



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**APLICACIÓN DE MODELOS INTERNACIONALES  
DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO POR  
CORROSIÓN EN EL CONTEXTO DE PUENTES DE  
ACERO CHILENO: CASO DE ESTUDIO PUENTE  
EL TOYO**

Memoria de Título presentada por

**Michael Mauricio Farías Valle**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Marcelo Marquez Marambio

Profesor Correferente  
Ramiro Bazáes Gallardo

Marzo de 2026



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Aplicación de modelos internacionales de predicción del deterioro por corrosión en el contexto de puentes de acero chilenos: caso de estudio puente El Toyo

**Nombre del candidato(a):** Michael Mauricio Farías Valle

**Carrera / Grado:** Licenciatura en Ciencias de la Ingeniería

**Campus:** San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ramiro Bazález Gallardo, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a)

del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

---

---

---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

Fecha: 20/04/2026

Firma: 

**Estudiante o Candidato(a):**

Fecha: 06/04/2026

Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*



UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

**APLICACIÓN DE MODELOS INTERNACIONALES DE PREDICCIÓN  
DEL DETERIORO POR CORROSIÓN EN EL CONTEXTO DE PUENTES  
DE ACERO CHILENO: CASO DE ESTUDIO PUENTE EL TOYO**

AUTOR:

**Michael Mauricio Farías Valle**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Marcelo Marquez	.....
Miembro 1 Comisión	Ramiro Bazález	.....

Santiago, Chile, Marzo de 2026

# Índice

1	Contextualización.....	4
2	Objetivos general.....	6
2.1	Objetivos Específicos.....	6
3	Metodología de Investigación .....	7
3.1	Revisión sistemática.....	8
3.2	Caracterizar el ambiente y el puente. ....	8
3.3	Aplicación de modelos al puente. ....	8
3.4	Análisis y limitaciones. ....	8
4	Marco Teórico .....	9
4.1	Mecanismo de corrosión. ....	9
4.2	Modelos de corrosión atmosférica a largo plazo. ....	9
4.3	Fundamentos de los agentes atmosféricos y su deposición. ....	11
4.4	Modelos de deterioro estructural por corrosión. ....	12
4.5	Mapa chileno de corrosión.....	13
4.6	Clasificación de ambiente corrosivo ISO 9223.....	14
5	Desarrollo .....	15
5.1	Caracterizar el ambiente y el puente. ....	15
5.1.1	Recolección de antecedentes del puente.....	15
5.1.2	Estudio entorno ambiental. ....	17
5.2	Aplicación de modelos al puente. ....	21
5.2.1	Estandarización y preparación de datos.....	21
5.2.2	Programación de modelos y simulación del deterioro.....	22
6	Análisis de Resultados.....	25
6.1	Resultados modelo basado en la resistencia. ....	25
6.2	Resultados modelo basado en el estado de servicio.....	26
6.3	Resultados ambientes estándar.....	27
7	Conclusión.....	30
8	Referencias .....	31

# APLICACIÓN DE MODELOS INTERNACIONALES DE PREDICCIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN EN EL CONTEXTO DE PUENTES DE ACERO CHILENO: CASO DE ESTUDIO PUENTE EL TOYO

Michael Farías Valle<sup>1</sup>, Marcelo Márquez Marambio<sup>2</sup>, Ramiro Bazáez Gallardo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Federico Santa María

<sup>2</sup> Ministerio de Obras Públicas

## Resumen

En esta investigación se evaluaron dos modelos internacionales de predicción de corrosión en puentes de acero chilenos, utilizando como caso de estudio el Puente El Toyo (San José de Maipo). El objetivo principal es analizar cómo las condiciones ambientales afectan la seguridad estructural a largo plazo. Mediante simulaciones en MATLAB se evaluó la fiabilidad estructural en un horizonte de 90 años bajo enfoques de resistencia y estado de servicio. Los resultados para el emplazamiento real indican un comportamiento altamente estable.

Palabras claves: Corrosión atmosférica, Puentes de acero, Fiabilidad.

## 1 Contextualización

Los puentes son elementos clave dentro de la infraestructura vial nacional, ya que aseguran la continuidad y operatividad de la red vial y ferroviaria. La función de esta infraestructura no solo se limita a facilitar el desplazamiento de personas y mercancías, sino que también contribuye al desarrollo económico y social del territorio en el que se encuentran.

En el caso de Chile, existe un número significativo de este tipo de infraestructura, más de 7.645 puentes en servicio a lo largo de todo el territorio (Márquez, 2024). Dichos puentes son administrados por diversos organismos como el Ministerio de Obras Públicas a través de la Dirección de Vialidad y Dirección de Concesiones, la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE), las ilustres municipalidades y la Corporación Nacional del Cobre (Codelco). La gran cantidad de puentes evidencia la necesidad de contar con metodologías de gestión que aseguren su conservación de manera eficiente.

Cerca de un 50% de estos puentes están constituidos principalmente por elementos metálicos (Departamento de Ingeniería Mecánica, 2019). Y gran parte de estas estructuras fueron construida hace más de cincuenta años, lo que implica que muchas de ellas se encuentran actualmente en una fase avanzada de su vida y expuestas a condiciones de deterioro. Dentro de los principales mecanismos de deterioro que afectan su desempeño estructural, destacan la fatiga, asociada a la acumulación de daños por cargas repetidas, y la corrosión, que ocurre gracias a la interacción con factores ambientales agresivos. Ambos fenómenos son de carácter progresivo y comprometen la capacidad estructural de los puentes y disminuyen su vida útil (Kayser & Nowak, 1989).

Dada la gran extensión del territorio de Chile, su diversidad climática y geográfica, se genera diversos escenarios de exposición desde zonas costeras con alta presencia de cloruros hasta ambientes cordilleranos sometidos a condiciones extremas de humedad y temperatura. En este contexto, la corrosión pasa a ser un factor crítico de deterioro, ya que se puede manifestar con mayor intensidad, acelerando los procesos de pérdida de sección y aumentando la vulnerabilidad estructural.

Frente a este panorama, la gestión de puentes metálicos en Chile enfrenta el desafío de implementar estrategias de evaluación y mantenimiento que permitan anticipar fallas y optimizar recursos. Una de las líneas más prometedoras actualmente es la aplicación de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural (SHM), la cual posibilita la recopilación y análisis continuo de información sobre el comportamiento de las estructuras, lo que permite planear y diseñar actividades de mantenimiento, aumentar la seguridad, verificar hipótesis y ampliar el conocimiento sobre la estructura en cuestión (Garita, 2015).

En este marco, el presente trabajo busca aportar a la comprensión y gestión del deterioro en puentes metálicos chilenos, con un enfoque particular en el fenómeno de la corrosión. La integración de modelos de deterioro estructura abre la posibilidad de establecer criterios más precisos para extender la vida útil de estas estructuras, contribuyendo así a mejorar su seguridad y sostenibilidad en el tiempo.

El caso de estudio de esta investigación corresponde al Puente El Toyo, ubicado en la Ruta G-27, en la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana (Ver Figura 1). Se trata de un puente convencional de vigas metálicas con una longitud total de 45 metros y una calzada de 6 metros de ancho construido en 1987. Actualmente en servicio bajo la administración de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, este puente ha sido seleccionado porque forma parte de un nuevo proyecto colaborativo entre la Dirección de Vialidad y la empresa Geosinergia, iniciativa que contempla la sensorización del tablero y sus elementos principales.



**Fig 1. Ubicación general del puente El Toyo – Fuente Google Maps.**

Lo anterior convierte a esta estructura en una oportunidad ideal para estudiar el deterioro por corrosión bajo un enfoque moderno de gestión, integrando modelos de fiabilidad, con el propósito de mejorar la toma de decisiones asociadas al mantenimiento de puentes metálicos en Chile.

## **2 Objetivos general**

Aplicación de modelos internacionales de predicción del deterioro por corrosión en puentes de acero al contexto chileno, mediante su análisis teórico y aplicabilidad práctica en el puente el Toyo.

### **2.1 Objetivos Específicos.**

1. Identificar los principales modelos de predicción del deterioro por corrosión propuestos en el contexto internacional, aplicados a estructuras de puentes metálicos, mediante una revisión sistemática.
2. Caracterizar las condiciones ambientales, materiales y estructurales del puente El Toyo, con foco en los factores que favorecen el deterioro por corrosión.
3. Evaluar los modelos seleccionados al caso de estudio, analizando el nivel de deterioro estimado y su evolución en el tiempo.
4. Analizar las limitaciones de los modelos utilizados en el contexto chileno, y desarrollar las recomendaciones para futuras investigaciones y aplicación en otros puentes.

### 3 Metodología de Investigación

La metodología nos indica el plan de trabajo a seguir para cumplir los objetivos específicos propuestos, desde la revisión sistemática hasta el desarrollo de los lineamientos generales. Esta contempla cuatro grandes etapas, ligadas a cada uno de los objetivos específicos.

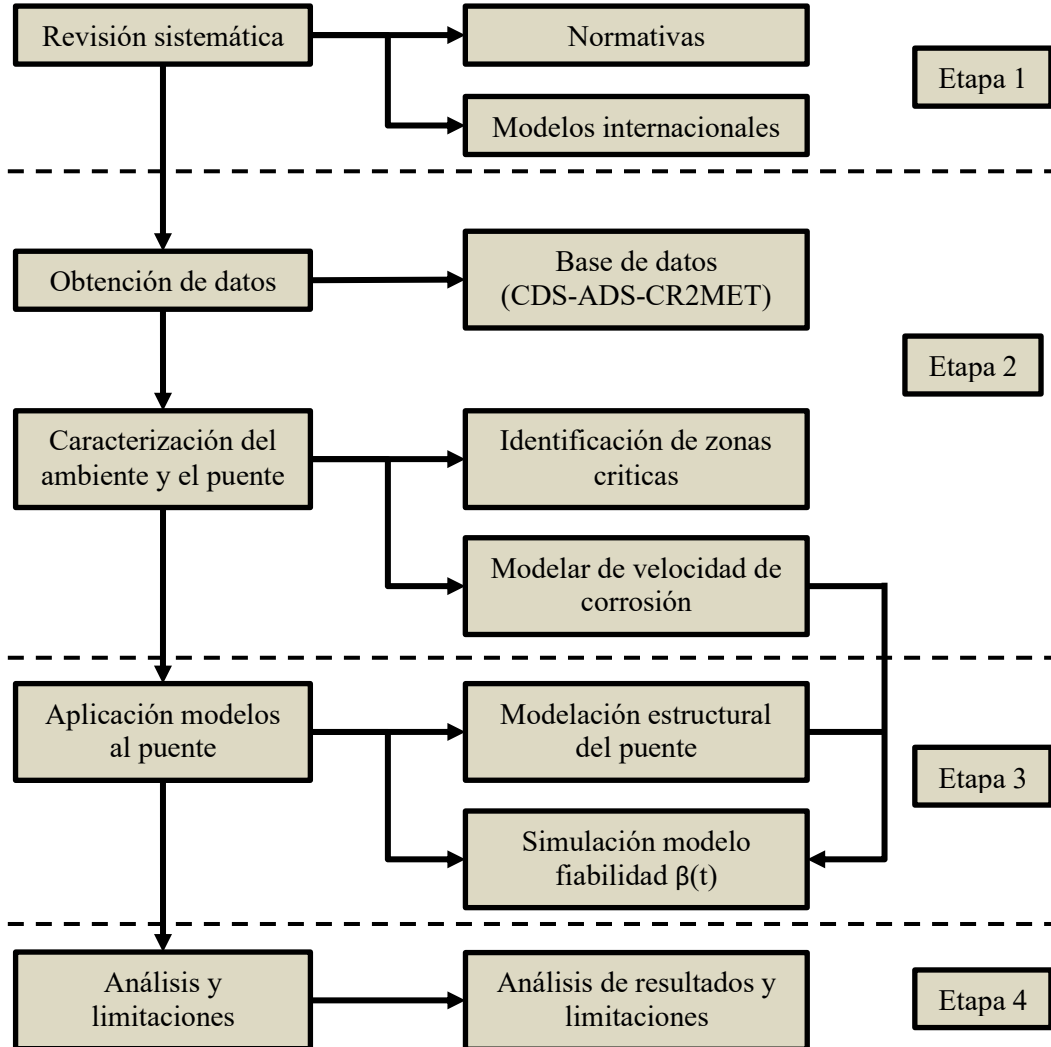


Fig 2. Diagrama de flujo metodológico.

