



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE UN FRAMEWORK DE GESTIÓN
INTEGRADO DE INFRAESTRUCTURA URBANA EN CHILE**

Memoria de Título presentada por

Isaac Alonso Urrea Mateluna

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Felipe Araya

Julio de 2025



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE UN FRAMEWORK DE GESTIÓN
INTEGRADO DE INFRAESTRUCTURA URBANA EN CHILE**

AUTOR:

Isaac Alonso Urrea Mateluna

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	Felipe Araya	
Miembro 1 Comisión	Marcelo Bravo	
Miembro 2 Comisión		

Santiago, Chile, Julio de 2025



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: EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE UN FRAMEWORK DE GESTIÓN INTEGRADO DE INFRAESTRUCTURA URBANA EN CHILE

Nombre del candidato(a): Isaac Alonso Urrea Mateluna

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Santiago San Joaquín ; Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Felipe Araya, 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

☒ 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:

☐ 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: 04/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04/08/2025

; Firma:

EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL USO DE UN FRAMEWORK DE GESTIÓN INTEGRADO DE INFRAESTRUCTURA URBANA EN CHILE

Isaac Urra Mateluna¹, Felipe Araya²

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile

Resumen

El presente trabajo evalúa la factibilidad de implementar un modelo de gestión integrada de infraestructura urbana en Chile, tomando como base el framework propuesto por Abu-Samra et al. (2020), el cual plantea una estrategia de intervención coordinada entre pavimentos, redes de agua potable y alcantarillado. Este enfoque busca maximizar beneficios técnicos, sociales y económicos mediante un modelo de optimización trilevel multiobjetivo, con criterios de salud del corredor (CCS), duración de intervención (NCR) y costos del ciclo de vida (LCC).

Para analizar su aplicabilidad en el contexto chileno, se adoptó una metodología exploratoria basada en revisión documental y análisis crítico de fuentes técnicas y normativas locales. Se contrastaron las exigencias del modelo con la estructura institucional, la disponibilidad de datos, y las capacidades operativas de los municipios chilenos, tomando como caso de estudio la comuna de Providencia. Además, se evaluaron estudios nacionales e internacionales relacionados con la gestión integrada de infraestructura y se identificaron barreras y oportunidades específicas para el sector hídrico y vial urbano. La metodología incluyó el levantamiento de antecedentes técnicos de infraestructura urbana, revisión de modelos de deterioro aplicados en Chile, y un análisis cualitativo de los supuestos del framework frente al escenario operativo y regulatorio nacional.

Los resultados muestran que, si bien la estructura del modelo es técnicamente adaptable, su aplicación enfrenta desafíos importantes en términos de interoperabilidad de datos, coordinación interinstitucional, y criterios de priorización que integren adecuadamente los servicios sanitarios. Se concluye que el framework es potencialmente viable en Chile bajo ciertas condiciones institucionales, siendo su implementación más factible en comunas con capacidad técnica consolidada y acceso a información sistematizada.

Abstract

This study evaluates the feasibility of implementing an integrated urban infrastructure management model in Chile, based on the framework proposed by Abu-Samra et al. (2020), which promotes coordinated interventions among pavements, drinking water, and sewer networks. The framework aims to optimize technical, social, and economic outcomes through a tri-level multi-objective optimization model, using corridor condition (CCS), intervention duration (NCR), and life cycle cost (LCC) as key performance indicators.

To assess its applicability in the Chilean context, an exploratory methodology was adopted, combining literature review and critical analysis of national technical sources and regulations. The framework's requirements were contrasted with the institutional structure, data availability, and operational capacities of Chilean municipalities, using the Municipality of Providencia as a case study. The analysis included a review of local infrastructure management practices, deterioration models applied in Chile, and a qualitative evaluation of the framework's assumptions considering the Chilean regulatory and operational environment

Results indicate that, while the model's structure is technically adaptable, its implementation faces significant challenges related to data interoperability, inter-agency coordination, and the integration of water-related infrastructure in prioritization criteria. The study concludes that the framework is potentially viable in Chile under certain institutional conditions, with higher feasibility in municipalities that demonstrate consolidated technical capacity and access to structured information systems.

1 Contextualización

Los gobiernos regionales y municipalidades experimentan una constante dificultad por asegurar los niveles de calidad deseados en infraestructura crítica dentro de las ciudades, debido a infraestructura envejecida o situaciones específicas que se dan en el ciclo de vida. Estos efectos se van acumulando y derivan en intervenciones reactivas que interrumpen el correcto funcionamiento de la red, estas interrupciones en el servicio de cada rama de la infraestructura categorizada como ‘crítica’ afectan el normal desarrollo de las actividades cotidianas e impactan en la economía de la sociedad.

Según estudios en Canadá, aproximadamente un tercio de la infraestructura municipal se encuentra en condiciones regulares o deficientes, lo que genera un considerable déficit financiero para los gobiernos locales, equivalentes a municipalidades de Chile. (Abu Samra et al., 2018). Este problema es especialmente evidente en sistemas críticos (*Brechas y Estándares de Gobernanza de La Infraestructura Pública En Chile*, 2017) como las redes de agua potable, aguas residuales y la infraestructura vial que se encuentra sobre estas en las calles de la ciudad, estas requieren intervenciones constantes y planificadas para garantizar su funcionalidad y minimizar las interrupciones en el servicio.

Tradicionalmente, la gestión de estas infraestructuras se ha llevado a cabo de forma aislada, con intervenciones puntuales en cada sistema según su estado y necesidad de mantenimiento, sin embargo, este enfoque no coordinado no solo resulta ineficiente desde el punto de vista económico, también incrementa las interrupciones en los servicios causando molestias a la comunidad afectada.

Todo lo mencionado ha desencadenado el accionar de académicos y profesionales alrededor del mundo, como primer ejemplo se tiene a Rinaldi (Rinaldi et al., 2001), quien concluyó que las distintas redes de infraestructura urbana son interdependientes, y que los fallos en un sistema pueden provocar un efecto en cascada en otros. Además, se ha identificado que la falta de coordinación en las intervenciones puede incrementar los costos y los riesgos de falla futuros (Di Sivo & Laviana, 2011). Con estos antecedentes como base, se hace evidente que una planificación integrada de la infraestructura municipal puede ser la solución de muchos de los problemas actuales en el largo plazo.

En este contexto, se propone evaluar la aplicación un marco de gestión integrada de infraestructura urbana más importante, donde se optimizan las intervenciones a través de la coordinación de múltiples sistemas, como las calles, las redes de agua y los sistemas de alcantarillado. En gran parte de los casos, en las grandes ciudades existe una relación de interdependencia física y geográfica de redes, tal como detalló Rinaldi (Rinaldi et al., 2001). El objetivo de este tipo de enfoques es maximizar la eficiencia operativa, reducir los costos y minimizar las interrupciones en el servicio, algunos framework ponen el foco en algún objetivo específico (optimización) y otros en varios al mismo tiempo (optimización multiobjetivo).

El principal marco de gestión integrado de activos presentado (Abu-Samra et al., 2020) tiene base en modelos de optimización que, en forma resumida, considera los costos, los tiempos y la condición de salud de los activos, este se encarga en primera instancia de recopilar información sobre toda la red para posteriormente trabajar los datos con ecuaciones que sean aplicables a los datos/contexto de estudio. El paso final es optimizar dependiendo del interés de las partes interesadas, esto mediante las variables en las ecuaciones disponibles y herramientas matemáticas implementadas en computadoras.

Se evaluará la posibilidad de aplicarlo en infraestructura urbana en Chile, específicamente en la comuna de Providencia, en este paso se discutirá la validez de las ecuaciones contenidas en cada uno de los modelos, basados en la disponibilidad de datos y las alternativas presentadas en este estudio. Los modelos y ecuaciones usados en algunos frameworks de gestión integrada de activos han sido desarrollados específicamente para los lugares en que son aplicados, esto también debe ser incluido en la discusión de los resultados que eventualmente pueden obtenerse al ser aplicado en una comuna de la Región Metropolitana.

Finalmente, se entregarán recomendaciones a los ejecutores en caso de ser necesario, poniendo el foco en las dificultades y desafíos que pueden surgir al implementar un marco de gestión integrado que optimiza más de un objetivo.

2 Desarrollo del marco teórico

2.1 Antecedentes de la Investigación

La gestión de infraestructura urbana surgió como tema de estudio al encontrar el interés de académicos de la Ingeniería Civil y un crecimiento exponencial en las grandes ciudades postrevolución industrial. Durante fines del siglo XIX en París, Nueva York y Londres se comenzaron a planificar los sistemas de alcantarillado y abastecimiento de agua potable, a partir de la década del 1950 se comenzó a usar la modelación matemática para buscar soluciones óptimas a problemas con muchas soluciones y para predecir fallas en materiales y por tanto, en redes. Con el avance de la informática se comenzaron a usar computadores para modelar el flujo dentro de tuberías y el desgaste que esto provoca, también los patrones de uso de las calles y los daños que se espera tener en una línea de tiempo. Al mismo tiempo los sistemas de información geográfica (GIS) se comenzaron a popularizar y se comenzaron a usar recurrentemente en las operaciones de mantenimiento, incluso, entrados los años 2000 se investigaba el uso de datos de la red georreferenciados para planificar la gestión en base a ello (Martínez Solano & Pérez García, 2002).

Desde el inicio del siglo XX hasta la actualidad, la forma de estudiar, planificar y trabajar ha cambiado, también gracias a la disponibilidad de nueva tecnología. Si se analiza la red hidráulica se pasó de tener inventarios en planos y un sistema de mantenimiento reactivo a inventarios basados en GIS, mantenimientos que se apoyan en gemelos digitales de la red, predicción de fallas basados en análisis de BigData, inspección con sensores introducidos en la red entre muchos otros avances. Por su lado, la red vial y el mantenimiento de pavimentos ha pasado de inspecciones manuales a sensores de monitoreo en tiempo real (LIDAR) y modelos que predicen el desgaste del pavimento cada vez mejor.

Para estudiar el estado del arte alrededor del mundo en la gestión de infraestructura urbana es de ayuda el análisis de literatura desarrollado por Shamsuddin Daulat y otros académicos de la Norwegian University of Science and Technology o NTNU (Daulat et al., 2024), donde se revisan distintos enfoques de IMAM (Integrated Multi-Infrastructure Asset Management) desde puntos tales como dominio, escala de aplicación, objetivos y enfoque aplicado. Además, se analizan dificultades y se entregan directrices para afrontarlas, esto puede ser de ayuda para analizar los posibles resultados del framework que será propuesto para Chile, además de la validez de cada modelo matemático aplicado basado en la revisión exhaustiva de los datos disponibles.

De los estudios que fueron analizados se pondrá especial atención en los que tienen su base en algún tipo de optimización matemática, de estos se destacan Kleiner et al. (2010) con red de pavimento y agua; Nafi and Kleiner (2010) con red de pavimento y agua; (Marzouk & Osama, 2017) con red de pavimento, agua, alcantarillado y electricidad; Alinizzi et al. (2018) con red de pavimento y agua; (Abu Samra et al., 2018) con red de pavimento y agua que en un estudio posterior añadieron la red de alcantarillado (Abu-Samra et al., 2020); finalmente (Ramos-Salgado et al., 2021) con red de agua y alcantarillado.

Este tipo de modelos ha sido históricamente desarrollado en instituciones académicas de países desarrollados, algunos ejemplos extraídos del paper de Daulat son Canadá, Estados Unidos, Noruega, Países Bajos, Australia, Hong Kong, España, Austria y Reino Unido, en la mayoría de estos estudios se tiene financiamiento tanto de las universidades de los académicos participantes, organismos patrocinadores y/o del estado, mediante programas que fomentan el desarrollo de avances en pos de la mejora continua de la materia.

Es en este contexto que se vuelve interesante estudiar el avance de la gestión integrada de infraestructura urbana en países en vías de desarrollo y analizar en detalle cada parte del framework desarrollado por Abu Samra para evaluar si existen las condiciones de que esto sea desarrollado en comunas urbanas del país.

