



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**MÉTODO DE CALIBRACIÓN DE UN INDICADOR DE PRIORIZACIÓN PARA LA  
INSTRUMENTACION DE MONITORIZACIÓN DE PUENTES**

POR

**Pablo Tomás Miranda Martinetti**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para  
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía  
Tomás Echaveguren

Agosto 2022  
Concepción (Chile)

© 2022 Pablo Tomás Miranda Martinetti

© 2022 Pablo Tomás Miranda Martinetti

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mi mamá, papá, hermanos, mi Tía Anabella y mi Nona. También, a mis amigos y polola que me han apoyado a lo largo de este proceso universitario.*

*Muchas Gracias.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi profesor patrocinante Tomás Echaveguren Navarro por su disponibilidad y constante apoyo en el desarrollo de este trabajo. Agradezco también al profesor de comisión Luis Merino Quilodrán por sus acotaciones para poder mejorar mi trabajo.

Agradezco a Gustavo Jiménez por ayudar de forma activa a lo largo de este trabajo, por su tiempo y dedicación. Además, agradezco al equipo de Ingenieros Civiles del Laboratorio de Transporte, Pablo Cartes, Nicolas Flores, Cristóbal Solar y por su tiempo y ayuda en este trabajo.

## **RESUMEN**

Los puentes presentan diferentes características, complejidad, importancia en la red, edad y diferentes costos de reposición, rehabilitación y mantenimiento. Si un puente colapsa, falla o se ve interrumpida su conexión de manera total o parcial genera grandes impactos tanto sociales, económicos y de conectividad.

Debido a esto se necesita conocer el estado de los puentes dentro de la red nacional. Al contar con una gran cantidad de puentes se necesita priorizar el levantamiento de esta información. Esto debido a que conlleva grandes costos de inversión, por lo que resulta muy difícil poder implementar la instrumentación en todos los puentes de la red nacional.

El objetivo de la memoria es proponer un método de calibración para un indicador de priorización para la instrumentación de monitorización de puentes.

Para esto, se propuso un método de calibración para un indicador de priorización, mediante un procedimiento de tres etapas. El primer paso es la recolección de datos, que se realiza mediante la aplicación de la metodología Delphi. Luego se aplica el método de regresión para variables discretas elegido. Por último, se realiza una discusión de los coeficientes obtenidos junto a los estadígrafos del modelo.

## **ABSTRACT**

All bridges present different characteristics, complexity, importance in the network, age, and also, different reposition, rehabilitation and maintenance costs. If a bridge collapses, fails or sees its connection interrupted partially or totally, it generates big social, economic and connectivity impacts.

Due to this, it is necessary to know the state of the bridges within the national network. Having a large number of bridges makes it imperative to prioritize the gathering of information. Its great investment cost makes it incredibly difficult to implement the instrumentation in all national network's bridges.

The main goal of this thesis is to propose a calibration method, for a prioritization indicator for bridge monitoring instrumentation.

To achieve this, a calibration method, for a prioritization indicator, was proposed, through a procedure of three stages. The first step is data collection, done by applying the Delphi method. Secondly, the chosen regression method for discrete variables is applied. Finally, a discussion of the coefficients obtained is carried out together with the statisticians of the model.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 MOTIVACIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 PLAN DE TRABAJO.....</b>	<b>2</b>
<b>1.5 PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>2</b>
<b>1.6 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 2: INDICADORES DE PRIORIZACIÓN Y SUS MÉTODOS DE CALIBRACIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 LA PRIORIZACIÓN DE MONITORIZACIÓN DE PUENTES.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN DE MODELOS DE DATOS DISCRETOS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4 INDICADORES DE PRIORIZACIÓN DISPONIBLES A NIVEL NACIONAL .....</b>	<b>9</b>
<b>2.5 VARIABLES QUE PERMITEN PRIORIZAR LA INSTRUMENTACIÓN DE MONITORIZACIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>2.6 CONCLUSIONES .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 3: FORMULACIÓN CONCEPTUAL DEL INDICADOR DE PRIORIZACIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 PROPUESTA DE FORMULACIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3 INDICADOR DE PRIORIZACIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 COMPLEJIDAD.....</b>	<b>13</b>
<b>3.5 CONCLUSIONES .....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL INDICADOR DE PRIORIZACIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>16</b>
<b>4.3 EJEMPLO DE CALIBRACIÓN UTILIZANDO EL PROCEDIMIENTO PROPUESTO .....</b>	<b>16</b>
<b>4.4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>22</b>

---

<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....</b>	<b>24</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>26</b>
<b>Anexo 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....</b>	<b>28</b>
<b>Anexo 4.1 Diseño y aplicación de encuesta piloto.....</b>	<b>29</b>
<b>Anexo 4.1.1 Diseño de la encuesta.....</b>	<b>29</b>
<b>Anexo 4.1.2 Diseño y aplicación de la encuesta piloto.....</b>	<b>29</b>
<b>Anexo 4.1.3 Resultado de Encuesta Piloto Parte 1 .....</b>	<b>29</b>
<b>ANEXO 4.2 DISEÑO Y APLICACIÓN DE ENCUESTA DEFINITIVA .....</b>	<b>38</b>
<b>Anexo 4.2.1 Encuesta Definitiva Parte 1 sobre Complejidad del Puente.....</b>	<b>38</b>
<b>Anexo 4.2.2 Encuesta Definitiva Parte 1 sobre la priorización de instrumentación de monitorización de puentes.....</b>	<b>40</b>
<b>ANEXO 4.3 RESPUESTAS ENCUESTAS DEFITIVAS.....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo 4.3.1 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 1 .....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo 4.3.2 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 2 .....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO 4.4 VALORES DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS .....</b>	<b>47</b>
<b>Anexo 4.4.1 Valores de los parámetros estadísticos Encuesta Definitiva Parte 1 .....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO 4.5 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS. ....</b>	<b>49</b>
<b>Anexo 4.5.1 Regresión Binomial Negativa .....</b>	<b>49</b>
<b>Anexo 4.5.2 Regresión Quasi Poisson .....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo 4.5.3 Regresión Poisson Cero Truncado.....</b>	<b>53</b>



**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 2.1 Enfoques de priorización .....</b>	<b>4</b>
<b>Tabla 3.1 Clasificación del galibo vertical del puente .....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 4.1 Valores t y p para los coeficientes del Indicador de priorización .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 4.2 Valores t y p para los coeficientes de la Complejidad .....</b>	<b>22</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 4.1 Código de calibración por Regresión Binomial Negativa del Indicador de Priorización.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 4.2 Código de calibración por Regresión Binomial Negativa del modelo de Complejidad.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4.3 Código de calibración por Regresión Quasi Poisson del Indicador de Priorización.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4.4 Código de calibración por Regresión Quasi Poisson del modelo de Complejidad .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4.5 Código de calibración por Regresión Poisson Cero Truncado del Indicador de Priorización.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4.6 Código de calibración por Regresión Poisson Cero Truncado del modelo de Complejidad.....</b>	<b>20</b>

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación

Chile cuenta con una red vial de 85.984 km de longitud y un total de 7.250 puentes (Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2020). El MOP está encargado de su construcción, mantención y operación; además de tener una contabilidad de bienes públicos.

Dentro de las estructuras que conforman la red vial se encuentran los puentes. Estos son una pieza fundamental de la red vial nacional, debido a que otorgan continuidad a la red. Es por esto que, de no existir redundancia en la red una interrupción parcial o permanente de este puede generar un gran impacto con altos costos sociales, económicos y de conectividad para el país.

Debido a esto se necesita conocer el estado de los puentes dentro de la red nacional. Para esto se cuenta con dos métodos: la inspección visual y la monitorización de estas estructuras, los cuales se complementan. Al contar con una densa red nacional se debe priorizar el levantamiento de esta información.

Es por esta razón, que resulta primordial poder identificar qué puentes son más prioritarios a ser monitorizados mediante la instrumentación. Estas acciones conllevan grandes costos de inversión, por lo que resulta muy difícil poder implementar la instrumentación en todos los puentes de la red nacional. Aquí es donde surge la necesidad de proponer un método de calibración para un indicador que permita decidir qué puentes son más prioritarios para esta instrumentación, incorporando diferentes características de los puentes para poder lograr una asignación óptima de recursos. Esto contribuye directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible mostrados en el Anexo 1.1.

## 1.2 Objetivo general

Proponer un método de calibración para un indicador de priorización para la instrumentación de monitorización de puentes.

### 1.3 Objetivos específicos

- Identificar las variables relevantes para la priorización de monitorización de puentes.
- Formular un indicador de priorización.
- Proponer un método de calibración para el indicador.
- Realizar un ejemplo del proceso de calibración del indicador.

### 1.4 Plan de trabajo

La estrategia de trabajo comienza con una investigación sobre indicadores de priorización, las variables que utilizaban y sus métodos de calibración. Luego, se investigó sobre los métodos de calibración existentes para los modelos de variables discretas.

Luego, se formuló conceptualmente el Indicador de Priorización, definiendo su rango y sus variables explicativas: Importancia en la red vial, Vulnerabilidad, Edad y Complejidad. Para la Complejidad también se realizó una formulación conceptual, definiendo su rango y las variables explicativas: Estructuración, Galibo vertical y Dificultad de acceso para inspeccionar.

Una vez formulados los modelos, se realizó el procedimiento de calibración para estos modelos, el cual comenzó por la toma de datos, la cual se realizó mediante la metodología Delphi reuniendo la opinión de expertos en el área de gestión de puentes mediante una encuesta. Después, se escogieron los métodos de calibración Regresión Binomial Negativa, Regresión Poisson Cero Truncado y Regresión Quasi Poisson. Después, se realizó un ejemplo del proceso de calibración utilizando la Regresión Quasi Poisson obteniendo un Indicador de Priorización y un modelo matemático para la Complejidad. Por último, se hizo una discusión de los estadígrafos obtenidos:  $R^2$ , Valor t, Valor p y valor del estadístico F.

### 1.5 Principales resultados y conclusiones

Se logró proponer un método de calibración para indicador que prioriza la pertinencia de monitorización de puentes. Este método plantea la utilización de métodos de regresiones no tradicionales, conocidos como *Count Regression*. Este tipo de regresiones permite calibrar un modelo de variables discretas.

Se realizó un ejemplo de calibración siguiendo el procedimiento propuesto obteniendo un modelo para el Indicador de Priorización y otro para la Complejidad. De estos modelos se obtuvieron estratigráficos estadísticamente significativos, lo que corrobora que el método propuesto es estadísticamente válido.

## **1.6 Organización de la memoria**

Esta memoria se compone de cinco capítulos. En el capítulo dos, se presentan el concepto de priorización y sus enfoques, en donde se enseñan los trabajos propuestos para cada uno de ellos. Además, se presentan los modelos de regresión para variables discretas. Por último, se muestran las variables relevantes encontradas en la investigación. El capítulo tres, se presenta la formulación conceptual del Indicador de Priorización y de la Complejidad, detallando el rango de ambos modelos y las variables explicativas utilizadas junto a su clasificación. El capítulo cuatro, contiene el procedimiento de calibración propuesto para el Indicador de Priorización y para la Complejidad. Además, se presenta un ejemplo de calibración utilizando la Regresión Quasi Poisson seguido de una discusión de los coeficientes obtenidos junto a sus estadígrafos. Por último, el capítulo cinco contiene las conclusiones más importantes de la memoria sobre la formulación conceptual del modelo, del procedimiento propuesto y sobre los resultados obtenidos en el ejemplo de calibración realizado. Además, se presentan líneas de investigación que puede seguir esta memoria.

## CAPÍTULO 2: INDICADORES DE PRIORIZACIÓN Y SUS MÉTODOS DE CALIBRACIÓN

### 2.1 Introducción

En este capítulo, se presenta la información recopilada de la investigación sobre la monitorización de puentes mediante la instrumentación, la priorización de mantenimiento de puentes, los indicadores de priorización disponibles y sobre los métodos de regresión que existen para calibrar modelos de variable discreta.

