



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**Análisis de gestión integrada de proyectos de
infraestructura urbana a escala regional mediante
simulación basada en agentes: caso Región de
Valparaíso.**

Memoria de Título presentada por

Christopher Narváez Beltrán

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Felipe Araya A.

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: **Análisis de gestión integrada de proyectos de infraestructura urbana a escala regional mediante simulación basada en agentes: caso Región de Valparaíso**

Nombre del candidato(a): **Christopher Narváez Beltrán**

Carrera / Grado: **Ingeniería Civil**

Campus: **Casa Central** 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 (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: **13/04/2026** Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: **31/03/2026** 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.

"El reconocimiento pertenece al hombre que está en la arena, cuyo rostro está manchado de polvo, sudor y sangre; que se esfuerza valientemente; que erra, que da un traspie tras otro, porque no hay esfuerzo sin error ni fallo."
— Theodore Roosevelt

Pero también pertenece a quienes desde la grada no juzgan, sino que alientan; a quienes con su presencia silenciosa o su palabra oportuna nunca dejaron que me rindiera. A ti, a mis amigos y en especial a mis padres, este momento es tan suyo como mío.

Análisis de gestión integrada de proyectos de infraestructura urbana a escala regional mediante simulación basada en agentes: caso Región de Valparaíso.

Christopher Narváez¹, Felipe Araya²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

La gestión fragmentada de proyectos de infraestructura urbana en la Región de Valparaíso genera sobrecostos, duplicidad de intervenciones y disrupciones reiteradas a la comunidad. Este estudio evalúa los beneficios de coordinar obras colocalizadas mediante un enfoque de gestión integrada, utilizando un modelo de simulación basada en agentes (ABM) desarrollado en el software AnyLogic. El modelo representa el comportamiento de agencias y carteras de proyectos en cinco comunas de la región (Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache), simulando la interacción bajo cuatro escenarios estratégicos: Status Quo, Integración por Afinidad, Integración sin Afinidad e Integración Vertical, evaluados en distintos radios de búsqueda espacial (100 a 400 metros) y temporal (1 a 4 años).

Los resultados cuantifican el impacto directo en el uso del espacio público, demostrando que el escenario de Integración por Afinidad es consistentemente el más eficiente para reducir las Semanas de Intervención (SDI) por cada proyecto coordinado en zonas costeras y por su parte, el escenario sin Afinidad es el más eficiente para las zonas del interior. Asimismo, se identificó un límite de viabilidad logística, donde forzar la integración en radios amplios (400 metros) genera rendimientos decrecientes. Esta investigación aporta evidencia cuantitativa inédita al campo de la gestión de infraestructura, entregando recomendaciones prácticas para optimizar la planificación regional y mitigar el impacto urbano de las obras públicas en Chile.

Palabras clave: Gestión integrada, Agent-Based Modeling (ABM), Infraestructura urbana, Coordinación Interinstitucional.

Índice de contenidos

| | |
|---|----|
| Índice de contenidos..... | 5 |
| 1. Introducción..... | 7 |
| 2. Revisión de literatura..... | 8 |
| 2.1 Oportunidad de investigación | 11 |
| 3. Objetivos | 12 |
| 3.1 Objetivo General..... | 12 |
| 3.2 Objetivos Específicos..... | 12 |
| 4. Metodología..... | 13 |
| 4.1 Caso de estudio | 13 |
| 4.2 Recolección de datos..... | 14 |
| 4.2.1 Búsqueda de información en organismos locales | 14 |
| 4.2.2 Tipos de proyectos recopilados y cobertura | 15 |
| 4.3 Modelo ABM..... | 16 |
| 4.3.1 Arquitectura del entorno y Configuración GIS | 16 |
| 4.3.2 Definición de los agentes..... | 17 |
| 4.3.3 Algoritmo optimizador | 19 |
| 4.4 Limitaciones..... | 31 |
| 5. Resultados | 32 |
| 5.1 Quilpué..... | 32 |
| 5.2 Viña del Mar | 34 |
| 5.3 Villa Alemana | 35 |
| 5.4 Limache | 37 |
| 5.5 Valparaíso | 39 |
| 6. Discusión..... | 41 |
| 6.1 Evaluación de los escenarios de integración..... | 41 |
| 6.2 Mirada regional..... | 42 |
| 6.3 Contribución práctica..... | 42 |
| 6.4 contribución teórica | 43 |
| 7. Conclusiones | 44 |
| 8. Referencias | 46 |
| 9. Anexos..... | 48 |
| A. Ratio Villa Alemana..... | 48 |

| | | |
|----|-------------------------|----|
| B. | Ratio Limache | 48 |
| C. | Ratio Valparaíso..... | 49 |
| D. | Ratio Viña del Mar..... | 49 |
| E. | Ratio Quilpué | 50 |

1. Introducción

La gestión de la infraestructura urbana actualmente constituye uno de los desafíos más significativos y complejos para las ciudades de hoy en día. Los sistemas vitales que sostienen esta vida urbana no operan en el vacío, coexisten en un espacio físico y limitado. Sin embargo, tal como advierten Abu-Samra & Amador (2019), aunque físicamente funcionan como un sistema interdependiente debido a su proximidad espacial, su administración como tal sigue estando marcada por una fragmentación institucional. Esta desconexión, en donde, cada organismo (como servicios de agua, alcantarillado, vialidad, obras públicas y electricidad) planifica tanto sus intervenciones para nueva infraestructura como para mantenimiento de manera aislada, generando ineficiencias evidentes, tales como la rotura repetida de pavimentos recién bacheados, duplicación de costos de movilización y una disrupción social constante para la ciudadanía.

Si bien la ingeniería ha intentado abordar este desafío en ocasiones anteriores con modelos de programación matemática, estos enfoques a veces resultan poco eficientes si se trata de capturar la naturaleza dinámica de la ciudad. Los planes maestros a largo plazo tienden a volverse obsoletos rápidamente frente a la variabilidad de los presupuestos anuales y las posibles urgencias operativas emergentes (Daulat et al., 2024). Por ello, existe esta necesidad de transitar a metodologías capaces de identificar y explorar “ventanas de oportunidad” que surgen de la interacción espacial entre los distintos proyectos.

Para dar respuesta a esta desconexión, duplicación de costos y trabajos, la presente investigación desarrolla un modelo de simulación basada en agentes (ABM) orientado a la optimización del uso del espacio público con el fin de disminuir las disrupciones a la ciudadanía. Esta propuesta metodológica se fundamenta en la visión de Osman (2012) y Vasquez, S., & Araya, F. (2022) quienes establecen que la gestión de activos urbanos se aborda de mejor manera conceptualizando los elementos de la infraestructura urbana no como datos pasivos, sino como agentes con atributos y comportamientos propios. Bajo este enfoque, cada proyecto se modela como una entidad que busca compatibilidad con sus vecinos tanto de manera espacial como temporal, operando bajo la supervisión de un algoritmo centralizado que emula la toma de decisiones de un ente coordinador a nivel regional.

La investigación aplica este modelo mediante un estudio en la región de Valparaíso, abarcando las comunas de Limache, Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar y Valparaíso. A través de distintos escenarios con diferentes métodos y búsquedas de coordinación, desde la agrupación por afinidad constructiva hasta la integración vertical de los distintos tipos de infraestructura de la región; este trabajo busca evidenciar que es posible ahorrar el tiempo de interrupción total de los espacios públicos con el fin de generar menos molestias a la ciudadanía y, además, generar oportunidades de sostenibilidad económica para los distintos municipios.

2. Revisión de literatura

La infraestructura urbana constituye la base material y funcional que sostiene la vida en las ciudades. A través de redes de servicios como el agua potable, la electricidad, el transporte o el saneamiento, se asegura el funcionamiento cotidiano de la población y se habilitan las condiciones necesarias para el desarrollo económico y social de los territorios involucrados (Goodman & Hastak, 2015). Su provisión incide directamente en la calidad de vida de las comunidades y en la competitividad de las regiones. Sin embargo, pese a su relevancia, las infraestructuras urbanas suelen gestionarse de forma sectorial y fragmentada, con escasa coordinación entre las agencias responsables (municipalidades, sanitarias, eléctricas, telecomunicaciones, entre otras). Esta fragmentación se traduce en sobre costos, duplicidad de trabajos y interrupciones reiteradas para los usuarios, como se ha observado en contextos urbanos chilenos como latinoamericanos (Vásquez Ávila & Araya F, 2023).

A lo anterior se suma una presión creciente por el aumento sostenido de la demanda de servicios urbanos, asociado al crecimiento poblacional, la densificación de áreas metropolitanas y los efectos del cambio climático. La necesidad de intervenciones de mantenimiento y ampliación de redes es cada vez mayor, lo que acentúa los conflictos derivados de la falta de coordinación institucional. En este contexto surge la pregunta central que orienta la investigación: ¿Cómo avanzar hacia una gestión integrada de proyectos urbanos que reconozca las interdependencias existentes, optimice recursos y minimice los impactos sociales negativos?