2.1.1 Conceptos teóricos

En el ámbito de la ingeniería civil, especialmente en la gestión de infraestructuras, es crucial comprender una serie de conceptos clave que facilitan un enfoque integral y sistemático de planificación, operación y mantenimiento. La optimización multiobjetivo permite abordar la toma de decisiones en función de varios objetivos simultáneos, mientras que la gestión de activos de infraestructura organiza la operación y el mantenimiento de estos activos de manera rentable.

Parte esencial de este proceso es el análisis del costo del ciclo de vida (LCC), que evalúa los costos totales a lo largo de la vida útil de un activo, y la evaluación de condiciones de red, que determina la vida útil restante de los activos y la necesidad de intervenciones. La evaluación de riesgos y la gestión integrada de infraestructura son fundamentales para anticipar problemas y mejorar la confiabilidad mediante el flujo de información en sistemas diversos. Además, la evaluación de desempeño mide la capacidad de los activos para cumplir con los estándares de servicio. Herramientas como la probabilidad de fallo, la consecuencia de fallo y el índice de condición de infraestructura (ICI) cuantifican la confiabilidad y el impacto de fallas, respectivamente, ayudando a priorizar intervenciones como el mantenimiento preventivo y la rehabilitación.

Finalmente, la gestión de pavimentos y redes de tuberías (alcantarillado y agua potable) requieren de un inventario de activos detallado que registre características esenciales de cada componente, permitiendo una gestión de riesgos efectiva y una optimización orientada a maximizar la vida útil y funcionalidad de la infraestructura. Estos conceptos conforman un marco teórico robusto que respalda decisiones técnicas en la administración y sostenibilidad de la infraestructura urbana.

2.2 Definición del Problema

- Relevancia de gestión de activos como pavimento, red de agua potable y alcantarillado
- Existencia de interdependencias en estas redes.
- Planificación de mantención en base al deterioro de la infraestructura y la optimización de plazos de intervención y costos al ejecutor y usuarios.
- Coordinación de actividades en intervenciones de mantenimiento de cada red.
- Evaluar si los resultados que se tendrían al usar el framework justifican su implementación real.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de un marco de optimización multiobjetivo de gestión integrada de redes de infraestructura urbana, donde los objetivos sean maximizar el estado de infraestructura y minimizar tanto el costo de mantención como los tiempos de interrupción de servicio. El contexto de aplicación es la red de agua potable, alcantarillado y pavimento de un sector acotado en la Región Metropolitana con la finalidad de acotar el problema, pero dejando la posibilidad de ser escalado y replicado.

3.2 Objetivos específicos

- Construir una base de datos a partir de (1) datos georreferenciados de infraestructura urbana y discutir la disponibilidad y calidad de lo encontrado, además, (2) se debe construir una matriz que relacione actividades de intervención y su impacto en otras redes, esto será fundamental para medir el impacto de la coordinación entre intervenciones.
- Basado en la base de datos construida, investigaciones relacionadas desarrolladas con anterioridad en Chile y entrevistas con profesionales expertos en el tema se evaluará la implementación de modelos que permitan: (1) medir el ahorro de tiempo al coordinar intervenciones, (2) cuantificar el ahorro de costos debido a coordinación de actividades en mantenimiento e indirectamente por ahorros de tiempo, (3)
- Analizar el impacto de aplicar un framework de optimización multiobjetivo a infraestructura urbana en Chile y la validez que tendrían los resultados basados en los datos encontrados y la aplicabilidad de cada modelo ya analizado.

4 Metodología de investigación

4.1 General

Se identifican principalmente tres grandes etapas de trabajo donde se pueden agrupar todos procesos y actividades a desarrollar, estas etapas se basan en la estructura de la mayoría de los framework revisados para la construcción de este estudio.

En primer lugar, se disecciona cada modelo que compone el framework que se planea implementar, en este caso las dimensiones de análisis se limitan a tres, interdependencia entre mantenimiento de redes, costos socioeconómicos del mantenimiento y la salud de redes mediante niveles de servicio. Cada uno de estos modelos estará compuesto por ecuaciones matemáticas desarrolladas por los autores correspondientes, es en esta etapa donde se debe escoger cuidadosamente la que mejor se adecúe a la realidad del país y disponibilidad de datos.

Las variables que estén contenidas deben ser analizadas con el objetivo de tener la mayor cantidad de acceso a la información, dado el contexto de aplicación de cada framework pueden existir valores que varíen según demografía, contexto social, económico, medioambiental u otros, es por esto que se debe elegir el modelo que más ventaja tenga a la hora de ser trasladado al contexto chileno.

En una segunda etapa está el análisis de variables y datos necesarios para los modelos, esta etapa de trabajo se desarrollará en su mayoría dentro de los resultados. Se debe incluir también el proceso de proponer alternativas para subsanar la falta de datos, variables o imposibilidad de desarrollos que complican implementaciones de la estructura de trabajo.

Finalmente se debe analizar y discutir las ventajas de la optimización multiobjetivo, basado en los IMAM ya desarrollados en el mundo. Al mismo tiempo se debe hacer una discusión efectiva de las herramientas de optimización que existen y las ventajas y desventajas de cada una. Todo esto debe ser acompañado de recomendaciones a cada proceso antes mencionado, haciendo hincapié en las dificultades que han tenido investigadores en el pasado y las que podría tener un potencial ejecutor en caso de aplicar este framework.

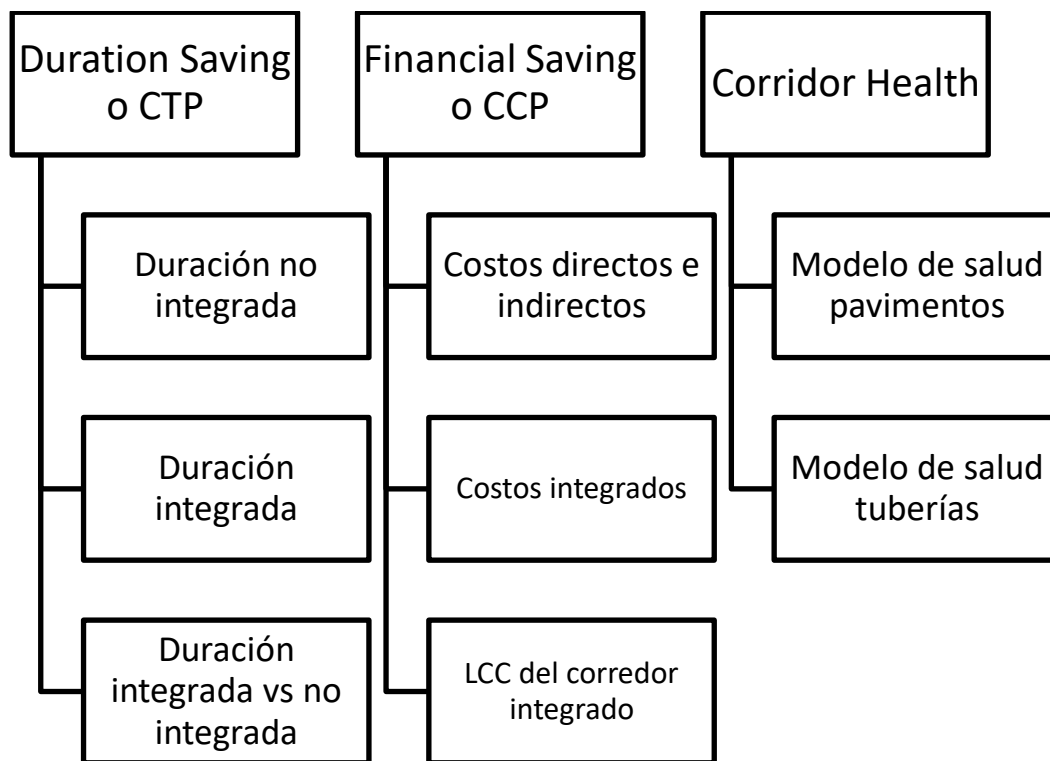


Ilustración 1: Diagrama de flujo etapa uno: Estudio de modelos cuantificadores.

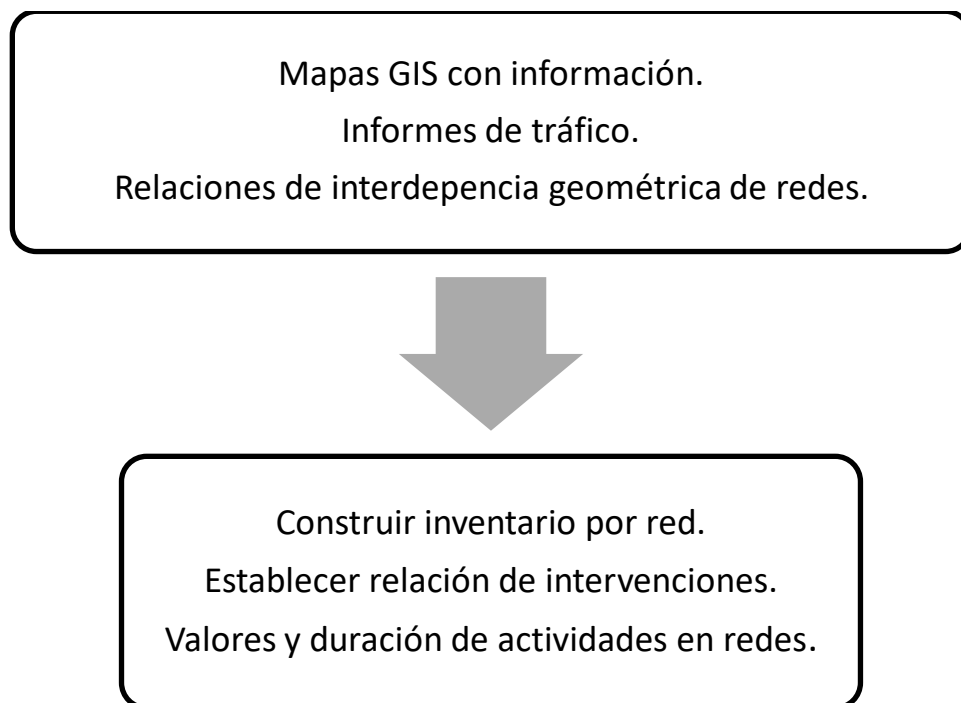


Ilustración 2: Diagrama de flujo etapa dos: Database e intervenciones

4.2 Análisis de modelos cuantitativos de estudios desarrollados que sirvan de base para aplicación en un framework en Chile

Gran parte del trabajo desarrollado en sistemas de gestión integrado de infraestructura urbana se enfoca en desarrollar modelos cuantificadores, el trabajo desarrollado por Soliman (Abu-Samra et al., 2020) presenta modelos computacionales cuyos parámetros son detallados con exactitud en el documento.

Para resumir y en forma bastante general, se tiene que el modelo de duraciones tiene como objetivo determinar la duración de las intervenciones desarrolladas de forma combinada y de la forma tradicional, con el objetivo de comparar los resultados y cuantificar cualquier ahorro de tiempo. De forma análoga, el modelo LCC (Life Cost Cycle) calcula los costos de aplicar intervenciones de mantenimiento y rehabilitación de forma combinada o de la forma tradicional.

Por último, un modelo de condición intenta predecir el estado de cada red mediante modelos de deterioro que pueden considerar desgaste normal y por condiciones extremas o fortuitas.

Hay que destacar que la intención del framework que se buscará construir está acotada a mejorar el estado actual de los procesos de gestión, la medición de mejora es un proceso que añade complicaciones y es ambicioso, esto será discutido en el análisis de los problemas.

4.2.1 Duration Saving Model

El motivo de esta etapa es, según investigadores como Amir Behera (Behera et al., 2024) o Soliman Abu Samra, reducir la duración total de un proyecto mediante la reducción de acumulada de las actividades que lo conforman, ambos mencionan el término Critical Path como parámetro fundamental de análisis, ya que el será el camino de actividades que constituirán un plan de mantenimiento específico.

