aún más la presentación de la información y la toma de decisiones en su intervención.

Metodología

El proyecto contempló la ejecución de las actividades de revisión de los documentos del sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia y de informes de Administración Vial, la revisión de los documentos existentes referentes a los modelos de aplicación de análisis multicriterio y esquema de evaluación de criterios para vulnerabilidad en puentes, revisión de los documentos relacionados Inspección Visual de puentes, revisión bibliográfica existente sobre las bases de datos Oracle, programa Expert.choice.V11(4), sistemas de administración de puentes, plantear y realizar la estructura y arquitectura computacional con un procedimiento guía para el manejo del software, ejemplo de aplicación del software a un inventario de puentes, con análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

Modelo de evaluación para puentes con metodología multicriterio.

La estructuración del proyecto se fundamentó en dos ejes, uno que es la metodología de evaluación utilizando la Jerarquización Analítica -AHP(5) y otro, es la construcción de la herramienta computacional utilizando un manejador de base de datos en ORACLE V5; para lo cual, se hizo una revisión de las fortalezas y debilidades del Sistema de SIPUCOL(6) - Sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia del INVIAS, de la calificación de la inspección visual de puentes del Instituto de Desarrollo Urbano - IDU de Bogotá D.C(7) que cuenta con una evaluación de puentes a través de una hoja de cálculo Excel programada.

Se identificaron las variables relevantes y se estructuró una primera jerarquización del proceso de decisión, tomando criterios y subcriterios con características homogéneas; para lo cual los expertos e ingenieros responsables de las decisiones antes de pasar al siguiente paso que es la valoración de preferencias, deberán estar de acuerdo con la estructura. (8)

De los indicadores relevantes para la jerarquización se tomaron los siguientes aspectos: Estado del puente (estructural y funcional), socavación del puente en pilas, estribos y aletas, grado de importancia dentro de la red vial, Tránsito Promedio Diario – TPDS, importancia de la vía, impacto por cierre, dificultad de recuperación de la vía, pendiente

del tramo, fecha de construcción del puente, configuración estructural, vías alternas y sensibilidad ambiental. (9)

Clasificando los criterios anteriores dentro la disciplina de la ingeniería vial como: Riesgos estructurales (E), hidráulicos (H), geotécnicos (G), y por los tipos de consecuencia como: tránsito, vulnerabilidad de la red (VR), valor estratégico del puente (VEP). (10)(11)(12)

Caracterización del modelo lineal

Para definir el modelo lineal integrando los indicadores y la función de utilidad lineal con factores ponderados de la importancia relativa de los indicadores se tiene que:

$$S_i = \sum w_f * S_{fi} \quad (1)$$

Donde S_i es el índice ponderado del puente "i", w_f es el factor de ponderación del atributo "f", S_{fi} es la calificación del indicador del atributo "f" en el puente "i".

De acuerdo con la propuesta de la estructura jerárquica, se definen tres indicadores:

Indicador de riesgo ponderado del puente "i"

$$IRP_i = w_{11}E_i + w_{12}H_i + w_{13}G_i \quad (2)$$

Donde IRP_i es el indicador de riesgo ponderado del puente "i", E_i es la calificación del indicador de riesgo de falla estructural en el puente "i", H_i es la calificación del indicador de riesgo de falla hidráulica en el puente "i", G_i es la calificación del indicador de riesgo de Geotécnico "i", w_{11} , w_{12} , w_{13} son factores de ponderación de la importancia relativa de E, H, G como indicadores de riesgo del puente.

Indicador de consecuencias por fallas del puente "i"

$$ICP_i = w_{21}NT_i + w_{22}VR_i + w_{23}VEP_i \quad (3)$$

Donde ICP_i es el indicador de consecuencia ponderado del puente "i", NT_i es el indicador de consecuencia por nivel del tránsito en el puente "i", VR_i es la calificación del indicador de consecuencia por vulnerabilidad de la red (afectación por desvíos) como resultado de la inhabilitación del puente "i", VEP_i es el indicador de consecuencia por valor estratégico del puente "i", w_{21} , w_{22} , w_{23} son factores de ponderación de la importancia relativa de NT, VR, VEP como indicadores de consecuencia del puente.

Indicador de costo de mantenimiento y rehabilitación del puente "i"

$$ICMR_i = C_i \quad (4)$$

Donde C_i es el monto del costo de mantenimiento y rehabilitación dado en pesos. La utilidad del indicador está asociada a los recursos presupuestales de la entidad encargada del puente. Para el presente proyecto se tendrá en cuenta en su análisis el valor de diez (10) como menor valor de inversión y de uno (1) como mayor valor de inversión y se puede tomar valores intermedios de acuerdo con los requerimientos de inversión.

Determinación de los factores de ponderación

Los juicios de valores son la base del proceso para la metodología AHP y pueden estar

definidos por información técnica, científica, la basada en la experiencia y conocimiento del grupo decisor o lo que se conoce como las opiniones de cada individuo y/o grupo de interés involucrado en la toma de decisión, esta es una característica que hace diferente este método a otros. (8)

Para el caso de los factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo ponderado (w11, w12, w13) e indicadores de consecuencia de falla del puente (w21, w22,

w23) se definió tomarlos en base a los resultados de las tres inspecciones realizadas por el INVIAS en los periodos 1996-1997, 2001-2002 y 2008-2009)(13) y en base al porcentaje de participación de las variables, dado que es una de las ventajas del método (AHP) permite "(...)obtener un sistema de pesos que resulte consistente con las preferencias subjetivas mostradas por el centro decisor(...)." (11).