El concepto de interdependencia resulta clave para comprender la complejidad de la gestión urbana. En su trabajo, Rinaldi et al., (2001) clasificaron las interdependencias de infraestructura en cuatro categorías: físicas, geográficas, cibernéticas y lógicas. Las interdependencias físicas se refieren a la dependencia material de un sistema respecto de otro, como ocurre cuando el suministro eléctrico es condición para el funcionamiento de bombas de agua. Las interdependencias geográficas aluden a la colocación de infraestructuras, de modo que la intervención o falla de una afecta a la otra (por ejemplo, una rotura de matriz que daña la calzada). Las interdependencias cibernéticas se producen a través del flujo de información, como cuando la operación de redes requiere datos de otras agencias. Finalmente, las interdependencias lógicas abarcan relaciones no incluidas en las anteriores, como decisiones regulatorias o financieras que condicionan el desempeño de varios sistemas.

Estudios posteriores han evidenciado que estas interdependencias, si bien permiten mejorar la eficiencia operativa, también incrementan la vulnerabilidad ante fallas en cascada. Eventos como el apagón norteamericano de 2003 o el terremoto de Chile en 2010 demostraron que la interrupción en un sistema puede amplificarse rápidamente hacia otros, con consecuencias socioeconómicas de gran escala (Ouyang, 2014). Comprender las interdependencias es, por tanto, fundamental para anticipar efectos cruzados, diseñar planes de contingencia y evaluar oportunidades de integración entre proyectos de infraestructura.

Frente a esta visión tradicional que enfoca la interdependencia netamente como un riesgo o vulnerabilidad, la literatura reciente propone un cambio de paradigma. Grafius et al. (2020) argumentan que la complejidad inherente a la superposición de los sistemas urbanos no debe ser vista solo como una amenaza, sino como una oportunidad estratégica. Abordar estas interdependencias (especialmente las geográficas) desde una perspectiva sistémica, permite justificar el abandono de la gestión aislada por especialidad y fomenta la coordinación de intervenciones conjuntas. Bajo este enfoque, lo que antes se consideraba un problema logístico (el choque de redes en el espacio público) se transforma en una ventaja para maximizar la eficiencia operativa y reducir significativamente los tiempos totales de interrupción.

Para superar a las limitaciones de la gestión fragmentada, la literatura ha planteado la necesidad de avanzar hacia enfoques de gestión integrada, entendidos como esquemas que reconocen y gestionan de manera coordinada las interdependencias. Abu Samra et al. (2018) desarrollaron un marco multiobjetivo aplicado a redes viales y sanitarias en Canadá, demostrando que la coordinación de intervenciones puede reducir en más de un 30 % los costos de ciclo de vida y hasta en un 50 % los costos para los usuarios. Estos beneficios incluyen menores tiempos de obra, reducción de molestias comunitarias y mejor percepción institucional.

La idea se ve ilustrada en la Figura 1:

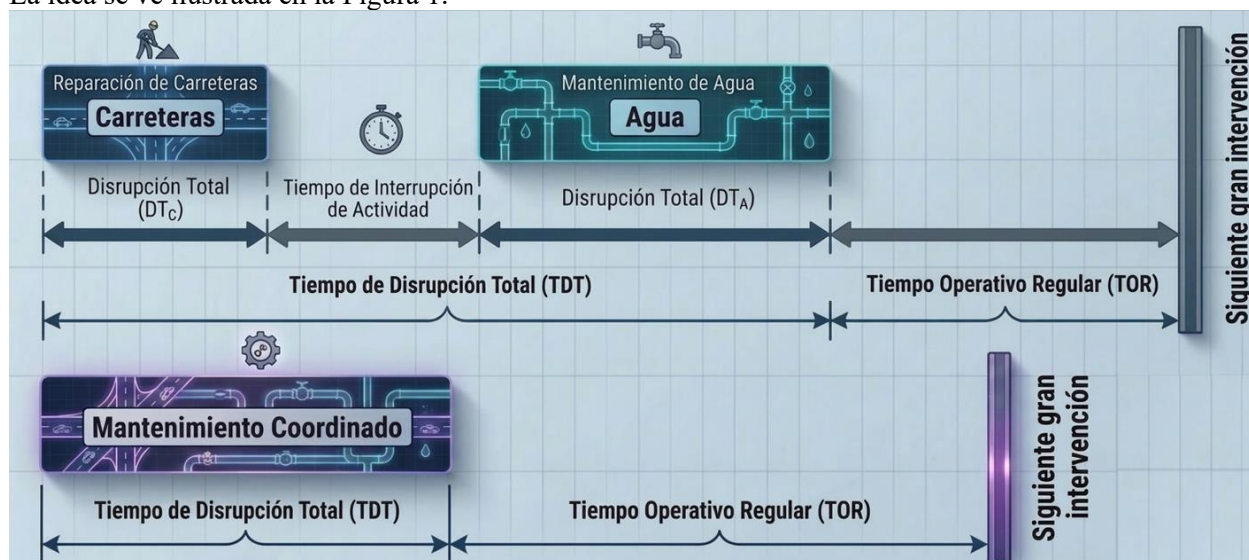


Figura 1. "Conventional versus integrated system disruption times" Adaptación de Abu Samra, S., Ahmed, M., Hammad, A., & Zayed, T. (2018). *Multiobjective Framework for Managing Municipal Integrated Infrastructure*

En el caso chileno, Araya & Vásquez (2022) identificaron que la principal barrera para implementar este tipo de gestión no es técnica, sino organizacional: la falta de coordinación y la fragmentación de responsabilidades entre agencias. Al mismo tiempo, destacan que la disposición de los funcionarios y la confianza entre actores pueden convertirse en motores para la integración. La experiencia de Vásquez Ávila (2023), que aplicó un modelo basado en agentes a escala municipal, refuerza esta visión al mostrar que la inclusión de la comunidad es un factor determinante para la aceptación de políticas de integración. La participación ciudadana permite legitimar intervenciones y maximizar los beneficios sociales percibidos.

En resumen, la gestión integrada se presenta como un enfoque con un doble objetivo: mejorar la eficiencia técnica y financiera de los proyectos, y al mismo tiempo fortalecer la gobernanza urbana mediante procesos colaborativos. No obstante, aún existen vacíos en su aplicación a escalas regionales y en contextos de países en desarrollo, donde las capacidades institucionales son desiguales y la información técnica no siempre está disponible.

Por otra parte, el análisis de interdependencias y la evaluación de esquemas de gestión integrada han impulsado el desarrollo de diversas metodologías de modelado. Ouyang (2014) presenta una clasificación exhaustiva de seis enfoques principales: métodos empíricos, modelos basados en agentes (ABM), dinámica de sistemas, teoría económica (input-output y equilibrio general computable), modelos de redes y enfoques híbridos. Cada método ofrece ventajas y limitaciones según el objetivo del estudio.

- Enfoques empíricos permiten identificar patrones de fallas y cuantificar indicadores, pero presentan limitaciones para capturar dinámicas emergentes.
- La dinámica de sistemas resulta útil para representar retroalimentaciones en el tiempo, aunque tiende a simplificar la heterogeneidad de actores.
- Los modelos de red se enfocan en la topología y los flujos, capturando vulnerabilidades estructurales, pero con menor capacidad de incorporar procesos sociales.
- La simulación basada en agentes (ABM) destaca por su capacidad de representar actores heterogéneos (como municipios, empresas de servicios, comunidades y simular interacciones locales que generan comportamientos globales. Esta cualidad la hace especialmente adecuada para problemáticas urbanas, donde la coordinación depende de decisiones descentralizadas y de múltiples actores con intereses divergentes.

Tabla 1. “Approach comparisons from several criteria” Adaptación de Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems.

| TIPO DE ENFOQUE | SUB-ENFOQUE | CANT. DATOS | ACCESIBILIDAD | INTERDEPENDENCIAS | COSTO COMP. | MADUREZ |
|--------------------------|---|-------------|---------------|-------------------|-------------|---------|
| Empírico | - | M, A | M | P, C, G, L | B | M |
| Basado en agentes | - | A | B | P, C, G, L | A | A |
| Basado en SD | - | M, A | M | P, C, L | M | A |
| Teoría económica | Insumo-producto | M | A | P, C | B | A |
| | Equilibrio general computable | A | M | P, C, G, L | M | M |
| Basado en redes | Método basado en topología | B, M | M | P, C, G, L | B, M | A |
| | Método basado en flujo | A | B | P, C, G, L | A | A |
| Otros | Modelo Jerárquico Holográfico (HHM) | A | B | P, C, L | B | B |
| | Basado en HLA | A | A | P, C, G, L | A | B |
| | Redes de Petri (PN) | M, A | M | P | M, A | M |
| | Teoría de Sistemas de Control Discreto (DCST) | M, A | B | P, C, G, L | M | B |
| | Redes Bayesianas (BN) | M, A | B | P, C, G, L | M | B |

Los enfoques de modelación de interdependencias se evalúan con cinco criterios según la Tabla 1: (1) Cantidad de datos requeridos, donde B, M, A corresponden a baja, mediana o alta cantidad de información necesaria; (2) Accesibilidad, donde B indica difícil acceso, M acceso medio y A acceso fácil; (3) Interdependencias, clasificados como P (físicas), C (cibernéticas), G (geográficas) y L (lógicas); (4) Coste computacional, en que B representa cálculos rápidos, M tiempos medios y A procesos lentos; y (5) Madurez del enfoque, donde B indica bajo desarrollo (pocos estudios), M nivel intermedio (prototipos) y A alta consolidación (múltiples aplicaciones reales).