### 2.2 La priorización de monitorización de puentes

La monitorización es un método de auscultación no destructivo que permite observar la salud estructural de un puente en tiempo real y de manera continua a lo largo de su vida útil (De Solminihac *et al.*, 2018). Se utiliza cuando se necesita conocer información de la integridad de la estructura y sus componentes (Seguel, 2019). Debido a que se cuenta con recursos limitados, resulta muy difícil poder monitorizar todos los puentes de la red nacional. Es por esto que se debe priorizar qué puentes deben ser monitorizados.

La priorización es un proceso de ordenamiento en base a criterios de calificación preestablecidos, sin necesidad de que el orden de precedencia constituya un conjunto de acciones más convenientes para un fin determinado. Esta es una tarea que se realiza en conjunto con la optimización para la toma de decisiones de mantenimiento, con el propósito de escoger el mejor plan de mantenimientos para una determinada red de puentes (De Solminihac *et al.*, 2018).

Esta priorización se clasifica en enfoques de primera hasta quinta generación, como se ve en la Tabla 2.1.

**Tabla 0.1 Enfoques de priorización**

<b>Generación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Autores</b>
<b>Primera</b>	Se basa en necesidades de mantenimiento, utilizando indicadores de priorización e indicadores de desempeño de un activo vial.	Valenzuela <i>et al.</i> (2010), Moreno (2021)
<b>Segunda</b>	Incorpora la variable tiempo, permitiendo evaluar los efectos del mantenimiento en el tiempo y su impacto a largo plazo.	Lwambuka <i>et al.</i> (2014), Stevens <i>et al.</i> (2020), Oyegbile <i>et al.</i> (2021)

**Tabla 0.2 Enfoques de priorización (Continuación)**

<b>Tercera</b>	Corresponde a un análisis del ciclo de vida, en el cual incluye la optimización analizando los costos de la agencia vial, de los usuarios y externalidades.	Kulkarni <i>et al.</i> (2004)
<b>Cuarta</b>	Utiliza técnicas de análisis multicriterio, las cuales permiten obtener un programa subóptimo que permiten considerar criterios de distinta naturaleza para la toma de decisiones de mantenimiento.	Contreras-Nieto <i>et al.</i> (2019), Bush <i>et al.</i> (2020), Darban <i>et al.</i> (2021)
<b>Quinta</b>	Utiliza técnicas de modelación basadas en la inteligencia artificial, aprendizaje automático y minería de datos para producir priorizaciones.	Kawamura y Miyamoto (2003), Cheng (2014)

En esta investigación se encontraron métodos de calibración para modelos de variable discreta. Estos modelos son de primera generación, los cuales tienen como característica principal el tener un ponderador que acompaña a las variables explicativas. Este ponderador depende de la importancia que se da a cada criterio.

### 2.3 Métodos de calibración de modelos de datos discretos

Para calibrar estos modelos se necesita identificar qué tipo de variables se tiene en la base de datos, que en este caso son variables discretas. Las variables discretas son variables de valor entero no negativo. Para realizar esta calibración se pueden utilizar los métodos de regresión lineales tradicionales. Esto se puede hacer mediante la transformación de variables discretas en variables continuas. Para poder utilizar el método de regresión lineal se deben cumplir cuatro supuestos (Vila, Torrado y Reguant, 2019): Independencia, que los errores en la medición de las variables explicativas sean independientes entre sí; Homocedasticidad, que los errores tengan varianza constante; Normalidad, que las variables sigan la Ley Normal; No colinealidad, que las variables independientes no estén correlacionadas entre ellas.

Por otro lado, existen métodos de calibración para variables discretas conocidos como “*Count Regression*”.

Dentro de la literatura encontrada, se pudieron identificar los siguientes métodos de regresión para calibrar el modelo: Modelo de Regresión de Poisson, Modelo de Regresión Binomial Negativa y Modelo de Regresión Cero Truncado (Cameron y Trivedi, 1998).

### 2.3.1 Modelo de Regresión de Poisson

Es un modelo de regresión lineal generalizado para datos discretos que debe tener una distribución de Poisson, en donde se debe cumplir que la varianza sea igual a la media. Esto se conoce como equidispersión. Este método también se caracteriza por ser un heterocedástico, ya que sus varianzas no son constantes, por lo que su variabilidad es diferente para cada observación. La principal característica de este método es que es capaz de capturar la naturaleza discreta y no negativa de los datos de conteo.

Para la construcción de este modelo se debe garantizar que el parámetro  $\mu_i$  sea positivo. Para esto se utiliza la función exponencial como se ve en la Ecuación 2.1.

$$\mu_i = \exp(x_1 \beta), \quad (2.1)$$

Donde:

- $\mu_i$  = Parámetro de la forma funcional
- $x_1$  = Variable explicativa
- $\beta$  = Coeficiente del modelo

La distribución Poisson de las variables explicativas X está dada por la Ecuación 2.2, en donde la media está dada por la Ecuación 2.3.

$$P(Y_i = y_i / x_i) = \frac{e^{-\mu_i(x_i)} \mu_i(x_i)^{y_i}}{y_i!}, \quad y_i = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.2)$$

$$E(Y_i / x_i) = \exp(\beta_0 + \dots + \beta_p x_{ip}), \quad (2.3)$$

Donde:

- $P(Y_i = y_i / x_i)$  = Función de probabilidad
- $Y_i$  = Variable dependiente
- $E(Y_i / x_i)$  = Media



Si la distribución no cumple la condición de equidispersión, se tienen dos casos: sobre dispersión, para el caso en donde la varianza es mayor a la media; y sub dispersión, para el caso en donde la varianza es menor a la media.

### 2.3.2 Modelo de Regresión Binomial Negativa

Es un modelo más general utilizado para cuando se presenta una sobre dispersión, cuya representación tradicional es obtenido de la incorporación de un término de perturbación  $\varepsilon_i$  en la distribución de Poisson que corresponde a una aleatoriedad en el parámetro  $\mu_i$  del modelo de Poisson, como se muestra en la Ecuación 2.4, en donde  $\varepsilon_i$  sigue una distribución Gamma.

$$\mu_i^* = \exp(x_i \beta + \varepsilon_i), \tag{2.4}$$

Donde:

- $\mu_i^*$  = Parámetro de la forma funcional
- $x_i$  = Variable explicativa
- $\varepsilon_i$  = Perturbación

La función de probabilidad de este modelo está dada por la Ecuación 2.5, en donde  $\mu_i$  corresponde al término de la Ecuación 2.1. Además, se define el termino  $v_i$  en la Ecuación 2.6 para los valores de  $t=0;1$ .

$$P(Y_i = y_i / x_i) = \frac{\Gamma(x_i + v_i)}{\Gamma(y_i + 1) \Gamma(v_i)} \left( \frac{v_i}{v_i + \mu_i} \right)^{v_i} \left( \frac{\mu_i}{v_i + \mu_i} \right)^{y_i}, \tag{2.5}$$

$$v_i = \left( \frac{1}{\alpha} \right) \mu_i^t, \tag{2.6}$$

Donde:

- $P(Y_i = y_i / x_i)$  = Función de probabilidad
- $Y_i$  = Variable dependiente
- $E(Y_i / x_i)$  = Media
- $\beta$  = Coeficiente del modelo

Este modelo tiene dos especificaciones, para el primer caso aparece el Modelo de Regresión Binomial Negativa 1 (NB1), para cuando se tengo un valor  $t=0$ , en donde el valor de la Media y la Varianza están dados por la Ecuación 2.7 y la Ecuación 2.8 respectivamente.

$$E(Y_i | x_i) = \exp(x_1 \beta), \tag{2.7}$$

$$\text{Var}(Y_i | x_i) = (1 + \alpha) \exp(x_1 \beta), \tag{2.8}$$

Donde:

- $\alpha = \text{Constante}, \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$
- $E(Y_i/x_i) = \text{Media}$
- $\text{Var}(Y_i | x_i) = \text{Varianza}$

El segundo caso aparece el Modelo de Regresión Binomial Negativa 2 (NB2), para cuando se tenga un valor de  $t=1$ , en donde el valor de la Media y la Varianza están dados por la Ecuación 2.7 y la Ecuación 2.9 respectivamente.

$$\text{Var}(Y_i | x_i) = \exp(x_1 \beta) (1 + \alpha \exp(x_1 \beta)), \tag{2.9}$$

### 2.3.3 Modelo de regresión de cero truncado

Es un modelo de regresión de datos de conteo basado que se puede utilizar para el caso de que se tenga una distribución de Poisson o una regresión Binomial Negativa para los que no se permita que una variable tome el valor de cero, como se muestra en la Ecuación 2.10.

$$f(y_i, \Lambda / y_i \geq r) = \frac{h(y_i, \Lambda)}{1 - H(r - 1, \Lambda)} \tag{2.10}$$

Donde:

- $y_i = \text{Variable dependiente}$
- $\Lambda = \text{Vector del parámetro}$
- $h = \text{Variable aleatoria}$
- $r = \text{Entero positivo}$

Este tipo de modelos son utilizados para casos especiales de modelos de regresión de Poisson o Binomial Negativa en donde la variable independiente o las variables explicativas no puedan tomar el valor de cero.

## 2.4 Indicadores de priorización disponibles a nivel nacional

Dentro del estado del arte se encontró el índice de priorización realizado por Moreno (2021). Moreno propuso el diseño de dos indicadores para la clasificación de pertinencia de monitorización de puentes, cuyo rango va de 0 a 100. Para esto incorporó de variables proxy para poder capturar de manera indirecta las diferentes dimensiones de los puentes, tales como la Calificación Automática de la calificación estructural del puente (CA), el Transito Medio Diario Anual (TMDA), el porcentaje de vehículos pesados (VP) y la superficie del puente (Sup), con las cuales se calculan los indicadores mediante una suma ponderada de dichas variables, obteniendo los indicadores mostrados en las Ecuaciones 2.11 y 2.12. Para cada variable se asigna un ponderador ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$ ) que depende de una matriz de rangos definidos para variables de entrada.

$$I = \alpha CA + \beta TMDA + \gamma VP \quad (2.11)$$

$$I = \alpha CA + \beta TMDA + \gamma VP + \epsilon Sup \quad (2.12)$$

Como resultado, se obtuvo que ambos modelos permiten priorizar la pertinencia de monitorización de los puentes contenidos en la base de datos, recomendando el uso del primer modelo debido a que utiliza menos variables y llega a resultados similares que el segundo.

## 2.5 Variables que permiten priorizar la instrumentación de monitorización

Dentro de la investigación realizada, se encontraron variables que pueden servir para formular un indicador que permite priorizar la instrumentación de monitorización de los puentes.

Estas variables son: La vulnerabilidad del puente, que representa la probabilidad de falla del puente ante un sismo o debido a la acción de las fuerzas hidráulicas; y la importancia en la red vial, que describe la importancia del puente dentro de la red vial en la que está inserto (Valenzuela *et al.*, 2010).

## 2.6 Conclusiones

La priorización es importante en cuanto a qué puentes deben ser instrumentados para su monitorización, ya que se cuenta con recursos limitados. Para poder priorizar una acción de monitorización se debe conocer que herramientas existen para poder optimizar dicha elección. Para

esto se deben conocer los enfoques que tiene dicha priorización para poder utilizar el correcto. En este caso es el enfoque de primera generación que permite diseñar un indicador que ayuda a priorizar qué puente debe ser instrumentado.

Para proponer un método de calibración de un indicador de priorización se necesita conocer que métodos de calibración hay para variables discretas. Esto permite poder hacer un cambio de paradigma en cuanto al uso de métodos de regresión tradicionales, ya que no se cumplen los supuestos básicos que sustentan estos métodos.

Se definieron las variables relevantes para formular un indicador que prioriza la instrumentación de monitorización. Este indicador permite capturar las diferentes características del puente, como la vulnerabilidad y la importancia del puente en la red vial.

## **CAPÍTULO 3: FORMULACIÓN CONCEPTUAL DEL INDICADOR DE PRIORIZACIÓN**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo, se presenta la formulación conceptual del Indicador de Priorización para la instrumentación de monitorización de puentes, especificando las variables explicativas del modelo y como se obtienen. También se presenta la formulación de la variable Complejidad del puente, la cual es una de las variables del Indicador de Priorización.