### **3.1 Revisión sistemática.**

Esta etapa contempla las siguientes actividades.

- Búsqueda bibliográfica: Búsqueda sistemática en plataformas científicas.
- Selección de modelos relevantes: Identificar y seleccionar modelos en base a criterios como aplicabilidad en puentes de acero, validación y claridad metodológica.
- Resumen evaluativo: Elaborar ficha técnica para identificar desafíos de adaptación al caso de estudio y fortalezas de cada modelo.

### **3.2 Caracterizar el ambiente y el puente.**

Esta etapa contempla las siguientes actividades.

- Recolección de antecedentes técnicos del puente: Recopilación de datos estructurales de la estructura (materialidad, geometría, antigüedad, historial de mantenciones e inspecciones).
- Estudio del entorno ambiental: Recopilación de datos históricos ambientales, especialmente en lo referido las condiciones climáticas, nivel de salinidad y factores ambientales relevantes para el desarrollo de la corrosión.
- Clasificación del ambiente corrosivo: Generación de modelos de corrosión atmosférica a largo plazo y clasificación del ambiente corrosivo de la zona.
- Identificación de zonas críticas: Revisión de documentos de inspección y revisión presencial de zonas del puente con evidencia de corrosión.

### **3.3 Aplicación de modelos al puente.**

Esta etapa contempla las siguientes actividades

- Selección de modelos: Seleccionar uno o más modelos identificados en el OE1 que sean compatibles con la estructura del puente y los datos ambientales recopilados.
- Estandarización y preparación de datos: Organizar y preparar datos para cumplir los requerimientos de entrada de cada modelo seleccionado.
- Programación de modelos y simulación del deterioro: Programar modelos en alguna herramienta capaz de procesar la información, como MATLAB (The MathWorks, 2024), y ejecutar simulaciones para distintos escenarios temporales.

### **3.4 Análisis y limitaciones.**

Esta etapa contempla las siguientes actividades

- Análisis comparativos de resultados: Comparar resultados obtenidos e identificar que tanto se ajustan al contexto chileno.
- Identificación de limitaciones: Analizar limitaciones metodológicas al ser aplicado en el ambiente del puente y verificar la compatibilidad al caso chileno.

## 4 Marco Teórico

### 4.1 Mecanismo de corrosión.

La corrosión se define como “el proceso de deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas y electroquímicas” (Salazar-Jiménez, 2015). Gran parte de los mecanismos de corrosión ocurre a través de reacciones electroquímicas que requieren la presencia de electrodos, un medio conductor y una conexión que permita el flujo de electrones. Bajo estas condiciones, el acero se oxida y se transforma en productos como óxidos, lo que conlleva una pérdida progresiva de material que afecta a la durabilidad de las estructuras. La reacción química general se expresa de la siguiente manera.

Existen diversos tipos de corrosión, sin embargo solo algunos son relevantes en el caso de los puentes metálicos ya que estas estructuras permanecen expuestas a condiciones atmosféricas durante toda su vida útil. Entre las relevantes se encuentran la corrosión generalizada que ocurre sobre toda la superficie metálica, provocando un desgaste uniforme en ambientes húmedos, industriales o costeros (Salazar-Jiménez, 2015). La corrosión galvánica que se presenta cuando dos metales de distinta naturaleza entran en contacto, generando una celda electroquímica que acelera el deterioro del metal, fenómeno común en conexiones apernadas (Martínez Pérez, 2023). Finalmente, la corrosión por picadura que se manifiesta en zonas localizadas de la superficie, donde perfora el material y genera puntos de concentración de esfuerzos (Martínez Pérez, 2023).

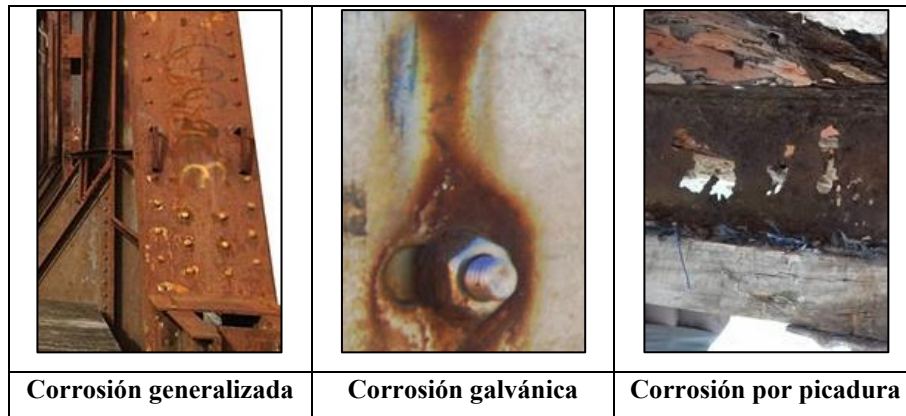


Fig 3. Tipos de corrosión relevantes.

Comprender los distintos mecanismos de corrosión es fundamental para explicar la degradación progresiva de los puentes de acero y constituye la base para modelar su comportamiento a largo plazo, con el fin de estimar el deterioro y así poder definir estrategias de mitigación.

### 4.2 Modelos de corrosión atmosférica a largo plazo.

La predicción de la corrosión atmosférica a largo plazo se ha modelado mediante diversos enfoques, ya sea como función potencial-lineal, función bilineal o como función potencial (ley bilogarítmica) (Morcillo, 1998). Esta última es la más utilizada en investigaciones sobre la corrosión atmosférica y presenta la forma.

$$C = A \cdot t^n \quad (1)$$

Donde:

C: representa la penetración de corrosión ( $\mu\text{m}$ ).

t: tiempo de exposición del metal (años).

A: la velocidad de corrosión al primer año de exposición.

n: parámetro que refleja el comportamiento fisicoquímico de la capa de corrosión y su interacción con la atmósfera.

El parámetro “n” ha sido estudiado en exposiciones de larga duración (10-20 años), obteniéndose los rangos resumidos en la Tabla 1.

**Tabla 1. Rangos de n en la ec. [1] obtenidos en exposiciones de larga duración (10-20 años) – (Morcillo, 1998).**

Material	Atmósferas rural-urbana lejos del mar	Atmósferas industriales lejos del mar	Atmósferas marinas
Acero al carbono	0.3-0.7	0.3-0.7	0.6-0.9
Zinc	0.8-1.0	0.9-1.0	0.7-0.9
Cobre	0.5-0.9	0.6-0.8	0.4-0.6

Adicionalmente, se han propuesto funciones empíricas de daño por corrosión atmosférica anual para diversos metales que incorporan parámetros ambientales, las cuales se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Funciones de daño para corrosión atmosférica anual - (Morcillo, 1998).**

Material	Ref.	Función de daño	Observaciones
Acero al carbono	7	$C = 0,728 (HR) - 31,19$ (Únicamente atmósferas rurales)	C = corrosión anual en $\mu\text{m}$ (acero, zinc y cobre) y en $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (aluminio) HR = Humedad relativa media (%) T = Temperatura media anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) D = Número de días de lluvia al año P = Precipitación total anual (mm) TDH = Número de horas/año en que HR > 80% y T > 0 $^{\circ}\text{C}$ Cl = Salinidad atmosférica media anual ( $\text{mg Cl m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) S = Media anual de velocidad de depósito de $\text{SO}_2$ ( $\text{mg SO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) S* = Concentración media anual de $\text{SO}_2 + \text{Cl}^-$ ( $\text{mg SO}_2 \text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ )
	8	$C = 0,606 (S) + 22,36$	
	9	$C = 0,346 (S^*) + 36,53$	
	2	$C = 0,259 (S) + 0,431 (Cl) + 20,71$	
	10	$C = 1,59 (S) + 0,96 (Cl) + 2,49$	
	11	$C = 26,6 (S) + 57,4 (Cl) + 33,0$	
Zinc	7	$C = 0,012 (D) - 0,35$ Únicamente atmósferas rurales	
	10	$C = 0,0009 (P) + 0,0462$	
	8	$C = 12,26 (TDH) + 0,030 (S) - 3,05$	
	9	$C = 0,0741 (S^*) + 0,671$	
	2	$C = 0,0511 (Cl) + 0,713$	
	10	$C = 2,52 (TDH) + 0,02 (Cl) - 0,05$	
Cobre	10	$C = 0,0216 (HR) - 0,7656$ Únicamente atmósferas rurales	
	8	$C = 6,75 (TDH) + 0,0010 (S) - 1,86$	
	9	$C = 0,042 (S^*)$	
	10	$C = 2,07 (TDH) + 0,02 (S) + 0,01 (Cl)$	
	11	$C = 2,00 (S) + 1,45 (Cl) + 1,03$	
Aluminio	2	$C = 0,020 (HR) - 1,13$ Únicamente atmósferas rurales	
	10	$C = 0,0001 (P) - 0,2306 (TDH) + 0,0738$	
	7	$C = 0,203 (T) + 0,042 (Cl) - 2,41$	
	11	$C = 0,56 (S) + 0,72 (S) + 0,18$	
	10	$C = 0,832 (TDH) + 0,024 (S) + 0,007 (Cl) - 0,182$	

De igual forma, investigaciones posteriores han propuesto otras funciones de daño por corrosión atmosférica anual que incorporan una mayor cantidad de variables ambientales, lo que permite estimar valores cercanos a la realidad. Entre las más relevantes se encuentran la normativa ISO 9223, el UN/ECE ICP Project y el Multi Assess Program (Kubzova et al., 2020).

Función según ISO 9223:

$$r_{corr} = 1.77 \cdot P_d^{0.52} \cdot e^{0.02 \cdot RH} \cdot e^{f_{st}} + 0.102 \cdot S_d^{0.62} \cdot e^{0.0033 \cdot RH + 0.04 \cdot T} \quad (2)$$

Con:

$$f_{st} = \begin{cases} 0.15 \cdot (T - 10), & T < 10^{\circ}\text{C} \\ -0.054 \cdot (T - 10), & T \geq 10^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

Función según UN/ECE ICP Project:

$$r_{corr} = 34 \cdot P_d^{0.33} \cdot e^{0.02 \cdot RH} \cdot e^{f_{st}} \quad (3)$$

Con:

$$f_{st} = \begin{cases} 0.059 \cdot (T - 10), & T < 10^{\circ}\text{C} \\ -0.036 \cdot (T - 10), & T \geq 10^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

Función según Multi-Assess Program:

$$r_{corr} = 29.1 + (21.7 + 1.39 \cdot Pd^{0.6} \cdot RH_{60} \cdot e^{f_{st}} + 1.29 \cdot RAIN \cdot [H^+] + 0.593 \cdot PM_{10}) \quad (4)$$

Con:

$$f_{st} = \begin{cases} 0.15 \cdot (T - 10), & T < 10^\circ C \\ -0.054 \cdot (T - 10), & T \geq 10^\circ C \end{cases}$$

Donde:

$r_{corr}$ : pérdida de espesor por corrosión después de un año de exposición ( $\mu\text{m}/\text{año}$ ).