Tabla 1. Factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo ponderado.

Causas	Número de casos	%	Indicador de riesgo asociado	%	W1
Deficiencia estructural y de diseño	13	18	Estructural(E)	28	w11
Sobrecarga e impacto	4	5	Estructural (E)		
Deficiencia en construcción e interventoría	4	5	Estructural (E)		
Avalancha, creciente, etc.	29	40	Hidráulica (H)	40	W12
Socavación, perdida estribos, pilas, etc.	23	32	Geotecnia (G)	32	W13
Totalidad de casos	73	100		100	

Fuente: Elaboración propia en base a la información del Tomo II Ingeniería de puentes, colapso, inspección especial, socavación, vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga”, pág. 35 Edgar Muñoz Díaz, UPJ 2012.

Obteniendo el Indicador de Riesgo Ponderado (IRP):

$$IRP = 0,28 E + 0,40 H + 0,32 G \quad (5)$$

Para los subcriterios de los indicadores de riesgo estructural (w21, w22, w23) como son elementos funcionales, elementos estructurales y elementos de la infraestructura, se determinó

teniendo en cuenta la información de daños en la evaluación de 2008 realizada por el INVIAS en componentes promedio calificados como “Malos” calificación 4 y 5 y “Regular” calificación de 3 en Sipucol, obteniendo que, w21 = 0,29, w22 = 0,49 y w23 = 0,22.

Tabla 2. Factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo estructural.

Elemento del Puente	Malo	Regular	Promedio	% Participación	Indicador de riesgo asociado(Estructural)	% por Indicador	Wi
Superficie de rodadura	1	11	6	6.3	Elemento funcional	29.0	w21
Juntas de dilatación	18	2	10	10.4	Elemento funcional		
Andenes y Bordillos	4	1	2.5	2.6	Elemento funcional		
Barandas	16	2	9	9.4	Elemento funcional		
Losa	9	1	5	5.2	Superestructura	49.0	w22
Vigas	18	2	10	10.4	Superestructura		
Elementos del Arco	12	3	7.5	7.8	Superestructura		
Cables	18	2	10	10.4	Superestructura		
Elementos de armadura	25	5	15	15.6	Superestructura		
Conos y Taludes	4	1	2.5	2.6	Infraestructura	22.0	w23
Aletas	3	1	2	2.1	Infraestructura		
Estribos	5	1	3	3.1	Infraestructura		
Pilas	6	1	3.5	3.6	Infraestructura		
Apoyos	5	1	3	3.1	Infraestructura		
Cause	13	1	7	7.3	Infraestructura		
		Total	96	100.0		100.0	

Fuente: Elaboración propia en base a la información del Tomo I Ingeniería de Puentes-reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación, pág. 301 Edgar Muñoz Díaz, UPJ 2012. [12]

Para los subcriterios de los indicadores de riesgo Hidráulico (w_{24} , w_{25} , w_{26}) como son: Socavación en pilas, socavación en estribo/aletas y socavación cauce se determinó teniendo en cuenta la información de daños en la evaluación de 2008 realizada por el INVIAS

en componentes promedio calificados como “Malos” calificación 4 y 5 y “Regular” calificación de 3 en Sipucol, obteniendo que así: $w_{24} = 0.22$, $w_{25} = 0.26$ y $w_{26} = 0.52$.

Tabla 3 Factores de ponderación de la importancia relativa para los indicadores de riesgo Hidráulico.

Componente de la estructura	Malo	Regular	Promedio	% Participación	Indicador de riesgo asociado (Hidráulico)	% por Indicador	Wi
Pilas	6	1	3.5	26%	Socavación en Pilas	26%	w24
Estribos	5	1	3	22%	Socavación en Estribos /Aletas	22%	w25
Cause	13	1	7	52%	Socavación Cause	52%	w26
		Total	13.5	100%		100	

Fuente: Elaboración propia en base a la información del Tomo I Ingeniería de Puentes- reseña histórica, tipología, diagnóstico y recuperación, pág. 301 Edgar Muñoz Díaz, UPJ 2012. [12].

Para los subcriterios de los indicadores de riesgo Geotécnico (w27, w28, w29) como son: Sismicidad, lluvias y procesos de remoción en masa se tomarán porcentual a la participación para conservar la igualdad en la ecuación también, como se comentó anteriormente, pueden ser generados por el grupo decisor de “acuerdo a juicio de valores de expertos”, obteniéndose que: $w_{27} = 0.34$ $w_{28} = 0.33$ y $w_{29} = 0.33$.

Para los indicadores de consecuencia de falla del puente (w31, w32, w33) se tomarán porcentual a la participación para conservar la igualdad en la ecuación, obteniéndose que, $w_{31} = 0.34$, $w_{32} = 0.33$ y $w_{33} = 0.33$

Para los criterios de los indicadores de consecuencia de falla del puente (w34, w35, w36) como son: Los Niveles de Tránsito, Vulnerabilidad de la Red Vial y el Valor estratégico del Puente se tomarán

porcentual a la participación para conservar la unidad de la identidad en la formula, ósea que, $w_{34} = 0.34$, $w_{35} = 0.33$ y $w_{36} = 0.33$.