### **3.2 Propuesta de formulación**

El Indicador de Priorización es un modelo matemático de variables explicativas discretas que sirve como herramienta para poder priorizar qué puentes deben ser instrumentados para su monitorización. Dentro de las variables del Indicador de Priorización se tiene la Complejidad del puente, la que es representada mediante otro modelo matemático que permite capturar la complejidad de distintas características de los puentes.

En esta formulación se definió el rango de los modelos, sus variables explicativas y como se clasifican.

### **3.3 Indicador de Priorización**

El Indicador de Priorización (IP) se estima con la Ecuación 3.1. Se define el rango del indicador de priorización desde 1 a 10, en donde 1 representa un puente con baja prioridad a ser monitorizado y 10 representa un puente con alta prioridad a ser monitorizado.

$$IP=f(X_1,X_2,X_3,X_4) \quad (3.1)$$

Donde:

- IP = Indicador de Priorización
- $X_1$  = Complejidad
- $X_2$  = Importancia en la red vial
- $X_3$  = Vulnerabilidad
- $X_4$  = Edad (años)

Luego, se definieron las variables explicativas utilizadas en el Indicador de Priorización y su respectiva clasificación.

### **3.3.1 Complejidad**

Esta variable describe la complejidad de las características del puente entre las cuales se encuentran: estructuración del puente (De Solminihac *et al.*, 2018), si el puente es del tipo convencional vigas/celosía, atirantado/ colgante, de arco o un viaducto; galibo vertical, que se refiere a la altura del límite de aguas máximas al punto más bajo del puente; dificultad de inspección visual, que se refiere a la dificultad que tiene el inspector a la hora de realizársele una inspección visual a un puente

Estas variables inciden de distinta manera en el Indicador de Priorización. Sí el puente tiene una mayor Complejidad, el puente tendrá una mayor prioridad de ser instrumentado. En cambio, sí tiene una menor Complejidad, el puente tendrá una menor prioridad de ser instrumentado.

### **3.3.2 Importancia en la red vial**

Esta variable describe la importancia del puente dentro de la red vial en la que está inserto. Para esto se considera la existencia de rutas alternativas, en caso de producirse un corte total o parcial del puente. Una ruta se considera como una real alternativa cuando existe una estructura cercana al puente, la cual permita un tráfico con pocas interrupciones y pequeños atrasos para no aumentar de manera significativa el tiempo de viaje. Además, se considera el tránsito medio anual (TMDA; veh/día-año) que pasa por un puente. Esta variable se clasifica en 3 rangos: importancia baja, para puentes que tienen un bajo TMDA menor a 1200 veh/día-año y/o cuentan con diversas rutas alternativas; importancia media, para puentes que tienen un TMDA entre 1200 y 3000 veh/día-año y/o cuentan con tan solo 1 ruta alternativa; importancia alta, para puentes que tienen un TMDA mayor a 3000 veh/día-año y no poseen ruta alternativa

Estas variables inciden de distinta manera en el indicador de priorización. Sí el puente tiene una importancia baja, este tendrá una menor prioridad de ser instrumentado. En cambio, sí posee una importancia alta, este tendrá una mayor prioridad de ser instrumentado.

### **3.3.3 Vulnerabilidad**

Esta variable describe la susceptibilidad del puente a experimentar algún tipo de daño debido a una amenaza natural, tales como sismo, precipitaciones o inundaciones. Esta variable se clasifica en tres

rangos: vulnerabilidad baja, para puentes que tienen poca probabilidad de sufrir daños ante una amenaza sísmica o hidráulica; vulnerabilidad media, para puentes que tienen una probabilidad media de sufrir daños ante una amenaza sísmica o hidráulica; alta vulnerabilidad, para puentes que tienen una alta probabilidad de sufrir daños ante una amenaza sísmica o hidráulica.

Estas variables inciden de distinta manera en el indicador de priorización. Sí el puente tiene mayor vulnerabilidad, el puente tendrá una mayor prioridad de ser instrumentado. Sí el puente tiene mayor riesgo hidráulico, el puente tendrá una mayor prioridad de ser instrumentado.

### 3.3.4 Edad

Esta variable describe el periodo de tiempo desde que el puente se construyó hasta el presente o hasta su último año en operación. Esta variable se clasifica en tres rangos: puente nuevo, para puentes hasta 26 años; de edad media, para puentes entre 26 y 50 años; y antiguos, para puentes de más de 50 años Rashidi *et al.* (2016).

Esta variable incide de distinta manera en el indicador de priorización. Sí el puente tiene una mayor edad, tendrá una mayor prioridad de ser instrumentado. Por el contrario, sí el puente tiene una menor edad, tendrá una menor prioridad de ser instrumentado.

## 3.4 Complejidad

La complejidad del puente ( $X_1$ ) se estima mediante la Ecuación 3.2. Se define el rango de la complejidad del puente desde 1 a 10, en donde representa un puente de menor complejidad y 10 representa un puente de mayor complejidad.

$$X_1 = g(a_1, b_1, c_1), \quad (3.2)$$

Donde:

- $X_1$  = Complejidad
- $a_1$  = Estructuración
- $b_1$  = Galibo vertical (m)
- $c_1$  = Dificultad de acceso para inspeccionar

Luego, se definieron las variables explicativas utilizadas en la Complejidad del puente y su respectiva clasificación.

### 3.4.1 Estructuración

Esta variable describe las soluciones técnicas, arquitectónicas y paisajistas que están directamente relacionadas a los cursos de agua y/o accidentes geográficos que estos deben cruzar. Se clasifican en cuatro tipos de estructuraciones; puentes convencionales vigas/ celosía, puentes atirantados/ colgantes, puentes de arco y viaductos.

Esta variable incide de distinta manera en la Complejidad. Sí el puente tiene una estructuración más compleja, el puente tendrá una mayor Complejidad. Por el contrario, sí el puente tiene una estructuración menos compleja, el puente tendrá una menor Complejidad.

### 3.4.2 Galibo vertical

Esta variable describe la altura media del límite de aguas máximas al punto más bajo del puente. Se clasifica en 3 rangos, definidos en la Tabla 3.1: galibo vertical bajo, para puentes con un galibo vertical entre 5 y 10 m; galibo vertical medio, para puentes con un galibo vertical entre 10 y 20 m; y galibo vertical alto, para puentes con un galibo vertical mayor a 20 m.

Esta variable incide de distinta manera en la Complejidad. Sí el puente tiene un galibo vertical más alto, el puente tendrá una mayor Complejidad. Por el contrario, sí el puente tiene un galibo vertical más bajo, el puente tendrá una menor Complejidad.

**Tabla 0.1 Clasificación del galibo vertical del puente**

Galibo Vertical	
Tipo	Longitud (m)
Bajo	5-10
Medio	10-20
Alto	>20

### 3.4.3 Dificultad de acceso para inspeccionar

Esta variable describe la dificultad de acceso a distintos elementos del puente que deben ser revisados mediante inspección visual. Se clasifica en 3 rangos: dificultad baja, para puentes con baja dificultad de acceso a los distintos elementos que deben ser inspeccionados, por lo que no se necesitan medios auxiliares para acceder a los distintos elementos; dificultad media, para puentes que necesitan medios auxiliares para acceder a ciertos elementos para ser inspeccionados; dificultad alta, para puentes que



no tienen accesibilidad a los distintos elementos para ser inspeccionado, por lo que se necesita de medios auxiliares para poder inspeccionar los distintos elementos.

Esta variable incide de distinta manera en la Complejidad. Sí el puente tiene una mayor dificultad de acceso a inspeccionar, el puente tendrá una mayor Complejidad. Por el contrario, sí el puente tiene una menor dificultad de acceso a inspeccionar, el puente tendrá una menor Complejidad.

### **3.5 Conclusiones**

La formulación conceptual del Indicador de Priorización consideró cuatro variables: la Complejidad, la Importancia en la red, la Vulnerabilidad y la Edad. Se definió el rango del indicador y sus variables junto a su clasificación.

Debido a que no se tiene una definición precisa de la Complejidad, porque no depende de una sola variable, se formuló conceptualmente un modelo para poder describirla de mejor manera y poder capturar las distintas características del puente. Para esto, se definió el rango de la Complejidad y las variables explicativas que forman este modelo junto a su clasificación.

En comparación con el modelo propuesto por Moreno, el modelo formulado en esta memoria es superior en cuanto a la definición de la clasificación de sus variables. Esto debido a que en la propuesta de Moreno se normalizan las variables para su clasificación. Esto genera que no se logre capturar cabalmente la información entregada por las variables explicativas.

## **CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL INDICADOR DE PRIORIZACIÓN**

### **4.1 Introducción**

Este capítulo describe el procedimiento de calibración del Indicador de Priorización. Este procedimiento comienza por la toma de datos mediante la aplicación de una encuesta a expertos. Luego, se realiza la calibración del Indicador de Priorización y la Complejidad. Por último, se realiza una discusión de los resultados obtenidos. Una vez descrito el procedimiento se realiza un ejemplo de calibración.

### **4.2 Calibración del modelo**

Una vez formulado conceptualmente, se propone un procedimiento de calibración para modelo matemático, cuyo procedimiento consta de tres etapas: recolección de datos, elección y aplicación del método de regresión y por último una discusión de los resultados obtenidos.

Para la toma de datos se propuso utilizar una recolección de datos mediante la metodología Delphi, la cual consiste en la aplicación de una encuesta a un panel de expertos del área de gestión de puentes para capturar su opinión.

Luego, se utilizaron los métodos de regresión para variables discretas mostrados en el capítulo dos: Regresión Quasi Poisson, Regresión Binomial Negativa y Regresión Poisson Cero truncado. Estos métodos se aplican mediante el *software* de licencia libre R-Studio.

Finalmente, una vez obtenida la calibración con estos tres métodos para ambos modelos, se hace una discusión de los resultados obtenidos del modelo Quasi Poisson. Dentro de este análisis se verifica que el valor de  $p$  sea estadísticamente significativo para cada coeficiente obtenido con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha < 0.05$ ). Además, se debe analizar el valor del coeficiente de determinación  $R^2$ , que debe ser cercano a 1 y el valor del estadístico F, que debe ser suficientemente grande para que el modelo sea significativo.

### **4.3 Ejemplo de calibración utilizando el procedimiento propuesto**

Se realizó un ejemplo de calibración utilizando el procedimiento en donde se recopiló información mediante la aplicación de una encuesta a un panel de expertos. Luego se utilizaron los métodos de

Regresión Binomial Negativa, Regresión Quasi Poisson y Regresión Poisson Cero Truncado. Finalmente se hizo una discusión de los resultados obtenidos.

### **4.3.1 Toma de datos**

La recopilación de datos se basó en la aplicación de una encuesta a un panel de expertos en el área de la gestión de puentes. Para poder diseñar dicha encuesta se siguió una técnica que consistió en dos etapas.

- **Etapla 1: Encuesta Piloto**

Esta etapa tiene por objetivo recopilar información de un grupo reducido de expertos con el fin de preparar la encuesta definitiva. La encuesta piloto se encuentra en el Anexo 4.1. Su aplicación estuvo dentro de un proceso iterativo de mejora de la misma encuesta hasta llegar a la encuesta definitiva.

- **Etapla 2: Encuesta Definitiva**

Según los cambios aplicados a la encuesta piloto, se diseñó la encuesta definitiva. Esta se aplica al panel de expertos para obtener los datos necesarios para la posterior calibración del indicador.

La encuesta definitiva se encuentra en el Anexo 4.2. Este documento fue enviado a expertos del área de gestión de puentes, de la cual se obtuvieron 6 respuestas que se encuentran en el Anexo 4.3. Al no obtener la cantidad de respuestas necesarias se hizo una simulación de la base de datos correspondiente a las encuestas de complejidad del puente y el indicador de priorización. Dicha simulación se hizo con los datos obtenidos buscando que distribución se ajustaba mejor a estos haciendo un ranking de acuerdo con el test de Anderson-Darling. A partir de aquello, se escogió la distribución binomial como la que mejor se ajusta a los datos. Mediante esta simulación se obtuvo una base de datos de 56 encuestados para ambas encuestas.