$P_d$ : deposición anual de dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ).

$S_d$ : deposición anual de cloruros  $\text{Cl}^-$  ( $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ).

$T$ : temperatura media anual del aire ( $^\circ\text{C}$ ).

$RH, RH_{60}$ : humedad relativa media anual (%).

$[H^+]$ : acidez media de la precipitación (pH).

$PM_{10}$ : concentración media anual de material particulado con  $d \leq 10\mu\text{m}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

$f_{st}$ : factor dependiente de la temperatura media anual.

### 4.3 Fundamentos de los agentes atmosféricos y su deposición.

Para aplicar las funciones de daño mencionadas anteriormente se requiere una caracterización precisa de los contaminantes atmosféricos que favorecen la corrosión y a los que se encuentra expuesto el puente El Toyo, el cual será descrito en secciones posteriores. Dado que se utilizan modelos de reanálisis global para obtener los contaminantes atmosféricos presentes en la zona es necesario establecer los mecanismos físicos que rigen la transferencia de los contaminantes de la atmosfera hacia la superficie.

La presencia de  $\text{SO}_2$  atmosférico se analiza a través de su concentración másica en los modelos de corrosión. Sin embargo, los modelos de reanálisis globales suelen reportarlo en términos de la razón de mezcla ( $\text{kg}/\text{kg}$ ), es por ello que se hace indispensable el uso de la Ley de los Gases Ideales para caracterizar la densidad local en función de la temperatura y presión del sitio (Seinfeld & Pandis, 2006), mediante la siguiente expresión.

$$C = RM \cdot \left( \frac{P}{R \cdot T} \right) \cdot 10^9 \quad (5)$$

Donde:

$C$ : Concentración local [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].

$RM$ : Razón de mezcla [ $\text{kg}/\text{kg}$ ].

$P$ : Presión atmosférica [ $\text{Pa}$ ].

$R$ : Constante específica de gases para aire seco ( $287.05 \text{ [J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$ ).

$T$ : Temperatura en Kelvin.

La transferencia de  $\text{SO}_2$  desde la atmosfera hacia la estructura ocurre principalmente mediante deposición seca donde la velocidad de deposición es como se cuantifica la interacción con la estructura y físicamente se rige por el Modelo de Resistencia (Wesely, 1988) que establece que la velocidad a la que el gas llega a la superficie ( $v_d$ ), se determina como.

$$v_d^{-1} = r_a + r_b + r_c \quad (6)$$

Donde:

$r_a$ : Resistencia aerodinámica.

$r_b$ : Resistencia de la capa laminar.

$r_c$ : Resistencia de la superficie.

Por otro lado, en ambientes alejados de la costa marina el transporte de cloruro está ligado directamente con la sedimentación de las partículas en suspensión ( $PM_{10}$ ). El programa UN/ECE ICP (Kubzova et al., 2020) establece una dependencia entre la concentración ambiental y la deposición de partícula en suspensión.

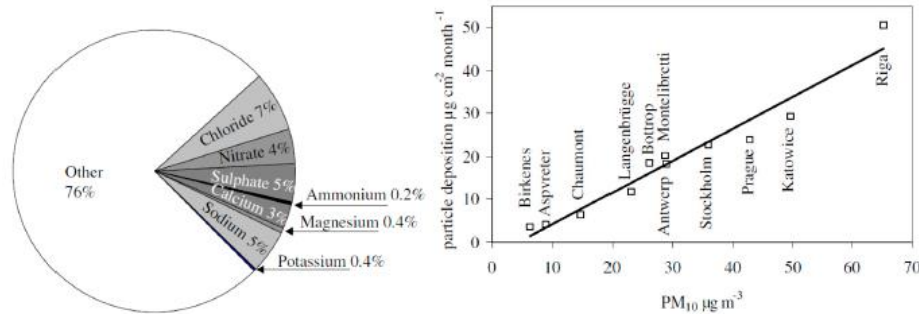
$$PM_{10,dep} = \frac{72.6}{100} \cdot PM_{10} \quad (7)$$

Donde:

$PM_{10,dep}$ : Tasa de partículas de polvo en suspensión en el aire [ $g/cm^2 \cdot mes$ ]

$PM_{10}$ : Concentración de partículas de polvo en suspensión en el aire [ $g/cm^3$ ]

Bajo este enfoque se establece que las partículas de polvo  $PM_{10}$  contienen aproximadamente un 7% en peso de cloruros (Ver Figura 4), lo que permite estimar la tasa de deposición final de cloruros  $Cl_{dep}$ .



**Fig 4. Valores medidos experimentalmente de  $PM_{10}$  en el aire – Programa experimental UN//ECE ICP (Kubzova et al., 2020).**

#### 4.4 Modelos de deterioro estructural por corrosión.

De forma genérica, y con el objetivo de implementar en los sistemas de gestión de puentes (BMS), el deterioro de una estructura se ha analizado como un proceso dependiente del tiempo que puede describirse matemáticamente de diversas formas ya sea con modelos basados en la razón de falla, modelos markovianos, procesos estocásticos y modelos basados en el índice de fiabilidad (Clemente, 2011).

Este último enfoque ha sido la vía mediante la cual diversas investigaciones sobre puentes han abordado el deterioro estructural, implementando los mencionados modelos de velocidad de corrosión y vinculándolos con la probabilidad de falla para a las condiciones ambientales locales.

Estos modelos de fiabilidad interpretan la aleatoriedad de distintas variables, es por ello que la fiabilidad se define como un índice que está directamente relacionado con la probabilidad de falla de una estructura (Cañamares et al., 2016). En general la relación se expresa como.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (8)$$

Donde:

$\beta$ : Índice de fiabilidad.

$P_f$ : Probabilidad de falla.

$\Phi^{-1}$ : Inversa de la función de distribución normal estándar acumulada.

Bajo este contexto, Kayser & Nowak (1989) desarrollaron un modelo probabilístico para la fiabilidad de puentes de acero corroídos, donde la fiabilidad del sistema se modeló como un conjunto de modos

de falla y la corrosión se incorporó mediante la función de corrosión potencial. El índice de fiabilidad se evalúa a partir de la probabilidad de falla mediante las aproximaciones planteadas por C. A. Cornell (Cornell, 1970), que relacionan las medias y desviaciones estándar de la resistencia y la carga, expresada como.

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (9)$$

Donde:

R: Media de resistencia nominal.

Q: Media de carga ultima.

$\sigma_R, \sigma_Q$ : Desviación estándar de la resistencia y carga respectivamente.

Por otro lado, Cheung & Li (2001) analizaron la fiabilidad de servicio considerando como estados límite el incumplimiento de los criterios planteados por los códigos AASHTO y OHBDC, se considera que ocurre la falla cuando se excede el límite de deflexión máxima. Para ello se emplearon simulaciones de Monte Carlo en combinación con métodos de bandas finitas para estimar la probabilidad de falla  $P_f$ .

$$P_f = \int I_f \cdot f_{AB}(A, B) \cdot f_{t_c}(t_c) \cdot f_{E_c}(E_c) \cdot f_{E_s}(E_s) \cdot dA \cdot dB \cdot dt_c \cdot dE_c \cdot dE_s \quad (10)$$

Donde  $f_x(x)$  representa la función de densidad de probabilidad de cada variable e  $I_f$  es un indicador que define si la falla ocurrió o no.

Si bien ambos estudios plantean como la corrosión afecta significativamente a la fiabilidad estructural del puente, en el caso del estudio de Kayser & Nowak (1989) lo analizan desde la perspectiva de la resistencia, mientras que Cheung & Li (2001) lo abordan desde la perspectiva del estado de servicio.

#### 4.5 Mapa chileno de corrosión.

En el contexto nacional, la corrosión se ha estudiado mediante la aplicación de la metodología planteada por las normativas ISO 9223-9226, lo que ha permitido generar los conocidos mapas nacionales de corrosión atmosférica (Vera et al., 2012). En la Figura 5 se muestra un extracto de dichos mapas, donde se observa la distribución de la categoría corrosiva a lo largo del territorio nacional y es señalada la ubicación del puente El Toyo, que se encuentra en una zona de categoría “C2”.

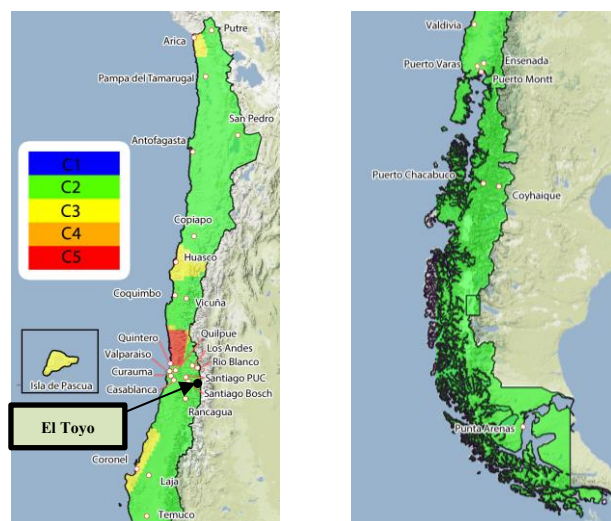


Fig 5. Mapa de corrosividad atmosférica chilena.

Bajo la misma línea de investigación se han logrado estimar modelos de corrosión atmosférica a largo plazo basados en funciones potenciales, para ciertas localidades del territorio nacional.

**Tabla 3. Resumen de los parámetros de los Modelos de Predicción a Largo Plazo (Ecuación 1), en las distintas estaciones para Acero, a 3 años - (Vera, n.d.).**

ESTACIONES	n	Log <sub>10</sub> A	A				
San Pedro de Atacama	0.47936428	0.4924095	3.10748826	Pampa del Tamarugal	0.468	0.80439498	6.37374935
Santiago (PUC)	0.49256167	0.5422682	3.48552496	Temuco	0.409	0.80462886	6.37718268
Putre	0.3547122	0.56984898	3.71406057	Puerto Varas (BOSCH)	0.44901814	0.86116465	7.26381295
Los Andes	0.48863724	0.61420436	4.11343235	Coquimbo	0.63305865	0.87280048	7.46105911
Vicuña	0.43827768	0.62084143	4.17677834	Puerto Montt	0.36155498	0.87616644	7.51911008
Rancagua	0.42733664	0.630979	4.27542214	Punta Arenas	0.44534418	0.88558831	7.6840169
Río Blanco	0.46187795	0.65793197	4.54916793	Copiapó	0.4447549	0.90407321	8.01813215
Laja	0.482	0.69367084	4.93936177	Puerto Chacabuco	0.396	0.90573089	8.04879549
Ensenada	0.468	0.73129493	5.38635446	Antofagasta	0.52158671	0.93667079	8.64312491
Casablanca	0.60567132	0.73963498	5.49079187	Huasco	0.71903321	1.02785735	10.6624584
Quilpué	0.635	0.74915479	5.61247979	Valparaíso	0.37	1.04986102	11.2165945
Curauma	0.36037993	0.76377933	5.80469397	Arica	0.567	1.19409482	15.6348898
Coyhaique	0.16875973	0.77147542	5.90847519	Valdivia	0.28157555	1.22440903	16.7652112
Santiago (BOSCH)	0.46726177	0.77220516	5.91841149	Coronel (BOSCH)	0.434	1.37486786	23.7065231
				Quintero	0.84659915	1.52706967	33.6565555

Estos resultados permiten no solo caracterizar la agresividad atmosférica de las diferentes zonas de Chile, sino que también nos entregan valores referenciales para calibrar los modelos que se aplicarán al caso de estudio.