A estos enfoques se han sumado aportes recientes desde la perspectiva socio-técnica. Manny et al. (2022, 2023) proponen el concepto de redes socio-técnicas, que integran en un mismo marco a actores sociales y elementos técnicos de la infraestructura, analizando relaciones como flujos de información, competencias de operación o transferencias de datos. Esta aproximación permite comprender barreras sociales y técnicas de manera conjunta, especialmente relevantes en procesos de digitalización, descentralización e integración de sistemas.

De manera más reciente, la investigación extranjera ha avanzado hacia la cuantificación de las interdependencias espaciales para justificar la integración de proyectos. Daulat et al. (2024) desarrollaron métricas para evaluar el grado de colocación física entre la infraestructura hídrica, sanitaria y vial, demostrando que la superposición de zanjas representa una oportunidad masiva de integración. Al modelar la intersección tridimensional de estas redes en entornos urbanos, el estudio calculó un potencial de ahorro de costos de hasta un 24% al ejecutar obras conjuntas, evidenciando que sistemas como el agua potable y el alcantarillado comparten más de la mitad de su volumen de excavación. Estos resultados subrayan la urgencia de abandonar la planificación fragmentada en favor de esquemas logísticos que aprovechen el espacio compartido para evitar la duplicidad de trabajos y la intervención reiterada del pavimento.

Estos hallazgos teóricos resultan fundamentales para respaldar la hipótesis de la presente investigación, ya que validan a nivel internacional que la proximidad espacial es el eje central de la eficiencia constructiva urbana.

La revisión evidencia que la gestión de infraestructuras urbanas enfrenta un doble desafío: por una parte, técnico, relacionado con la coordinación de intervenciones y por otra, la reducción de vulnerabilidades, y organizacional, vinculado a la fragmentación institucional y a la gobernanza multi-actor. La literatura internacional ha mostrado beneficios tangibles de la integración en términos de costos, tiempos y aceptación social. Sin embargo, persisten vacíos respecto a su aplicación en contextos latinoamericanos, donde la diversidad de actores y la debilidad institucional dificultan la implementación de esquemas integrados (Araya & Vásquez, 2022; Vásquez Ávila, 2023).

2.1 Oportunidad de investigación

La Región de Valparaíso, con una gran concentración de proyectos y actores, constituye un escenario idóneo para explorar estas problemáticas. La modelación basada en agentes, apoyada en una visión socio-técnica, se configura como una herramienta idónea para simular distintos escenarios y anticipar sus efectos sobre dimensiones económicas, temporales y/o comunitarias.

En este contexto, la presente investigación se posiciona no como la creadora de un nuevo paradigma o estrategia matemática, sino como un puente hacia la aplicabilidad en el mundo real. El trabajo somete la teoría global de integración en el contexto chileno, más aún se usa un foco distinto a lo de siempre, en donde los modelos de vanguardia optimizan ahorros financieros directos por metro cubico excavado, esta simulación está orientada hacia una métrica de impacto social, cuantificando la reducción efectiva de las semanas de intervención (SDI) que soporta la ciudadanía. Abordar esta brecha, dentro de la gestión pública, permite demostrar como esta ineficiencia tiene un costo social perceptible. Cambiar la perspectiva desde el ahorro monetario hacia el ahorro en tiempos de intervención entrega otro tipo de evidencia necesaria para lograr impulsar la creación de entidades coordinadoras y modernizar la fragmentada situación actual.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Modelar la gestión integrada de infraestructura urbana en la Región de Valparaíso, mediante una simulación basada en agentes, a fin de evaluar su implementación a través de escenarios para tomadores de decisiones.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar estado del arte y estado de la práctica regional, con caracterización de actores, procesos, normativas y brechas de coordinación como marco conceptual y requerimientos del modelo.
- Diseñar un modelo basado en agentes que simule la coordinación entre proyectos y agencias que permita comparar distintos escenarios, con definición de datos de entrada, reglas de integración y procedimientos de calibración.
- Formular recomendaciones y protocolos de coordinación para la gestión urbana regional, a partir de la comparación de escenarios simulados.

4. Metodología

La metodología de esta investigación consta de una serie de etapas, desde la obtención de datos como tal hasta el desarrollo de un modelo basado en agentes operativo con el fin de estudiar la posibilidad de integración de proyectos en la región de Valparaíso.



Figura 2. Etapas generales de la metodología

4.1 Caso de estudio

La zona de estudio corresponde a la región de Valparaíso en Chile, contemplando las ciudades de Limache, Villa Alemana, Quilpué, Viña del Mar y Valparaíso como se muestra en la Figura 3. Fue escogida por ser la segunda área metropolitana más importante del país (luego de Santiago) y pudiendo ser representativa de una realidad intermedia aplicable a otras ciudades de Latinoamérica.

Asimismo, la coexistencia de 5 administraciones municipales relativamente cercanas entre si sobre un tejido de infraestructura vial y redes de servicios básicos ofrece un escenario ideal para evaluar la capacidad del modelo ABM.

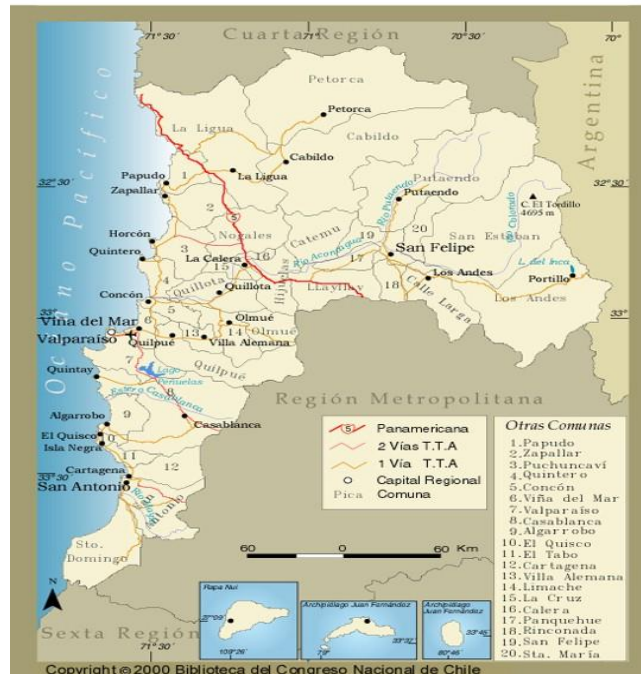


Figura 3. Región de Valparaíso. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)

4.2 Recolección de datos

El proceso de recolección de información se desarrolló de manera progresiva y práctica, con el propósito de construir una base de datos real que sirviera como soporte para el modelo de simulación basada en agentes (ABM). Desde el inicio se tuvo claro que los datos debían representar fielmente el funcionamiento real de las instituciones públicas, por lo que el trabajo combinó revisión documental, solicitudes formales de información y contacto directo con los organismos responsables.

En cuanto a las variables a recolectar, basándose en el estado del arte sobre la gestión integrada y metodologías ABM, se siguieron los requisitos de información para la interoperabilidad municipal descritos por Halfawy (2008) y la definición de atributos de agentes propuesta por Osman (2012) (los cuales contemplan atributos espaciales, atributos de estado y costos), con ello, se establecieron los datos esenciales que debía contener cada proyecto:

- Nombre
- Ubicación georreferenciada.
- Fechas de inicio y termino de licitación.
- Fechas de inicio y termino de ejecución de obras.
- Plazos de contrato.
- Costo inicial y final del proyecto.
- Antecedentes de los oferentes involucrados.

Estas variables se seleccionaron no solo con la finalidad de ser descriptivos, sino porque constituyen los parámetros fundamentales para evaluar la compatibilidad espacio-temporal entre intervenciones. Como lo sugieren Minaei et al. (2024), estos atributos son los mínimos necesarios para determinar si un proyecto es susceptible de ser agrupado o coordinado con otro proyecto (es decir, si es un “activo integrable”), transformando así datos aislados en oportunidades de sincronización logística.