### **4.3.2 Calibración del modelo**

La calibración del modelo se dividió en dos partes: una para la encuesta sobre el Indicador de Priorización y otra parte para la Complejidad. Para ambas partes se tiene una base de datos de variables discreta, por lo que en primera instancia se calculó la media ( $\bar{x}$ ) y varianza ( $s^2$ ) de los datos obtenidos en ambas encuestas, mediante la Ecuación 4.1 y 4.2 respectivamente. Los resultados de los parámetros estadísticos calculados se encuentran en el Anexo 4.4.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (4.1)$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (4.2)$$

Donde n es el número de datos.

Dado los resultados obtenidos, se obtuvo, tanto como para la base de datos de la encuesta sobre la evaluación de complejidad del puente, como para la evaluación de priorización de monitorización de los puentes, se tiene que se presenta una sub dispersión.

Al no poder cumplir la condición de equidispersión, no se puede utilizar el método de regresión de Poisson. Es por esto, que se optó por utilizar los métodos de Regresión Binomial Negativa, Quasi Poisson y Poisson Cero Truncado. Estas calibraciones se encuentran en el Anexo 4.5.

Ambas partes de esta calibración se realizó mediante el programa “RStudio”, el cual es un *software* de licencia libre, el cual tiene como herramienta distintos métodos de calibración. Para esto, se utilizó el paquete *readxl* para poder importar la base, el paquete *mass* para poder utilizar los métodos de regresión. Luego se utilizó el comando para realizar la regresión para poder realizar la calibración. Por último, se utilizó el comando *summary* para mostrar la calibración obtenida y *summary.lm* para obtener los estadígrafos del modelo.

Para la Regresión Binomial Negativa se utilizó el código de la Figura 4.1 para el Indicador de Priorización y el código de la Figura 4.2 para la complejidad del puente.

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
priorizacion <- read_excel(ruta_excel,sheet='Priorizacion')
summary(priorizacion)
eqt.nb2 <- as.formula(Priorizacion~Complejidad+Contexto+Vulnerabilidad+Edad)
modelobn2 <- glm.nb(eqt.nb2, data=priorizacion, link=log)
summary(modelobn2)
summary.lm(modelobn2)
```

**Figura 0.1 Código de calibración por Regresión Binomial Negativa del Indicador de Priorización**

```

library(readxl)

library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
complejidad <- read_excel(ruta_excel)
summary(complejidad)
eqt.nb <- as.formula(Complejidad~Estructuracion+Galibo+Dificultad)
modelobn <- glm.nb(eqt.nb, data=complejidad, link=log)
summary(modelobn)
summary.lm(modelobn)

```

**Figura 0.2 Código de calibración por Regresión Binomial Negativa del modelo de Complejidad**

Para la Regresión Quasi Poisson se utilizó el código de la Figura 4.3 para el Indicador de Priorización y el código de la Figura 4.4 para la Complejidad.

```

library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
priorizacion <- read_excel(ruta_excel,sheet='Priorizacion')
summary(priorizacion)
quasipoisson.model2 <- glm(Priorizacion~Complejidad+Contexto+Vulnerabilidad+Edad,family =
'quasipoisson',data=priorizacion)
summary(quasipoisson.model2)
summary.lm(quasipoisson.model2)

```

**Figura 0.3 Código de calibración por Regresión Quasi Poisson del Indicador de Priorización**

```

library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
complejidad <- read_excel(ruta_excel)
summary(complejidad)
quasipoisson.model1 <- glm(Complejidad~Estructuracion+Galibo+Dificultad,family =
'quasipoisson',data=complejidad)
summary(quasipoisson.model1)
summary.lm(quasipoisson.model1)

```

**Figura 0.4 Código de calibración por Regresión Quasi Poisson del modelo de Complejidad**

Para la Regresión de Poisson Cero Truncado se utilizó el código de la Figura 4.5 para el Indicador de Priorización y el código de la Figura 4.6 para la complejidad del puente.

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)
library(VGAM)
ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
priorizacion <- read_excel(ruta_excel,sheet='Priorizacion')
zero2 <- vglm(Priorizacion~Complejidad+Contexto+Vulnerabilidad+Edad,family=pospoisson(),data=priorizacion)
summary(zero2)
summary.lm(zero2)
```