Se puede obtener la duración de las actividades de mantenimiento dentro de un corredor considerando la (1) duración combinada, (2) parcialmente-combinada y (3) convencional. El ahorro de tiempo es consecuencia de actividades que se pueden tratar como ‘Joint/Parallel Activities’ siendo desarrolladas de forma conjunta o paralela teniendo en cuenta su ubicación.

Abu Samra categoriza la duración de intervenciones que se pueden llegar a combinar en tres grupos:

1. Standalone duration (SD): representa la duración de las actividades requeridas solo por un sistema i y durante el desarrollo de estas actividades ninguna más puede llevarse a cabo.
2. Parallel duration (PD): Representa la duración total de actividades de una red que pueden ser desarrolladas al mismo tiempo.
3. Joint duration (JD): Hace referencia al tiempo que tardan las actividades necesarias para el mantenimiento de más de una red que esté involucrada en un sector.

Se proponen expresiones para cada una de las duraciones, estas quedan definidas como la sumatoria de las duraciones de las actividades que componen cada intervención, tal como se muestran a continuación:

$$SD_{i_{ot}} = \sum_{m=1}^M UR_{m_t} * Q_{m_{ot}} * IA_{o_{i_{tr}}} \text{ para standalone duration}$$

$$PD_{ijk_{ot}} = \sum_{y=1}^Y \max (UR_{y_t} * Q_{m_y} * IA_{o_{i_{tr}}}) \text{ para paralel duration}$$

$$JD_{ijo_t} = \sum_{e=1}^E UR_{e_t} * Q_{e_{o_t}} * IA_{o_{i_{t_r}}} \text{ para 2 sistemas}$$

$$JD_{ijk_{o_t}} = \sum_{q=1}^Q UR_{q_t} * Q_{q_{o_t}} * IA_{o_{i_{t_r}}} \text{ para 3 sistemas}$$

Donde O = identificador del corredor (numero); t = tiempo en la línea de planificación (años); $IA_{o_{i_{t_r}}}$ = índice de aplicabilidad de una intervención r en un tiempo t para una red i en un corredor O, es un valor binario (1 o 0); m, y, e, q son contadores auxiliares en el modelo; i, j y k identifican al sistema (número); UR_{m_t} = rendimiento de una actividad m en un momento t (hora/unidad); $Q_{m_{o_t}}$ = cantidad de trabajo necesario para completar la actividad m en el corredor O en el tiempo t (la unidad depende del rendimiento de la actividad); $PD_{ijk_{o_t}}$ = duración en paralelo de todas las actividades de intervención desarrolladas en los sistemas i, j, k en el corredor O en un tiempo t. (horas); JD_{ijo_t} = duración combinada de las actividades de intervención en dos sistemas en un corredor O en un tiempo t (horas); $JD_{ijk_{o_t}}$ = duración combinada de las actividades de intervención en los tres sistemas en un corredor O en un tiempo t (horas).

Esto es solo una presentación de la lógica matemática detrás del modelo, el análisis de cada ecuación contenida en el modelo y a su vez, cada parámetro contenido en cada ecuación será desarrollado en etapas posteriores.

La estructura del modelo de Abu Samra para estimar las duraciones tiene cuatro etapas: (1) descomponer actividades que componen una intervención, (2) categorizar las actividades, (3) estimar sus duraciones, (4) cálculo de la coordinación del corredor.

La primera fase consta en fraccionar las intervenciones necesarias para mantenimiento de los distintos sistemas en actividades tangibles y con un rendimiento acorde a parámetros (ejemplo: largo del corredor, número de usuarios, tipo de suelo, tipo de tubería, diámetro, etc.).

La segunda fase consta en categorizar las actividades e identificar las que pueden ser desarrolladas de forma paralela. Para calcular el tiempo que se tarda en completar todas las actividades necesarias para una intervención se usa el método CPM (Critical Path Method), que consta en (1) descomponer las actividades de una intervención y asignarles una duración, (2) determinar cuál de esas actividades puede o no ser desarrollada en paralelo, esto depende de una línea temporal en el itinerario de la intervención, finalmente (3) determinar el camino crítico de actividades a desarrollar para calcular la duración de la intervención en el corredor estudiado.

La tercera fase consiste en calcular dos números que serán usados para comparar el antes y después de la eventual integración de actividades:

- Asset standalone duration (ASD_i) que representa la duración de todas las actividades necesarias para un sistema i sin interrupciones, asumiendo que no existirá ninguna coordinación de actividades
- Corridor Coordinated Duration (CCD) que representa la duración total del proyecto de mantenimiento asumiendo coordinación entre distintos sistemas siempre que sea posible.

Finalmente, la fase cuatro calcula el Network Coordination Ratio (NCR), valor que intenta cuantificar el ahorro de tiempo que se puede obtener al coordinar intervenciones de forma parcial

o completa. Se explica que mientras menor sea el valor de NCR menor será el ahorro de tiempo que resulta de la coordinación de actividades. A continuación, se muestran las expresiones matemáticas definidas por Abu Samra para ASD_i , CCD y NCR :

$$ASD_{i_{O_t}} = SD_{i_{O_t}} + JD_{ijk_{O_t}} + \sum_{i=1}^{n_s} ASD_{i_{O_t}}$$

$$CCD_{O_t} = \sum_{i=1}^{n_s} SD_{i_{O_t}} + \sum_{i=1}^{n_s} JD_{ijk_{O_t}} + \{JD_{ijk_{O_t}} * n_a\} + \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} JD_{ijk_{O_t}}$$

$$NCR_t = \sum_{o=1}^O \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_s} ASD_{i_{O_t}}}{CCD_{O_t}} \right)$$

Donde $ASD_{i_{O_t}}$ es la duración independiente de todos los sistemas n_s en el corredor o en el tiempo t (horas); i = contador de sistema (número); CCD_{O_t} = Corridor Coordinated Duration para todos los sistemas n_s en un corredor O en un tiempo t (horas); n_a = cantidad de intervenciones que ocurren en un mismo corredor (número); NCR_t = Network coordination ratio en un tiempo t (%).

4.2.2 Financial Saving Model

El modelo de ahorro financiero calcula los costos directos e indirectos de construir, tener y mantener los sistemas de infraestructura, según Soliman, los costos directos son fáciles de definir y de calcular, pues representan los costos de las actividades de intervención necesarias para asegurar el nivel de serviciabilidad deseado en un horizonte de planificación establecido. Por el contrario, los costos indirectos de la mantención de infraestructura crítica urbana suelen considerar aspectos sociales, económicos, medioambientales y de índole que no son motivo de interés en el estudio, por tanto, el cálculo de los costos indirectos se basará en el valor output que entregan las ecuaciones *Standalone Indirect Cost* y *Joint Indirect Cost* del modelo Duration Saving Model.

Para calcular el costo del ciclo de vida para cada escenario de intervención es necesario dividir los costos en tres categorías: (1) Costos independientes directos e indirectos (SID_i y SIC_i); (2) Costo combinado directo e indirecto entre sistema i y j (SID_{ij} y SIC_{ij}); (3) Costo combinado directo e indirecto entre sistema i, j y k (SID_{ijk} y SIC_{ijk}).

Para todo lo mencionado anteriormente se dejan propuestas las siguientes expresiones matemáticas.

$$SDC_{i_{O_t}} = \sum_{m=1}^M Q_{m_{O_t}} * UC_{m_t} * IA_{O_{i_{tr}}} \quad \text{para standalone direct cost}$$

$$SIC_{i_{O_t}} = ASD_{i_t} * A_{i_{O_t}} * \left[((1 - T_p) * AADT * UUC_T) + (T_p * AADT * UUC_T) \right] \quad \text{para standalone indirect cost}$$

$$JDC_{ijk_{ot}} = \sum_{e=1}^E Q_{e_{ot}} * UC_{e_t} * IA_{o_{it_r}} \quad \text{para joint direct cost with i, j \& k}$$

$$JIC_{ijk_{ot}} = CCD_{OC_t} * A_{io_t} * [(1 - T_p) * AADT * UUC_T] + (T_p * AADT * UUC_p) \quad \text{para joint indirect cost with i, j \& k}$$

Donde UC_{m_t} es el costo unitario de una actividad autónoma en el sistema i en un tiempo t (\$); A_{io_t} es la proporción de área de sección en que se trabajará versus el área total de la sección (%); T_p el porcentaje de camiones (%); $AADT$ = promedio anual de tráfico diario (vehículos); UUC_T y UUC_p son el costo unitario de usuario por vehículo de carga y vehículo de pasajeros respectivamente.

Con los costos directos e indirectos de los escenarios ‘autónomo’ y ‘conjunto’ se puede calcular $C_{C_{ot}}$ = costo de mantención y rehabilitación del corredor o en un tiempo t para el escenario de intervenciones combinadas. Este valor será el costo en un tiempo t específico, sin embargo, para el *Life Cost Cicle* o costo acumulado en el horizonte de planificación se contempla la sumatoria de lo anteriormente mencionado.

$$C_{C_{ot}} = \left[\sum_{i=1}^{n_s} (SDC_{i_{ot}} + SIC_{i_{ot}}) \right] + \left[\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} (JDC_{ij_{ot}} + JIC_{ij_{ot}}) \right] + \left[\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} (JDC_{ijk_{ot}} + JIC_{ijk_{ot}}) \right]$$

$$LCC_{C_o} = \sum_{t=1}^Y C_{C_o}$$

4.2.3 Corridor Health Model

Para el “estado de salud” del corredor se considera más de un modelo de deterioro para los distintos sistemas y se estima una condición que depende de la ponderación que se le dé a cada sistema para el estado general del corredor. Antes de explicar el método usado para calcular el estado del corredor, debe quedar claro el alcance del concepto, en el contexto de esta investigación ‘corredor’ es considerado como el área de trabajo que engloba una o más sistemas de los estudiados. Abu Samra explica que debido a las diferencias que existe entre los sistemas en lo que respecta a vida de servicio, patrones de deterioro, condiciones a las que está sometido, etc., es que se desarrollan diferentes modelos de deterioro para cada sistema.

Para la condición de las calles fue construido un modelo de regresión que permite conocer el estado del sistema a lo largo de su horizonte de planificación, este modelo considera impactos negativos (por ejemplo: envejecimiento, tráfico, hielo y deshielo, condiciones extremas de clima, etc.) e impactos positivos como puede ser el mantenimiento y rehabilitación.

Por otro lado, Abu Samra usa un modelo de Weibull modificado para representar el estado de las tuberías de agua potable y de alcantarillado, al igual que para el estado de las calles, esto permite conocer el estado de salud de la infraestructura al considerar los efectos negativos (por ejemplo:

envejecimiento y roturas) y positivos (por ejemplo: reparar filtraciones o reemplazo de secciones). Las expresiones se detallan y explican a continuación:

$$R_{rot} = [0.033 * t_{i_o}^2] - [2.688 * t_{i_o}] + R_o \text{ para caminos}$$

$$R_{pot} = e^{-\left(\frac{t_{i_o}-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \text{ para tuberías}$$

Donde t_{i_o} = antigüedad del sistema i en el corredor 0 (años); R_{rot} = fiabilidad del camino del corredor 0 en un tiempo t (%); R_o = fiabilidad del camino en el corredor 0 en el momento inicial de análisis (%); R_{pot} = fiabilidad de la tubería dentro del corredor 0 en un tiempo t (%); d_{pot} es una función de densidad de probabilidad del deterioro del sistema i en el corredor 0 en un tiempo t (%); β, α, γ son factores de forma, escala y locación respectivamente, más adelante se detallará cómo funciona un modelo modificado de Weibull y el significado de cada parámetro.

$$R_{AI_{po_{i+1}}} = R_{pot} * e^{-\left(\frac{t_{i_o}-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} * IA_{O_{i_{tr}}}$$

$$R_{AI_{ro_{i+1}}} = ([0.033 * t_{i_o}^2] - [2.688 * t_{i_o}] + R_o) * IA_{O_{i_{tr}}}$$

$$CCS_{C_o} = \sum_{i=1}^{n_s} (W_i * \overline{R_{i_{C_{ot}}}})$$

El método para determinar la salud del corredor también debe considerar el hecho de que puede generarse una falla súbita no esperada según el modelo de deterioro que se sigue, lógicamente este fenómeno es más esperable en sistemas antiguos. Con el fin de cuantificar esas fallas repentinas se considera un generador de eventos extremos que asegure esas fallas en parte de la red estudiada, no se detalla con exactitud cómo lo hace, pero se especifica que se generan fallas repentinas a múltiples corredores en tiempos aleatorios dentro del espacio de tiempo de estudio.