#### 4.6 Clasificación de ambiente corrosivo ISO 9223.

La normativa ISO 9223 (2012) establece una metodología para determinar la categoría corrosiva de una zona en base a la medición de la velocidad de corrosión. Para ello, presenta una tabla que fija los límites de la tasa de corrosión del primer año para cada categoría corrosiva, considerando metales estándar como acero al carbono, zinc, cobre y aluminio. Se presenta un total de seis categorías corrosivas, desde C1 a CX, en orden creciente de agresividad corrosiva.

**Tabla 4. Índices de corrosión, durante el primer año de exposición para las diferentes categorías de corrosividad - ISO 9223 (2012).**

Corrosivity category	Corrosion rates of metals				
	Unit	Carbon steel	Zinc	Copper	Aluminium
C1	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$r_{\text{corr}} \leq 0,9$	negligible
	µm/a	$r_{\text{corr}} \leq 1,3$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	$r_{\text{corr}} \leq 0,1$	—
C2	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0,9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0,6$
	µm/a	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,7$	$0,1 < r_{\text{corr}} \leq 0,6$	—
C3	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	µm/a	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0,7 < r_{\text{corr}} \leq 2,1$	$0,6 < r_{\text{corr}} \leq 1,3$	—
C4	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	µm/a	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2,1 < r_{\text{corr}} \leq 4,2$	$1,3 < r_{\text{corr}} \leq 2,8$	—
C5	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1\ 500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	µm/a	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4,2 < r_{\text{corr}} \leq 8,4$	$2,8 < r_{\text{corr}} \leq 5,6$	—
CX	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$1\ 500 < r_{\text{corr}} \leq 5\ 500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$
	µm/a	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8,4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5,6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	—

NOTE 1 The classification criterion is based on the methods of determination of corrosion rates of standard specimens for the evaluation of corrosivity (see ISO 9226).

NOTE 2 The corrosion rates, expressed in grams per square metre per year [g/(m<sup>2</sup>·a)], are recalculated in micrometres per year (µm/a) and rounded.

NOTE 3 The standard metallic materials are characterized in ISO 9226.

NOTE 4 Aluminium experiences uniform and localized corrosion. The corrosion rates shown in this table are calculated as uniform corrosion. Maximum pit depth or number of pits can be a better indicator of potential damage. It depends on the final application. Uniform corrosion and localized corrosion cannot be evaluated after the first year of exposure due to passivation effects and decreasing corrosion rates.

NOTE 5 Corrosion rates exceeding the upper limits in category C5 are considered extreme. Corrosivity category CX refers to specific marine and marine/industrial environments (see Annex C).

## 5 Desarrollo

### 5.1 Caracterizar el ambiente y el puente.

#### 5.1.1 Recolección de antecedentes del puente.

A través de la plataforma del Ministerio de Obras Públicas I3MOP, se obtuvo la documentación técnica necesaria para el análisis de la estructura del puente El Toyo. La recopilación de los planos originales permitió extraer datos precisos sobre su materialidad y geometría.

A continuación, se presenta una serie de vistas del puente, donde se detallan las dimensiones generales del ancho de calzada, la disposición de las vigas principales y los elementos que conforman la superestructura.

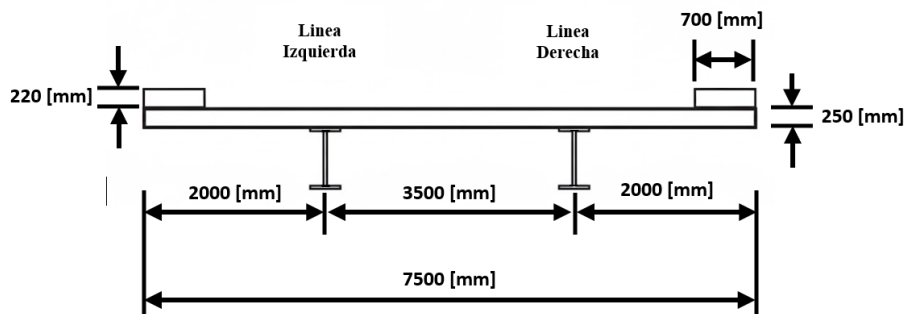


Fig 6. Vista transversal del puente El Toyo.

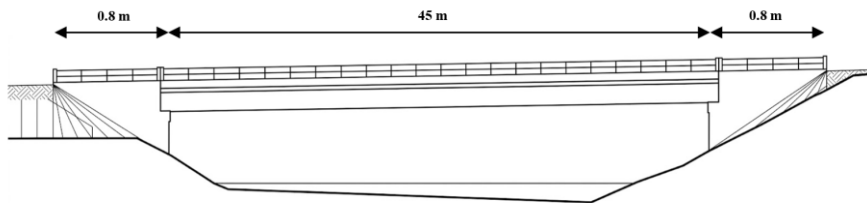


Fig 7. Vista general del puente El Toyo.

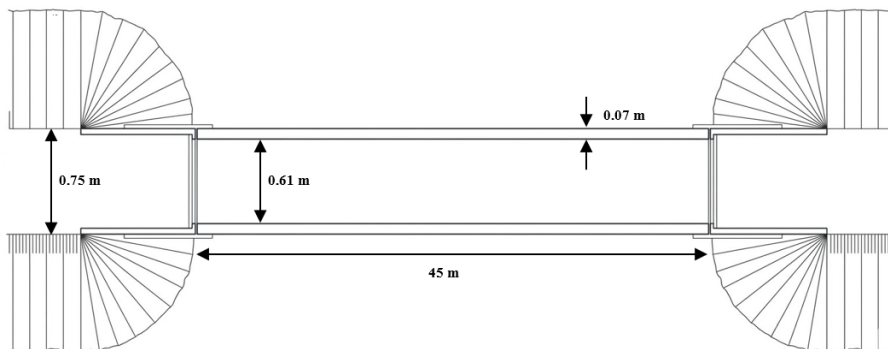
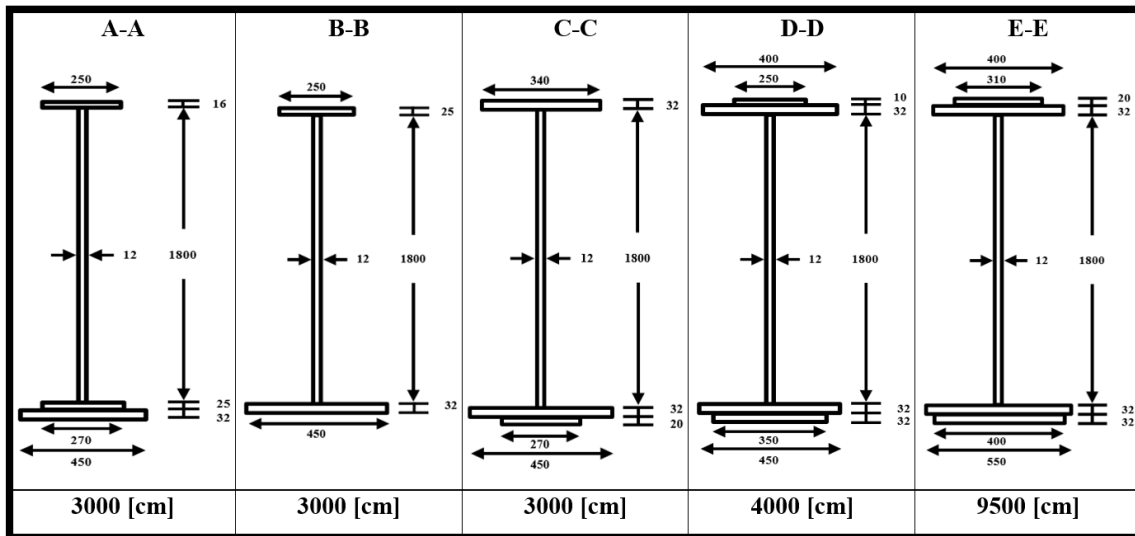


Fig 8. Vista planta del puente El Toyo.

Respecto a la configuración del vano, las vigas del puente presentan una estructura armada compuesta por perfiles de sección variable a lo largo de su extensión. Esta configuración geométrica varía simétricamente desde los apoyos hacia el centro del vano: se inicia con la sección A-A en el estribo, y continúa hasta alcanzar la sección E-E en el punto medio, y posteriormente retoma el orden inverso hasta llegar al estribo opuesto.

Hay que mencionar que la sección A-A es la que cuenta con la placa de apoyo de la estructura, la cual posee unas dimensiones de 450 x 450 mm. En la Figura 9 se detallan las variaciones dimensionales de cada una de estas secciones transversales.



**Fig 9. Perfiles de acero presentes en el vano.**

Complementariamente, se recopiló información detallada sobre la materialidad del puente, específicamente respecto a las propiedades mecánicas del acero estructural y del hormigón del tablero. Estos parámetros son fundamentales para el desarrollo de los modelos analíticos y de fiabilidad. En la Tabla 5 se resumen las propiedades consideradas.

**Tabla 5. Propiedades mecánicas de los materiales.**

Material	Propiedad	Valor
Acero al carbono	Modulo elasticidad ( $E_s$ )	200.000 [MPa]
(Vigas)	Límite de fluencia ( $f_y$ )	340 [MPa]
(Barras de Refuerzo)	Límite de fluencia ( $f_y$ )	420 [MPa]
Hormigón	Resistencia a compresión ( $f'_c$ )	29,41 [MPa]
(Losa)	Modulo elasticidad ( $E_c$ )	25.641,99 [MPa]

En cuanto al historial de mantenimiento, se tuvo acceso a las ficha de inspección de los años 2016-2022-2024, donde se aprecia el avance del deterioro de la estructura y se menciona la visualización de oxidación en las vigas del tablero, también se tuvo acceso a un informe de inspección visual en el cual se evaluó el estado de las soldaduras y se asignó una calificación técnica al estado de conservación global de la estructura.

A partir de la revisión de estos antecedentes, se identificó la presencia de corrosión en zonas críticas específicamente en las cercanías del ala inferior de las vigas y en determinadas uniones soldadas. Debido a este hallazgo los modelos de fiabilidad integrarán el avance de la corrosión como una pérdida de sección por penetración en el ala inferior, siguiendo la metodología y los estudios previos detallados en la sección 2.4.



**Fig 10. Viga de acero corroída.**

### **5.1.2 Estudio entorno ambiental.**

La caracterización del ambiente del sitio estudiado se basó en la recopilación de datos ambientales históricos obtenidos a través del Ecosistema de Espacio de Datos de Copernicus (CDSE). Para ello se utilizaron dos de los servicios presentes en el ecosistema el Climate Data Store (CDS), desde el cual se extrajeron series trihorarias de temperatura y humedad relativa proveniente de la base de datos “ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present”, y el Atmosphere Data Store (ADS), utilizado para obtener concentraciones de material particulado ( $PM_{10}$ ) y dióxido de azufre ( $SO_2$ ) mediante la base de datos “CAMS global reanalysis (EAC4)”.

Debido a que la base de datos CAMS reporta cantidad de  $SO_2$  en términos de razón de mezcla de masa ( $kg/kg$ ), se realizó una conversión a concentración másica ( $\mu g/m^3$ ) para facilitar la interpretación de los datos. Este procesamiento se fundamentó en la Ley de los Gases Ideales, ecuación (5), considerando las condiciones de la zona, por lo que se fijó la presión del nivel analizado de 900 [Pa].

Posteriormente, utilizando los valores de concentración diaria de  $SO_2$  previamente calculados, se estimó la deposición de  $SO_{2,dep}$ . Este proceso representa la transferencia de contaminantes gaseosos directamente hacia la superficie estudiada. Para ello se aplicó una velocidad de deposición ( $v_d$ ) de 0.0025 [m/s], valor representativo para la rugosidad y cobertura del suelo de la zona precordillerana.