**Figura 0.5 Código de calibración por Regresión Poisson Cero Truncado del Indicador de Priorización**

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)
library(VGAM)
ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
complejidad <- read_excel(ruta_excel)
summary(complejidad)
zero1 <- vglm(Complejidad~Estructuracion+Galibo+Dificultad,family=pospoisson(),data=complejidad)
summary(zero1)
summary.lm(zero1)
```

**Figura 0.6 Código de calibración por Regresión Poisson Cero Truncado del modelo de Complejidad**

### 4.3.3 Discusión de resultados

Una vez realizadas las calibraciones, se presentan los modelos obtenidos por el método de Regresión de Quasi Poisson para el Índice de Priorización y para la Complejidad. Además, se muestra el valor de sus estadígrafos calculados: el valor p de cada uno de sus coeficientes junto a su valor t correspondiente; el valor de  $R^2$  Ajustado; y el valor del estadístico F junto a su valor p.

El Indicador de Priorización obtenido se expresa en la Ecuación 4.1.

$$IP = 0.354 + 0.061X_1 + 0.214X_2 + 0.258X_3 + 0.102X_4, \quad 1 \leq IP \leq 10 \quad (4.1)$$

Donde IP es el Indicador de priorización de monitorización de puentes,  $X_1$  es la Complejidad,  $X_2$  es la importancia en la red vial,  $X_3$  es la vulnerabilidad,  $X_4$  es la edad.

Se obtuvieron los siguientes estadígrafos para el Indicador de Priorización:  $R^2$  Ajustado=0.972;  $F=1.021 \times 10^4$ ; Valor  $p= 2.2 \times 10^{-16}$ . Además, se muestran en la Tabla 4.1 los valores t y valores p de cada coeficiente.

**Tabla 0.1** Valores t y p para los coeficientes del Indicador de Priorización

<b>Coefficientes</b>	<b>Valor t</b>	<b>Valor p</b>
<b>Constante</b>	8.04	$2.16 \times 10^{-15}$
<b><math>X_1</math></b>	5.98	$2.93 \times 10^{-9}$
<b><math>X_2</math></b>	20.07	$2 \times 10^{-16}$
<b><math>X_3</math></b>	24.37	$2 \times 10^{-16}$
<b><math>X_4</math></b>	9.59	$2 \times 10^{-16}$

Para esta calibración se obtuvo un valor de  $R^2$  Ajustado cercano a 1, por lo que el ajuste del modelo es bueno. Además, se obtuvo un valor de F suficientemente grande con un valor p estadísticamente significativo, por lo que el modelo es significativo. Finalmente, se obtuvieron valores p menores a 0.05, con unos valores t lejanos a cero por lo que los coeficientes obtenidos son estadísticamente significativos.

Dado los valores obtenidos en los coeficientes, se puede concluir que la variable que más influye en el modelo es la vulnerabilidad del puente, en cambio, las variables que menos influye en el modelo es la complejidad del puente.

Para la Complejidad se obtuvo el modelo expresado en la Ecuación 4.2.

$$X_1 = 0.934 + 0.093a_1 + 0.077b_1 + 0.228c_1, \quad 1 \leq X_1 \leq 10 \quad (4.2)$$

Donde  $X_1$  es la Complejidad,  $a_1$  es la estructuración,  $b_1$  es el galibo y  $c_1$  es la dificultad de acceso para inspeccionar.

Se obtuvieron los siguientes estadígrafos para el Indicador de Priorización:  $R^2$  Ajustado=0.956;  $F=1.176 \times 10^4$ ; Valor  $p= 2.2 \times 10^{-16}$ . Además, se muestran en la Tabla 4.2 los valores t y valores p de cada coeficiente.

**Tabla 0.2 Valores t y p para los coeficientes de la Complejidad**

<b>Coefficientes</b>	<b>Valor t</b>	<b>Valor p</b>
<b>Constante</b>	29.23	$2 \times 10^{-16}$
<b>a<sub>1</sub></b>	13.83	$2 \times 10^{-16}$
<b>b<sub>1</sub></b>	8.43	$2 \times 10^{-16}$
<b>c<sub>1</sub></b>	24.85	$2 \times 10^{-16}$

Para esta calibración se obtuvo un valor de  $R^2$  Ajustado cercano a 1, por lo que el ajuste del modelo es bueno. Además, se obtuvo un valor de F suficientemente grande con un valor p estadísticamente significativo, por lo que el modelo es significativo. Finalmente, se obtuvieron valores p menores a 0.05, con unos valores t lejanos a cero por lo que los coeficientes obtenidos son estadísticamente significativos.

Dado los valores obtenidos en los coeficientes, se puede concluir que la variable que más influye en el modelo es la dificultad de acceso a inspeccionar, en cambio, las variables que menos influye en el modelo es el galibo vertical.

#### 4.4 Conclusiones

Se realizó un procedimiento de calibración para variables discretas, que consiste en la recopilación de datos, en la aplicación de modelos de regresión y una discusión de los resultados obtenidos. Además, se realizó un ejemplo de calibración siguiendo este procedimiento, obteniendo valores de los parámetros estadísticos estadísticamente significativos.

Lo más importante de este capítulo es la propuesta de los modelos de regresión de *Count Regression*, que presentan un cambio de paradigma acerca de los métodos utilizados tradicionalmente en Chile para la calibración de este tipo de indicadores de priorización. Se escogió la utilización de estos modelos debido a que se tienen datos discretos, debido a que no se cumplen los supuestos que sostiene los métodos tradicionales utilizados con variables continuas.

Al realizarse el ejemplo de calibración se pudo corroborar que los modelos de *Count Data* son válidos, ya que se obtuvieron estadígrafos significativos. Se obtuvieron valores p y t estadísticamente significativos para el cálculo de los coeficientes de ambos modelos. Además, se obtuvieron valores



de  $R^2$  Ajustado muy cercano a 1 por lo que el ajuste de los modelos es bueno. Por último, se obtuvieron valores del estadístico F de gran magnitud, por lo que se puede concluir que ambos modelos son significativos, es decir, las variables explicativas describen de buena manera las variables dependientes Indicador de Priorización y Complejidad.

Por último, la variable más importante para el Indicador de Priorización es la vulnerabilidad del puente. Para el caso de la Complejidad la variable más importante del modelo es la dificultad de acceso a inspeccionar.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Se ha logrado proponer un método para poder calibrar un indicador que prioriza la pertinencia de monitorización de puentes, para el cual se plantea la utilización de métodos de regresiones no tradicionales, como lo son los métodos de regresión para variables discretas.

Para la formulación del Indicador de Priorización, se definieron las variables Importancia en la red vial, Vulnerabilidad, Edad y Complejidad. La inclusión de esta última variable fue lo más innovador en la etapa de formulación del Indicador, ya que para obtener esta variable se formuló un segundo modelo matemático. Esto se hizo porque la definición de esta variable no era precisa, debido a que la Complejidad de un puente no depende de una sola variable.

Se realizó un ejemplo de calibración siguiendo el procedimiento propuesto obteniendo un modelo para el Indicador de Priorización y otro para la Complejidad. De estos modelos se obtuvieron estadígrafos estadísticamente significativos. Esto corrobora que el método propuesto para los modelos de variables discretas es estadísticamente válido.

Para poder obtener la base de datos utilizada para realizar la calibración se recopiló mediante la metodología Delphi, la cual consistió en enviar una encuesta a expertos de Dirección de Vialidad.

Este trabajo tiene un alcance superior en cuanto al método de calibración con respecto al trabajo propuesto por Moreno debido a que en este último no se utilizó un método de calibración para obtener los coeficientes del modelo, si no que se asignó un coeficiente dependiendo de la importancia que les diera el autor a estas variables dependiendo de sus diferentes escenarios. Esto trajo como ventajas al trabajo de Moreno tener un modelo sencillo de utilizar, que permite generar un ranking para priorizar la monitorización de puentes, pero al no ser calibrado trajo como desventaja la pérdida de información entregada por las variables explicativas, ya que no lograron capturar de la manera deseada la información.

Como futuras líneas de investigación se recomienda utilizar el procedimiento propuesto. Para esto se recomienda la aplicación de la encuesta formulada para el desarrollo de una investigación. Se recomienda enviar dicha encuesta al comienzo de la investigación para poder obtener las respuestas necesarias para realizar la calibración del Indicador de Priorización y de la Complejidad.

Por último, se recomienda analizar el uso de más variables explicativas para poder capturar de mejor manera las características de los puentes. Además, investigar sobre más métodos de calibración para

variables discretas, debido a que tradicionalmente en Chile se utilizan métodos de regresión tradicionales que no cumplen los supuestos básicos que los sustentan.

## REFERENCIAS

- Bush, S., Dean, A., White, C., y Lamrock, J. (2020). Prioritization Framework for Asset Management of New Brunswick's Covered Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(4), 4020049-1 - 402009-2. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001464](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001464).
- Cheng, M.Y., y Hoang, N.D. (2014). Risk Score Inference for Bridge Maintenance Project Using Evolutionary Fuzzy Least Squares Support Vector Machine. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(3), 4014003-1 - 4014003-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000275](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000275).
- Colin, A., y Trivedi, P. (1998). *Regression analysis of count data*. Cambridge University Press.
- Contreras-Nieto, C., Shan, Y., Lewis, P., y Hartell, J. (2019). Bridge maintenance prioritization using analytic hierarchy process and fusion tables. *Automation in Construction*, 101, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.016>.
- Darban, S., Tehrani, H., Karballaezadeh, N., y Mosavi, A. (2021). Application of analytical hierarchy process for Structural Health Monitoring and Prioritization of Concrete Bridge in Iran, *Appl. Sci.*, 11. <https://doi.org/10.3390/app11178060>.
- de Solminihaç, H., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2018). *Gestión de Infraestructura Vial*. Ediciones UC.
- Kawamura, K., & Miyamoto, A. (2003). Condition state evaluation of existing reinforced concrete bridges using neuro-fuzzy hybrid system. *Computers & Structures*, 81(18-19), 1931-1940. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00213-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00213-X).
- Kulkarni, R., Miller, D., Ingram, R., Wong, W., y Lorenz, J. (2004). Need-Based Project Prioritization: Alternative to Cost-Benefit Analysis. *Journal of Transportation Engineering*, 130(2), 150-158. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:2\(150\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:2(150)).
- Lwambuka, L., y Mtenga, P. (2014). Bridge Management Strategy Based on Extreme User Cost for Bridge Network Condition. *Advances in Civil Engineering*. 2014, 1-5. <https://doi.org/10.1155/2014/390359>.
- Ministerio de Obras Públicas. (2020). *Puentes para Chile*. Gobierno de Chile.

- Moreno, F. (2021). *Diseño de indicadores para la clasificación de pertenencia de monitorización de puentes*. Universidad de Concepción, Chile.
- Oyegbile, O., Chorzepa, M., Durham, S., y Kim, S. (2021). Novel Prioritization Mechanism to Enhance Long-Term Performance Predictions for Bridge Asset Management. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(1), 4020133-1 - 4020133-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001531](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001531).
- Seguel, J. (2019). *Bases metodológicas para implementación de sistemas de instrumentación y monitoreo de salud estructural en tiempo real de puentes en Chile*. Universidad de Chile, Chile
- Stevens , N.-A., Lydon, M., Marshall, A., y Taylor , S. (2020). Identification of Bridge Key Performance Indicators Using Survival Analysis for Future Network-Wide Structural Health Monitoring. *Sensor* 2020,20(23), 1-15. <https://doi.org/10.3390/s20236894>.
- Valenzuela , S., de Solminihaç, H., y Echaveguren, T. (2010). Proposal of an Integrated Index for Prioritization of Bridge Maintenance. *Journal of Bridge Engineering*, 15(3), 337-343. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000068](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000068).
- Vilà Baños, R., Torrado-Fonseca, M., y Reguant Alvarez, M. (2019). Anàlisi de regressió lineal múltiple amb SPSS: un exemple pràctic. *Revista d'Innovació I Recerca En Educació*, 12(2), 1-10. <https://doi.org/10.1344/reire2019.12.222704>

## Anexo 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

### Vinculación

Se vincula debido a que el objetivo principal es proponer un método para calibrar un indicador de priorización de monitorización, con el cual se logra optimizar la toma de decisiones sobre qué puentes deben ser instrumentados. Esto conlleva consigo una optimización de recursos mediante una acción preventiva en lugar de reactiva. Además, cuando un puente falla tiene algún problema genera grandes costos a nivel social y de conectividad por lo que al evitar que esto suceda se genera un beneficio económico, social y de conectividad. También este trabajo es innovador debido a que cambia el paradigma con el cual se prioriza la monitorización en Chile, debido a que se propone un método de calibración *ad hoc* a las variables utilizadas.