Se pide de forma explícita al administrador que revise con atención este generador de eventos y recomienda usar modelos como Monte Carlo y simulación de eventos discretos.

Abu Samra hace simplificaciones que explica en su investigación, específicamente cuando se trata de intervenciones mayores como repavimentación, reparación de fugas y cambios de tramos de tubería, el efecto que se tiene sobre la fiabilidad del sistema que se trabaja en el corredor específico es fácil de relacionar. Considerando el caso específico donde se trabajan los tres sistemas de forma integrada y se requiere de una obra de impacto considerable (por ejemplo: reemplazo de tubería) es válido asumir que la fiabilidad del alcantarillado mejorará debido al desarrollo de actividades de mantenimiento y la fiabilidad del camino que fue destruido volverá a ser de un 100%, ya que deberá ser construido nuevamente.

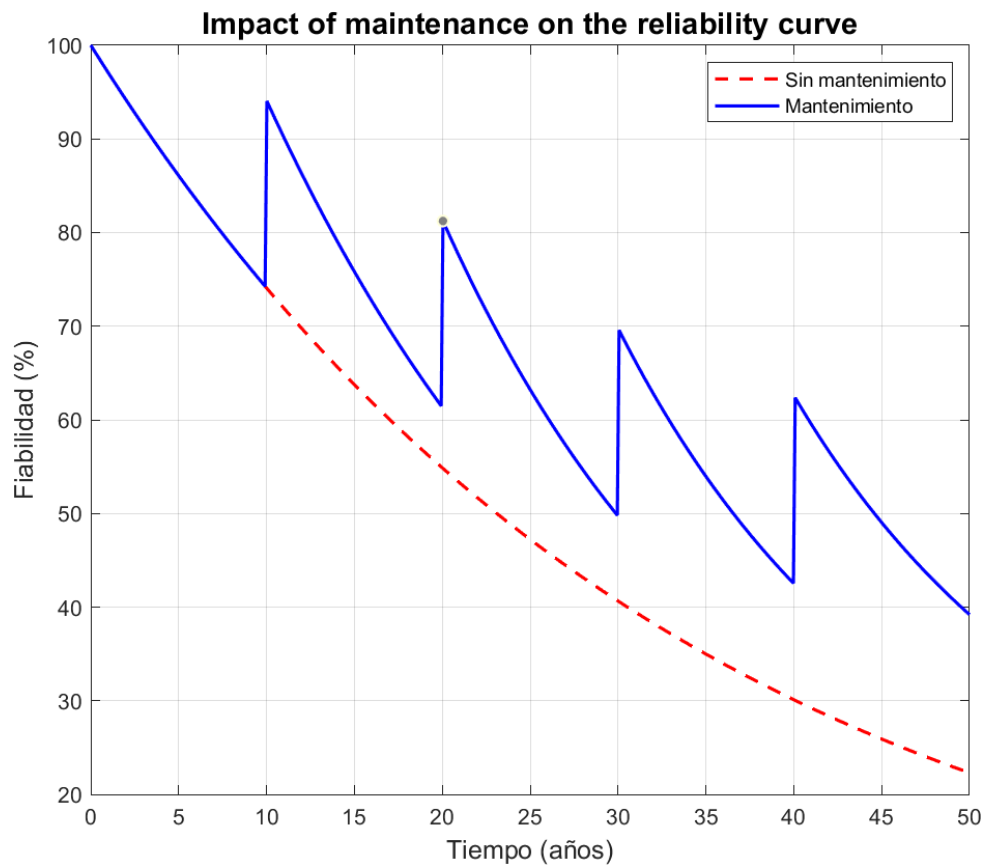
Para otros casos la fiabilidad de un sistema puede verse beneficiado por una intervención en la red en un escenario de intervenciones combinado, sin embargo, la forma en que se ve afectado el sistema no es claro y depende del estado justo antes de desarrollar las actividades.

Todo lo antes mencionado puede ser sintetizado en una matriz de impacto en la fiabilidad por intervenciones, además, para cuantificar los efectos que significa aplicar una u otra actividad de

intervención se pueden usar curvas de deterioro e impacto de intervención en tuberías y caminos. A continuación se muestra una matriz ejemplo de la matriz de impactos y un gráfico que sirve para mostrar cómo afectan las acciones de mantenimiento en una tubería (puede ser la red de agua potable o de alcantarillado).

<i>Escenario de Intervención</i>	<i>Activos</i>	<i>Acción de Intervención</i>	<i>de</i>	<i>Carreteras (fiabilidad %)</i>	<i>Agua (edad—años)</i>	<i>Alcantarillado (edad—años)</i>
Convencional (1 sistema)	Carreteras	Superposición de superficie		Varía*	N/A	N/A
		Reasfaltado		100%	N/A	N/A
	Agua	Reparación fugas	de	Varía**	Varía*	N/A
		Reemplazo tubería	de	Varía**	0	N/A
	Alcantarillado	Reparación fugas	de	Varía**	N/A	Varía*
		Reemplazo tubería	de	Varía**	N/A	0
Parcialmente combinado (2 sistemas)	Carreteras y agua	Reemplazo tubería reasfaltado	de y	100%	0	N/A
	Carreteras y alcantarillado	Reemplazo tubería reasfaltado	de y	100%	N/A	0
	Agua y alcantarillado	Reemplazo tubería	de	Varía**	0	0
Combinado (3 sistemas)	Coordinación total	Reemplazo tubería reasfaltado	de y	100%	0	0

Tabla 1



Gráfica 1: Ejemplo del impacto de las intervenciones de mantenimiento en tuberías.

Fuente: Elaboración propia

4.3 Inventario de redes, actividades e interdependencia de intervenciones

Cuando se trabaja con bases de datos que incluyen características físicas de algún tipo de red de infraestructura, cuando se debe caracterizar un conjunto de actividades y otorgar determinados factores, o cuando se desea establecer una relación entre intervenciones para ser agrupadas, es esperable que surjan desafíos o problemas. Es por esto que se debe revisar la literatura de aquellos que llevan tiempo en I+D de esta área de la Ingeniería Civil como apoyo, para revisar sus problemas y sus soluciones.

En este contexto, se tienen dos artículos que son de ayuda para dos aspectos fundamentales de la metodología de este proyecto.

En primer lugar, el estudio de Abu Samra determina los valores mínimos que se deben conocer para que los modelos cuantitativos tengan validez, para esto, se debe recolectar información de mapas GIS que incluyan características físicas y espaciales, las características físicas que se esperan obtener se resumen en la siguiente tabla:

Variable	Unidad
Largo del corredor	[m]
Ancho de pista	[m]
Número de pistas	-
Área	[m ²]
Tráfico promedio diario anual (AADT)	[veh/día]
Material y diámetro de tubería de agua potable	[m]
Material y diámetro de tubería de alcantarillado	[m]
Profundidad de la red (excavación)	[m]
Tipo de suelo	-
Año de instalación	[año]

Tabla 2*

**Dependiendo del tráfico en cada calle se clasificará en tres categorías: (1) tráfico alto, (2) tráfico medio, y (3) tráfico bajo. Las tuberías se clasifican dependiendo del material del que están hechas, siendo (1) las metálicas, (2) plásticas y (3) las de concreto, donde se incluyen las de asbesto cemento y las de concreto. La última clasificación tiene relación con el tamaño de la tubería, aquí encontramos (1) tuberías pequeñas con diámetro menor a 10 [in]; (2) tuberías medianas, con diámetro entre 10 y 18 [in] y (3) tuberías grandes, con diámetros mayores a 18 [in].*

La clasificación de los activos de cada red es importante para evaluar el uso de modelos de deterioro, que pueden variar de una a otra calle o tubería en función del uso y/o características físicas.

En segundo lugar, es de suma importancia establecer un desglose de intervenciones que los operadores de las redes de infraestructura aplican, con la finalidad de obtener información como:

- Duración esperada de intervención (suma de actividades)
- Costo asociado
- Efecto sobre salud del activo (LOS improvement)

El artículo de los investigadores indios relacionado a optimización multiobjetivo en proyectos de construcción (Behera et al., 2024) introduce un modelo simple que involucra optimizar costos, tiempo, impacto ambiental y satisfacción del cliente. En este, se presenta una tabla que contiene información que, de ser obtenida, podría facilitar el proceso de caracterización de actividades de mantenimiento y rehabilitación.

Hay que recordar que un plan de mantenimiento incluye varias actividades, que tienen relaciones de sucesión, recursos destinados y una duración determinada. Estos valores se pueden encontrar tanto en el estudio de Abu Samra como en el de Behera, se resumen los más importantes en la siguiente tabla de ejemplo:

<i>Sr. No.</i>	<i>Activity</i>	<i>Immediate successors</i>	<i>EMs</i>	<i>DCA</i>	<i>EIA</i>
1	Preparación del sitio	3, 8	1	17.7	0.91
2	Excavación de asfalto	6	1	39.6	0.921
3	Excavación de tierra	8, 6, 7	1	47	0.751
4	Movimiento de tierras y retiro de escombros	10, 7, 9	1	54.6	0.823
5	Reemplazo de tramo de tubería	9, 7	1	14.2	0.885
6	Reparación de filtración en tubería	8, 9, 7	1	14.2	0.885
7	Compactación de terreno (pizonado)	10, 9	1	14.2	0.885
8	Superposición de superficie	10, 9	1	14.8	0.892
9	Reasfaltado	10	1	47	0.751
10	Reemplazo de tubería y reasfaltado	8, 9, 4	1	7.8	1

Tabla 3

Esta tabla incluye información que cubre necesidades acerca de las intervenciones (desde ahora Intervention Activities) y las dependencias que pueda existir entre ellas.

A su vez, las IA (Intervention Activities) deben incluir dos conjuntos de datos fundamentales: (1) la base de datos de tiempo, que incluye información de rendimientos de diferentes actividades de intervención/mantenimiento y (2) la base de datos financieros, que incluye información sobre los costos de cada intervención y un desglose por actividad, además de costos asociados al público relacionado con la actividad o intervención.

4.4 Modelo de optimización

En sus publicaciones de 2018 (Abu Samra et al., 2018) y 2020, Soliman comienza la descripción de su método exponiendo las dificultades que experimenta durante el desarrollo de un modelo de optimización, estas se relacionan con la interdependencia espacial de las redes y la cantidad de escenarios que se tienen, este fenómeno también es mencionado en el capítulo 3.1 del estudio de Daulat (Daulat et al., 2024) y en el capítulo de Dimensiones de interdependencias de infraestructura de Rinaldi (Rinaldi et al., 2001).

Para entender bien en que se basan las optimizaciones usadas por autores como Abu Samra, Ramos y Salgado (Ramos-Salgado et al., 2021), Marzouk y Osama (Marzouk & Osama, 2017), entre otros, hay que explicar cuál o cuáles son las variables que este framework consideraría. Para el caso de estudio particular se involucran las variables costos, tiempo y estado físico, al ser más de un objetivo el que se busca recibe el nombre de optimización multiobjetivo.