En paralelo, se estimó la deposición de cloruro ( $Cl^-$ ) de manera indirecta a partir de los datos de material particulado ( $PM_{10}$ ). Siguiendo la metodología del programa internacional UN/ECE ICP, ecuación (7), se determinó la tasa de deposición de las partículas ( $PM_{10,dep}$ ).

Finalmente, considerando que las partículas de  $PM_{10}$  contienen aproximadamente un 7% en peso de cloruro según lo medido por el UN/ECE ICP, se determinó la tasa de deposición final ( $Cl^-_{dep}$ ).

Este registro se complementó con datos de precipitación total anual obtenidos de la plataforma nacional CR2MET, consolidando un base de datos históricos representativa del entorno ambiental del puente El Toyo del periodo 2003-2024.

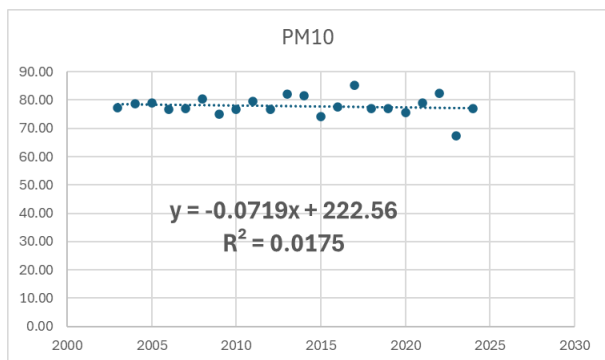
Los valores correspondientes a temperatura, humedad relativa HR, material particulado  $PM_{10}$ , dióxido de azufre  $SO_2$  y cloruros Cl se presentan como promedios anuales, mientras que la precipitación se contabilizó como el total acumulado por año.

**Tabla 6. Historial de parámetros ambientales.**

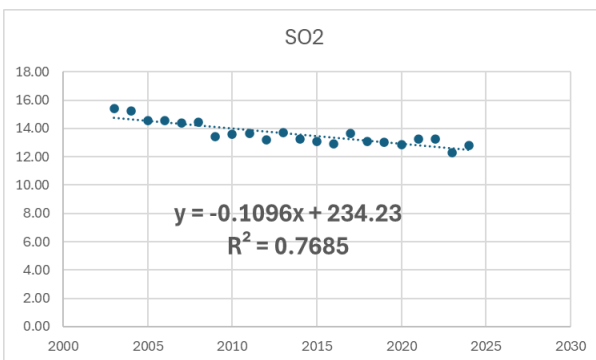
<b>Año</b>	<b>Temp media anual [°C]</b>	<b>HR [%]</b>	<b>Precipitación [mm]</b>	<b>PM<sub>10</sub> [mg/m<sup>2</sup>·d]</b>	<b>SO<sub>2</sub> [mg/m<sup>2</sup>·d]</b>	<b>Cl [mg/m<sup>2</sup>·d]</b>
2003	6.01	58.83%	376.10	77.21	15.01	1.28
2004	5.16	60.46%	456.00	78.82	14.80	1.31
2005	5.07	62.48%	791.40	78.86	14.15	1.31
2006	6.05	61.49%	472.00	76.64	14.14	1.27
2007	4.07	59.57%	330.00	77.09	14.00	1.28
2008	4.94	59.58%	700.00	80.46	14.03	1.34
2009	5.56	59.38%	556.50	75.04	13.06	1.24
2010	4.20	58.79%	307.10	76.71	13.20	1.27
2011	4.76	58.67%	224.50	79.50	13.27	1.32
2012	5.52	59.74%	480.50	76.71	12.85	1.27
2013	4.91	58.77%	346.70	82.07	13.34	1.36
2014	4.67	57.98%	260.80	81.48	12.89	1.35
2015	5.97	56.79%	391.40	74.09	12.71	1.23
2016	5.70	59.74%	390.43	77.46	12.58	1.29
2017	4.98	59.41%	395.30	85.15	13.31	1.41
2018	5.46	58.24%	259.68	77.15	12.76	1.28
2019	6.29	53.54%	108.27	77.11	12.70	1.28
2020	6.67	56.94%	322.85	75.55	12.49	1.26
2021	5.84	58.00%	310.59	78.96	12.90	1.31
2022	4.89	57.79%	-	82.29	12.89	1.37
2023	6.75	61.91%	-	67.34	11.96	1.12
2024	5.73	59.19%	-	76.99	12.44	1.28

Para modelar el deterioro se obtuvieron los antecedentes climáticos del año de construcción del puente El Toyo (1987). Si bien los datos de temperatura, humedad relativa y precipitación fueron recuperados de las plataformas CDS y CR2MET, no fue posible obtener datos de concentraciones de PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> para dicho periodo.

Es por ello que se realizó una estimación basada en el comportamiento observado en los registros obtenidos entre los años 2003 y 2024. Se analizaron los gráficos de tendencia de ambas variables para identificar patrones de comportamiento que permitan proyectar los valores representativos hacia 1987.



**Fig 11. Gráfico PM<sub>10</sub> vs tiempo.**



**Fig 12. Gráfico SO<sub>2</sub> vs tiempo.**

El análisis de los gráficos reveló que la componente PM<sub>10</sub> se ha mantenido estable en el tiempo sin una tendencia significativa, lo que indica una baja variabilidad. Por ello se optó por usar el promedio de los registros históricos como valor representativo para el año 1987.

A diferencia del material particulado, el SO<sub>2</sub> muestra una disminución sostenida en el tiempo, respaldada con un R<sup>2</sup> elevado. Esta tendencia se puede atribuir a la mejora progresiva de las normativas ambientales y el control de emisiones industriales. Por lo tanto, se estimó el valor para el año 1987 mediante la ecuación de la recta obtenida.

**Tabla 7. Parámetros ambientales de 1987.**

Año	Temp media anual [°C]	HR	RAIN	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	Cl
1987	5.58	63.33%	1024.50	77.85	16.52	1.29

Una vez recopilados los datos ambientales, se procedió a estimar la velocidad de corrosión para el primer año de exposición (A) parámetro fundamental para la ecuación de daño a largo plazo. Tras evaluar las diversas funciones de corrosión anual presentadas en el marco teórico, se realizó un análisis crítico seleccionando las formulaciones que mejor se adaptan.

En este proceso, se descartaron aquellos modelos que debido a su simplicidad de variables de entrada tendían a sobrestimar el deterioro en la zona. Bajo este criterio se optó por utilizar los resultados de cuatro modelos, la función dependiente de la humedad relativa C(HR), la norma ISO 9223, el proyecto UN/ECE ICP y el Multi Assess Program (Ver ecuaciones 2, 3 y 4).

**Tabla 8. Resumen corrosión anual de la zona.**

Función de Corrosión	r corr
C (HR)	14.8121558
ISO 9223	4.12137483
UN/ECE ICP	8.52514671
Multi Assess Program	6.95304096

Posteriormente se clasificó el ambiente corrosivo de la zona de acuerdo con lo establecido por la normativa ISO 9223, la cual define ciertos rangos de corrosión anual para distintas categorías de exposición.

**Tabla 9. Clasificación corrosiva de la zona.**

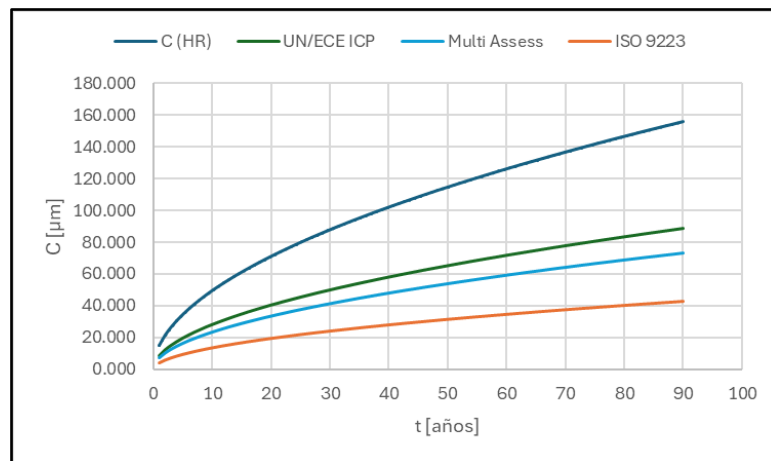
<b>Función de Corrosión</b>	<b>Clasificación ISO</b>
C (HR)	C2
ISO 9223	C2
UN/ECE ICP	C2
Multi Assess Program	C2

La clasificación corrosiva obtenida en la zona del puente El Toyo es “C2”, lo que indica que es un ambiente con baja corrosión, dado que se encuentra en una zona templada y un ambiente atmosférico con baja contaminación. Esta conclusión es consistente con los registros del Mapa de Corrosión Chileno, el cual también sitúa esta área dentro de la categoría corrosiva C2, validando así la caracterización ambiental realizada.

Una vez estimada la velocidad de corrosión inicial (A) para el año de construcción del puente (1987). Se generaron los modelos de deterioro a largo plazo. Para este cálculo se utilizó un exponente ambiental  $n = 0.523$ , valor establecido por la normativa ISO 9223 para estructuras de acero al carbono. Proyección 90 años.

**Tabla 10. Ecuaciones de deterioro a largo plazo.**

<b>Función de Corrosión</b>	<b>Ecuación</b>
C (HR)	$C(t) = 14.812 \cdot t^{0.523}$
UN/ECE ICP	$C(t) = 8.525 \cdot t^{0.523}$
Multi Assess Program	$C(t) = 6.953 \cdot t^{0.523}$
ISO 9223	$C(t) = 4.065 \cdot t^{0.523}$



**Fig 13. Modelos de deterioro a largo plazo.**

Las curvas resultantes muestran un comportamiento coherente con la forma típica de la corrosión atmosférica, presentando una pérdida inicial más acelerada seguida de una reducción progresiva en la tasa de deterioro lo cual se atribuye a la formación de capas de productos de corrosión sobre la superficie del acero las cuales actúan como una barrera protectora.

## 5.2 Aplicación de modelos al puente.

Tras caracterizar la corrosión y proyectar el daño a lo largo del tiempo resulta fundamental traducir estos daños físicos a indicadores de seguridad estructural. Es por ello que se seleccionaron dos metodologías de evaluación que permitirán abordar el comportamiento del puente desde distintos estados límites.

Se abordó el modelo de fiabilidad en estado de servicio propuesto por Cheung & Li (2001) para evaluar como la degradación por corrosión afecta a las condiciones operativas de la estructura, centrándose en al aumento progresivo de las deformaciones bajo las cargas de servicio.

De igual forma se abordó el modelo de fiabilidad basado en la resistencia desarrollado por Kayser & Nowak (1989) que se aplica para cuantificar la seguridad de la estructura en términos de la capacidad última, analizando la probabilidad de falla a medida que la sección transversal de los elementos críticos se deteriora.

### 5.2.1 Estandarización y preparación de datos.

En primer lugar, debido a que la configuración del puente presenta simetría longitudinal, es posible simplificar el comportamiento global del tablero a el análisis de una viga representativa. Para ello se aplicó el concepto de ancho tributario lo que permite simplificar la estimación de las deflexiones y las fuerzas internas (momento, corte y apoyo), que afectan a los elementos principales bajo la acción de las cargas de servicio.

Para la ejecución de un modelo que represente la situación del puente analizado fue necesario transferir los parámetros técnicos del puente obtenidos desde los documentos oficiales hacia los códigos de los modelos realizados en el software MATLAB (The MathWorks, 2024).

Las propiedades y dimensiones de las losas de hormigón armado y los perfiles de acero estructural se obtuvieron directamente de los planos originales de la estructura, presentados en la figura 6, 7, 8 y 9, asegurando que los modelos representen de manera real la capacidad resistente nominal de la estructura.