Para los subcriterios de los indicadores de consecuencia de falla del puente (w41, w42, w43, w44, w45, ... w48) para niveles de tránsito, vulnerabilidad de la red vial y valor estratégico que tienen como subcriterios el TPDS, la importancia de la vía e impacto por cierre, dificultad de la recuperación y pendiente del tramo, con la finalidad de conservar la unidad en la ecuación lineal se tomaran porcentual la participación por no contar con datos estadísticos, ósea que para el TPDS $w_{41} = 1$, por la importancia de la vía e impacto por cierre $w_{42} = 0.34$, $w_{43} = 0.33$ y $w_{44} = 0.33$. Por Valor estratégico, se tomará para la fecha de construcción, configuración estructural del puente, vías alternas y sensibilidad ambiental $w_{45} = 0.25$, $w_{46} = 0.25$, $w_{47} = 0.25$ y $w_{48} = 0.25$. Es necesario evaluar la totalidad de los subcriterios para obtener el 100% de la suma de los pesos

Tabla 5 Factores de ponderación para los Indicador de consecuencia del puente.

INDICADOR	CALIFICACION	CRITERIO	INDICADOR	w_3	SUBCRITERIO A	INDICADOR	w_4
(ICP)*		(NT) *		$w_{31} = 0.34$	TPDS		$w_{41} = 1$
		(VR) *		$w_{32} = 0.33$	Importancia de la vía e Impacto por cierre		$w_{42} = 0.34$
					Dificultad de recuperación		$w_{43} = 0.33$
					Pendiente del tramo		$w_{44} = 0.33$
		VEP *		$w_{33} = 0.33$	Fecha de Construcción		$w_{45} = 0.25$
					Configuración estructural del puente		$w_{46} = 0.25$
					Vías alternas		$w_{47} = 0.25$
			Sensibilidad ambiental		$w_{48} = 0.25$		
* Indicador de Consecuencia del Puente (ICP) * Nivel de Tránsito (NT) * Vulnerabilidad de La Red (VR) * Valor Estratégico del Puente (VEP)							

Fuente: Cálculos propios

Calificación de las condiciones del puente

Con base en la fundamentación del método de Saaty, en primera medida para el indicador de riesgo ponderado e indicador de consecuencia del puente, dependen de la evaluación realizada para cada puente en particular, por expertos y responsables de las decisiones

en el área de puentes; se definió la escala de calificación para cada indicador de la función de utilidad con la mayor objetividad posible, dependiendo del tipo de daños y las características de la estructura y demás variables asociadas, para que sea homogénea y consistente la base de comparación.

Tabla 6 Calificación de las condiciones del puente con el Modelo de decisión Multicriterio Discreto.

Calificación	Modelo de decisión Multicriterio Discreto	Estado del Puente
1	Muy alta posibilidad de cierre o corte de accesos por razones estructurales, hidráulicas. Accidentes graves (víctimas fatales o heridos graves) registrados en el puente en los últimos tres años, debido a razones de falta de adecuación geométrica (reducción de sección transversal y de velocidad de circulación, falta de visibilidad).	Muy mal estado
2	Alta posibilidad de cierre o corte de accesos por razones estructurales, hidráulicas. Accidentes graves (víctimas fatales o heridos graves) registrados en el puente en los últimos cuatro años, debido a razones de falta de adecuación geométrica (reducción de sección transversal y de velocidad de circulación, falta de visibilidad).	Mal estado
3	Muy alta posibilidad de limitación de cargas por razones estructurales, hidráulicas. Ancho de la calzada del puente menor al de la calzada de los accesos (reducción del ancho de carril), o velocidad de circulación en el puente mucho menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de 20 Km/h o más).	Mal estado
4	Alta la posibilidad de limitación de cargas por razones estructurales, hidráulicas. Ancho de la calzada del puente menor al de la calzada de los accesos (reducción del ancho de carril), o velocidad de circulación en el puente mucho menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de 20 Km/h o más).	Mal estado
5	Altos sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente por razones estructurales, hidráulicas. Causas que incrementan el costo en caso de reparación urgente: zonas alejadas de centros urbanos importantes; proyectos de alta complejidad técnica; dificultades administrativas para contratación. Ancho de la calzada del puente menor a 7,30 m, ó velocidad de circulación en el puente menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de entre 10 Km/h y 20 Km/h).	Regular estado
6	Presenta sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente por razones estructurales, hidráulicas. Causas que incrementan el costo en caso de reparación urgente: zonas intermedias de centros urbanos importantes; proyectos de complejidad técnica; dificultades administrativas para contratación. Ancho de la calzada del	Regular estado

	puente menor a 7,30 m, ó velocidad de circulación en el puente menor a la velocidad de aproximación en los accesos (disminución de velocidad de entre 10 Km/h y 20 Km/h).	
7	Sin sobrecostos en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera urgente. Deficiencias en los elementos de guía y seguridad pasiva del puente. Barandas, defensas y barandas peatonales, señalización.	Buen estado
8	Costos dentro de la normalidad en caso de tener que realizar las obras de rehabilitación de manera no urgente. Daños menores en los elementos de guía y seguridad pasiva del puente. Barandas, defensas y barandas peatonales, señalización que deben ser reparados.	Buen estado
9	Daños insignificantes que no requieren reparación solamente obras de mantenimiento de rutina.	Buen estado
10	Sin daño, requiere solamente obras de mantenimiento de rutina.	Buen estado