Tal como se muestra en el estudio de Chen y Bai (Chen & Bai, 2019) de la Universidad de Chang'an, desde la década del 2010 los métodos de optimización apuntan en su mayoría a la optimización multiobjetivo, cambiando la tónica de lo que se desarrollaba en el pasado. Esto se

puede explicar según el mismo estudio y de forma resumida, con el aumento en la capacidad de cómputo matemático que ofrecen los computadores actuales

Es importante también revisar el uso de algoritmos matemáticos en la búsqueda de las mejores soluciones, el estudio de Alothaimeen y Arditi (Alothaimeen & Arditi, n.d.) revisa 55 publicaciones y los métodos usados en la Optimización Multiobjetivo asociada a procesos constructivos. A continuación se mostrará de forma más gráfica la revisión de métodos de optimización en la literatura de IMAM actual.

Método / Algoritmo	Tipo / Familia	Aplicaciones comunes en IAM	Ventajas	Limitaciones
NSGA-II / NSGA-III	Algoritmos evolutivos no genéticos	Diseño de infraestructuras sostenibles, planificación de mantenimiento, selección de materiales	Amplia adopción, buena convergencia y diversidad en soluciones Pareto	Requiere ajuste de parámetros, puede ser computacionalmente intensivo
Particle Swarm Optimization (PSO)	Inteligencia de enjambre	Optimización de redes de agua, planificación de mantenimiento de pavimentos	Rápida convergencia, fácil implementación	Riesgo de convergencia prematura, sensibilidad a parámetros
Ant Colony Optimization (ACO)	Inteligencia de enjambre	Programación de mantenimiento, rutas de inspección	Eficaz en problemas de rutas y secuencias, adaptable a cambios dinámicos	Puede ser lento en converger, requiere ajuste cuidadoso de parámetros
Simulated Annealing (SA)	Metaheurística basada en temperatura	Optimización de costos y tiempos en proyectos de construcción	Capacidad para escapar de óptimos locales, implementación sencilla	Puede ser lento, depende de la programación de enfriamiento
Differential Evolution (DE)	Algoritmo evolutivo	Diseño estructural, optimización de materiales	Manejo eficaz de problemas continuos, menos parámetros que otros algoritmos evolutivos	Puede requerir muchas evaluaciones de la función objetivo
Método de Asintotas Móviles (MMA)	Programación no lineal	Optimización estructural, diseño de topologías	Eficaz en problemas de gran escala, buena convergencia en problemas estructurales	Requiere derivadas, menos adecuado para problemas discretos o no diferenciables

<i>Enfoques basados en Deep Reinforcement Learning (DRL)</i>	Aprendizaje automático	Optimización de decisiones en tiempo real, mantenimiento predictivo	Capacidad de aprendizaje y adaptación, manejo de problemas dinámicos	Requiere grandes conjuntos de datos, complejidad en la implementación
<i>Método de VIKOR</i>	Análisis de decisión multicriterio	Evaluación de alternativas de mantenimiento, priorización de proyectos	Considera la cercanía a la solución ideal, útil en la toma de decisiones con múltiples criterios	Requiere determinación precisa de pesos y criterios
<i>Enfoques híbridos (e.g., NSGA-II + VIKOR)</i>	Combinación de métodos	Optimización y evaluación de soluciones en proyectos de infraestructura	Combina ventajas de múltiples métodos, mejora la calidad de las soluciones	Mayor complejidad computacional, requiere integración cuidadosa de métodos

Tabla 4

5 Resultados

Para este apartado del análisis se buscan estudios que hayan aplicado el análisis de duración de procesos y actividades, de los costos del ciclo de vida de activos, la caracterización del estado de salud de cada una de las redes y la optimización multiobjetivo para mejorar la toma de decisiones en la gestión de infraestructura.

Se considerarán investigaciones que hayan aplicado cada modelo por separado o como un conjunto y se deben analizar la metodología usada, por esto nos referimos a los datos involucrados y la forma en que son obtenidos.

5.1 Duration Saving Model

En los framework de gestión integrada de infraestructura como el de Abu Samra o Ramos-Salgado (Ramos-Salgado et al., 2021) o el paper de Vasquez y Araya (Vasquez & Araya, 2023) se advierte continuamente de la falta de colaboración entre partes interesadas. A esto se puede sumar la falta de intención que pueden tener los stakeholders de facilitar información a investigadores.

Los datos necesarios para el modelo que determina los ahorros de tiempo provenientes de la gestión integrada incluyen información sobre actividades de intervención y rendimientos, a priori, suena simple y básico, pero el tratamiento de la información requiere recomendaciones y colaboración con profesionales.

Tal como se mencionó en el análisis de la construcción del modelo en la metodología, se tienen 3 fases, de las cuales solo la tercera se puede desarrollar de forma ajena a los organismos que se hacen cargo de la infraestructura. Las etapas 1 y 2 tienen relación con descomponer actividades a partir de planes de mantenimiento y categorizarlas.

Cabe mencionar que esta es solo una de las formas que existe en la literatura para satisfacer el objetivo de medir los efectos de la integración en la gestión en el tiempo de desarrollo, se profundiza dado su simplicidad matemática y fácil entendimiento que supone a las partes interesadas proveedoras de datos.

5.2 Financial Saving Model

Estudios previos comparativos y complementarios

El uso de los costos de ciclo de vida como herramienta de soporte para la decisión en la gestión de infraestructura no es para nada nuevo, Rahman y Vanier (Rahman & Vanier, 2004) hicieron en 2004 un estudio de LCC como parámetro para basar administración y toma de decisiones en la gestión de Infraestructura Municipal. En este estudio se evalúan costos relacionados con mantenimiento, reparaciones y renovaciones, tal como se pudo ver en el framework desarrollado por Abu Samra. Finalmente se discute y se hacen conclusiones sobre la efectividad que puede tener considerar el LCC en la toma de decisiones y se intenta evaluar su significancia en duración de proyecto.

Por otro lado, en una Tesis del Doctor Adelino Ferreira y Doctor Gerardo Flintsch (Ferreira & Flintsch, 2004) se desarrolló un algoritmo computacional que implementa un modelo LCC, llamado por ellos mismos como LifeCCAS. En este, se deben introducir variables como Costos Iniciales, Costos de operación y mantenimiento, Costos de rehabilitación, Costo socioambiental y

Frecuencia y tipo de intervención. Ambos académicos son expertos en gestión y métodos de rehabilitación de pavimentos, por ende, esta fue la única red considerada en el estudio.

El sistema realiza simulaciones de diferentes estrategias de intervención y se queda con la que minimice el costo total de LCC en un periodo de tiempo x y maximice la calidad o salud del activo, por lo que puede ser considerado como un problema de optimización multiobjetivo. (a diferencia del framework basado en un sistema multiobjetivo que se busca implementar)

Limitaciones

El modelo contenido en el marco de trabajo de Abu Samra incluye parámetros que relacionan dos o tres redes distintas, esto es mediante la matriz de relaciones que se debe construir en la etapa de base de datos.

En esta etapa se buscan modelos de autores que hayan especificado métodos de programación o fórmulas para cada red en específico para finalmente estimar un LCC de cada red. Las relaciones que se establecen entre redes i , j y k son fundamentales para obtener el factor denominado como factor de costo de ciclo de vida en el escenario de intervenciones combinadas o LCC_{Co} por sus siglas en inglés.

De todas las expresiones desarrolladas y expuestas, LCC_{Co} es la más importante en el análisis económico del problema, permite estimar el costo de ciclo de vida para un corredor o considerando planes de mantención y rehabilitación (M&R) de cada red.

A continuación se hará el desglose de las expresiones del framework que pueden ser usadas directamente y la fuente de donde se recomienda extraer cada variable, además, en caso de que alguna expresión dificulte el desarrollo del trabajo por falta de datos se propone una expresión alternativa.

Q_{mo_t} , Q_{eo_t} y Q_{yo_t} : Son la cantidad de trabajo necesario para completar una actividad m , e , y en un corredor o en un tiempo t , son valores que deben ser entregados por el personal experto en el mantenimiento de cada activo analizado, se pueden encontrar ejemplos de las intervenciones que se recomienda seguir en la tabla al final de la sección. La unidad cuantificadora dependerá del tipo de trabajo analizado.

UC_{m_t} , UC_{y_t} y UC_{e_t} : Son costos unitarios de todas las actividades ‘autónomas’ que incluyan los planes de intervención de cada una de las redes que se consideren, se recomienda que se sean determinados por el personal experto en el mantenimiento de cada activo.

$AADT$: Average Annual Daily Traffic o Promedio Anual de Tráfico Diario, es de vital importancia que este valor represente de buena forma la realidad de cada carril. Se debería obtener con la colaboración

T_p : Truck Percentage

UUC_T y UUC_p : Costo unitarios de cada camión y vehículo de pasajeros, este valor se relacionará directamente con $AADT$ y T_p para estimar los costos indirectos que conlleva la interrupción de un corredor.

Hay que profundizar sobre el UUC_T y la falta de un parámetro que incluya el transporte público de superficie y los usuarios de este. Según el Plan Integral de Movilidad 2009-2019 de la Municipalidad de Santiago (Olivares Hauva et al., 2019) el número de personas movilizadas en

transporte público colectivo es 2.6 veces mayor al de personas en vehículo particular, además, el número de viajes es 2.5 veces más.

Todo lo anterior indica que no se puede ignorar el costo unitario que Abu Samra propone para cuantificar el tiempo perdido de las personas que usan el transporte público. Por esto se propone usar el valor observado por el Sistema Nacional de Inversiones en su Reporte Anual de Precios Sociales (PRECIOS SOCIALES REPORTE ANUAL | 2024, n.d.), donde se recomienda un valor de Valor Social de Tiempo para los pasajeros y vehículos de carga, tal como se muestran a continuación:

<i>Valor Social del Tiempo (VST)</i>	Tiempo Urbano	Viaje	CLP/h-pax	\$3.114 CLP
		Camión	CLP/h-veh	\$11.996 CLP

Tabla 5

Como la unidad de medida de los valores entregados depende de la cantidad de pasajeros, es importante que la base de datos de vehículos que pasan por cada calle incluya en número de buses, mediante un promedio de pasajeros se podrá usar el valor de VST de viaje urbano para el estimado de pasajeros en los buses.

5.3 Corridor Health Model

Estudios complementarios

Un estudio reciente realizado en Chile por el Tesista de la Universidad de Chile Miguel Cubillos se enfoca en estudiar y comparar la efectividad de modelos de deterioro en tuberías de agua potable. En un principio, durante el desarrollo del marco teórico de su investigación, Cubillos (Cubillos Jimenez, 2022) explica la diferencia de los métodos estadísticos que se han desarrollado durante desde la mitad del siglo XX, los separa en métodos probabilísticos y determinísticos y explica sus diferencias. Para el análisis de los métodos estadísticos que se usan en la actualidad el autor cita el estudio de Nishiyama y Filion (Nishiyama & Yves, 2013) donde se hace una revisión de los modelos de predicción de rotura en tuberías principales de agua, se analizan modelos desarrollados y usados desde el 2000 hasta el 2012. Además se evalúa su aplicabilidad considerando requerimiento de datos y entrega recomendaciones de uso.

El primer modelo probabilístico que se menciona en el estudio es el desarrollado por Yang Wang, Tarek Zayed y Osama Moselhi de la Universidad de Concordia (Wang et al., 2009), en donde modelan 5 modelos de regresión múltiple que se diferencian en el material de la tubería. Para el desarrollo de los modelos se usaron datos de 15 años y 432 [km] de red de la ciudad de Quebec, Canadá, específicamente en la municipalidad de Ste Foy.