De igual forma se integró el resultado obtenido de la caracterización de ambiente de la zona para el año de construcción del puente (1987). Estos datos específicos del sitio son la entrada principal que permitirá proyectar la pérdida de sección en el tiempo, para ello se utilizó la ecuación de la ISO 9223, de la Tabla 10.

Adicionalmente se integró información de ambientes corrosivos estándares obtenidos de estudios bajo condiciones típicas de exposición. Esto con el fin de establecer un marco comparativo que permita evaluar el desempeño del puente bajo distintos escenarios de agresividad ambiental.

**Tabla 11. Parámetros estadísticos para A y n (Kayser & Nowak 1988).**

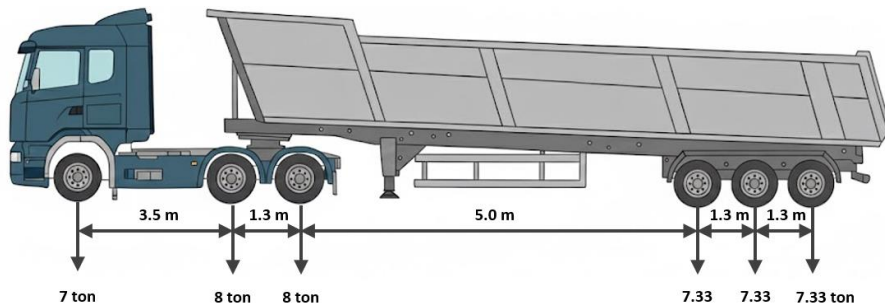
Ambiente	Estudio		Rural		Urbano		Costero	
	A	n	A	n	A	n	A	n
Valor medio	4.121	0.523	34	0.65	80.2	0.593	70.6	0.789
Coefficiente de variación	-	-	0.09	0.1	0.42	0.4	0.66	0.49
Coefficiente de correlación	-	-	-	-	0.68	-	-0.31	-

Finalmente, para definir las cargas de servicio se consideró que el puente es utilizado principalmente para desviar el transporte pesado proveniente de las minas ubicadas en el Cajón del Maipo, por lo que la definición de este parámetro es crítica para el modelo de fiabilidad. Del análisis de la información obtenida en las plazas de pesaje de la Minera Lo Valdés, ubicada en el sector alto del Cajón del Maipo, Region Metropolitana. Se observó que la mayor cantidad de camiones provenientes de las mineras poseían una configuración de 6 ejes y un peso que en promedio no superaba las 45 toneladas.

**Tabla 12. Análisis plaza de pesajes Minera Lo Valdés.**

	Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	Eje 6	Peso Total
<b>Desviación</b>	739	1448	1655	1832	1208	3678	2391
<b>Promedio</b>	5592	8830	8307	7561	8186	6056	44532
<b>COV</b>	0.13	0.16	0.20	0.24	0.15	0.61	0.05

Es por ello que se optó por utilizar la configuración descrita en el decreto MOP 158 para el peso máximo permitido en transportes especiales, fijando un límite de 45 toneladas en 6 ejes. Esta elección técnica es representativa de la demanda real de la estructura ya que coincide con los datos recolectados en los registros de pesaje. Complementariamente, se incorpora un factor de impacto de 1.15, para considerar los efectos dinámicos del tráfico. De igual forma se incorporó un factor de reparto de carga del 75%. Este porcentaje se fundamenta dado el análisis de una viga individual bajo la condición más desfavorable, asegurando que la viga crítica sea capaz de soportar la mayor concentración de carga viva esperada en el sistema.



**Fig 14. Configuración geométrica y distribución cargas por eje del camión.**

### 5.2.2 Programación de modelos y simulación del deterioro.

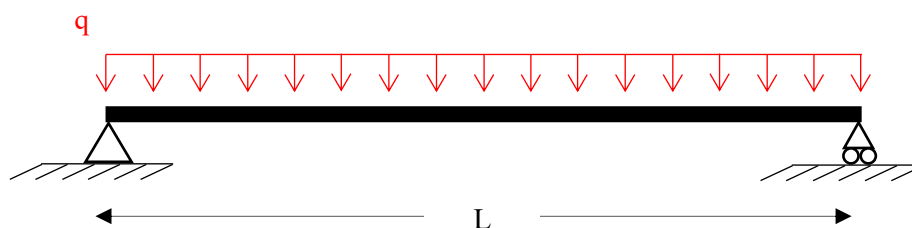
Para simular el deterioro estructural se desarrollaron dos modelos de análisis mediante el software MATLAB (The MathWorks, 2024). El objetivo fue estimar la evolución de la fiabilidad del puente en un horizonte de 90 años, estableciendo como año inicial el año de construcción del puente El Toyo (1987). Con el fin de capturar la evolución de la degradación, la evaluación se realizó en intervalos de 5 años permitiendo monitorear la pérdida de seguridad frente a la corrosión.

#### 5.2.2.1 Modelo basado en la resistencia.

El primer enfoque evaluado corresponde a la implementación de la metodología propuesta por Kayser & Nowak (1989), la cual analiza la fiabilidad estructural mediante la capacidad resistente de los elementos críticos. Este modelo como tal se centra en la evolución de los tres modos de fallas fundamentales de la viga, momento flector, esfuerzo de corte y reacción en los apoyos.

Para determinar las resistencias nominales de este elemento y proyectar su evolución en el tiempo frente a la corrosión o pérdida de sección se aplicaron los criterios y ecuaciones de diseño establecidas por la normativa AASTHO LRFD 2024 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024).

El cálculo de las fuerzas internas sobre la estructura se realizó mediante un análisis estático lineal, modelando la viga principal como un elemento simplemente apoyado. Bajo ese enfoque la carga muerta se consideró como una carga uniformemente distribuida a lo largo de todo el vano.



**Fig 15. Diagrama de carga muerta sobre el vano.**

Por otra parte, la carga viva se determinó simulando el tránsito del camión descrito previamente sobre el puente. Para identificar los escenarios más críticos se realizó un procedimiento de desplazamiento del camión en tramos de 0.1 metros a lo largo de la viga. De este modo se analizaron las líneas de influencia para identificar la posición crítica del camión para el esfuerzo de corte máximo, el momento flector máximo en el vano y finalmente la ubicación que producía la mayor reacción en los apoyo de la viga.

Debido a que tanto las propiedades de los materiales como las magnitudes de carga presentan desviaciones respecto a sus valores nominales, se adoptaron parámetros de distribución, sesgo y coeficiente de variación (COV) propuestos por Kayser & Nowak (1989). Estos valores son fundamentales para el cálculo de la fiabilidad estructural.

**Tabla 13. Parámetros estadísticos (Kayser & Nowak 1988).**

Variables	Distribución	Sesgo	COV
Miembros hechos en fabrica (Vigas de acero)	Normal	1.03	0.04
Miembros fundidos en sitio (Losas, Vigas armada en sitio)	Normal	1.05	0.08
Carga viva (Análisis Pesaje Camiones)	-	-	0.05

Este análisis permite que el modelo de fiabilidad compare la capacidad resistente decreciente del acero con las solicitudes máximas reales que imponen las cargas de estos camiones del servicio minero.

### 5.2.2.2 Modelo basado en el estado de servicio.

Posteriormente, se modelo la fiabilidad estructural bajo el enfoque planteado por Cheung & Li (2001), el cual evalúa la fiabilidad de servicio de la estructura mediante el análisis de sus deflexiones máximas. Para este análisis en concreto, se implementaron simulaciones de Monte Carlo ejecutando 100.000 iteraciones por cada año evaluado, asegurando que se capture la variabilidad de la respuesta estructural frente al deterioro.

Para la ejecución de las simulaciones de Monte Carlo es fundamental definir las distribuciones estadísticas de las propiedades mecánicas y los parámetros de degradación que afectan la respuesta estructural en el tiempo. En este sentido, se adoptan las variables aleatorias y modelos de corrosión establecidos por Cheung & Li (2001), los cuales permiten modelar la incertidumbre en el espesor de los elementos y las propiedades elásticas de los materiales.

**Tabla 14. Parámetros estadísticos (Cheung & Li 2001).**

Variables	Distribución	Valor medio	COV
Parámetro de corrosión A ( $A < 200 \cdot 10^3$ mm)	Log-normal	$4.06523 \cdot 10^{-3}$ mm	0.09
Parámetro de corrosión B ( $B < 1.5$ mm)	Log-normal	0.65	0.1
Espesor de la losa de concreto, $t_c$	Normal	250 mm	0.067
Módulo de elasticidad del concreto, $E_c$	Log-normal	25.641MPa	0.2
Módulo de elasticidad del acero, $E_s$	Log-normal	200.000 MPa	0.06

Bajo este enfoque, la definición de los límites de deflexión admisible se basó en los criterios establecidos por el Manual de Carreteras, Volumen N° 3 (MOP, 2024), los cuales son consistentes con las disposiciones de la normativa AASHTO LRFD 2024 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2024). Para el análisis del puente El Toyo se optó por evaluar el comportamiento estructural bajo dos umbrales normativos distintos el límite general de  $L/800$  para carga vehicular y el criterio más restrictivo de  $L/1000$ , correspondiente a puentes con tránsito peatonal. Esta comparativa permite analizar la respuesta de la estructura frente a la exigencia de mayor rigidez requerida para mitigar vibraciones que resulten incómodas o inseguras para las personas.

La determinación de la deflexión crítica se realizó mediante un análisis estático lineal sobre una viga simplemente apoyada. Con el fin de capturar con precisión el comportamiento crítico se realizó una simulación del paso del camión sobre el puente en tramos de 0.1 metros identificando la posición específica de los ejes que genera la mayor demanda de deflexión. Este proceso permite monitorear como la pérdida de rigidez de la sección producto del avance de la corrosión compromete progresivamente la funcionalidad de la estructura frente a las exigencias normativas vigentes.

## 6 Análisis de Resultados

### 6.1 Resultados modelo basado en la resistencia.

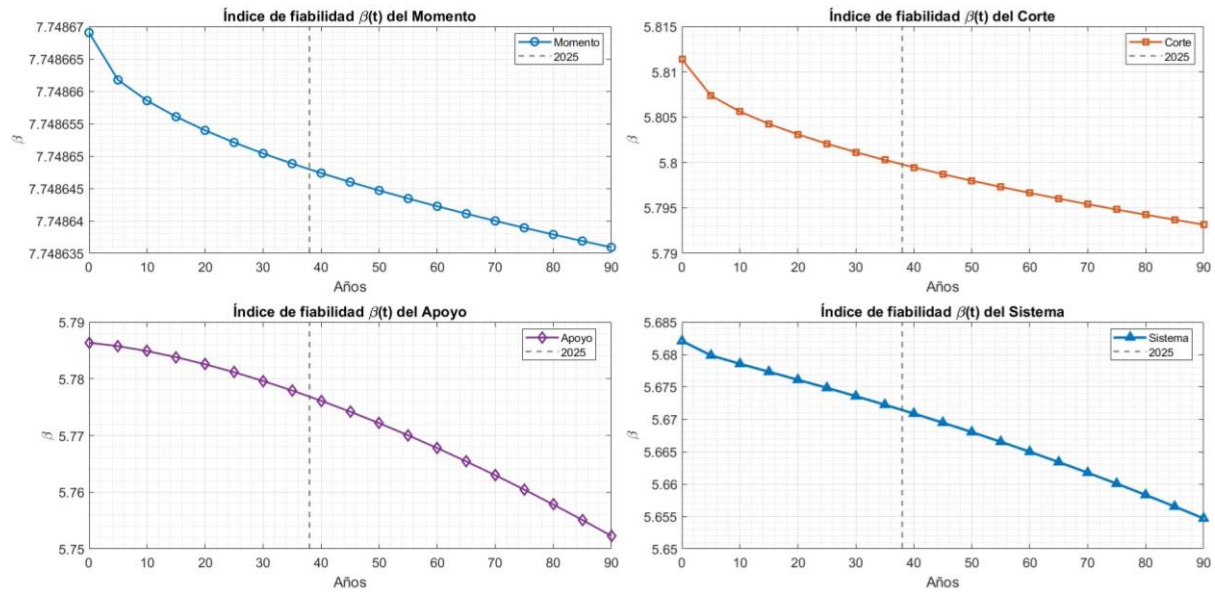


Fig 16. Resultados modelo de fiabilidad basado en la resistencia.