Fuente: Ejecución propia con fundamento en la referencia (1) y (14)

A mejor estado del puente mayor calificación, por lo que la calificación de uno (1) corresponde a máximo riesgo y la calificación de (10) corresponde a mínimo riesgo. Las calificaciones se asocian con las siguientes situaciones:

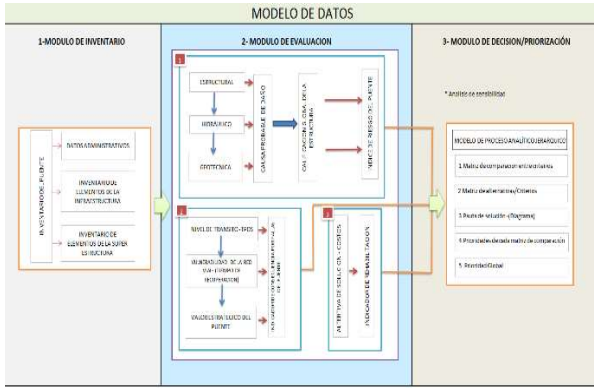
Para aquellos puentes que resulten con riesgo alto se definió en cinco puntos, el umbral para cualquiera de los indicadores individuales de riesgo (estructura, hidráulica, geotécnico) y en siete puntos, para el indicador de riesgo ponderado. Así quedan en el rango de riesgo bajo los puentes que cumplan simultáneamente la condición de tener todos sus indicadores individuales con valores **mayores a cinco** (5) y el indicador de riesgo ponderado **mayor** a siete (7), para estos casos corresponden a obras de mantenimiento de rutina que no requieren priorización. Los puentes que no cumplen la condición anterior quedan en el rango de riesgo alto y deben someterse al

indicador de consecuencia para el proceso de ordenamiento de prioridades. El ordenamiento de prioridades de inversión resulta de menor a mayor ICP; a menor puntaje, mayor prioridad.

Configuración de la herramienta computacional

La herramienta computacional esta está conformada por tres módulos; inventario, evaluación y decisión/priorización. Definidos los parámetros contenidos en la inspección visual, fundamentados en los formatos usados en el inventario, se basa en tres pasos para el inventario de puentes, los cuales son los datos administrativos, inventario de elementos de la infraestructura e inventario de elementos de la superestructura.

Tabla 7 Modelo de Datos

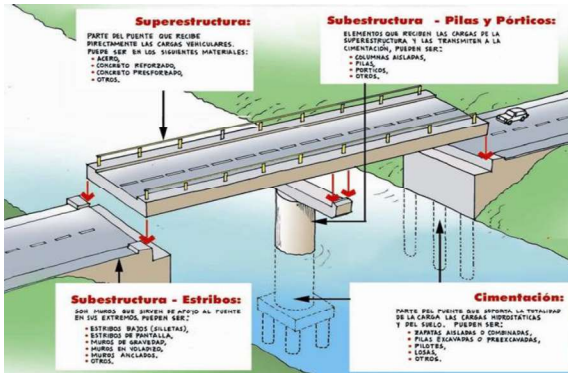


Fuente: Autores

Modulo de inventario

Hace parte de este Inventario la información que se obtiene de la inspección del o de los puentes en la inspección.

Tabla 8 Esquema general de un puente

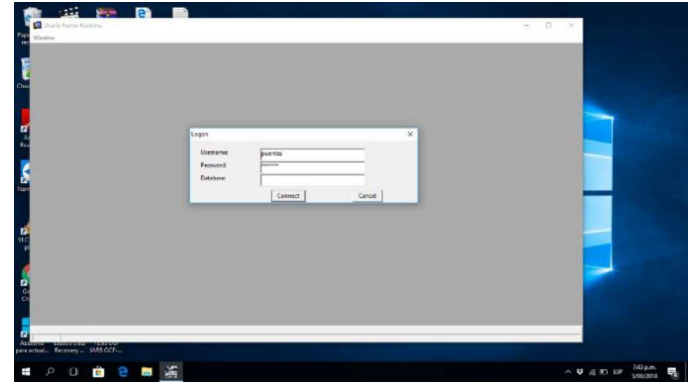


Fuente: Manual para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de puentes de la red vial principal de Colombia, Universidad de los Andes – INVIAS-Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, 2005

Para el ingreso, el sistema nos presenta la primera ventana flotante, donde solicita Username, Password y el Database, mostrando la ventana de presentación del programa

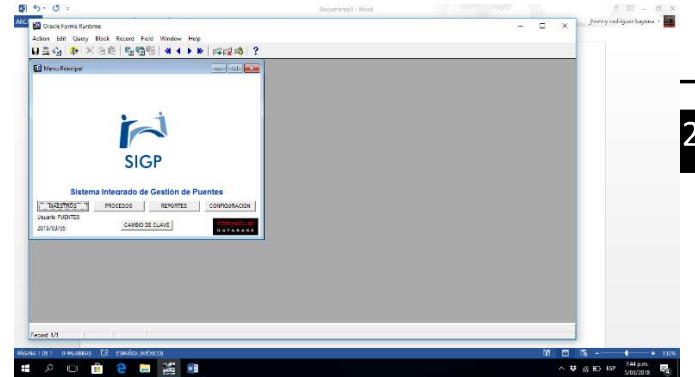
llamado SIGP (Sistema Integrado de Gestión de Puentes).