En la siguiente tabla elaborada por Cubillos se muestran de forma resumida las expresiones ajustadas y los coeficientes de determinación ajustados por Wang et al:

<i>Material</i>	<i>Número total de datos</i>	<i>Ecuación del modelo</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Prueba de significancia (α=0.1)</i>	<i>Porcentaje promedio de validez (%)</i>
Gray cast iron	476	$\text{Log10}R = 4.85 - 0.0206A + 0.000245A^2 + 0.00281S - 0.905\text{Log10}L - 1.40\text{Log10}S$	68.9	Passed	60.8
Ductile iron (without lining)	187	$\text{Log10}R = 1.83 - 0.911\text{Log10}L$	65	Passed	57.9
Ductile iron (with lining)	186	$\text{Log10}R = 3.36 + 0.000150L \times A - 1.11\text{Log10}L - 0.646\text{Log10}A - 0.254\text{Log10}S$	71.5	Passed	64.3
PVC	136	$\text{Log10}R = 2.69 - 0.898\text{Log10}L - 0.745\text{Log10}A$	78.9	Passed	67.5
Hyprescon*	47	$\text{Log10}R = 1.81 + 0.00593L - 0.000028L \times S - 0.958\text{Log10}L$	81.3	Passed	50

Tabla 6

* Hyprescon es una abreviatura usada en inglés para referirse a las tuberías ‘High Pressure Concrete’ hechas de Hormigón.

Respecto a las expresiones de Wang hay que hacer comentarios y consideraciones. La variable R dentro de cada expresión es la variable dependiente y representa las roturas por kilómetro y por años de un tramo de tubería. Por otro lado, ya se sabe que la expresión usada por Abu Samra busca obtener la fiabilidad de las tuberías en un corredor o en el año t mediante la siguiente expresión:

$$R_{pot} = e^{-\left(\frac{t_{io}-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}} \text{ para tuberías}$$

Esta expresión incluye parámetros difíciles de obtener, pues vienen de ajustes de curvas de Weibull que se obtienen con parámetros históricos (no solo actuales) de las tuberías.

La solución a esto es usar una relación entre la tasa de rotura de Wang y la fiabilidad estimada de Abu Samra mediante una función de transferencia. Estas variables tienen una relación inversamente proporcional, ya que entre mayor sea el índice de roturas por kilómetro de tubería menor será la fiabilidad del tramo.

De este modo se propone reemplazar los factores de forma, escala y locación por la tasa de rotura de Wang, aplicando un parámetro de ajuste que implique una relación realista entre roturas deseadas para cada nivel de fiabilidad.

Dado que Abu Samra et al. consideran que valores de fiabilidad por debajo de 0.6 indican necesidad de intervención, se puede ajustó una función exponencial de transferencia entre la tasa de rotura R y la fiabilidad estimada mediante:

$$Reliability = e^{-k*R}$$

Por ejemplo, para que una tasa de rotura de una una (1) rotura por km por año (configurable según planificación o mandante) implicara una fiabilidad de 0.6 o 60%, se debe calcular:

$$k = \ln\left(\frac{1}{0.6}\right) \approx 0.5 \therefore R_{pot} = e^{-0.5*R}$$

Donde el R contenido en el exponente será obtenido a partir de las expresiones de Wang, dependientes del material y características físicas de la red. Esta función permite compatibilizar métricas de deterioro empírico con modelos de optimización que requieren una función de confiabilidad continua.

Para el análisis de los pavimentos en cada corredor las ecuaciones de Abu Samra son bastante simples y solo dependen del tiempo que ha transcurrido desde el último plan de mantenimiento.

La ecuación principal que ha sido desarrollada y utilizada en el framework en que se basa este apartado entrega la fiabilidad del pavimento en un corredor O analizado en un año i, la expresión es la siguiente:

$$R_{rot} = [0.033 * t_{i_o}^2] - [2.688 * t_{i_o}] + R_o \text{ para caminos}$$

En esta expresión R_{rot} es la probabilidad de que un sistema funcione bajo las condiciones deseadas y no falle, tiempo se puede apreciar que a medida que la variable independiente (tiempo) aumenta, la fiabilidad tiende a 0, es decir, un plan de mantenimiento deberá ser aplicado para asegurar que el pavimento siga operativo y en el nivel de servicio deseado.

Como ya fue mencionado, R_o es la fiabilidad del sistema en el tiempo 0 o tiempo donde eventualmente comienza el horizonte de planificación coordinado, para su estimación se debe proponer un valor tabulado, obtenido de alguna curva graficada o algún modelo matemático que sea aplicable a la realidad estudiada

Para la estimación del valor R_o se propone el uso de la ecuación desarrollada por Alelí Osorio en su publicación del 2018 (Osorio-Lird et al., 2018), donde se obtiene una ecuación que permite estimar el estado de una calle en función de condiciones físicas relevantes.

El resultado de interés en este modelo es llamado Asphalt/Concrete UPCI, es un índice determinístico que determina condición, mas no probabilidad de falla. Esto quiere decir que habría que establecer una relación entre estado de la red y fiabilidad mediante una función de confiabilidad. Esto se podría hacer de forma lineal o para mayor simplicidad, por tramos, como se muestra en el siguiente gráfico:

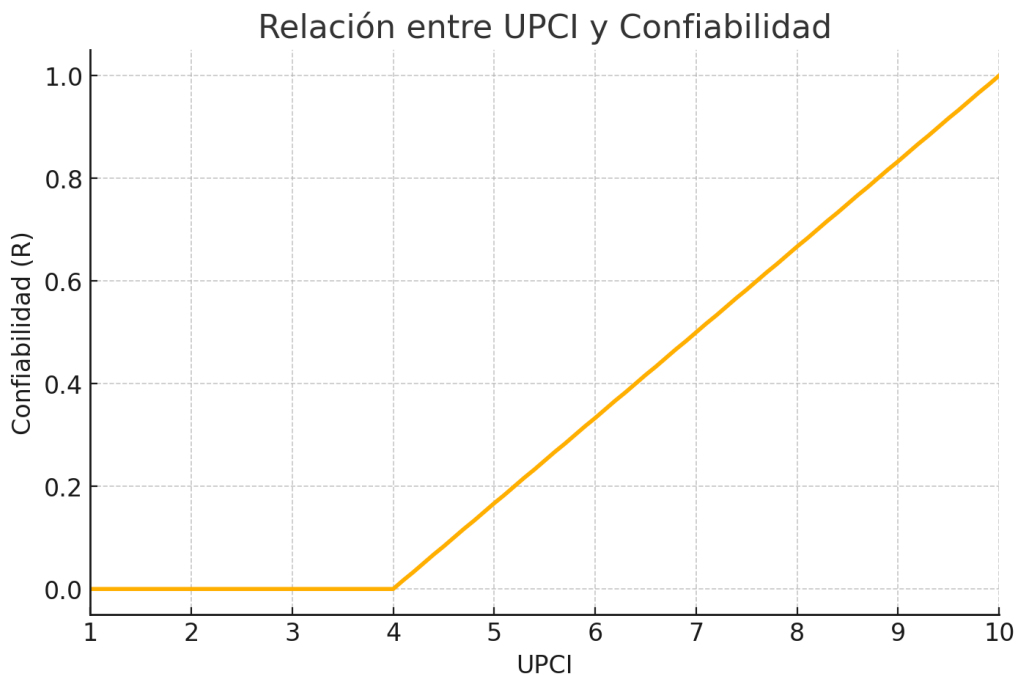


Ilustración 3: Ejemplo de Relación entre UPCI y R

Este ejemplo de relación no es aleatorio, se determinó un UPCI=4 como el límite de confiabilidad en base a las similitudes que tiene con el sistema de medición PCI (Pavement Condition Index) del ASTM D6433, que va entre 0 y 100. Se asumió que ambos sistemas pueden ser análogos de forma lineal solo a modo de ejemplo.

Las expresiones del estudio citado son las siguientes, los parámetros necesarios se encuentran debajo de las ecuaciones:

$$UPCI \text{ asfaltos} = 10 - 0.038 * FC - 0.049 * TRC - 0.046 * DP - 0.059 * R - 0.237 * P$$

$$UPCI \text{ concreto/hormigón}$$

$$= 10 - 0.042 * LC - 0.025 * TC - 0.063 * DP - 0.263 * F - 0.038 * COB - 0.018 * JD$$

- FC: Grietas por fatiga (%)
- TRC: Suma de grietas transversales y de reflexión (%)
- DP: Parche deteriorado (%)
- R: Ahuellamiento en mm, calculado como el promedio de ahuellamiento de los segmentos en la unidad de muestra
- P: Baches (%)
- LC: Grietas longitudinales (%)
- TC: Grietas transversales (%)
- F: Desnivel entre losas en mm, calculado como el promedio del desnivel de cada losa en la unidad de muestra
- COB: Suma de quiebres de esquina y oblicuos (%)

- JD: Daño en juntas en porcentaje del total de metros de juntas en la unidad de muestra

5.4 Base de datos: Inventario de redes e interdependencia entre actividades

El estudio de Vásquez y Araya (Vasquez & Araya, 2023) menciona explícitamente el uso de GIS en el contexto de prácticas de gestión de infraestructura urbana integrada.

Esto se presenta como una referencia de buenas prácticas observadas en Canadá, utilizadas para comparar el nivel de desarrollo de las prácticas chilenas. Aunque el estudio revela que en Chile hay esfuerzos por tener inventarios y sistemas de información, también reconoce limitaciones como la calidad y disponibilidad de los datos georreferenciados. (Vasquez & Araya, 2023).

Con estos antecedentes y las metodologías usadas por los investigadores que fueron revisados en la revisión de literatura, se procede a buscar la información que corresponda en el formato antes mencionado.



Fig. 3. Sample from the city of Kelowna GIS maps (infrastructure drawings map viewer) (© 2016 Google, Image City of Kelowna)

Ilustración 4: Imagen satelital del inventario georreferenciado de Abu Samra

Para esta investigación se coordinó una reunión con el Sr. Manuel Mediano Flores, director de Infraestructura de la Municipalidad de Providencia y Encargado de Emergencias Comunes, en esta se conversó de los alcances y objetivos que tiene el desarrollo de esta.

En esta reunión se entregaron archivos digitales correspondientes a la red de agua potable y de alcantarillado, recopilados por la Municipalidad de Providencia en conjunto con la entidad responsable del mantenimiento de las redes, Aguas Andinas.

El formato en que la municipalidad almacena esta información es en archivos ShapeFile (.sph) A continuación se muestran gráficos que representan los datos presentes en inventarios versus la totalidad de la superficie del caso de estudio.

Además, se exponen tablas con el contenido de los archivos, el número de filas está relacionado a tramos de polilínea de corredores, delimitados por sus coordenadas.