Se observa una disminución progresiva de la fiabilidad en todos los modos de falla evaluados. Este comportamiento es consecuencia directa de la pérdida de sección tanto en el ala inferior (crítica para la flexión) como en el alma de los extremos (crítica para el corte y apoyo). La reducción del área efectiva y del momento de inercia disminuyen la capacidad nominal de la estructura para resistir momentos flectores y esfuerzos cortantes.

Dado que la resistencia disminuye mientras las cargas actuantes permanecen constantes el margen de seguridad se reduce sistemáticamente, lo que se traduce en la caída del índice de fiabilidad  $\beta$  observado en los gráficos.

Del análisis comparativo, se observa que el momento flector presenta el índice de fiabilidad  $\beta$  más alto del sistema. Es por ello que se concluye que la estructura se encuentra bien diseñada para resistir grandes solicitaciones de momento interno.

Sin embargo, se aprecia que la falla en el apoyo es la que domina la seguridad global de la estructura dada que es la que presenta un menor nivel de seguridad desde el año 0. De igual forma se observa que la falla en el apoyo presenta una tasa de deterioro más acelerada que el resto de las fallas. Es por estas diferencia de pendientes que si la pérdida de sección continua con el mismo ritmo observado, dicho modo de falla será el que domine la estructura por completo. Dicha información es de vital importancia para la priorización de inspecciones en las zonas críticas del puente a lo largo de su vida útil.

## 6.2 Resultados modelo basado en el estado de servicio.

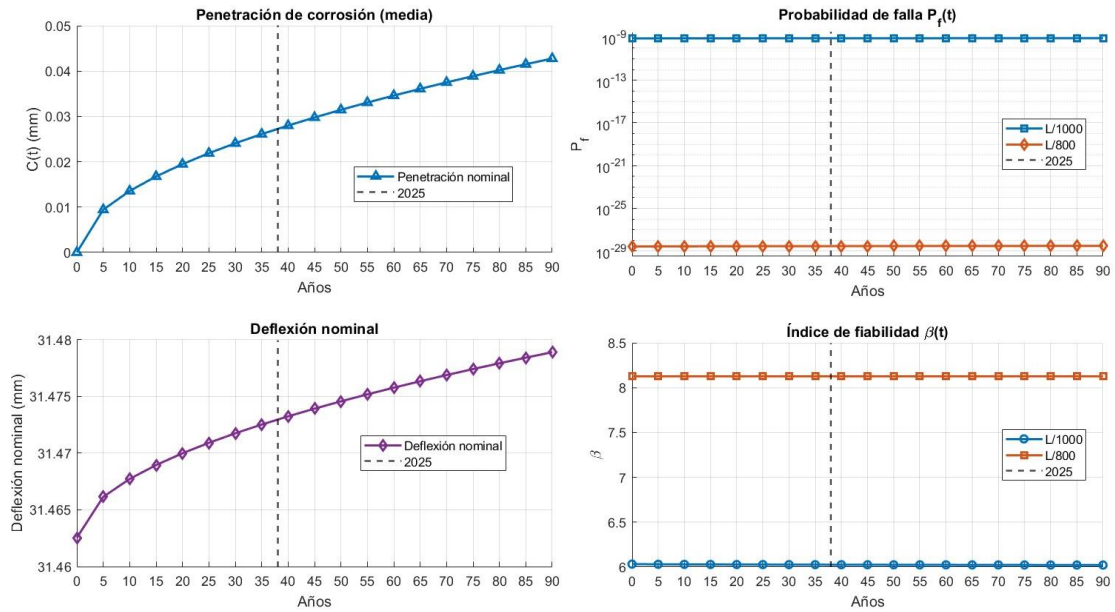


Fig 17. Resultados modelo de fiabilidad basado en el estado de servicio.

Se observa que la pérdida de sección por corrosión genera un incremento en la deflexión del puente. Este fenómeno se explica físicamente por la reducción del área transversal de la viga de acero, lo que disminuye directamente el momento de inercia. Al reducirse la rigidez de flexión ( $EI$ ) la estructura pierde resistencia geométrica, experimentando mayores deformaciones ante las cargas de servicio aplicadas.

Del análisis de los resultados, se concluye que el proceso de degradación es lento y estable. La penetración de la corrosión proyectada a 90 años es apenas de 0.042 mm una magnitud considerablemente baja que refleja que las condiciones ambientales son de baja agresividad. Debido a esta pérdida mínima de material el impacto en el desempeño funcional es despreciable, el aumento de deflexión es mínimo del orden de la centésima manteniéndose lejos de los umbrales críticos.

Por otro lado, al contrastar los dos límites de deformación establecidos por la normativa, se evidencian las siguientes diferencias en los niveles de seguridad.

Para el límite de  $L/800$  el índice de fiabilidad se mantuvo constante en los 90 años, obteniendo un valor de 8.1259. Por otro lado para el límite de  $L/1000$  el índice de fiabilidad experimentó un leve reducción, pasando de 6.0484 en el año 0 hasta 6.0380 en el año 90.

Como es de esperar, el límite  $L/1000$  es más exigente lo que reduce el margen de seguridad y por ende el índice de fiabilidad en comparación con  $L/800$ . No obstante, en ambos casos los valores de  $\beta$  se mantienen constantes y por encima de los valores críticos establecidos por la práctica de ingeniería, lo que garantiza la serviciabilidad de la estructura durante todo el periodo evaluado.

### 6.3 Resultados ambientes estándar.

El análisis de ambientes estándar tiene como fin evaluar la sensibilidad del modelo de deterioro frente a la variabilidad climática presente en el territorio chileno. Dado que el puente El Toyo se ubica en una zona de baja agresividad, extender el estudio a zonas con mayor presencia de contaminantes permite cuantificar cuánto se reduce realmente la vida útil de una estructura. Con el objetivo de identificar el momento en el que el puente deje de cumplir los niveles de seguridad, transformando así el modelo en una herramienta que permita generar planes de mantenimiento estructural.

Para estudiar los distintos ambientes estandar se ingresaron los valores presentados en la Tabla 11, donde se detallan los parametros necesarios para generar los modelos de corrosión atmosférica a largo plazo.

Ambiente Rural

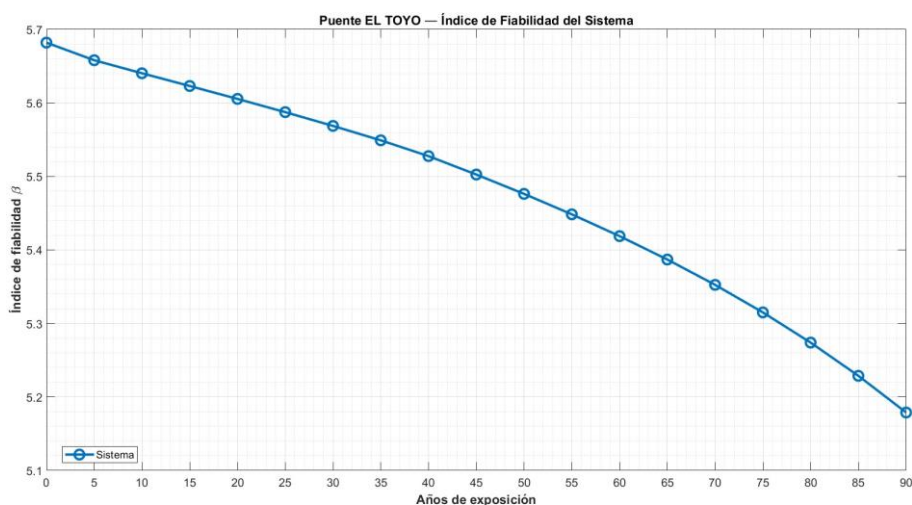


Fig 18. Índice de fiabilidad de Resistencia (Rural).

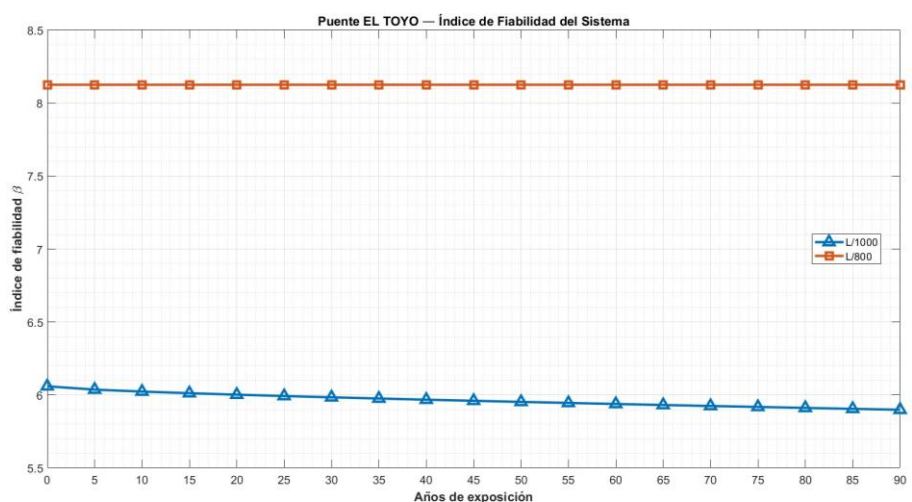
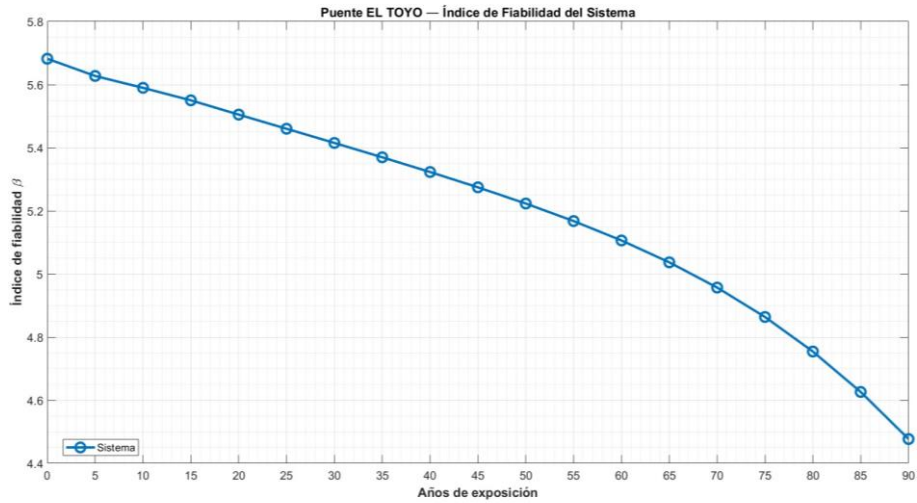


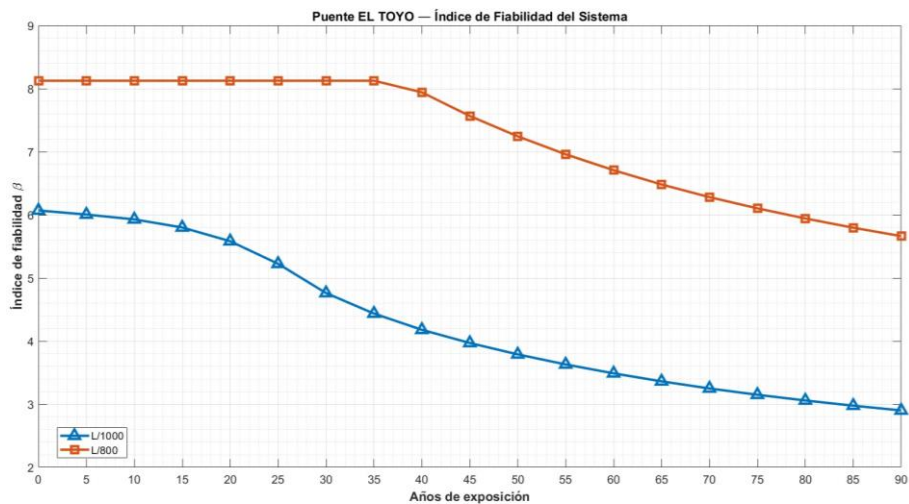
Fig 19. Índice de fiabilidad de Serviabilidad (Rural).