Figura No. 1 Ventana de Inicio



Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

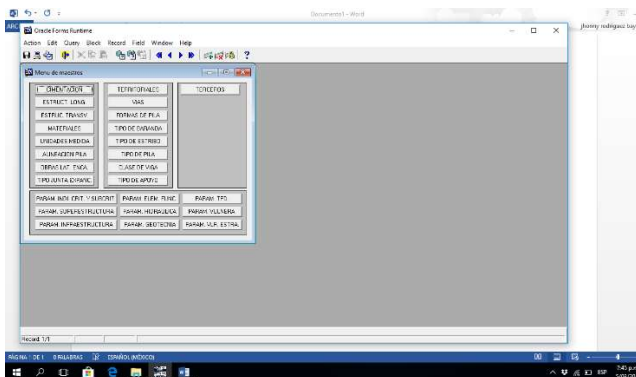
Figura No. 2 Formulario principal del SIGP



Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

La ventana principal da acceso a los diferentes módulos del sistema; están agrupados en menús, que dependiendo del perfil del usuario que ingrese estarán activos o inactivos y se ubican los botones de Maestros, Procesos, Reportes, Configuración y cambio de clave.

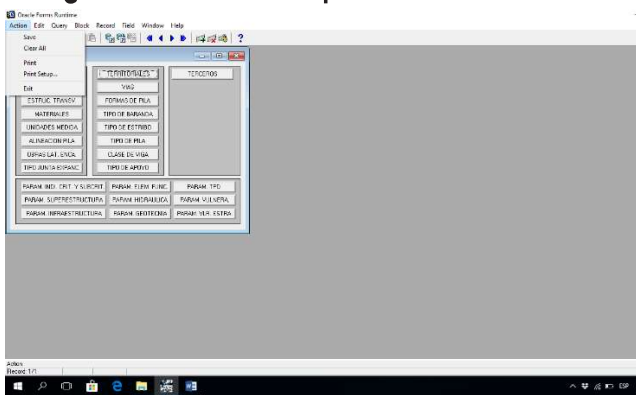
Figura No. 3 Formulario de Maestros



Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

En esta ventana se encuentran distintos botones que permiten navegar e ingresar los diferentes datos correspondientes a los campos en la base de datos, con el fin de realizar ediciones tales como crear, eliminar o modificar cualquier campo creado.

Figura No. 4 Lista de opciones de Archivo



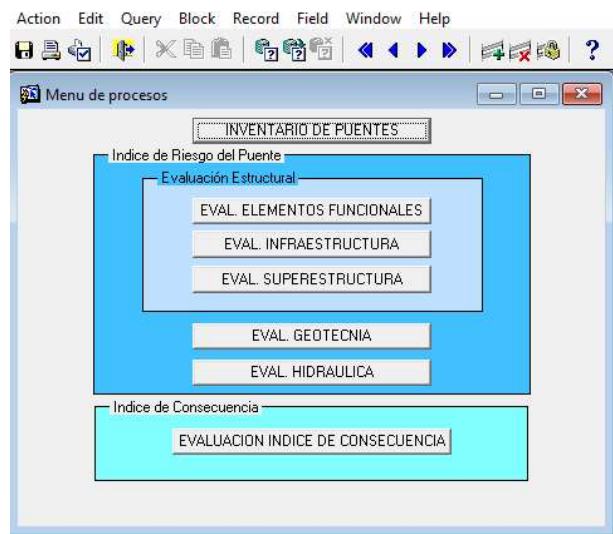
Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

Adicionalmente se encuentra los botones de Editar que permite ingresar desde este menú a la edición de los campos previamente creados; el cual consiste en crear un nuevo campo, editarlo o eliminarlo. (Save, Print, Print setup ,Exit, Cut ,Copy, Paste, enter query, Execute query, Cancel query, Previous block, Next record, Next

block, Insert record, Remove record, Lock record, Help). Los cuales se pueden activar picando en el icono o utilizando las ayudas de las teclas Tab para deslizarse o F9 para seleccionar.

En el menu de procesos, se encuentran la ventana flotante del inventario de puentes, es decir, el módulo administrativo de la base; posteriormente, y una vez creado el puente con los principales registros, continua con el módulo de evaluación con los principales criterios, para determinar el "Índice de riesgo " y el "índice de consecuencia" .