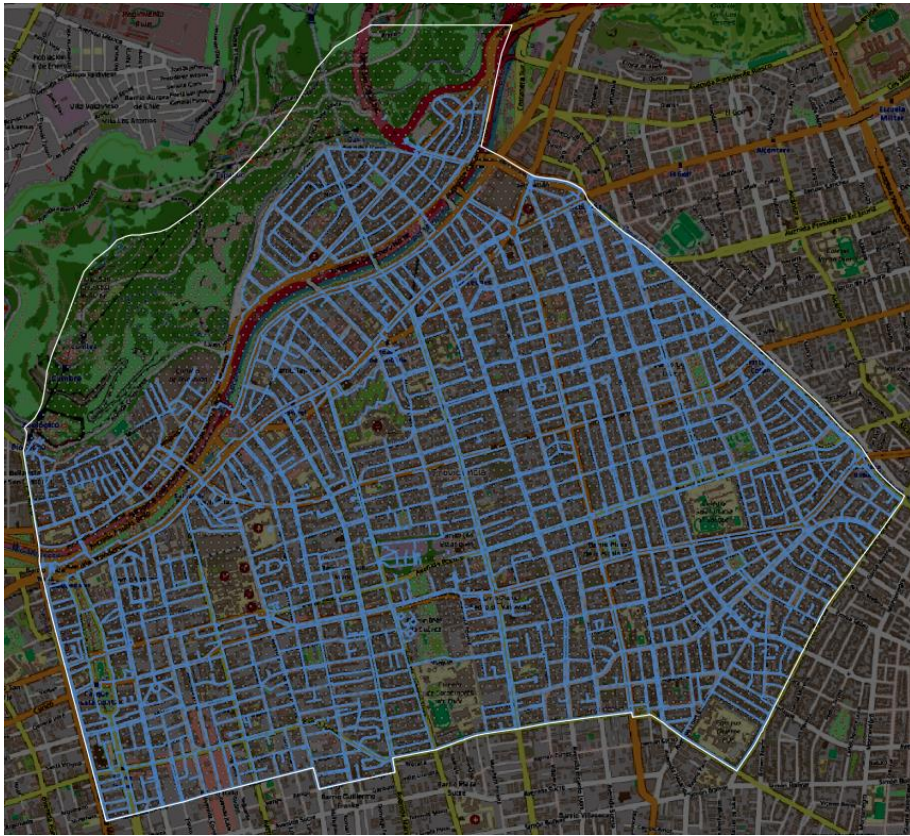


Ilustración 5: Red de agua potable inventariada por la comuna de Providencia

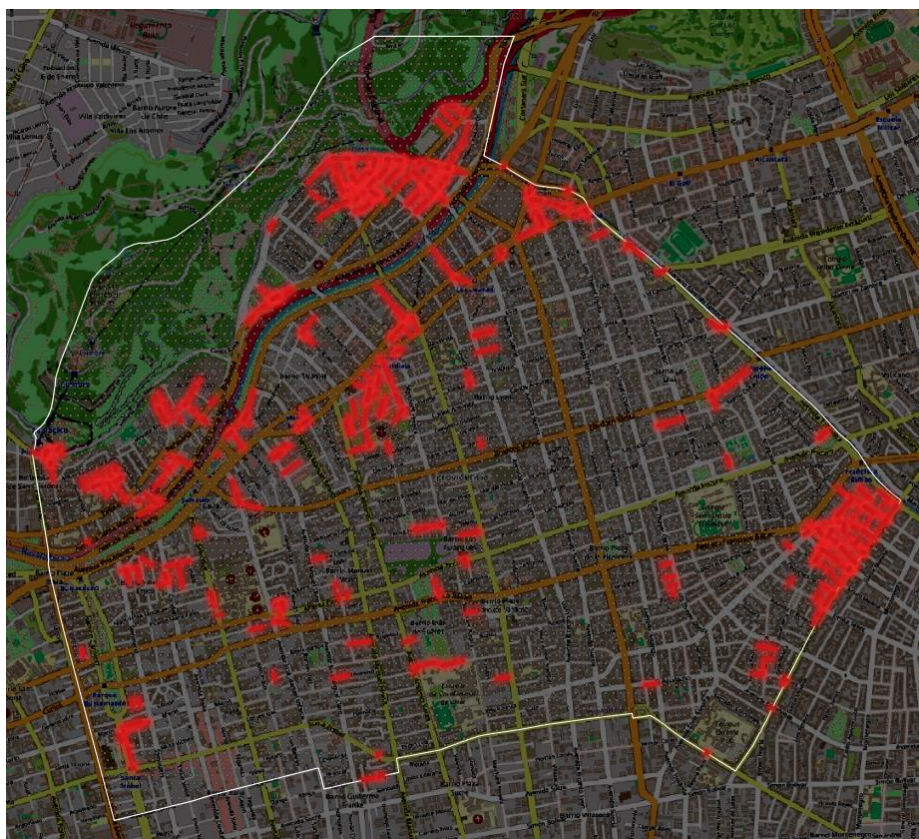


Ilustración 6: Red de alcantarillado inventariada por la comuna de Providencia

<i>Corridor ID No.</i>	<i>Corridor length (m)</i>	<i>Number of lanes</i>	<i>Lane width (m)</i>	<i>Section area (m²)</i>	<i>AADT</i>	<i>Traffic growth rate (%)</i>	<i>Current condition (%)</i>	<i>Year of installation (Water network)</i>	<i>Pipe diameter (Water network) (cm)</i>	<i>Year of installation (Sewer network)</i>	<i>Pipe diameter (Sewer network) (cm)</i>
1	370	3	3	3330	12000	5	90	1953	450	1920	600
2	370	4	3	4420	8000	5	70	1982	150	1990	525
3	452	4	3	6780	11000	5	85	1985	250	1950	1893
4	393	4	3	2358	5000	5	65	1956	200	1943	200
5	419	4	3	4917	7000	5	65	1985	100	1950	300
6	766	4	3	9192	9500	5	90	1991	100	1970	150
7	342	4	3	3420	9000	5	75	1983	500	1990	450
8	311	3	3	1866	8500	5	85	1977	500	1985	400
9	485	3	3	3388	6000	5	65	1965	300	1945	375
10	453	5	3	5213	8500	5	70	1972	350	1943	350
11	486	4	3	5976	5000	5	90	1956	200	1920	625
12	498	4	3	6446	10000	5	70	1979	250	1965	450
13	652	3	3	4770	9000	5	70	1982	500	1990	200
14	468	3	3	2482	8000	5	90	1965	100	1953	200
15	492	4	3	1242	5000	5	75	1967	150	1965	450
16	715	3	3	1073	10000	5	85	1977	200	1990	150
17	207	3	3	1630	6000	5	65	1982	350	1945	525
18	376	3	3	2862	5000	5	65	1975	350	1978	525
19	519	2	3	3114	9000	5	75	1980	150	1950	150
20	560	4	3	6720	8000	5	70	1987	150	1982	600

Tabla 7: Inventario deseable extraído del paper de Abu Samra

<i>Coordenadas*</i>	<i>Diámetro o [cm]</i>	<i>Material</i>	<i>Longitud</i>	<i>Año</i>
(351178.70, 6300892.61, 351195.00, 6300845.29, 351223.38, 6300762.95)	150	4	137.142	1975
(350752.45, 6300841.83, 350759.34, 6300822.63)	150	3	20.399	1990
(349483.81, 6300593.34, 349485.00, 6300592.06)	150	1	1.749	1975
(351788.60, 6300463.69, 351787.61, 6300467.03)	100	2	3.484	1975
(351813.39, 6300345.11, 351813.47, 6300344.85)	100	6	0.272	1987
(349290.08, 6299590.66, 349310.95, 6299606.41, 349281.24, 6299642.37, 349278.07, 6299639.65)	100	3	76.968	1956
(351529.85, 6300386.58, 351529.71, 6300387.03)	100	2	0.471	1975
(351518.67, 6300370.04, 351519.96, 6300366.07, 351515.29, 6300361.42)	150	5	10.765	1971
(349363.48, 6300517.90, 349351.18, 6300509.09, 349282.51, 6300448.57, 349266.73, 6300428.22, 349257.73, 6300411.45)	100	5	151.444	1975
(351642.31, 6299969.44, 351640.41, 6299975.19, 351635.21, 6299981.12)	150	1	13.941	1993
(352424.59, 6299706.56, 352419.23, 6299706.32, 352418.02, 6299706.17, 352415.52, 6299705.85, 352409.46, 6299705.09)	100	4	15.218	1976
(349662.16, 6299750.38, 349660.85, 6299752.92)	100	7	2.858	1988

Tabla 8: Inventario de red de agua potable en Providencia (solo se muestran 12 corredores)

*Nota: Las coordenadas tienen la forma $(x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}, \dots)$ y representan una polilínea, en casos donde el corredor no es totalmente recto y presenta curvaturas queda representado por más de dos puntos.

<i>Coordenadas**</i>			<i>Diámetro o [cm]</i>	<i>Material</i>	<i>Longitud</i>	<i>Año</i>
(349708.94 6301379.55)	6301444.68)	(349735.93	175	13	70.497	1969
(349462.11 6299932.93)	6299948.15)	(349435.73	300	1	30.454	2008
(348495.97 6299498.91)	6299499.69)	(348492.85	200	2	3.221	2009
(349308.67 6300669.23)	6300683.63)	(349318.35	300	5	17.358	1997
(352693.54 6299199.52)	6299203.66)	(352700.75	250	14	11.737	1971
(349243.69 6300665.87)	6300694.90)	(349274.66	200	3	42.443	1997
(347990.49 6299713.38)	6299719.79)	(347991.44	250	13	6.481	1985
(348494.29 6299098.96)	6299112.76)	(348429.01	200	13	66.724	1968
(349907.71 6300314.89)	6300318.88)	(349889.20	300	13	18.94	1974
(352580.67 6299253.92)	6299326.86)	(352648.15	175	13	99.367	1971
(349512.49 6299171.28)	6299161.41)	(349568.64	175	13	57.013	1970
(349878.19 6301267.01)	6301275.87)	(349887.93	250	13	13.167	1969

Tabla 9: Inventario de red de alcantarillado en Providencia (solo se muestran 12 corredores)

**Nota: Las coordenadas tienen la forma $(x_i y_i)(x_{i+1} y_{i+1}) \dots$ y representan una polilínea, en casos donde el corredor no es totalmente recto y presenta curvaturas queda representado por más de dos puntos.

5.5 Resumen

Tras haber analizado cada ecuación que conforma cada modelo del framework y los datos que se deben recolectar para el desarrollo de un estudio de gestión integrada a largo plazo, se puede tener una visión clara de las dificultades que se tendría para cada variable y dato.

En la siguiente tabla se desea clarificar la categorización que se le da a cada valor, se tienen en consideración para esto todas las recomendaciones basadas en literatura, propuestas a modelos que

se han hecho y los datos a los que se ha podido tener acceso. Las dificultades, recomendaciones y comentarios serán expuestos en la sección de Análisis y Discusión.

MODELO	VARIABLE	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Duration Saving	Ur	hora/unidad	Rendimiento de una actividad
	Q	Depende de UR	Cantidad de trabajo necesario para completar la actividad
	IA	-	Índice de aplicabilidad de una intervención r
Financial Saving	UC	\$	Costo unitario de una actividad autónoma en el sistema i
	Ai	%	Proporción de área de sección en que se trabajará versus el área total de la sección
	AADT	veh.	Promedio anual de tráfico diario
	UUCt	\$	Costo unitario de usuario por vehículo de carga
	UUCP	\$	Costo unitario de usuario por vehículo de pasajeros
	ti	años	Antigüedad del pavimento en el corredor O
	Rro	%	Fiabilidad del <u>camino</u> del corredor 0 en un tiempo t (%);
Corridor Health	Ro	%	Fiabilidad del camino en el corredor 0 en el momento inicial de análisis
	A	años	Antigüedad promedio de la tubería en el corredor
	S	mm	Dímetro promedio de la tubería en el corredor
	L	m	Largo de la sección de tubería basado en GIS
	k	-	Constante de transferencia
	FC	%	Grietas por fatiga
	TRC	%	Suma de grietas transversales y de reflexión
	DP	%	Parche deteriorado
	R	mm	Ahuellamiento promedio
	P	%	Baches
	LC	%	Grietas longitudinales
	TC	%	Grietas transversales
	FC	mm	Desnivel promedio entre losas
	COB	%	Suma de quiebres de esquina y oblicuos
	JD	%	Porcentaje de juntas dañadas en la sección

Para el estudio del estado de las variables involucradas en la totalidad de ecuaciones que conforman el framework se decidió usar una semaforización típica, donde el significado de cada color es:

- Rojo: Variable no disponible y que no puede ser recolectada, esto incluye a personal calificado y no calificado, las razones pueden ser técnicas, tecnológicas o en algunos casos por tratarse de información privada.
- Amarillo: Variable no disponible que puede ser recolectada o variable disponible pero no accesible para cualquier persona. Estos casos pueden incluir aquellos datos que son recolectados por organismos privados y que no dejan al alcance del público o datos que probablemente no han sido del interés de nadie y nunca han sido recolectados, sin embargo, con tecnología y personal adecuado puede ser adquirido.
- Verde: Variables conocidas y variables cuya fuente es conocida, dentro de las conocidas se han incluido aquellas que han sido reemplazadas por una alternativa. Dentro de las variables con fuente conocida no se debería hacer un trabajo extra de tratamiento de datos.

De los resultados expuestos se concluye que ningún valor involucrado en la totalidad de los modelos analizados es imposible de obtener, sin embargo, existen problemas de disponibilidad de datos, tanto porque pueden ser de carácter privado o porque simplemente nadie ha recopilado anteriormente los datos en la comuna analizada.