Del análisis entre la fiabilidad de servicio y resistencia en condiciones rurales, se concluye que el puente opera bajo condiciones de degradación insignificante. Para ambos casos los valores de fiabilidad  $\beta$  se mantienen prácticamente constante en valores elevados. Por su lado la fiabilidad de servicio se encuentra en valores sobre 8.1 para el límite de L/800 y valores sobre 5.9 para el límite de L/1000. Por otro lado, para la fiabilidad de resistencia se encuentra en valores sobre 5.

## Ambiente Urbano



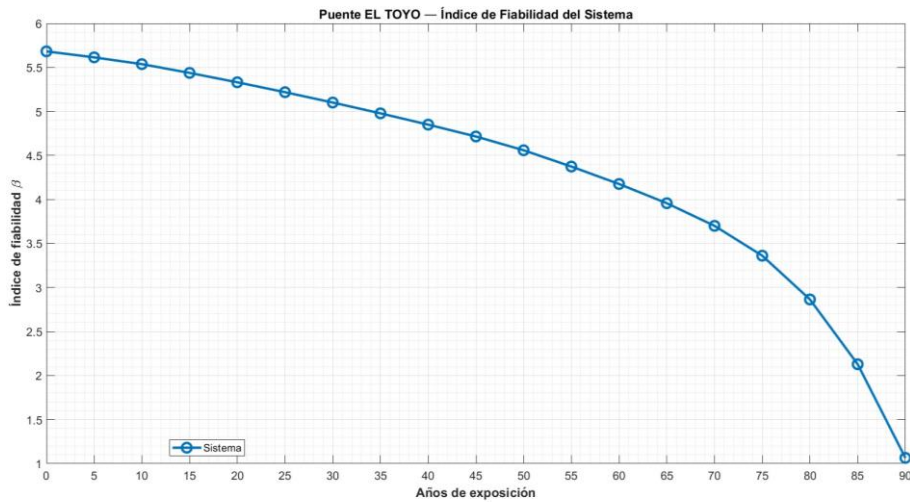
**Fig 20. Índice de fiabilidad de Resistencia (Urbano).**



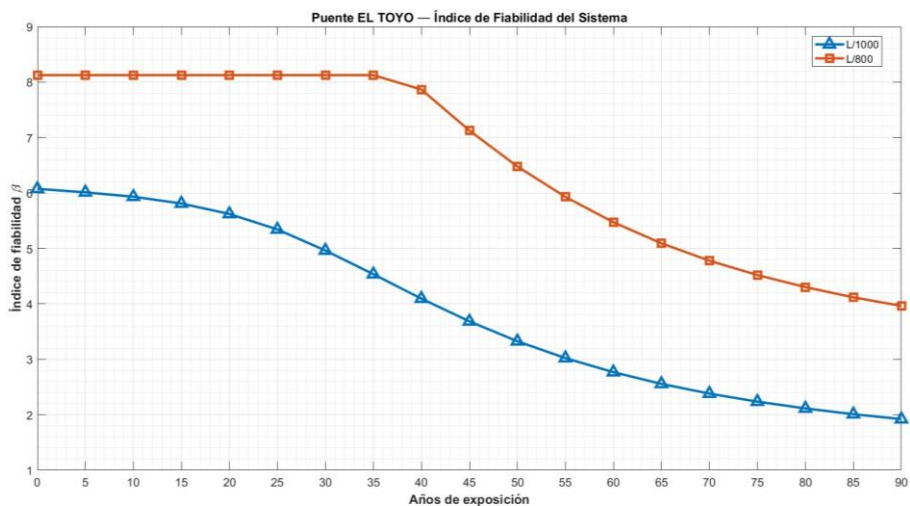
**Fig 21. Índice de fiabilidad de Serviciabilidad (Urbano).**

El análisis en ambiente urbano revela una transición crítica en el comportamiento estructural del Puente El Toyo. Se observa que la fiabilidad por servicio para el límite más restrictivo (L/1000) experimenta una degradación acelerada a partir del año 40, cruzando el umbral de la fiabilidad por resistencia. Este fenómeno indica que en entornos urbanos la pérdida de inercia geométrica debida a la corrosión atmosférica afecta prioritariamente a la rigidez del sistema. Mientras que la integridad estructural permanece en niveles de  $\beta$  superiores a 4.4. La serviciabilidad se convierte en un factor limitante de la vida útil, sugiriendo que las intervenciones se enfoquen principalmente en el control de deflexiones de la estructura y así evitar el incumplimiento de límites normativos.

## Ambiente Costero



**Fig 22. Índice de fiabilidad de Resistencia (Costero).**



**Fig 23. Índice de fiabilidad de Serviciabilidad (Costero).**

Notamos que el escenario marino representa la condición más crítica para el diseño del puente El Toyo. Los resultados demuestran que una degradación acelerada donde para la fiabilidad por servicio (L/1000) está bajo los niveles mínimos aceptables ( $\beta < 3$ ) en el año 55, mientras que la fiabilidad por resistencia experimenta una degradación muy acelerada a partir del año 75 cayendo desde una fiabilidad de 3.3 hasta una fiabilidad de 1 para el año 90. Esto nos indica que la estructura no es apta para entornos costeros sin la implementación de protección adicional.

## 7 Conclusión

La aplicación de modelos de deterioro por corrosión basados en índices de fiabilidad al puente El Toyo permitió caracterizar la evolución de su seguridad estructural ante distintos escenarios de exposición.

Con respecto al desempeño estructural según el entorno de exposición.

En el ambiente de estudio de la zona, el puente muestra un comportamiento altamente estable con una degradación insignificante, una penetración cercana a 0.042 mm en 90 años. Bajo estas condiciones el índice de fiabilidad se mantiene por encima de los mínimos normativos confirmando así que la estructura posee un diseño adecuado para su ubicación.

Por otro lado, el estudio demuestra que el entorno es el factor determinante en la vida útil de la estructura. Mientras que en ambientes rurales la seguridad es elevada, en ambientes marinos la fiabilidad de servicio llega a colapsar llegando valores inadmisibles, lo que condiciona la viabilidad del diseño en zonas costeras.

La integración de dos perspectivas de diseño resulto fundamental para identificar el modo de falla dominante y así poder optimizar las operaciones de mantenimiento.

Por su parte, el modelo de resistencia revelo que la falla en el apoyo es la que rige la seguridad global del sistema durante toda la vida útil siendo esta especialmente critica al largo plazo, ya que el deterioro se presenta de manera más acelerada.

Por otro lado, el modelo de servicio demostró ser el indicador más sensible en ambientes agresivos. La pérdida de rigidez geométrica afecta a la serviciabilidad antes que la capacidad última, generando así que las deflexiones sean la alerta temprana para las gestiones de mantenimiento.

Es por ello que este trabajo constituye un avance hacia la incorporación de metodologías predictivas dentro del sistema de gestión de puentes chilenos. La capacidad de anticipar el deterioro permitirá pasar de un mantenimiento reactivo a una programación de intervenciones basada en la fiabilidad que presente la estructura, optimizando así la asignación de recursos de conservación de puentes a nivel nacional.

La aplicación de los modelos a una viga aislada representativa del puente si bien captura de forma representativa las deflexiones y resistencia de la estructura, no considera efectos de cargas globales ni la interacción entre las vigas del tablero. Es por ello que se recomienda para futuras etapas la incorporación del enfoque de análisis de finite strip o elementos finitos con el fin de describir con mayor fidelidad lo que está experimentando la estructura.

De igual forma para ampliar el rango de aplicación del estudio se requiere ampliar el análisis a otras configuraciones y tipologías de puentes, ya que validar estos modelos en un conjunto más amplio de estructuras y ambientes permitiría fortalecer su aplicabilidad, mejorar su capacidad de predicción y avanzar hacia herramientas más robustas y sistemáticas dentro del BMS a nivel nacional.

## 8 Referencias

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2024). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Cañamares, J. M., Ángel, M., & Suárez, A. (2016). *Sistemas de Gestión de Puentes Optimización de estrategias de mantenimiento Implementación en redes locales de carreteras* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Cheung, M. S., & Li, W. C. (2001). Serviceability reliability of corroded steel bridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(3), 419–424. <https://doi.org/10.1139/cjce-28-3-419>
- Clemente, J. (2011). *Modelos de predicción del deterioro en sistemas de gestión de puentes* [Tesis]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cornell, C. A. (1970). A first order reliability theory of structural design. In N. C. Lind (Ed.), *Structural Reliability and Codified Design*. University of Waterloo, Solid Mechanics Division.
- Departamento de Ingeniería Mecánica. (2019). Puentes de acero avances tecnológicos en la identificación y pronóstico de daños estructurales. *Revista Dinamica*, 9–12.
- Garita, C. (2015). Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Tecnología En Marcha*, N° 29, 96–107.
- ISO 9223. (2012). *International Standard 9223*.
- Kaysers, J. R., & Nowak, A. S. (1989). RELIABILITY OF CORRODED STEEL GIRDER BRIDGES. In *Structural Safety* (Vol. 6).
- Kubzova, M., Krivy, V., & Kreislova, K. (2020). Probabilistic prediction of corrosion damage of steel structures in the vicinity of roads. *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su12239851>
- Márquez, M. (2024). *Monitoreo de puentes en Chile: Revisión del estado del arte* [Tesis para optar al grado de magíster en Industria Inteligente]. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Martínez Pérez, F. I. (2023). Corrosión. Tipos. Prevención. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32(2). <https://cu-id.com/2177/v32n2e10>
- MOP. (2024). *Manual de Carretera Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño*.
- Morcillo, M. (1998). Predicción a corto y largo plazo de la corrosión atmosférica de metales. *Revista de metalurgia*, Vol. 34, 109–112. <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es>
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología En Marcha*, 28(3), pág. 127-136. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION*. www.wiley.com.
- The MathWorks, Inc. (2024). *MATLAB (MATLAB R2024b)*.
- Vera, R. (n.d.). *Modelación de la Velocidad de Corrosión*. Retrieved September 1, 2025, from <http://www.mapadecorrosionatmosfericadechile.cl/uploads/publicaciones/Modelacion+Pagina+web.pdf>
- Vera, R., Puentes, M., Araya, R., Rojas, P., & Carvajal, A. (2012). Mapa de corrosión atmosférica de Chile: resultados después de un año de exposición. *Revista de La Construcción*, Vol. 12.
- Wesely, M. L. (1988). *PARAMETERIZATION OF SURFACE RESISTANCES TO GASEOUS DRY DEPOSITION IN REGIONAL-SCALE NUMERICAL MODELS\**. Saeum.