4.2.1 Búsqueda de información en organismos locales

Con las variables definidas, el siguiente paso fue conseguir datos reales de proyectos ejecutados en la región. Para ello se decidió acudir directamente a las municipalidades de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache, buscando antecedentes oficiales sobre obras públicas.

La primera gestión consistió en visitar las dependencias municipales, específicamente la Secretaría Comunal de Planificación y Coordinación (SECPLA) y las Direcciones de Obras Municipales (DOM), que suelen concentrar la información técnica y administrativa de los proyectos. Sin embargo, en la mayoría de los casos se indicó que no contaban con registros consolidados físicamente o que esos datos correspondían a otras áreas.

Frente a esa limitación, se evaluaron otros mecanismos institucionales para acceder a la información. En un primer intento se utilizó la Ley de Lobby (N.º 20.730), con el objetivo de solicitar reuniones con funcionarios municipales que pudieran autorizar el acceso a los antecedentes, pero las gestiones fueron infructuosas. Finalmente, se optó por recurrir a la Ley de Transparencia (N.º 20.285), que garantiza el acceso público a información sobre contratos y proyectos financiados con recursos fiscales. A través de esta vía se lograron obtener respuestas formales y respaldadas legalmente a través de documentos enviados por correo, lo que permitió contar con una base documental válida para el análisis posterior.

4.2.2 Tipos de proyectos recopilados y cobertura

Las solicitudes realizadas mediante la Ley de Transparencia abarcaban proyectos ejecutados entre 2020 y 2025, y se enfocaron en los siguientes rubros: eléctricos, sanitarios (agua potable y alcantarillado), viales, telecomunicaciones, infraestructura pública y gas. En general, las municipalidades entregaron información principalmente en los rubros eléctricos, sanitarios, viales y de infraestructura pública. Los proyectos eléctricos correspondían, en su mayoría, a mejoras en el alumbrado público; los sanitarios, a ampliaciones de red o nuevas conexiones domiciliarias; los viales, a pavimentaciones, bacheos, demarcaciones, semaforización y construcción de lomos de toro; y los de infraestructura pública incluían mantenciones de edificios municipales, construcción de equipamiento comunitario y habilitación de plazas o áreas verdes.

Pese a lo anterior, no fue posible acceder a datos sobre proyectos de telecomunicaciones ni de gas, dado que estas iniciativas son gestionadas por empresas privadas. Se contactó directamente a GasValpo y distintas operadoras de telecomunicaciones (empresas privadas de la región de Valparaíso), pero la información fue clasificada como sensible o confidencial, por lo que no pudo ser entregada. No obstante, se logró establecer comunicación con la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), que aportó un listado de mantenciones de la red de Esva, con fechas y ubicaciones generales de intervención, aunque sin detalles técnicos ni valores asociados. La información proporcionada por las municipalidades contenía principalmente los identificadores de licitación asociados a cada proyecto dentro de la plataforma Mercado Público. Por lo tanto, fue necesario revisar manualmente los expedientes digitales disponibles en dicha plataforma para extraer los datos complementarios de interés. Como resultado de este proceso, se elaboraron cinco planillas Excel, una por cada municipalidad consultada (teniendo en promedio 50 proyectos en cada una).

Esta base de datos constituye el insumo fundamental para el modelo ABM desarrollado en AnyLogic, ya que permite representar espacial y temporalmente las intervenciones urbanas, evaluar su potencial de integración en función de la distancia, el tiempo y la compatibilidad de rubros, y calibrar las reglas de comportamiento de los agentes dentro del entorno simulado.

A modo de resumen los pasos seguidos en la recolección de datos fueron los siguientes:



Figura 4. Proceso de construcción de base de datos

4.3 Modelo ABM

4.3.1 Arquitectura del entorno y Configuración GIS

La elección de la Modelación Basada en Agentes frente a métodos matemáticos tradicionales o de dinámica de sistemas se fundamenta en su capacidad exclusiva para representar la complejidad descentralizada de los entornos urbanos. Según se respalda en la revisión de la literatura, mientras los enfoques analíticos asumen un comportamiento estático, global y centralizado, el ABM opera bajo una lógica *bottom-up* que permite modelar actores altamente heterogéneos y autónomos con objetivos y reglas operativas propias. Al simular cómo estos múltiples agentes interactúan física y temporalmente sobre una geografía compartida, el modelo logra capturar interdependencias espaciales y comportamientos emergentes del sistema, entregando así un entorno de experimentación dinámico, realista y adaptable a las variables impredecibles de la gestión pública.

Para representar la complejidad espacial del caso de estudio, el modelo se construyó sobre un espacio georreferenciado, utilizando el motor GIS (Sistemas de Información Geográfica) nativo de la propia plataforma AnyLogic. Se utilizó el objeto “GIS Map” proporcionando una capa base visual para validar que los proyectos se ubiquen efectivamente sobre la trama urbana correspondiente en cada caso.

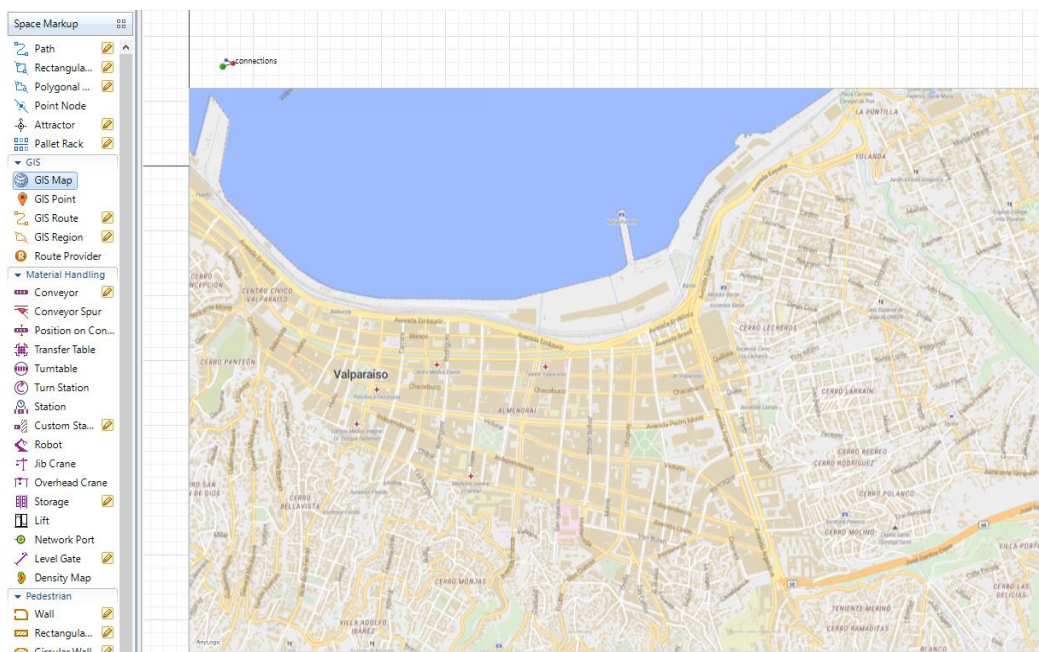


Figura 5. Ventana GIS Map en AnyLogic PLE (versión estudiante).

Para lograr que los proyectos efectivamente estén ubicados en donde corresponden se realizó una ubicación georreferenciada manual, principalmente de 2 maneras, por medio de planos de cada proyecto en donde señala su ubicación, y la otra manera corresponde al uso de la plataforma GEO-CGR de la Contraloría General de la República de Chile, esta última, tiene la finalidad del control ciudadano de obras públicas, la cual corresponde a un mapa que ya señala las ubicaciones de algunos proyectos (no en su totalidad) y con ello simplemente se homologó la información presente al GIS Map. De manera manual, en cada ubicación de cada proyecto se fue usando la herramienta “GIS Point” (la cual está visible en la Figura 5 en la barra izquierda) cuya función es demarcar un punto en el mapa otorgándole atributos de latitud y longitud. Con ello en mente se extrajeron todas las latitudes y longitudes de las ubicaciones de proyectos y estas fueron exportadas a una tabla para poder ser utilizadas por el agente en AnyLogic.

Conforme a lo anterior, se procedió a catalogar los puntos y clasificarlos, para ello arbitrariamente se designaron colores a ciertos grupos de infraestructura:

Tabla 2. Color por grupo de infraestructura para GIS Map

| Grupo infraestructura | Color en GIS Map |
|---------------------------------------|------------------|
| Vial | Rosado |
| Agua Potable y Alcantarillado (AP/AL) | Azul |
| Infraestructura Pública | Verde |
| Eléctrica | Rojo |

4.3.2 Definición de los agentes

A continuación, se presenta un diagrama visual que resume la interacción de información que se comparten entre agentes del modelo. Los detalles de estas conexiones y agentes se abordarán más adelante.