## **Anexo 4.1    Diseño y aplicación de encuesta piloto**

### **Anexo 4.1.1    Diseño de la encuesta**

El diseño de la encuesta parte con determinar la cantidad de escenarios que se incluirán en ella. Estos escenarios nacen de la combinación de los estados definidos anteriormente para cada variable del indicador. En esta oportunidad la encuesta está conformada de dos partes; la primera parte que consiste en la evaluación de la complejidad de los puentes, y la segunda parte que consiste en la evaluación de la priorización de monitorización de los puentes.

Para determinar la cantidad de escenarios de ambas partes de la encuesta, se hizo un análisis con respecto al clúster de las variables, el cual determino que para ambas partes de la encuesta se requería un total de 30 escenarios. Además de esto, se requirió la elaboración de tres formas distintas, con un traslape del 50% entre ellas, es decir, que las tres formas tuvieran la mitad de los escenarios iguales.

### **Anexo 4.1.2 Diseño y aplicación de la encuesta piloto**

La encuesta piloto fue aplicada a un grupo de cuatro ingenieros y estudiantes de magister de la Universidad de Concepción. Esta aplicación tuvo como objetivo probar la encuesta antes de aplicar la encuesta definitiva al panel de expertos, definir la forma de procesamiento de los resultados y calibración del indicador.

Esta encuesta estuvo compuesta de tres partes: introducción, definiciones de variables y desarrollo.

- a) **Introducción:** contiene el contexto de la aplicación de la encuesta junto a los objetivos.
- b) **Definiciones:** contiene las definiciones de las variables que conforman el indicador junto a la clasificación de estas.
- c) **Desarrollo:** contiene las instrucciones de llenado junto al formulario de respuestas.

Los resultados obtenidos en la encuesta piloto entregaron convergencia de las respuestas. Sin embargo, con la finalidad de obtener mejores datos para la calibración, se hicieron modificaciones en cuanto a las definiciones, y al diseño de los escenarios censurando los escenarios poco probables en la realidad, como se puede ver en el Anexo 4.1.

### **Anexo 4.1.3 Resultado de Encuesta Piloto Parte 1**

A continuación, se muestran las respuestas obtenidas en la Encuesta Piloto parte 1.

Encuestado 1

Tabla A.4.1.1 Resultados Encuesta Piloto Parte 1 Encuestado 1

<b>Complejidad</b>	<b>Estructuración</b>	<b>Galibo Vertical (m)</b>	<b>Dificultad de Inspección</b>
3	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja
6	Convencional vigas/ celosía	Medio	Media
7	Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta
8	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
5	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media
6	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
5	Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja
7	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta
9	Atirantado/ colgante	Alto	Alta
4	Atirantado/ colgante	Bajo	Baja
6	Atirantado/ colgante	Medio	Media
5	Atirantado/ colgante	Medio	Baja
6	Atirantado/ colgante	Bajo	Alta
5	Atirantado/ colgante	Bajo	Media
8	Atirantado/ colgante	Medio	Alta
6	Atirantado/ colgante	Alto	Bajo
6	Arco	Medio	Media
5	Arco	Medio	Baja
4	Arco	Bajo	Baja
5	Arco	Bajo	Media
6	Arco	Alto	Baja
9	Arco	Alto	Alta
8	Arco	Medio	Alta
7	Viaducto	Medio	Media
10	Viaducto	Alto	Alta
6	Viaducto	Bajo	Media
6	Viaducto	Medio	Baja
5	Viaducto	Bajo	Baja
8	Viaducto	Alto	Media
7	Viaducto	Alto	Baja

Encuestado 2



Tabla A.4.1.2 Resultados Encuesta Piloto Parte 1 Encuestado 2

<b>Complejidad</b>	<b>Estructuración</b>	<b>Galibo Vertical (m)</b>	<b>Dificultad de Inspección</b>
1	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja
4	Convencional vigas/ celosía	Medio	Media
6	Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta
7	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
3	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media
3	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
3	Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja
4	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta
10	Atirantado/ colgante	Alto	Alta
6	Atirantado/ colgante	Bajo	Baja
8	Atirantado/ colgante	Medio	Media
7	Atirantado/ colgante	Medio	Baja
8	Atirantado/ colgante	Bajo	Alta
5	Atirantado/ colgante	Bajo	Media
8	Atirantado/ colgante	Medio	Alta
7	Atirantado/ colgante	Alto	Bajo
6	Arco	Medio	Media
5	Arco	Medio	Baja
4	Arco	Bajo	Baja
5	Arco	Bajo	Media
7	Arco	Alto	Baja
9	Arco	Alto	Alta
8	Arco	Medio	Alta
7	Viaducto	Medio	Media
10	Viaducto	Alto	Alta
8	Viaducto	Bajo	Media
7	Viaducto	Medio	Baja
6	Viaducto	Bajo	Baja
9	Viaducto	Alto	Media
8	Viaducto	Alto	Baja

Encuestado 3

Tabla A.4.1.3 Resultados Encuesta Piloto Parte 1 Encuestado 3

Complejidad	Estructuración	Galibo Vertical (m)	Dificultad de Inspección
3	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja
5	Convencional vigas/ celosía	Medio	Media
6	Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta
7	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
4	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media
5	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
4	Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja
5	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta
10	Atirantado/ colgante	Alto	Alta
6	Atirantado/ colgante	Bajo	Baja
8	Atirantado/ colgante	Medio	Media
7	Atirantado/ colgante	Medio	Baja
8	Atirantado/ colgante	Bajo	Alta
7	Atirantado/ colgante	Bajo	Media
9	Atirantado/ colgante	Medio	Alta
8	Atirantado/ colgante	Alto	Bajo
6	Arco	Medio	Media
5	Arco	Medio	Baja
4	Arco	Bajo	Baja
5	Arco	Bajo	Media
6	Arco	Alto	Baja
8	Arco	Alto	Alta
7	Arco	Medio	Alta
7	Viaducto	Medio	Media
9	Viaducto	Alto	Alta
6	Viaducto	Bajo	Media
6	Viaducto	Medio	Baja
5	Viaducto	Bajo	Baja
8	Viaducto	Alto	Media
7	Viaducto	Alto	Baja

Tabla A.4.1.4 Resultados Encuesta Piloto Parte 1 Encuestado 4

Complejidad	Estructuración	Galibo Vertical (m)	Dificultad de Inspección
1	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja
4	Convencional vigas/ celosía	Medio	Media
7	Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta
8	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
3	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media
5	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
3	Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja
6	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta
9	Atirantado/ colgante	Alto	Alta
2	Atirantado/ colgante	Bajo	Baja
5	Atirantado/ colgante	Medio	Media
3	Atirantado/ colgante	Medio	Baja
6	Atirantado/ colgante	Bajo	Alta
4	Atirantado/ colgante	Bajo	Media
7	Atirantado/ colgante	Medio	Alta
4	Atirantado/ colgante	Alto	Bajo
5	Arco	Medio	Media
3	Arco	Medio	Baja
2	Arco	Bajo	Baja
4	Arco	Bajo	Media
4	Arco	Alto	Baja
9	Arco	Alto	Alta
7	Arco	Medio	Alta
6	Viaducto	Medio	Media
10	Viaducto	Alto	Alta
5	Viaducto	Bajo	Media
4	Viaducto	Medio	Baja
3	Viaducto	Bajo	Baja
7	Viaducto	Alto	Media
4	Viaducto	Alto	Baja

#### Anexo 4.1.4 Resultado de Encuesta Piloto Parte 2

A continuación, se muestran las respuestas obtenidas en la Encuesta Piloto parte 2.

## Encuestado 1

Tabla A.4.1.5 Resultados Encuesta Piloto Parte 2 Encuestado 1

Priorización	Complejidad	Contexto del puente	Vulnerabilidad del puente	Edad del puente
4	Baja	Medio	Alta	Nuevo
3	Baja	Bajo	Media	Antiguo
5	Baja	Alto	Alta	Medio
2	Baja	Bajo	Media	Nuevo
4	Baja	Alto	Media	Medio
4	Baja	Alto	Baja	Antiguo
4	Baja	Medio	Media	Antiguo
1	Baja	Bajo	Baja	Nuevo
3	Baja	Medio	Baja	Antiguo
3	Baja	Bajo	Alta	Nuevo
4	Media	Medio	Baja	Nuevo
7	Media	Alto	Alta	Nuevo
7	Media	Alto	Media	Antiguo
6	Media	Bajo	Alta	Antiguo
5	Media	Medio	Media	Medio
5	Media	Bajo	Alta	Nuevo
5	Media	Alto	Baja	Nuevo
7	Media	Medio	Alta	Antiguo
5	Media	Medio	Media	Nuevo
6	Alta	Medio	Alta	Medio
8	Alta	Medio	Alta	Nuevo
10	Alta	Alto	Alta	Antiguo
10	Alta	Medio	Baja	Medio
9	Alta	Alto	Alta	Medio
8	Alta	Alto	Media	Nuevo
6	Alta	Bajo	Baja	Antiguo
7	Alta	Alto	Baja	Medio
7	Alta	Bajo	Alta	Medio
6	Alta	Bajo	Media	Medio
5	Alto	Bajo	Baja	Medio

## Encuestado 2

Tabla A.4.1.6 Resultados Encuesta Piloto Parte 2 Encuestado 2

Priorización	Complejidad	Contexto del puente	Vulnerabilidad del puente	Edad del puente
4	Baja	Medio	Alta	Nuevo
3	Baja	Bajo	Media	Antiguo
7	Baja	Alto	Alta	Medio
2	Baja	Bajo	Media	Nuevo
6	Baja	Alto	Media	Medio
7	Baja	Alto	Baja	Antiguo
4	Baja	Medio	Media	Antiguo
1	Baja	Bajo	Baja	Nuevo
3	Baja	Medio	Baja	Antiguo
4	Baja	Bajo	Alta	Nuevo
2	Media	Medio	Baja	Nuevo
7	Media	Alto	Alta	Nuevo
8	Media	Alto	Media	Antiguo
3	Media	Bajo	Alta	Antiguo
4	Media	Medio	Media	Medio
2	Media	Bajo	Alta	Nuevo
6	Media	Alto	Baja	Nuevo
4	Media	Medio	Alta	Antiguo
3	Media	Medio	Media	Nuevo
5	Alta	Medio	Alta	Medio
4	Alta	Medio	Alta	Nuevo
10	Alta	Alto	Alta	Antiguo
10	Alta	Medio	Baja	Medio
10	Alta	Alto	Alta	Medio
8	Alta	Alto	Media	Nuevo
3	Alta	Bajo	Baja	Antiguo
6	Alta	Alto	Baja	Medio
3	Alta	Bajo	Alta	Medio
3	Alta	Bajo	Media	Medio
2	Alto	Bajo	Baja	Medio

Tabla A.4.1.7 Resultados Encuesta Piloto Parte 2 Encuestado 3

Priorización	Complejidad	Contexto del puente	Vulnerabilidad del puente	Edad del puente
7	Baja	Medio	Alta	Nuevo
5	Baja	Bajo	Media	Antiguo
9	Baja	Alto	Alta	Medio
5	Baja	Bajo	Media	Nuevo
7	Baja	Alto	Media	Medio
6	Baja	Alto	Baja	Antiguo
6	Baja	Medio	Media	Antiguo
3	Baja	Bajo	Baja	Nuevo
5	Baja	Medio	Baja	Antiguo
6	Baja	Bajo	Alta	Nuevo
5	Media	Medio	Baja	Nuevo
9	Media	Alto	Alta	Nuevo
8	Media	Alto	Media	Antiguo
7	Media	Bajo	Alta	Antiguo
7	Media	Medio	Media	Medio
7	Media	Bajo	Alta	Nuevo
7	Media	Alto	Baja	Nuevo
8	Media	Medio	Alta	Antiguo
7	Media	Medio	Media	Nuevo
7	Alta	Medio	Alta	Medio
9	Alta	Medio	Alta	Nuevo
10	Alta	Alto	Alta	Antiguo
10	Alta	Medio	Baja	Medio
10	Alta	Alto	Alta	Medio
9	Alta	Alto	Media	Nuevo
5	Alta	Bajo	Baja	Antiguo
7	Alta	Alto	Baja	Medio
7	Alta	Bajo	Alta	Medio
6	Alta	Bajo	Media	Medio
5	Alto	Bajo	Baja	Medio

Tabla A.4.1.8 Resultados Encuesta Piloto Parte 2 Encuestado 4

Priorización	Complejidad	Contexto del puente	Vulnerabilidad del puente	Edad del puente
5	Baja	Medio	Alta	Nuevo
6	Baja	Bajo	Media	Antiguo
7	Baja	Alto	Alta	Medio
3	Baja	Bajo	Media	Nuevo
6	Baja	Alto	Media	Medio
6	Baja	Alto	Baja	Antiguo
5	Baja	Medio	Media	Antiguo
1	Baja	Bajo	Baja	Nuevo
5	Baja	Medio	Baja	Antiguo
3	Baja	Bajo	Alta	Nuevo
4	Media	Medio	Baja	Nuevo
5	Media	Alto	Alta	Nuevo
7	Media	Alto	Media	Antiguo
7	Media	Bajo	Alta	Antiguo
5	Media	Medio	Media	Medio
4	Media	Bajo	Alta	Nuevo
4	Media	Alto	Baja	Nuevo
8	Media	Medio	Alta	Antiguo
4	Media	Medio	Media	Nuevo
7	Alta	Medio	Alta	Medio
7	Alta	Medio	Alta	Nuevo
10	Alta	Alto	Alta	Antiguo
10	Alta	Medio	Baja	Medio
8	Alta	Alto	Alta	Medio
6	Alta	Alto	Media	Nuevo
5	Alta	Bajo	Baja	Antiguo
6	Alta	Alto	Baja	Medio
5	Alta	Bajo	Alta	Medio
4	Alta	Bajo	Media	Medio
3	Alto	Bajo	Baja	Medio

## **ANEXO 4.2 DISEÑO Y APLICACIÓN DE ENCUESTA DEFINITIVA**

### **Anexo 4.2.1 Encuesta Definitiva Parte 1 sobre Complejidad del Puente**

Esta encuesta tiene por finalidad recopilar datos para el desarrollo de un modelo de priorización de necesidades de instrumentación para monitorizar puentes en Chile. La encuesta se encuentra dentro del marco del proyecto FONDEF IT18I0112 “Plataforma de Monitoreo Estructural de Puentes” liderado por la Universidad de Concepción, con el apoyo de la Dirección de Vialidad Nacional del Ministerio de Obras Públicas.

Quisiéramos pedirle su cooperación en su calidad de especialista en gestión de puentes para responder esta encuesta con la cual podremos desarrollar el modelo antes indicado

En la primera parte de la encuesta se califica sólo la complejidad de un puente, la cual es una de las variables que describe la priorización de instrumentación de monitorización, la cual está compuesta por la estructuración del puente, longitud del puente, galibo vertical y dificultad de inspección.

#### **Definición de variables**

- 1. Complejidad del puente:** describe cuan complejas son las características intrínsecas del puente, lo cual depende de las variables: estructuración, longitud, galibo vertical y dificultad de inspección.
- 2. Estructuración del puente:** se refiere a soluciones técnicas, arquitectónicas y paisajistas que están directamente relacionadas a los cursos de agua y/o accidentes geográficos que estos deben cruzar. Se clasifican en 4 tipos de estructuraciones; puentes convencionales vigas/ celosía, puentes atirantados/ colgantes, puentes de arco y viaductos.
- 3. Galibo vertical:** se refiere a la altura media del límite de aguas máximas al punto más bajo del puente. Se clasifica en 3 rangos: galibo vertical bajo, para puentes con un galibo vertical entre 5 y 10 m; galibo vertical medio, para puentes con un galibo vertical entre 10 y 20 m; y galibo vertical alto, para puentes con un galibo vertical mayor a 20 m.
- 4. Dificultad de acceso para inspeccionar:** se refiere a la dificultad de acceso a distintos elementos del puente que deben ser revisados mediante inspección visual, como por ejemplo las partes interiores de las vigas con gálibos verticales muy grandes o el muro frontal de un estribo. Se



clasifica en 3 rangos: dificultad baja, para puentes con baja dificultad de acceso a los distintos elementos que deben ser inspeccionados, por lo que no se necesitan medios auxiliares para acceder a los distintos elementos; dificultad media, para puentes que necesitan medios auxiliares para acceder a ciertos elementos para ser inspeccionados; dificultad alta, para puentes que no tienen accesibilidad a los distintos elementos para ser inspeccionado, por lo que se necesita de medios auxiliares para poder inspeccionar los distintos elementos.