Figura No. 5 Menú de procesos

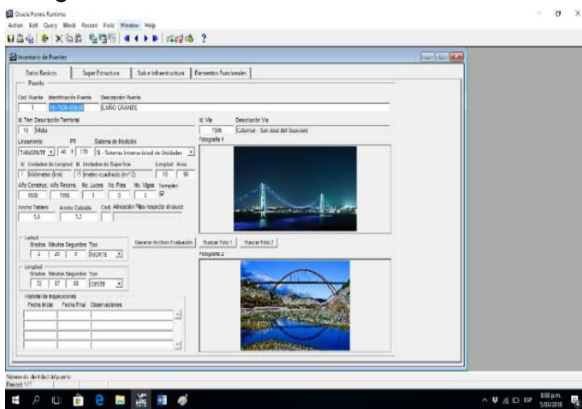


Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

El formulario de inventario de puentes; cuenta con cuatro subformularios el cual determina los principales datos de cada puente así: Administrativos, elementos que componene la estructura en su conjunto, subformulario datos básicos, como: El código, identificación,

nombre, dirección territorial a cargo, el tipo de alineamiento. (si es en curva, o tangente), sistema de medición (inglés o internacional), año de construido, año de reconstruido: año de la última intervención, número de luces que componen la estructura, número de pilas, número de vigas, terraplén; si su acceso es en lleno o a nivel con la vía (boton de selección), ancho de tablero, ancho de la calzada, alineación de la las pilas respecto al cauce; latitud, en grados, minutos, segundos y coordenadas Norte-Este (Botón de selección); longitud en grados, minutos, segundos y coordenadas Norte-Este (Botón de selección). El programa da la opción de presentar dos fotografías (para antes y despues), como se aprecia en la presentación:

Figura No. 6 Formulario de datos básicos



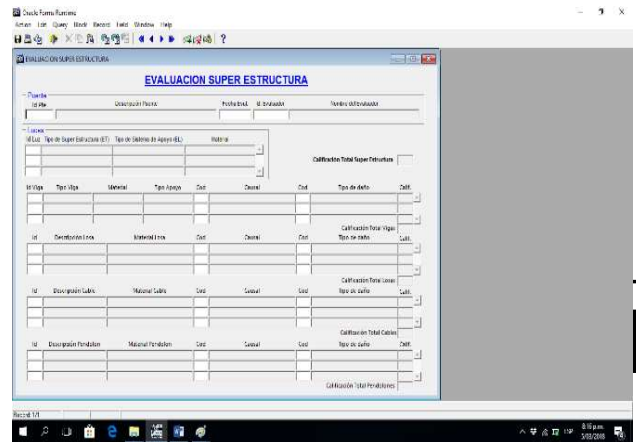
Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

Una vez cargado los elementos a evaluar se deben seleccionar desde una lista, las posibles causas que dieron origen al daño, por lo tanto, se debe tener coherencia entre las causas seleccionadas y el daño ocasionado. Una vez identificado el daño, el programa asigna una calificación que permite tener un valor cualitativo acorde con el modelo escogido de

Saaty, esta valoración está relacionada con el grado de severidad del daño.

Finalizando la evaluación de cada uno de los elementos que componen la superestructura, el programa realiza los cálculos internos y muestra el valor global de este sub criterio en un cuadro de texto tipo numérico.

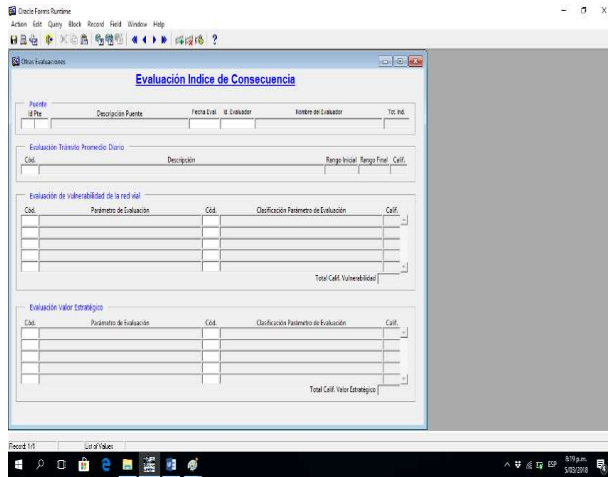
Figura No. 7 Formulario de Evaluación de Super Estructura



Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

Así consecutivamente se adelanta la evaluación de daños en los elementos de la infraestructura, elementos funcionales, evaluación hidráulica, geotécnica, evaluación del Tránsito Promedio Diario, evaluación de la vulnerabilidad de la Red Vial Nacional y evaluación del valor estratégico:

Figura No. 8 Formulario de Evaluación de Índice de Consecuencia



Fuente: Autores - Oracle Forms Run Time

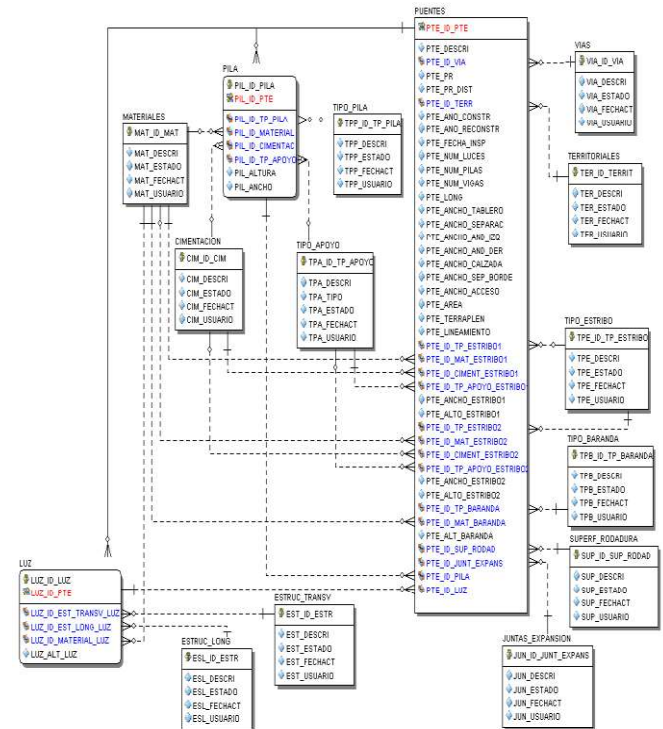
Módulo de decisión/priorización

El proceso de toma de decisiones o priorización se resume en tres pasos: Primero se suman los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas; segundo, se divide cada elemento de la matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada, y como último, paso se calcula el promedio de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan; una vez realizada la totalidad de las comparaciones se obtiene el resultado final consensuado(3), es decir el ordenamiento de las alternativas de mayor grado de importancia a menor grado.

Arquitectura del programa

A continuación, se presenta el diagrama de identidad – relación de todas las tablas y formularios que contiene el programa:

Ilustración 1 Algoritmo del programa



Fuente: Autores

Resultados

Con la finalidad de realizar las pruebas de integridad de la evaluación y de definir los distintos parámetros de la metodología a continuación se presenta la información de una serie de cinco puentes, con diferentes características evaluadas con el sistema SIPUCOL y al mismo tiempo evaluado por la metodología Saaty objeto de este proyecto.

Tabla 9. Resultado de la evaluación por SIPUCOL:

Identificación	Nombre puente	Carretera	P.R.	# Luces	Luz total	Material Superestr	Calif
01-2511-013.00	Tarazá	Los Llanos - Tarazá	122+0200	2	91.49	Acero	3
01-2511-008.00	Puqui	Los Llanos - Tarazá	102+0587	1	60.70	Acero y Concreto	3
06-6504-001.20	El Aguila	Puerto Rico - Mina Blanca	9+0051	2	62.00	Concreto Presforzado	4
07-6211-009.00	Chichaca	Sogamoso - Aguazul	103+0692	1	22.00	Acero y Concreto	4
16-7506-009.00	Caño Grande	Calamar - San José del Guaviare	46+0170	1	16.20	Concreto Reforzado	2

Fuente: Elaboración propia extractado del informe SIPUCOL 2016

Resultado de la evaluación con el método de análisis multicriterio y utilizando la herramienta computación:

DETERMINACION DE ORDEN DE ALTERNATIVA		
JERARQUIA	PUENTE	PUNTAJE INDICADOR
1	El Águila	0.4270
2	Chichaca	0.3000
3	Taraza	0.1090
4	Puqui	0.0920
5	Caño Grande	0.0670

Fuente: Resultado de aplicación de la Herramienta computacional

La jerarquización se da ordenando de mayor a menor valor. Como se aprecia, la metodología aplicada de la evaluación con el método de análisis multicriterio, da un orden de priorización de acuerdo con la información obtenida en la

evaluación y como resultado se obtuvo el puente Águila como prioritario, luego en el orden de alternativas sigue La Chichaca, Taraza, Puqui y Caño Grande; permitiendo el

método realizar toma de decisión con criterio ingenieril en el caso de priorizar inversión.

Al comparar la evaluación por el método de Jerarquización Analítica con el resultado de SIPUCOL se obtiene lo siguiente:

PUENTE	JERARQUIA	Calif
El Águila	1	4
Chichaca	2	4
Tarazá	3	3
Puqui	4	3
Caño Grande	5	2

Fuente: Elaboración propia

El sistema brinda la oportunidad de definir una secuencia de jerarquización definiendo un orden lógico para la toma de decisiones, este sistema facilitará la determinación en la inversión por parte de los organismos encargados del mantenimiento y rehabilitación de puentes, reduciendo de esta forma el riesgo de falla en las estructuras que conforman el sistema vial, involucrando variables de riesgo estructural, geotécnico e hidráulico, variables de seguridad vial y valor estratégico de la estructura.

Discusión

La aplicación desarrollada en el presente proyecto usando primero una metodología y nuevos criterios de evaluación, es la base para implementar nuevos desarrollos tecnológicos como por ejemplo una aplicación APP (aplicación informática diseñada para ser ejecutada en teléfonos inteligentes, tabletas y

otros dispositivos móviles) que involucre los mapas digitales del programa HERMES – INVIAS y/o del Servicio Geológico Colombiano – SGC, Sistema de Información Geográfica del IDU – SIGIDU(15), integrando la información geográfica del inventario físico referenciado (GPS) y la evaluación de puentes, por lo que se recomienda que el subsiguiente desarrollo intervenga un grupo interdisciplinario con carácter técnico, administrativo, gerencial y de programación computacional que faciliten y complementen el proyecto, lo que redundaría en el enriquecimiento en la toma de decisión y en la gestión de proyectos viales.