Figura 6. Interacción conceptual de los agentes en el modelo ABM.

Nivel Operativo (Agentes Proyecto)

Representan la unidad mínima de gestión (correspondiente al proyecto individual de pavimentación, tubería, etc.). Son los encargados de percibir el entorno espacial y temporal, pudiendo también detectar conflictos con sus vecinos inmediatos dentro de la zona. Estos, si bien tienen los mismos atributos en toda la región, han sido separados por ciudad para un análisis específico por municipalidad llevando los siguientes nombres “ProyectosQuilpue”, “ProyectosViña”, “ProyectosVillaAlemana”, “ProyectosLimache” y “ProyectosValparaíso”.

Dentro de estos agentes están todos los atributos señalados en el inciso 4.2 de recolección de datos y además un subgrupo de agentes llamados “misUbicaciones” en donde cada agente proyecto posee una colección de puntos georreferenciados los cuales representan donde está ubicado el proyecto como tal en el mapa.

Nivel estratégico (Agencia Central)

Este agente, a diferencia del anterior, no representa una obra como tal, sino que operacionaliza la función de una gobernanza centralizada, actuando como un ente coordinador que a la fecha es inexistente en la realidad de la región. Su diseño responde a la necesidad identificada por Araya & Vásquez (2022) quienes argumentan que la transición desde una gestión de activos aislados hacia una integrada requiere de un mecanismo de toma de decisiones unificado que sea capaz de visualizar la totalidad del sistema de infraestructura pública y no solamente sus partes individuales. En el modelo, este agente tiene la potestad de “leer” el entorno espacial y temporal que percibe cada proyecto y logra proponer modificaciones en los cronogramas y orden de los proyectos.

La inclusión de este agente además se fundamenta en los hallazgos de Araya et al., (2026) quienes concluyen que la factibilidad técnica de la coordinación multisectorial depende de la existencia de una plataforma o ente que gestione la información compartida entre los distintos sostenedores de la infraestructura. Por tanto, este agente simula ese rol hipotético; ejecutando algoritmos de optimización para lograr identificar “ventanas de oportunidad” que los operadores individuales, limitados por su visión sectorial, no pueden percibir o visualizar por sí mismos.

En términos computacionales, la Agencia Central ejecuta el siguiente ciclo de control:

- **Recopilación:** Consolida el estado de los agentes y sus interacciones con vecinos.
- **Evaluación:** Evalúa el costo sistémico actual de disrupción total (en semanas de intervención).
- **Optimización:** Propone escenarios alternativos de calendarización aprovechando ventanas de oportunidad.
- **Despliegue:** Asigna nuevas fechas de inicio y fin a los proyectos subordinados para minimizar las semanas de intervención en las distintas ciudades.

Nivel Receptor (Agentes Auxiliares)

Corresponden a 4 agentes observadores diseñados exclusivamente para la recolección de datos post optimización. Estos agentes están divididos en los grupos de infraestructura estudiados (Vial, AP/AL, Infraestructura pública y Eléctrico), cada uno de ellos registra los movimientos y nuevas fechas que fueron optimizadas por el agente de Agencia Central, simulando así, “ministerios” que deben estar a cargo de los movimientos de sus respectivos grupos y llevar una coordinación interministerial para lograr la integración propuesta y la nueva calendarización preliminar.

4.3.3 Algoritmo optimizador

Una vez definidos los agentes, el desafío central del modelo reside en la capacidad para sincronizar los calendarios de ejecución generando menos semanas de intervención. Desde la perspectiva de la investigación de operaciones y la modelación de infraestructuras críticas de ciudades, la coordinación con múltiples nodos de interdependencias con ventanas de tiempo variables se clasifica como un problema de complejidad “NP-Hard” (Ouyang,2014). Esto significa que, a medida que aumenta el número de proyectos, la cantidad de combinaciones posibles de fechas crece exponencialmente, haciendo así inviable el uso de algoritmos de optimización exacta o fuerza bruta para encontrar la solución perfecta en un tiempo breve o razonable.

Para abordar esta complejidad computacional en el programa de AnyLogic, el modelo implementa un “Motor de optimización Heurística” alojado en el algoritmo del agente Agencia Central. Esta estrategia se alinea con la gestión de activos propuestos por Shahata et al. (2022), quienes validan el uso de métodos de búsqueda estocástica para resolver problemas de rehabilitación urbana en donde las soluciones analíticas estudiadas fueron impracticables. El algoritmo no busca examinar todas las combinaciones posibles, si no que explora un espacio de soluciones para converger hacia un óptimo local que logre minimizar la disrupción social del escenario a estudiar.

Para ello, Agencia Central se basa en 2 filtros fundamentales: la vecindad espacial (¿Los proyectos están lo suficientemente cerca para integrarse?) y la distancia temporal (¿Ocurren en una ventana temporal aceptable para modificar su programación?). A continuación, se detalla la manera en la que opera cada una de estas etapas:

Búsqueda por radio

La primera condición necesaria para el análisis de la gestión integrada es la proximidad física. Dado que el modelo opera sobre un sistema de coordenadas geográficas (WGS84), se optó por mejorar la precisión de la posición usando la fórmula de Haversine puesto que para cada proyecto se posee la información de sus latitudes y longitudes como se muestra a continuación:

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_i) \cdot \cos(\varphi_j) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (1)$$

$$c = 2 \cdot \arctan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (2)$$

$$d = R_{tierra} \cdot c \quad (3)$$

En donde la distancia “d” entre dos agentes i y j, son definidos por sus coordenadas de latitud (φ) y longitud (λ). Además:

$\Delta\varphi = \varphi_j - \varphi_i$: Diferencia de latitudes (en radianes).

$\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$: Diferencia de longitudes (en radianes).

R_{tierra} : Radio medio de la tierra (aprox. 6371 km).

Una vez calculada la distancia $d_{i,j}$, el modelo aplica una regla de decisión binaria para establecer el límite máximo de interacción física entre obras definido como Radio (m)

La condición de radio se cumple si y solo si:

$$R(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{i,j} \leq r \\ 0 & \text{si } d_{i,j} > r \end{cases} \quad (4)$$

Este parámetro “r” no es una constante fija, si no una variable de sensibilidad dentro del modelo.

Para la definición de este radio de búsqueda (R), se estableció un rango operativo de 100 a 400 metros, fundamentado en la escala funcional de la infraestructura urbana presente. El límite inferior (100m) se adoptó buscando capturar intervenciones que puedan ocurrir en la misma calle física.

Por otro lado, el límite superior (400m) responde a una lógica de “coordinación de corredor” (Abu-Samra et al.,2020). Este radio permite identificar oportunidades de integración en redes adyacentes (como, por ejemplo, una matriz de agua en una calle paralela que se conecta a una pavimentación principal), promoviendo así, la creación de “paquetes de trabajo” que maximizan la eficiencia de la maquinaria utilizada en los proyectos y reducen las movilizaciones repetitivas en el mismo barrio.

Distancia temporal

De manera análoga a búsqueda por radio, la coordinación requiere una cierta coincidencia en el tiempo. Sin embargo, el modelo no solo busca proyectos que ya coinciden (lo cual sería muy trivial), sino que posee la capacidad de anticipar obras futuras para adelantarlas y ejecutarlas en conjunto con actuales u organizarlas con otras futuras. Con ello, se definió la variable distancia temporal configurada en un rango de sensibilidad de 1 a 4 años. Esta decisión no es arbitraria, por el contrario, responde a dos factores determinantes en la administración pública chilena:

A. Sincronía con el ciclo Político-Administrativo:

El límite superior de 4 años se fundamenta en la duración legal del mandato de alcaldes y concejos municipales en Chile (según Ley 18.695). En la gestión de infraestructura, este periodo representa el “horizonte de decisión efectiva”. Las autoridades locales priorizan la ejecución de carteras de proyectos que puedan inaugurarse dentro de su administración. El algoritmo replica este comportamiento de un gestor que busca maximizar la eficiencia de los recursos disponibles para un periodo de 1 año o hasta el periodo alcaldicio completo.

B. Alineación con instrumentos de planificación (PLADECO)

El rango anteriormente expuesto permite capturar la naturaleza de los instrumentos de planificación como el Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) y las carteras de inversión sectorial como, por ejemplo, planes maestros del Ministerio de Obras Públicas (MOP) o ESVAL (Empresa privada de servicio de agua). Estos instrumentos contienen una visión preliminar de los proyectos que se tienen contemplado realizar en el periodo electivo, como si fueran “proyectos en verde” programadas para un futuro cercano. Mediante el algoritmo de optimización, se podría proponer adelantar o atrasar inversiones para poder llevar a cabo la integración de los proyectos.