### Instrucciones de respuesta

#### Parte 1: Calificación de la complejidad del puente

En la primera parte de la encuesta se muestran escenarios que representan puentes **con distintas combinaciones de las variables que explican su complejidad**. Por favor, califique con una nota de **1 a 10** la complejidad del puente, en donde 1 representa una menor complejidad y 10 una mayor complejidad del puente.

**Tabla A.4.2.1 Formulario Encuesta Parte 1**

<b>Complejidad</b>	<b>Estructuración</b>	<b>Galibo Vertical (m)</b>	<b>Dificultad de Inspección</b>
	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja
	Convencional vigas/ celosía	Medio	Media
	Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta
	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media
	Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta
	Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja
	Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta
	Atirantado/ colgante	Alto	Alta
	Atirantado/ colgante	Bajo	Baja
	Atirantado/ colgante	Medio	Media
	Atirantado/ colgante	Medio	Baja
	Atirantado/ colgante	Bajo	Alta
	Atirantado/ colgante	Bajo	Media
	Atirantado/ colgante	Medio	Alta
	Atirantado/ colgante	Alto	Bajo
	Arco	Medio	Media
	Arco	Medio	Baja
	Arco	Bajo	Baja
	Arco	Bajo	Media

**Tabla A.4.2.1 Formulario Encuesta Parte 1 (Continuación)**

	Arco	Alto	Baja
	Arco	Alto	Alta
	Arco	Medio	Alta
	Viaducto	Medio	Media
	Viaducto	Alto	Alta
	Viaducto	Bajo	Media
	Viaducto	Medio	Baja
	Viaducto	Bajo	Baja
	Viaducto	Alto	Media
	Viaducto	Alto	Baja

### **Anexo 4.2.2 Encuesta Definitiva Parte 1 sobre la priorización de instrumentación de monitorización de puentes.**

Esta encuesta tiene por finalidad recopilar datos para el desarrollo de un modelo de priorización de necesidades de instrumentación para monitorizar puentes en Chile. La encuesta se encuentra dentro del marco del proyecto FONDEF IT18I0112 “Plataforma de Monitoreo Estructural de Puentes” liderado por la Universidad de Concepción, con el apoyo de la Dirección de Vialidad Nacional del Ministerio de Obras Públicas.

Quisiéramos pedirle su cooperación en su calidad de especialista en gestión de puentes para responder esta encuesta con la cual podremos desarrollar el modelo antes indicado

### **Parte 2**

En la segunda parte de la encuesta se califica la priorización de instrumentación de monitorización de puentes.

### **Definición de variables**

- 1. Complejidad del puente:** describe cuan complejas son las características intrínsecas del puente, lo cual depende de las variables estructuración, longitud, galibo vertical y dificultad de inspección. Se clasifica en 3 rangos: baja complejidad, para puentes que presentan una estructuración convencional vigas/ celosía, un galibo vertical bajo y no presenta dificultades para ser inspeccionado; complejidad media para puentes que presentan una estructuración de viaducto, un galibo vertical medio o alto y presenta una dificultad media de acceso para ser inspeccionados; y

alta complejidad para puentes que presenta una estructuración atirantada/ colgante o de arco, un galibo vertical alto y una alta dificultad de acceso para ser inspeccionado.

2. **El puente dentro del contexto de la red vial:** es un criterio de priorización que describe la importancia de puente dentro de la red vial en la cual está inserto a través de las características del contexto vial, tales como la existencia de una ruta alternativa y el TMDA. Se clasifica en 3 rangos: importancia baja, para puentes que tienen un bajo TMDA menor a 1200 veh/día y/o cuentan con diversas rutas alternativas; importancia media, para puentes que tienen un TMDA medio entre 1200 y 3000 veh/día y/o cuentan con tan solo 1 ruta alternativa; importancia alta, para puentes que tienen un Alta TMDA mayor a 3000 veh/día y no poseen ruta alternativa.
3. **Vulnerabilidad del puente:** es un criterio de priorización que describe la susceptibilidad del puente a sufrir algún tipo de daño debido a un riesgo asociado a una amenaza natural, como un sismo, precipitaciones o inundaciones. Se clasifica en 3 rangos: vulnerabilidad baja, para puentes que tienen poca probabilidad de sufrir daños ante una amenaza sísmica o hidráulica; vulnerabilidad media, para puentes que tienen una probabilidad media de sufrir daños ante una amenaza sísmica o hidráulica; alta vulnerabilidad, para puentes que tienen una alta probabilidad de sufrir daños ante una amenaza sísmica o hidráulica.
4. **Edad del puente:** es un criterio de priorización que describe el periodo de tiempo desde que el puente se construyó hasta el presente año o hasta su último año en operación. se clasifica en 3 rangos: puentes nuevos para puentes con una edad menor a 26 años; puentes de edad media para puentes con una edad entre 26 y 50 años; y puentes antiguos, para puentes con una edad mayor a 50 años.

### **Instrucciones de respuesta**

Parte 2: Calificación de la priorización de instrumentación de monitorización de puentes.

En la segunda parte de la encuesta se muestran escenarios que representan puentes **con distintas combinaciones de las variables que explican la priorización de instrumentación de monitorización de puentes**. Por favor, califique con una nota de **1 a 10** la priorización de

instrumentación de monitorización de puentes, en donde 1 representa una menor priorización y 10 una mayor priorización del puente.

**Tabla A.4.2.2 Formulario Encuesta Parte 2**

<b>Priorización</b>	<b>Complejidad</b>	<b>Contexto del puente</b>	<b>Vulnerabilidad del puente</b>	<b>Edad del puente</b>
	Baja	Medio	Alta	Nuevo
	Baja	Bajo	Media	Antiguo
	Baja	Alto	Alta	Medio
	Baja	Bajo	Media	Nuevo
	Baja	Alto	Media	Medio
	Baja	Alto	Baja	Antiguo
	Baja	Medio	Media	Antiguo
	Baja	Bajo	Baja	Nuevo
	Baja	Medio	Baja	Antiguo
	Baja	Bajo	Alta	Nuevo
	Media	Medio	Baja	Nuevo
	Media	Alto	Alta	Nuevo
	Media	Alto	Media	Antiguo
	Media	Bajo	Alta	Antiguo
	Media	Medio	Media	Medio
	Media	Bajo	Alta	Nuevo
	Media	Alto	Baja	Nuevo
	Media	Medio	Alta	Antiguo
	Media	Medio	Media	Nuevo
	Alta	Medio	Alta	Medio
	Alta	Medio	Alta	Nuevo
	Alta	Alto	Alta	Antiguo
	Alta	Medio	Baja	Medio
	Alta	Alto	Alta	Medio
	Alta	Alto	Media	Nuevo
	Alta	Bajo	Baja	Antiguo
	Alta	Alto	Baja	Medio
	Alta	Bajo	Alta	Medio
	Alta	Bajo	Media	Medio
	Alto	Bajo	Baja	Medio

**ANEXO 4.3 RESPUESTAS ENCUESTAS DEFITIVAS**

A continuación, se muestran las respuestas de las encuestas enviadas a los expertos correspondientes.

**Anexo 4.3.1 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 1****Tabla A.4.3.1 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 1 Encuestados 1, 2 y 3**

Estructuración	Galibo Vertical (m)	Dificultad de Inspección	Respuestas de los Encuestados		
			1	2	3
Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja	2	7	1
Convencional vigas/ celosía	Medio	Media	4	9	3
Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta	6	10	5
Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta	8	10	7
Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media	4	7	2
Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta	4	10	5
Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja	2	7	4
Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta	8	9	5
Atirantado/ colgante	Alto	Alta	9	10	9
Atirantado/ colgante	Bajo	Baja	2	6	4
Atirantado/ colgante	Medio	Media	4	10	6
Atirantado/ colgante	Medio	Baja	2	8	5
Atirantado/ colgante	Bajo	Alta	8	10	6
Atirantado/ colgante	Bajo	Media	4	9	5
Atirantado/ colgante	Medio	Alta	8	10	8
Atirantado/ colgante	Alto	Bajo	5	8	7
Arco	Medio	Media	5	9	6
Arco	Medio	Baja	4	8	3
Arco	Bajo	Baja	2	6	2
Arco	Bajo	Media	5	8	4
Arco	Alto	Baja	4	8	5
Arco	Alto	Alta	9	10	9
Arco	Medio	Alta	8	10	8
Viaducto	Medio	Media	7	10	6
Viaducto	Alto	Alta	6	7	6
Viaducto	Bajo	Media	9	9	10
Viaducto	Medio	Baja	6	8	6
Viaducto	Bajo	Baja	5	7	5
Viaducto	Alto	Media	8	9	7
Viaducto	Alto	Baja	5	7	6

Tabla A.4.3.2 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 1 Encuestados 4, 5 y 6

Estructuración	Galibo Vertical (m)	Dificultad de Inspección	Respuestas de los Encuestados		
			4	5	6
Convencional vigas/ celosía	Bajo	Baja	3	1	2
Convencional vigas/ celosía	Medio	Media	4	5	4
Convencional vigas/ celosía	Medio	Alta	7	6	6
Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta	8	7	8
Convencional vigas/ celosía	Bajo	Media	5	4	4
Convencional vigas/ celosía	Alto	Alta	5	5	4
Convencional vigas/ celosía	Medio	Baja	4	4	3
Convencional vigas/ celosía	Bajo	Alta	7	5	6
Atirantado/ colgante	Alto	Alta	10	9	9
Atirantado/ colgante	Bajo	Baja	5	5	2
Atirantado/ colgante	Medio	Media	7	7	5
Atirantado/ colgante	Medio	Baja	5	6	4
Atirantado/ colgante	Bajo	Alta	6	7	6
Atirantado/ colgante	Bajo	Media	5	6	4
Atirantado/ colgante	Medio	Alta	7	8	7
Atirantado/ colgante	Alto	Bajo	6	7	4
Arco	Medio	Media	7	6	5
Arco	Medio	Baja	6	5	4
Arco	Bajo	Baja	4	4	2
Arco	Bajo	Media	5	5	4
Arco	Alto	Baja	6	6	4
Arco	Alto	Alta	9	8	9
Arco	Medio	Alta	8	7	7
Viaducto	Medio	Media	7	6	6
Viaducto	Alto	Alta	6	8	6
Viaducto	Bajo	Media	7	10	10
Viaducto	Medio	Baja	6	8	6
Viaducto	Bajo	Baja	5	7	3
Viaducto	Alto	Media	6	9	7
Viaducto	Alto	Baja	5	8	4

## Anexo 4.3.2 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 2

Tabla A.4.3.3 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 2 Encuestados 1, 2 y 3

Complejidad	Contexto del puente	Vulnerabilidad del puente	Edad del puente	Respuestas de los Encuestados		
				1	2	3
Baja	Medio	Alta	Nuevo	9	7	7
Baja	Bajo	Media	Antiguo	7	6	5
Baja	Alto	Alta	Medio	9	9	9
Baja	Bajo	Media	Nuevo	7	2	5
Baja	Alto	Media	Medio	7	5	7
Baja	Alto	Baja	Antiguo	5	5	6
Baja	Medio	Media	Antiguo	7	6	6
Baja	Bajo	Baja	Nuevo	3	1	3
Baja	Medio	Baja	Antiguo	4	3	5
Baja	Bajo	Alta	Nuevo	8	2	6
Media	Medio	Baja	Nuevo	6	2	5
Media	Alto	Alta	Nuevo	9	3	9
Media	Alto	Media	Antiguo	7	8	8
Media	Bajo	Alta	Antiguo	9	7	7
Media	Medio	Media	Medio	7	3	7
Media	Bajo	Alta	Nuevo	9	2	7
Media	Alto	Baja	Nuevo	5	1	7
Media	Medio	Alta	Antiguo	9	9	8
Media	Medio	Media	Nuevo	7	2	7
Alta	Medio	Alta	Medio	9	6	6
Alta	Medio	Alta	Nuevo	9	3	9
Alta	Alto	Alta	Antiguo	9	10	10
Alta	Medio	Baja	Medio	5	4	6
Alta	Alto	Alta	Medio	9	10	10
Alta	Alto	Media	Nuevo	7	3	9
Alta	Bajo	Baja	Antiguo	5	6	5
Alta	Alto	Baja	Medio	5	5	7
Alta	Bajo	Alta	Medio	8	5	7
Alta	Bajo	Media	Medio	6	6	6
Alto	Bajo	Baja	Medio	3	3	6

Tabla A.4.3.4 Respuestas Encuesta Definitiva Parte 2 Encuestados 4, 5 y 6

Complejidad	Contexto del puente	Vulnerabilidad del puente	Edad del puente	Respuestas de los Encuestados		
				4	5	6
Baja	Medio	Alta	Nuevo	4	7	5
Baja	Bajo	Media	Antiguo	3	3	6
Baja	Alto	Alta	Medio	7	9	7
Baja	Bajo	Media	Nuevo	2	3	3
Baja	Alto	Media	Medio	6	7	6
Baja	Alto	Baja	Antiguo	6	7	6
Baja	Medio	Media	Antiguo	4	6	5
Baja	Bajo	Baja	Nuevo	1	1	1
Baja	Medio	Baja	Antiguo	3	4	5
Baja	Bajo	Alta	Nuevo	4	4	3
Media	Medio	Baja	Nuevo	2	3	4
Media	Alto	Alta	Nuevo	7	9	5
Media	Alto	Media	Antiguo	8	9	7
Media	Bajo	Alta	Antiguo	4	5	7
Media	Medio	Media	Medio	4	6	5
Media	Bajo	Alta	Nuevo	2	5	4
Media	Alto	Baja	Nuevo	6	7	4
Media	Medio	Alta	Antiguo	4	7	8
Media	Medio	Media	Nuevo	3	6	3
Alta	Medio	Alta	Medio	4	7	6
Alta	Medio	Alta	Nuevo	4	8	6
Alta	Alto	Alta	Antiguo	10	10	10
Alta	Medio	Baja	Medio	4	4	5
Alta	Alto	Alta	Medio	8	9	8
Alta	Alto	Media	Nuevo	8	8	5
Alta	Bajo	Baja	Antiguo	3	4	5
Alta	Alto	Baja	Medio	6	8	6
Alta	Bajo	Alta	Medio	3	6	5
Alta	Bajo	Media	Medio	3	4	4
Alto	Bajo	Baja	Medio	2	4	4



**ANEXO 4.4 VALORES DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS****Anexo 4.4.1 Valores de los parámetros estadísticos Encuesta Definitiva Parte 1**

A continuación, se muestran los parámetros estadísticos calculados para las respuestas a la encuesta definitiva.

**Tabla A.4.4.1 Parámetros estadísticos Encuesta Definitiva Parte 1**

<b>Parámetros estadísticos</b>		
<b>x (media)</b>	<b>s (desviación estándar)</b>	<b>c<sub>v</sub> (coeficiente de variación) (%)</b>
2,7	2,3	84%
4,8	2,1	44%
6,7	1,8	26%
8,0	1,1	14%
4,3	1,6	38%
5,5	2,3	41%
4,0	1,7	42%
6,7	1,6	24%
9,3	0,5	6%
4,0	1,7	42%
6,5	2,1	32%
5,0	2,0	40%
7,2	1,6	22%
5,5	1,9	34%
8,0	1,1	14%
6,2	1,5	24%
6,3	1,5	24%
5,0	1,8	36%
3,3	1,6	49%
5,2	1,5	28%
5,5	1,5	28%
9,0	0,6	7%
8,0	1,1	14%
7,0	1,5	22%
6,5	0,8	13%
9,2	1,2	13%
6,7	1,0	15%
5,3	1,5	28%
7,7	1,2	16%
5,8	1,5	25%

Tabla A.4.4.1 Parámetros estadísticos Encuesta Definitiva Parte 2

Parámetros estadísticos		
x (media)	s (desviación estándar)	c <sub>v</sub> (coeficiente de variación) (%)
6,5	1,8	27%
5,0	1,7	33%
8,3	1,0	12%
3,7	2,0	54%
6,3	0,8	13%
5,8	0,8	13%
5,7	1,0	18%
1,7	1,0	62%
4,0	0,9	22%
4,5	2,2	48%
3,7	1,6	45%
7,0	2,5	36%
7,8	0,8	10%
6,5	1,8	27%
5,3	1,6	31%
4,8	2,8	58%
5,0	2,3	46%
7,5	1,9	25%
4,7	2,3	48%
6,3	1,6	26%
6,5	2,6	40%
9,8	0,4	4%
4,7	0,8	17%
9,0	0,9	10%
6,7	2,3	34%
4,7	1,0	22%
6,2	1,2	19%
5,7	1,8	31%
4,8	1,3	27%
3,7	1,4	37%

## ANEXO 4.5 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.

Se utilizaron tres calibraciones con el programa R-Studio utilizando los métodos de Regresión Binomial Negativa, el método de Quasi Poisson y Poisson cero truncado.

### Anexo 4.5.1 Regresión Binomial Negativa

La regresión binomial negativa para el modelo de la complejidad del puente se realizó mediante el siguiente código:

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)
ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
complejidad <- read_excel(ruta_excel)
summary(complejidad)
eqt.nb <- as.formula(Complejidad~Estructuracion+Galibo+Dificultad)
modelobn <- glm.nb(eqt.nb, data=complejidad, link=log)
summary(modelobn)
```