Conclusiones

La utilización del método de análisis multicriterio con el modelo de jerarquización analítica desarrollado por Thomas Saaty en la Universidad de Pennsylvania, permite realizar la evaluación de puentes incluyendo no solo la parte estructural sino que además involucra como gran aporte, sin dejar de ser uno que otro más relevante, otros criterios como el Hidráulico y el Geotécnico y factores de consecuencia por criterios de intervención y requerimientos de inversión; se convierte en una herramienta fundamental para la toma de decisión en el momento de definir una inversión en rehabilitación, mantenimiento o reconstrucción de un puente.

El uso de sistemas computacionales permite desarrollos de herramientas más eficientes en el inventario, la evaluación y toma de decisión de la calificación de puentes seleccionados, relacionado con la inversión en puentes.

La evaluación de puentes con estos criterios, que a la fecha no han sido utilizados, permite resolver problemas de decisión con múltiples variables tomando información cualitativa y cuantitativa; siendo este proyecto el inicio y el aporte a nuevas implementaciones y metodologías en los procesos de los sistemas de gestión vial y en especial la administración o gestión de puentes.

Esta metodología permite al evaluador como gestor de un proyecto vial o al ingeniero experto o al dueño del proyecto o al ente gubernamental organizar o jerarquizar con un orden lógico o buen criterio ingenieril, en la definición de reparar la estructura e inversión prioritaria.

Referencias

- [1] Saaty, T. (2000). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications. Universidad de Pittsburgh, U. S. A.
- [2] Perez Morales, R. (2015). *Mejora al proceso de generación y selección de nuevos negocios en UNIRED*. Proyecto de grado de Magister en Ingeniería de Negocios con Tecnologías de Información Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile:
- [3] T. L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process," McGraw-Hill Inc, pp. 17–34, 1980 <https://expert-choice.updatestar.com/es>
- [4] Pacheco J. y Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Naciones Unidas - CEPAL Santiago de Chile, ISSN versión impresa 1680-886X ISSN versión electrónica 1680-8878.
- [5] INVIAS - Instituto Nacional de Vías y DCD- Directorado de Carreteras de Dinamarca (1996). *Manual de inventario de puentes, Manual de inspección principal de puentes, Manual de inspección especial de puentes, Base de datos - SIPUCOL – 1996. Software v1.0, Base de datos - SIPUCOL - 2001 Software v2.0, Proyecto INVIAS y DCD, Bogotá, Colombia.*
- [6] Boletín Técnico No. 3 *Inventario de Puentes – (2016)*, Incluye las zonas Urbanas y Rurales del Distrito Capital, Instituto de Desarrollo Urbano – IDU
- [7] Martínez Fernandez Susana. *Técnicas de Investigación de Operativas en Ingeniería*. (5/10/2018). España. <http://ocw.upm.es/Contenido/Materiales/t8.1toma-de-decisiones>.
- [8] Galarraga J. Hert Marcelo, (sep 2008) *Gestión de riesgos en gerenciamiento de puentes con modelo de decisión multicriterio discretas*. *Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil Vol 8(2) 151*. Recuperado desde: http://www.famaf.unc.edu.ar/~torres/trabajosp-arapublicacion/23-simposio_homenaje_al_dr_carlos_prato/23-simposio_homenaje_prato-19.pdf

[9] Perez, A. Casañ. (2013). "La decisión multicriterio; Aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación," Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, España.

[10] Universidad de los Andes - Instituto Nacional de Vías (septiembre 2004) Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos - CEDERI, Departamento de Ingeniería Civil - convenio de cooperación, proyecciones de la estabilidad del sector Ibagué - Armenia ante eventos hidrológicos y sísmicos extremos, estudio de evaluación de riesgos de la red vial nacional, implementación del SERVIAL - fase IV. Bogotá D.C. - Colombia.

[11] Universidad de los Andes - Instituto Nacional de Vías - Oficina de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2005). Manual para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de puentes de la red vial principal de Colombia, Bogotá, D.C.

[12] Universidad de los Andes - Instituto Nacional de Vías. (octubre 2001) Manual para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y recomendaciones para la rehabilitación de puentes, centro de investigaciones en materiales y obras civiles - CIMOC. Santafé de Bogotá.

[13] UNC, Universidad Nacional de Córdoba (2006). "Desarrollo y Aplicación de un Sistema de Gerenciamiento de Puentes para la República

Argentina", Informe Final, Convenio DNV - UNC. Centro de Vinculación de Ensayos No Destructivos y de Evaluación de Obras de Infraestructura Civil, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba, Argentina.

[14] Romero, C. (1996) Análisis de las decisiones multicriterio, Ingeniería de Sistemas para la defensa de España - Isdefe, Madrid, España: Primera Edición.

[15] Muñoz, E. (2012). Ingeniería de puentes, colapso, inspección especial, socavación, vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga", - Pontificia Universidad Javeriana, Tomo 2 pág. 35. Manual para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad de puentes de la red vial principal de Colombia, Universidad de los Andes - INVIAS- Oficina de Prevención y Atención de Emergencias, 2005.

[16] Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto de Desarrollo del Área Sur del Campo Kinteroni-Nuevo Mundo, Repsol-Wals, Perú - 2007.

[17] Sistemas de Información Geográfica del Instituto de Desarrollo Urbano IDU de Bogotá D.C (agosto 2018). <http://idu.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6950db8fa2d440ffbb3946c468eaae4a>. <https://www.idu.gov.co/page/transparencia/informacion-de-interes/sigi->