Matemáticamente, dos agentes i y j son candidatos a coordinación si sus intervalos de ejecución $[t_{inicio}^i, t_{fin}^i]$, ajustados por la holgura permitida Δt , caen dentro de esta ventana de muestra:

$$C_{temp}(i, j) = Verdadero \text{ si } |t_{inicio}^i - t_{inicio}^j| \leq \Delta t \quad (5)$$

Dónde “ Δt ” actúa como el horizonte de búsqueda (en años) de búsqueda de oportunidades de integración.

Tiempo de integración y solapamiento mínimo

Una vez que dos o más proyectos han sido identificados como espacial y temporalmente compatibles, el modelo debe determinar si la ventana de coincidencia es suficiente para justificar una operación en conjunta integrable. En la práctica de la ingeniería civil, la movilización de maquinarias, planes de desvío y personal conlleva costos fijos que no se amortizarían en intervenciones de muy corta duración. Por esta razón, el modelo incorpora una restricción de solapamiento mínimo fijado en 30 días corridos. Esta decisión de diseño se fundamenta en dos pilares técnicos y administrativos:

A. Mes calendario (Estados de pago)

En la administración pública chilena y en los contratos de obra estándar (MOP/SERVIU), el control financiero y avance se reportan mensualmente mediante los “estados de pago”. Fijar un traslape de 30 días asegura que la integración de los proyectos eventualmente pueda calzar con al menos un ciclo administrativo. También de cierto modo permitiría que un inspector fiscal evalúe el avance del “paquete integrado” bajo una métrica temporal unificada.

B. Viabilidad operativa de la “ventana de sincronización”

Autores como Shahata et al. (2022) describen el concepto de “*Synchronized Execution Windows*” (Ventanas de ejecución sincronizadas). Para que una sincronización sea efectiva, el proyecto a anexar (ej. Tubería) debe tener suficiente tiempo para ejecutar sus partidas (excavación, instalación, relleno) mientras que el proyecto principal (ej. Pavimentación) mantiene la calzada abierta. Al forzar un mínimo de 30 días, el algoritmo garantiza una ventana de trabajo “holgada” para que los subcontratistas operen secuencialmente dentro de la misma zona confinada.

En el código del modelo, si dos proyectos coinciden naturalmente solo por 10 días, Agencia Central no descarta la unión, sino que aplica un desplazamiento forzado para alinear las fechas de inicio de ejecución hasta lograr los 30 días requeridos (generalmente al inicio o al final del proyecto). Todo lo anterior de igual forma es consistente con las ideas de Abu-Samra et al. (2020) con el principio de “*shared mobilization costs*” (Costos de movilización compartidos). Para que el ahorro logístico de compartir cerramientos, señaléticas y maquinaria sea significativo y supere a los costos de coordinación, la intervención conjunta debe tener una duración sustancial, estimada en este modelo como un mes operativo estándar.

Antes de avanzar, resulta útil consolidar los *inputs* y reglas del modelo en la siguiente tabla resumen. Esto permite clarificar qué información es vital para que la simulación funcione y pueda calcular posteriormente el impacto de la coordinación.

Tabla 3. Resumen de variables de entrada, parámetros de configuración y métricas.

| Categoría | Variable / Elemento | Unidad / Rango |
|---|--|---------------------------------------|
| 1. Inputs (Datos de Entrada) | | |
| Identificación | Nombre | Texto |
| Espacialidad | Ubicación georreferenciada | Coordenadas |
| Periodo Administrativo | Fechas de inicio y término de licitación | DD/MM/AAAA |
| Periodo de Ejecución | Fechas de inicio y término de ejecución de obras | DD/MM/AAAA |
| Administración | Plazos de contrato | Días / Meses |
| Inversión | Costo inicial y final del proyecto | Pesos chilenos (\$) |
| Licitación | Antecedentes de los oferentes involucrados | Texto / Categórico |
| 2. Parámetros de Configuración (Setup) | | |
| Distancia física | Radio de búsqueda | 100 - 400 m |
| Distancia temporal | Distancia temporal | 1 - 4 años |
| Regla Operativa | Ventana Mínima de Solapamiento | 30 días |
| Comportamiento | Estrategia de Coordinación (Escenarios) | Múltiple |
| 3. Métricas de Evaluación (Outputs) | | |
| Impacto Físico/Social | Semanas de Intervención (SDI) | Semanas ahorradas |
| Eficiencia | Ratio de eficiencia | Semanas ahorradas / proyectos movidos |

Diseño experimental y definición de escenarios.

Una vez establecidos los parámetros fundamentales de integración (Radio de búsqueda y Distancia temporal) es necesario definir las “reglas del juego” bajo las cuales los distintos agentes operarán. Si se lleva a la realidad urbana, no todos los proyectos son técnicamente compatibles entre sí ni todas las coordinaciones son deseables administrativa o políticamente llevarlas a cabo.

Por lo tanto, para evaluar el modelo propuesto, se diseñaron cuatro escenarios de simulación que representaran los distintos grados o estrategias de madurez en la gestión de la infraestructura urbana. Estos escenarios funcionan como entornos experimentales donde se alteran las lógicas de restricción variando a su vez, los parámetros espaciales y temporales.

A continuación, se detallan los escenarios que se abordarán:

Escenario 0: Status Quo (Línea Base)

Representa el estado actual de la gestión municipal, caracterizado por la gestión individual de los proyectos. Los agentes proyecto se ejecutan estrictamente en su fecha original, tanto de ejecución como de licitación, ignorando por completo la existencia de sus vecinos cercanos. Por otra parte, el agente de Agencia Central permanece inactivo, no hay optimización ni búsqueda de proyectos compatibles. En particular, este escenario sirve como grupo de control o línea base, estimando la cantidad de semanas trabajadas en total considerando las 4 infraestructuras a estudiar (Vial, AP/AL, Infraestructura pública y Electricidad), esta cantidad de semanas de intervención se compararán con los demás escenarios para cuantificar el ahorro logrado por cada estrategia de coordinación. Se refleja la realidad donde una calle puede ser intervenida por la sanitaria en marzo y rota nuevamente por pavimentación en agosto del mismo año.

Escenario 1: Coordinación Sin Afinidad técnica

Este escenario representa una estrategia de “Oportunismo Logístico”. La Agencia Central busca agrupar proyectos en un mismo espacio-tiempo, ignorando la naturaleza técnica de las obras, pero respetando estrictamente los límites físicos de la zona de trabajo.

Para esta estrategia se establecen paquetes de integración que consisten en integrar 5 proyectos como máximo por grupo, correspondiendo a 1 proyecto grande central y 4 proyectos menores que se anexaran al proyecto más grande. En general, que un proyecto sea “grande” radica simplemente en 2 factores; que sea físicamente grande (o largo) y en términos presupuestarios mayor que los proyectos a anexar. La restricción de 5 proyectos recae tanto en la carga física de la zona (que es inviable que más de 5 cuadrillas de proyectos estén operando en un mismo sector) como en la carga administrativa que, en términos simples, tener que coordinar fechas de operaciones con 5 empresas ya resulta un desafío, pensar en más proyectos integrados solo comprometería la gestión de la mano de obra como de maquinaria y materiales. Por tanto, el modelo sacrifica la posible eficiencia matemática teórica total que conlleva gestionar proyectos sin restricciones técnicas en favor de una viabilidad operativa más aterrizada a la realidad chilena. También existe otra regla dentro del modelo que prohíbe que un grupo de proyectos a integrar resulte ser un grupo compuesto de proyectos del mismo rubro, puesto que, esa estrategia será llevada a cabo en otro escenario, lo cual no se quiere tener resultados “repetidos”. Bajo estas reglas, el modelo o más bien la Agencia Central, verifica si existe una ventana de oportunidad y agrupará una reparación de vereda con un postado nuevo y un recambio de luminarias puesto que coinciden temporal y espacialmente (o son adelantados o atrasados para que coincidan).

A continuación, un ejemplo ilustrado de la operación del escenario 1:

En la Figura 7, se puede observar un extracto de muestra visual del GIS Map de AnyLogic específicamente en la ciudad de Quilpué, para efectos demostrativos, el ejemplo se centrará en la zona de color rojo enmarcada. Cabe destacar que cada proyecto no corresponde a un único punto de los que se aprecian en el mapa, sino que un proyecto puede tener múltiples puntos representándolo.