**Figura A.4.5.1 Código de la Regresión Binomial Negativa para el modelo de la complejidad del puente**

Para la regresión del modelo de la complejidad del puente se obtuvo lo siguiente:

```
glm.nb(formula = eqt.nb, data = complejidad, link = log, init.theta = 214956.8024)
Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.26760 -0.52508  0.06728  0.45101  1.86932
Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.93437   0.04616  20.240 < 2e-16 ***
Estructuracion 0.09260   0.00967   9.576 < 2e-16 ***
Galibo        0.07710   0.01320   5.841 5.19e-09 ***
Dificultad    0.22833   0.01327  17.210 < 2e-16 ***
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Dispersion parameter for Negative Binomial(214956.8) family taken to be 1)
Null deviance: 1253.99 on 1622 degrees of freedom
Residual deviance: 828.12 on 1619 degrees of freedom
(1 observation deleted due to missingness)
AIC: 6668.2
Number of Fisher Scoring iterations: 1
      Theta: 214957
    Std. Err.: 749240
Warning while fitting theta: iteration limit reached
2 x log-likelihood: -6658.196
```

**Figura A.4.5.2 Resultados de la calibración para modelo de complejidad del puente**

La regresión binomial negativa para el modelo de la priorización de monitorización se realizó mediante el siguiente código:

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
priorizacion <- read_excel(ruta_excel,sheet='Priorizacion')
summary(priorizacion)
eqt.nb2 <- as.formula(Priorizacion~Complejidad+Contexto+Vulnerabilidad+Edad)
modelobn2 <- glm.nb(eqt.nb2, data=priorizacion, link=log)
summary(modelobn2)
```

**Figura A.4.5.3 Código de la Regresión Binomial Negativa para el modelo de la priorización de monitorización**

Para la regresión del modelo de la priorización de monitorización se obtuvo lo siguiente:

```
glm.nb(formula = eqt.nb2, data = priorizacion, link = log, init.theta = 190246.3339)
Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.39515 -0.43595 -0.02805  0.39542  2.46003
Coefficients:
            Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.35451   0.06483   5.469 4.54e-08 ***
Complejidad  0.06070   0.01492   4.068 4.74e-05 ***
Contexto     0.21440   0.01570  13.652 < 2e-16 ***
Vulnerabilidad 0.25837   0.01559  16.577 < 2e-16 ***
Edad         0.10173   0.01559   6.526 6.78e-11 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Dispersion parameter for Negative Binomial(190246.3) family taken to be 1)
Null deviance: 1135.99 on 1188 degrees of freedom
Residual deviance: 568.87 on 1184 degrees of freedom
AIC: 4700.8
Number of Fisher Scoring iterations: 1
      Theta: 190246
    Std. Err.: 740039
Warning while fitting theta: iteration limit reached
2 x log-likelihood: -4688.81
```

**Figura A.4.5.4 Resultados de la calibración para modelo de priorización de monitorización**

### Anexo 4.5.2 Regresión Quasi Poisson

La regresión Quasi Poisson para el modelo de la complejidad del puente se realizó mediante el siguiente código:

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
complejidad <- read_excel(ruta_excel)
summary(complejidad)
quasipoisson.modelo1 <- glm(Complejidad~Estructuracion+Galibo+Dificultad,family =
'quasipoisson',data=complejidad)
summary(quasipoisson.modelo1)
```

**Figura A.4.5.5 Código de la Regresión Quasi Poisson para el modelo de la complejidad del puente**

Para la regresión del modelo de la complejidad del puente se obtuvo lo siguiente:

```
glm(formula = Complejidad ~ Estructuracion + Galibo + Dificultad,
    family = "quasipoisson", data = complejidad)
Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.26762 -0.52509  0.06728  0.45102  1.86935
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.934374  0.031971  29.225 <2e-16 ***
Estructuracion 0.092598  0.006697  13.826 <2e-16 ***
Galibo        0.077098  0.009141   8.434 <2e-16 ***
Dificultad    0.228334  0.009189  24.849 <2e-16 ***
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
(Dispersion parameter for quasipoisson family taken to be 0.4796516)
Null deviance: 1254.02 on 1622 degrees of freedom
Residual deviance: 828.14 on 1619 degrees of freedom
(1 observation deleted due to missingness)
AIC: NA
Number of Fisher Scoring iterations: 4
```

**Figura A.4.5.6 Resultados de la calibración para modelo de complejidad del puente**

La regresión Quasi Poisson para el modelo de la priorización de monitorización se realizó mediante el siguiente código:

```
library(readxl)
library(MASS)
library(magrittr)

ruta_excel <- "C:\\Users\\pablo\\OneDrive\\Escritorio\\Base de datos.xlsx"
priorizacion <- read_excel(ruta_excel,sheet='Priorizacion')
summary(priorizacion)
quasipoisson.model2 <- glm(Priorizacion~Complejidad+Contexto+Vulnerabilidad+Edad,family =
'quasipoisson',data=priorizacion)
summary(quasipoisson.model2)
```

**Figura A.4.5.7 Código de la Regresión Quasi Poisson para el modelo de la priorización de monitorización**

Para la regresión del modelo de la priorización de monitorización se obtuvo lo siguiente:

```
glm(formula = Priorizacion ~ Complejidad + Contexto + Vulnerabilidad +
  Edad, family = "quasipoisson", data = priorizacion)
Deviance Residuals:
  Min      1Q  Median      3Q      Max
-2.39517 -0.43596 -0.02806  0.39543  2.46006
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.35451   0.04409   8.040 2.16e-15 ***
Complejidad  0.06070   0.01015   5.981 2.93e-09 ***
Contexto     0.21440   0.01068  20.071 < 2e-16 ***
Vulnerabilidad 0.25837   0.01060  24.371 < 2e-16 ***
Edad         0.10173   0.01060   9.594 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for quasipoisson family taken to be 0.4626496)

Null deviance: 1136.02 on 1188 degrees of freedom
Residual deviance: 568.88 on 1184 degrees of freedom
AIC: NA
Number of Fisher Scoring iterations: 4
```

**Figura A.4.5.8 Resultados de la calibración para modelo de priorización de monitorización**

### Anexo 4.5.3 Regresión Poisson Cero Truncado

Para la regresión del modelo de la complejidad del puente se obtuvo lo siguiente:

```
vglm(formula = Complejidad ~ Estructuracion + Galibo + Dificultad,
     family = pospoisson(), data = complejidad)
Coefficients:
      Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.914637  0.046877 19.512 < 2e-16 ***
Estructuracion 0.094388  0.009772  9.659 < 2e-16 ***
Galibo       0.078030  0.013335  5.852 4.87e-09 ***
Dificultad   0.232737  0.013451 17.302 < 2e-16 ***
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Name of linear predictor: loglink(lambda)
Log-likelihood: -3321.654 on 1619 degrees of freedom
Number of Fisher scoring iterations: 4
No Hauck-Donner effect found in any of the estimates
```

**Figura A.4.5.9 Resultados de la calibración para modelo de complejidad del puente**

Para la regresión del modelo de la priorización de monitorización se obtuvo lo siguiente:

```
vglm(formula = Priorizacion ~ Complejidad + Contexto + Vulnerabilidad +
     Edad, family = pospoisson(), data = priorizacion)
Coefficients:
      Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  0.29537  0.06702  4.408 1.05e-05 ***
Complejidad  0.06219  0.01523  4.083 4.44e-05 ***
Contexto     0.22243  0.01606 13.845 < 2e-16 ***
Vulnerabilidad 0.26799  0.01600 16.748 < 2e-16 ***
Edad         0.10575  0.01590  6.649 2.95e-11 ***
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Name of linear predictor: loglink(lambda)
Log-likelihood: -2330.361 on 1184 degrees of freedom
Number of Fisher scoring iterations: 4
No Hauck-Donner effect found in any of the estimates
```

**Figura A.4.5.10 Resultados de la calibración para modelo de priorización de monitorización**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO**

**Departamento** : Departamento de Ingeniería Civil  
**Carrera** : Ingeniería Civil  
**Nombre del memorista** : Pablo Tomás Miranda Martinetti  
**Título de la memoria** : Método de calibración de un indicador de priorización para la instrumentación de monitorización de puentes.  
**Fecha de la presentación oral** :  
**Profesor(es) Guía** : Dr. Tomás Echaveguren Navarro  
**Profesor(es) Revisor(es)** : Dr. Luis Merino Quilodrán  
**Concepto** :  
**Calificación** :

**Resumen**

Los puentes presentan diferentes características, complejidad, importancia en la red, edad y diferentes costos de reposición, rehabilitación y mantención. Si un puente colapsa, falla o se ve interrumpida su conexión de manera total o parcial genera grandes impactos tanto sociales, económicos y de conectividad.

Debido a esto se necesita conocer el estado de los puentes dentro de la red nacional. Al contar con una gran cantidad de puentes se necesita priorizar el levantamiento de esta información. Esto debido a que conlleva grandes costos de inversión, por lo que resulta muy difícil poder implementar la instrumentación en todos los puentes de la red nacional.

El objetivo de la memoria es proponer un método de calibración para un indicador de priorización para la instrumentación de monitorización de puentes.

Para esto, se propuso un método de calibración para un indicador de priorización, mediante un procedimiento de tres etapas. El primer paso es la recolección de datos, que se realiza mediante la aplicación de la metodología Delphi. Luego se aplica el método de regresión para variables discretas elegido. Por último, se realiza una discusión de los coeficientes obtenidos junto a los estadígrafos del modelo.