Para algunas variables marcadas en amarillo existe la posibilidad de trabajar en conjunto con los equipos correspondientes a las labores de cada red, otros valores se pueden recolectar de forma independiente con personal calificado según sea el caso.

6 Análisis y discusión

La aplicación de un modelo de gestión integrada de infraestructura urbana en Chile, basado en el framework propuesto por Abu-Samra et al. (2020), debe ser analizada no solo desde el punto de vista técnico de sus modelos de optimización, sino también considerando los desafíos que conlleva su implementación en un entorno como el chileno. En este análisis, se integran los hallazgos propios del estudio con los principales obstáculos identificados por Daulat et al. (2024), quienes realizaron una revisión crítica de la literatura sobre IMAM y su aplicabilidad.

Uno de los primeros elementos que emergen como limitantes estructurales es la calidad, disponibilidad e interoperabilidad de los datos (Challenge II). Durante el levantamiento de información para este estudio, se observaron deficiencias significativas en los sistemas de inventario de activos disponibles, con datos incompletos, no estandarizados o en formatos no interoperables entre servicios municipales. Si bien existen datos georreferenciados para pavimentos o redes sanitarias por separado, rara vez se encuentran integrados en una plataforma común, lo cual dificulta la aplicación directa de los modelos del framework, particularmente los que requieren evaluaciones conjuntas y simulaciones de deterioro combinadas. Este hallazgo coincide con Daulat, quien menciona que la fragmentación de datos y la existencia de "data silos" es uno de los mayores impedimentos para la práctica efectiva del IMAM.

En segundo lugar, se encuentra el desafío relacionado con las incertidumbres en la modelación y la toma de decisiones (Challenge III). La aplicación del modelo de salud del corredor, por ejemplo, requiere de curvas de deterioro validadas para cada tipo de infraestructura. Sin embargo, estas curvas no solo son escasas en el contexto chileno, sino que además dependen de factores locales como condiciones climáticas, tipo de suelo, calidad constructiva y mantenimiento histórico. Esta incertidumbre no solo afecta la precisión de las predicciones, sino también limita la confianza de los tomadores de decisiones respecto a la utilidad real del modelo. De acuerdo con Daulat, esta es una barrera crítica para pasar desde modelos conceptuales a aplicaciones reales.

El tercer elemento relevante es la comparabilidad entre corredores y activos (Challenge IV). En este estudio se propuso un enfoque basado en la agregación de los indicadores de fiabilidad de cada red (vial, agua y alcantarillado), sin embargo, dicha agregación puede ser arbitraria si no existen criterios claros para ponderar la importancia relativa de cada red en función del contexto. Por ejemplo, en una zona residencial, la prioridad puede estar en la red de agua potable, mientras que en un sector comercial o industrial, la funcionalidad vial podría tener un peso mayor. Esto plantea la necesidad de incorporar mecanismos de ponderación participativa o basados en análisis multicriterio adaptado al territorio.

Asimismo, la escala del problema (Challenge V) se vuelve crítica. El framework original fue aplicado a nivel de ciudad en contextos donde las instituciones cuentan con capacidades analíticas avanzadas. En cambio, en Chile, muchas municipalidades no cuentan con personal especializado ni con plataformas computacionales adecuadas para ejecutar modelos de optimización complejos. Esto refuerza la necesidad de adaptar la escala de aplicación, comenzando por pilotos acotados a nivel de corredores o barrios, y desarrollando gradualmente capacidades institucionales.

Relacionado con lo anterior, se presenta el problema de encaje o "fit" (Challenge VI), que se manifiesta en la falta de coherencia entre los marcos de referencia que utiliza cada institución para representar y gestionar sus activos. Por ejemplo, mientras una empresa sanitaria puede trabajar con coordenadas precisas y modelación BIM de su red, la dirección de obras municipales puede trabajar

con cartografía en papel o sistemas GIS no compatibles. Esta desalineación impide la integración efectiva de información necesaria para el funcionamiento del framework.

Finalmente, se destaca el problema de interacción entre actores (Challenge VII), también denominado "problema de interplay". La implementación del framework requiere de una coordinación efectiva entre actores municipales, empresas concesionarias, proveedores de servicios y eventualmente la comunidad. La experiencia chilena documentada por Vasquez y Araya (2021) muestra una alta fragmentación institucional, con competencias solapadas y escasa cultura de planificación conjunta. En este escenario, el uso de modelos como los de Abu-Samra puede resultar irrelevante si no se acompaña de un cambio organizacional que fomente la colaboración intersectorial.

6.1 Conclusiones del estudio

La presente investigación evaluó la aplicabilidad de un modelo de gestión integrada de infraestructura urbana, con base en el framework propuesto por Abu-Samra et al. (2020), en el contexto chileno. Los hallazgos más relevantes permiten extraer las siguientes conclusiones:

Existen condiciones técnicas y conceptuales que permiten adaptar el framework al contexto chileno, especialmente en comunas con mejor desarrollo institucional y acceso a información digitalizada, como Providencia.

La falta de interoperabilidad de datos entre redes de infraestructura representa una de las principales barreras para la implementación. A pesar de la existencia de datos georreferenciados en pavimentos y redes sanitarias por separado, su integración efectiva es limitada.

Las curvas de deterioro requeridas por el modelo de salud del corredor (CCS) no están disponibles para muchas redes locales, lo que impide una implementación directa. En estos casos, se recomienda el uso de alternativas como curvas genéricas ajustadas, simulaciones con supuestos conservadores o enfoques basados en juicio experto.

La fragmentación institucional y la ausencia de gobernanza intersectorial dificultan la planificación conjunta. La implementación del modelo exige no solo capacidad técnica, sino también cambios organizacionales y culturales que favorezcan la colaboración entre actores.

La agregación de indicadores entre redes distintas puede resultar arbitraria si no se establece previamente un mecanismo de ponderación adaptado al contexto urbano. Esto refuerza la necesidad de incorporar enfoques participativos o multicriterio en la toma de decisiones.

A pesar de estas barreras, la investigación demuestra que ningún modelo es completamente inaplicable; todos pueden ser ajustados o reemplazados por métodos alternativos cuando existen restricciones de datos o capacidades institucionales.

En resumen, la aplicabilidad del modelo depende directamente de la disponibilidad de datos, el desarrollo institucional local y la existencia de coordinación entre actores. Las comunas con mayor madurez en estos aspectos podrían liderar proyectos piloto de implementación progresiva.

6.2 Recomendaciones para el contexto chileno

Dado que en Chile la infraestructura vial es gestionada por las municipalidades, mientras que las redes de agua potable y alcantarillado se encuentran en manos de empresas sanitarias concesionadas, es fundamental establecer mecanismos institucionales de coordinación intersectorial. Tal como sugiere Daulat et al. (2024), una estrategia efectiva observada en otros países ha sido la creación de mesas técnicas permanentes o oficinas de coordinación de infraestructura urbana, integradas por representantes de cada organismo responsable. Estas instancias pueden servir para alinear calendarios de intervenciones, compartir información georreferenciada y discutir prioridades de rehabilitación.

Complementariamente, se recomienda establecer una plataforma digital común, basada en GIS interoperables, que permita a los distintos actores acceder a la información necesaria para planificar intervenciones conjuntas. En la literatura revisada, InfraGuide (2003a) propone un enfoque de cinco pasos donde el primer hito es la generación de un inventario compartido de activos, lo que facilita una base sólida para decisiones integradas.

Por último, se sugiere avanzar hacia la generación de planes maestros comunales de infraestructura integrada, que sean reconocidos como instrumentos de planificación territorial con respaldo normativo. Estos planes permitirían integrar los distintos horizontes de intervención, fortalecer la gobernanza local y postular a fondos públicos de infraestructura bajo un enfoque colaborativo y multisectorial.

En síntesis, si bien el framework propuesto presenta ventajas conceptuales y una estructura metodológica robusta, su aplicación en Chile enfrenta barreras relevantes, tanto en el plano técnico como institucional. Superarlas no es trivial, pero tampoco imposible: avanzar en calidad y estandarización de datos, construir capacidades técnicas locales, promover pilotos de pequeña escala, establecer mecanismos de gobernanza colaborativa y crear plataformas y planes maestros integrados emergen como condiciones habilitantes para acercar la teoría del IMAM a la práctica nacional.

7 Referencias

- Abu Samra, S., Ahmed, M., Hammad, A., & Zayed, T. (2018). Multiobjective Framework for Managing Municipal Integrated Infrastructure. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001402](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001402)
- Abu-Samra, S., Ahmed, M., & Amador, L. (2020). Asset Management Framework for Integrated Municipal Infrastructure. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000580](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000580)
- Alothaimen, I., & Arditi, D. (n.d.). *Overview of Multi-Objective Optimization Approaches in Construction Project Management*. www.intechopen.com
- Behera, A. P., Dhawan, A., Rathinakumar, V., Bharadwaj, M., Rajput, J. S., & Sethi, K. C. (2024). Optimizing time, cost, environmental impact, and client satisfaction in sustainable construction projects using LHS-NSGA-III: a multi-objective approach. *Asian Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01221-7>
- Brechas y estándares de gobernanza de la infraestructura pública en Chile*. (2017). OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264286948-es>
- Chen, L., & Bai, Q. (2019). Optimization in decision making in infrastructure asset management: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app9071380>
- Cubillos Jimenez, M. I. (2022). *MODELO DE DETERIORO EN TUBERÍAS DE AGUA POTABLE CON MÉTODOS PROBABILÍSTICOS Y DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL*.
- Daulat, S., Rokstad, M. M., Klein-Paste, A., Langeveld, J., & Tscheikner-Gratl, F. (2024). Challenges of integrated multi-infrastructure asset management: a review of pavement, sewer, and water distribution networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(4), 546–565. <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2119480>
- Di Sivo, M., & Laviana, D. (2011). Decision-support tools for municipal infrastructure maintenance management. *Procedia Computer Science*, 3, 36–41. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2010.12.007>
- Ferreira, A., & Flintsch, G. (2004). *Life-Cycle Cost Analysis System for Infrastructure Management*.
- Martínez Solano, F., & Pérez García, R. (2002). *TESIS DOCTORAL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y MEDIO AMBIENTE*.
- Marzouk, M., & Osama, A. (2017). *Fuzzy-Based Methodology for Integrated Infrastructure Asset Management*.
- Nishiyama, M., & Yves, F. (2013). *Review of Statistical Water Main Break Prediction Models*.
- Olivares Hauva, M., Arévalo Castro Ignacio Abé Castro, A., Rodríguez Rojas Colaboradores, C., Manterola San Martín, L., Savin, A., Cueto Martínez, C., López López, A., Daruich Rozas, M., Hidalgo Parra, L., de prensa, A., Victoria, E., Olivares, C., Arévalo Castro, A., & Tapia Acosta, E. (2019). *SANTIAGO MOVILIDAD URBANA SECRETARÍA COMUNAL DE PLANIFICACIÓN*.

- Osorio-Lird, A., Chamorro, A., Videla, C., Tighe, S., & Torres-Machi, C. (2018). Application of Markov chains and Monte Carlo simulations for developing pavement performance models for urban network management. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(9), 1169–1181. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1402064>
- PRECIOS SOCIALES REPORTE ANUAL | 2024. (n.d.). www.sni.gob.cl
- Rahman, S., & Vanier, D. J. (2004). *Life Cycle Cost Analysis as a Decision Support Tool for Managing Municipal Infrastructure*.
- Ramos-Salgado, C., Muñuzuri, J., Aparicio-Ruiz, P., & Onieva, L. (2021). A decision support system to design water supply and sewer pipes replacement intervention programs. *Reliability Engineering and System Safety*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107967>
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6), 11–25. <https://doi.org/10.1109/37.969131>
- Vasquez, S., & Araya, F. (2023). Identifying the Level of Development of Integrated Urban Infrastructure Management Practices in Chile. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 239, 361–374. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0503-2_30
- Wang, Y., Zayed, T., Asce, M., Moselhi, O., & Asce, F. (2009). *Prediction Models for Annual Break Rates of Water Mains*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0887-3828200923:147>