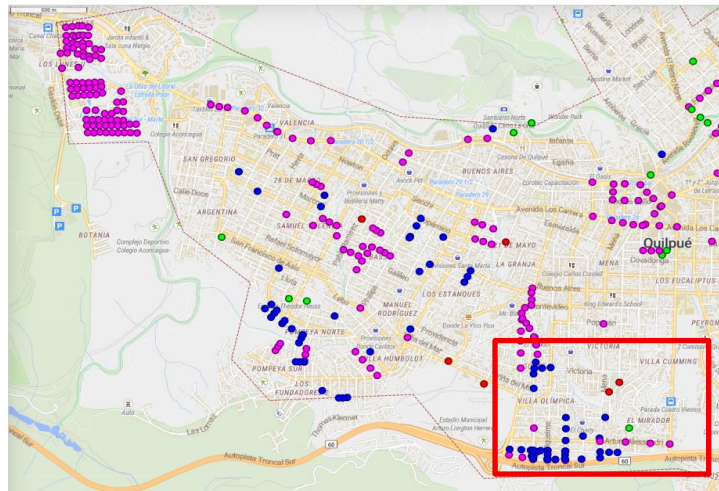


Figura 7. Extracto modelo ABM ciudad de Quilpué. GIS Map AnyLogic.

Se establece que el análisis usará para efectos del ejemplo arbitrariamente un radio de búsqueda de 300 metros y una distancia temporal de 3 años. Agencia central le asigna internamente a cada punto el radio de búsqueda para localizar vecinos de manera espacial como se muestra en la esquina superior izquierda de la Figura 8. Para el caso englobado por la circunferencia punteada se tiene que “A” corresponde a un proyecto de AP/AL que actúa como proyecto núcleo con mucho más presupuesto que su colindante “B” que es un proyecto vial, por último, “C” y “D” son proyectos de infraestructura pública y electricidad respectivamente. El proyecto sanitario, a partir del radio de búsqueda, encuentra los candidatos integrables “B”, “C” y “D”, como ninguno corresponde al mismo grupo que el proyecto núcleo por la primera restricción cumpliría, sin embargo, se permite que existan del mismo grupo pero que no represente a la mayoría, usualmente se permite 1 o 2 por paquete. En este caso “E” tendría ese papel, otro proyecto de AP/AL que no pone en riesgo la restricción impuesta en el modelo. Entonces juntos también cumplen la segunda restricción que es que los paquetes no superen la cantidad de 5 proyectos por carga física y administrativa que ya se mencionó anteriormente. Una vez que el modelo asegura eso, procede a hacer el análisis de la distancia temporal, verifica que “A” no este temporalmente más lejos de 3 años que cualquiera de los proyectos que se anexaran a la integración. Una vez se verifique eso, Agencia Central les señala a los agentes auxiliares de cada grupo señalando si es que alguno de los proyectos se debería atrasar o adelantar para coincidir temporalmente con el proyecto núcleo. La finalidad de tener un proyecto central es que este se convierte en un “ancla” y no cambia su calendarización, por otro lado, los proyectos a anexar son más pequeños tanto física como presupuestariamente que, en la práctica, son viables a recalendarizar sus respectivas ejecuciones en comparación con los más costosos. En caso de que algún proyecto del paquete no cumpla con lo anterior (por ejemplo, separado a 3.1 años) simplemente se descartaría del paquete y podría ser utilizado en otro que si cumpla.

De este modo se busca una calendarización agrupada y secuencial, por ejemplo, el proyecto “B” se debe ejecutar después que “A” ya que este último implica abrir zanja en la calle lo cual destruiría parte de lo que se pavimentó en “B” en caso de que se hubiese ejecutado antes. Si por cualquier motivo, en un estado original, “B” se realizara antes, el algoritmo será capaz de forzar que se mueva y se recalendarice.

Lo que busca lograr el modelo al mover los proyectos desde un escenario inicial (Figura 9 (a)) se pueda gestionar hacia un escenario secuencial con solapamiento entre proyectos para generar la ventana de oportunidad que ofrecería la posibilidad de tener un paquete de proyectos integrados como se ve en la Figura 9(b)¹

¹ Cabe destacar que los proyectos mostrados en la figura 9 no necesariamente son los mismos expuestos en la figura 8, es solo con fines ilustrativos.

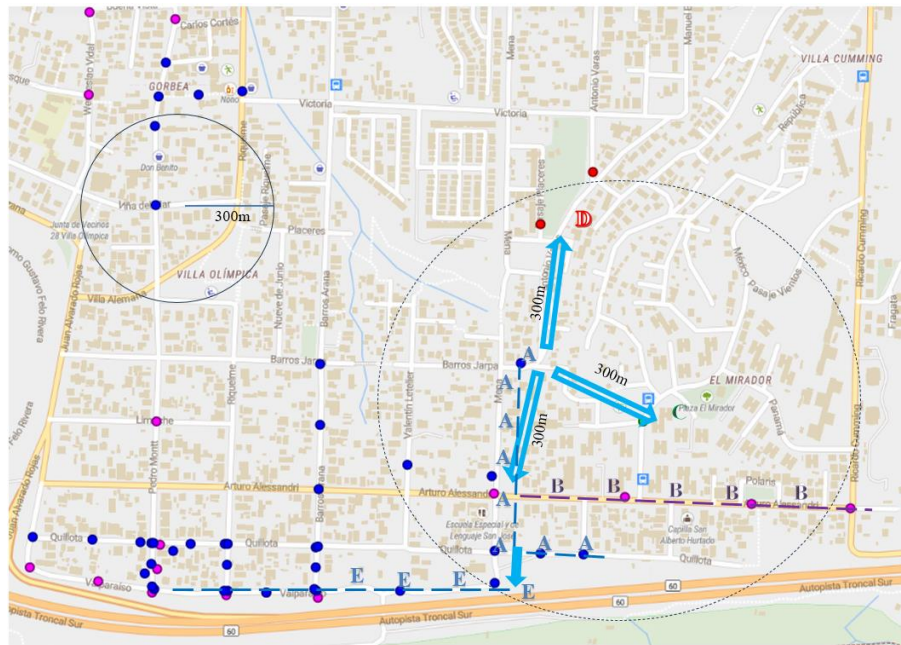
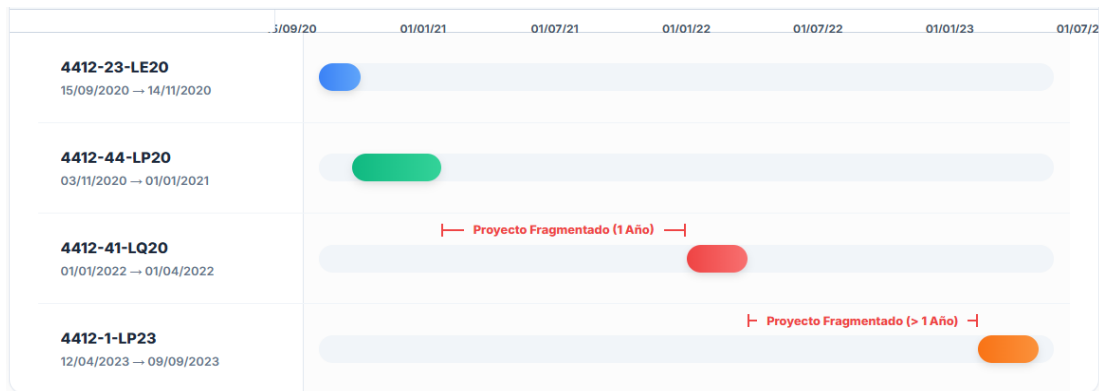
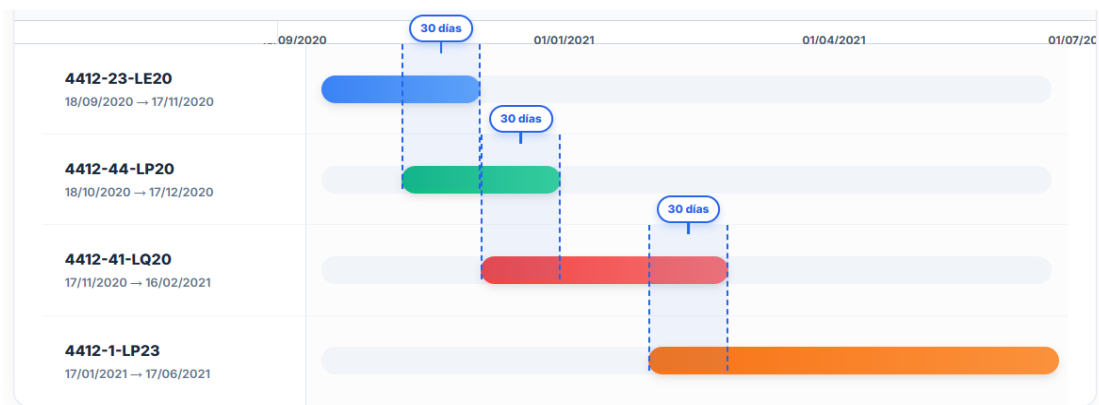


Figura 8. Extracto modelo ABM ejemplo escenario 1. AnyLogic.



Caso en Status Quo (a)



Caso optimizado (b)

Figura 9. Ejemplos de recalendarización de proyectos (a y b).

En el caso optimizado de la Figura 9 cada traslape tiene una duración mínima de 30 días extendiéndose a más si naturalmente los proyectos ya coinciden.

Escenario 2: Coordinación por Afinidad técnica

Este escenario introduce el concepto de compatibilidad técnica en donde se asume que resulta más fácil coordinar proyectos cuyas actividades planificadas sean un común denominador o complementarias. En este caso se aplicará un filtro adicional. El proyecto “A” solo considera a “B” si pertenece a un par compatible, adicionalmente, se cambia el enfoque de agrupación por paquetes a una gestión integrada por cadena (*chaining*).

Si el proyecto “A” es compatible con “B”, y el proyecto “B” compatible con “C” entonces {A, B, C} forman una cadena de coordinación, incluso si “A” y “C” no están cerca espacialmente entre sí. La afinidad actúa como eslabón, al detectar una conexión válida, el algoritmo “salta” al siguiente nodo y repite la búsqueda, expandiendo la cadena como una ramificación orgánica hasta que no encuentra conexiones válidas. Nuevamente, para evitar la saturación de la gestión, existe una restricción de conectividad máxima que limita a 4 conexiones extras, es decir, un proyecto puede estar conectado al eslabón principal antecesor y sucesor, y adicionalmente 2 proyectos que actuarían como ramificaciones que no corresponderían a la cadena principal de integración.

El procedimiento computacional para formar la o las cadenas es que, en una primera instancia, se consideran todos los proyectos como “nodos libres”, luego comenzaría la vinculación según afinidad (*Pairing*) que debe cumplir con el radio de búsqueda, la distancia temporal y la afinidad propiamente tal. Este proceso se repite recursivamente en un ciclo definido, en donde el sistema explora un “camino de decisión” diferente: prueba uniendo el proyecto “A” con el “B”, luego en la siguiente iteración prueba uniendo “A” y “C”, y así sucesivamente. Al finalizar el ciclo, el modelo no entrega el primer resultado viable, por el contrario, selecciona el que demostró generar el mayor ahorro de semanas de intervención.

Por otra parte, la tabla de compatibilidades a considerar es la siguiente:

Tabla 4. Pares de compatibilidad para escenario con afinidad técnica.

| Par compatible | Sinergia constructiva |
|--|---|
| Vialidad e Infraestructura pública | <p>-Al remodelar una plaza o directamente a construirla, se deben rehacer los accesos peatonales, incluyendo rebajes de solera y habilitar pasos de cebrera para el acceso a la plaza en una sola faena de hormigonado, asegurando que la cota del pavimento calce con la entrada.</p> <p>-La entrada a un parque suele impermeabilizar suelos o crear pequeños sumideros. Coordinarlo con la obra de pavimentación permite conectar los canales del parque al sistema de recolección de la calle.</p> <p>-Ambas obras generan un gran volumen de escombros, que, al coordinarse, pueden compartir la flota de camiones tolva y el vertedero autorizado, además de usar las mismas maquinarias o mano de obra para el despeje, optimizando el ítem de “retiro de material”.</p> |
| Infraestructura pública y Electricidad | <p>-La construcción de un parque o renovación de sedes municipales requiere de empalmes eléctricos tanto para su funcionamiento o estética en luminarias. Si se coordina con el mantenimiento de la red de media tensión del sector y permisos respectivos a Chilquinta (empresa privada de suministro eléctrico de la región),</p> |

| | |
|------------------------------------|---|
| | <p>se podrían dejar instalado un tablero o transformador (según sea el caso) justo cuando se esté haciendo la obra civil, evitando demoras extras en trámites.</p> <p>-En distintas ocasiones los postes y luminarias antiguas quedan “al medio” del diseño de la nueva plaza. La coordinación permite reubicar la postación antes de hormigonar el suelo, integrando así el diseño eléctrico con el arquitectónico del espacio público.</p> |
| AP/AL e Infraestructura pública | <p>-Un parque necesita una red de riego, coordinar con la sanitaria permite instalar la matriz de arranque o conectarse a una existente mediante los permisos correspondientes.</p> <p>-A veces, grandes colectores pueden colindar con la zona de construcción, si en el plan de la sanitaria debe renovar ese colector, sería el momento idóneo para renovar la plaza.</p> <p>-Por normativa, los espacios de reunión pública requieren grifos cercanos. Al renovar la vereda perimetral de un edificio público, se puede coordinar el cambio o instalación de grifos, compartiendo así, la rotura de acera y la reposición de baldosas.</p> |
| Vial y AP/AL | <p>-La empresa sanitaria realiza una zanja, abre el pavimento, cambia la tubería vieja y una vez se rellena y compacta la zanja, la empresa vial entra a colocar la carpeta asfáltica o de hormigón sobre el ancho de la calle. En vez de haber podido ser que la sanitaria deba romper el trabajo recién hecho de la pavimentación.</p> <p>-Antes de poner un pavimento nuevo, se revisarían todas las uniones domiciliarias a la red de alcantarillado, revisando fugas para repararlas proactivamente en conjunto con ESVAL (empresa privada de suministro de agua), evitando a largo plazo fugas ocultas que socaven el pavimento de forma leve (baches por lavado de finos) a los pocos meses de inauguración.</p> |

En la Figura 10, se encuentra un extracto del mapa GIS de AnyLogic correspondiente a la ciudad de Viña del Mar, en la cual se puede apreciar una serie de proyectos (ficticios) que se ejecutan en la zona. Se supondrá que el radio de búsqueda seleccionado es de 400 metros y una distancia temporal de 2 años (considere que la distancia física y temporal entre cada proyecto es consistente con los primeros filtros). En función de que tan pronto se ejecutará un proyecto, Agencia Central comienza a seleccionar proyectos para comenzar el barrido. Para el caso, se comenzó por “A”, este agente detectó que tiene dentro del radio de búsqueda a “B”, “C” y “D” (2 eléctricos y un vial respectivamente), luego consulta la lista de pares compatibles, en donde estima que “B” y “C” no podrían integrarse, pero “D” sí, entonces toma ese eslabón. “D” nuevamente busca el radio temporal y solo dispone de “E” el cual resulta ser par integrable y se adiciona a la cadena. Finalmente, “E” repite la secuencia y se logra integrar a su vez con “G” y “F”. Así sucesivamente hasta que no se puedan cumplir los límites físicos impuestos o por defecto, no se encuentren pares compatibles disponibles.

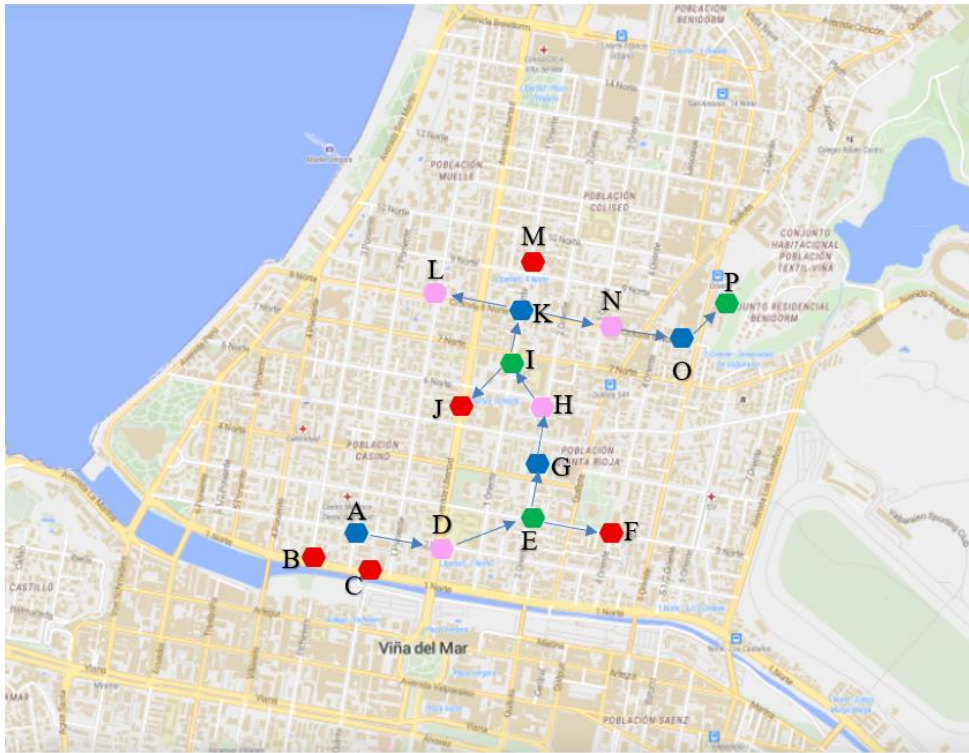


Figura 10. Extracto modelo ABM ejemplo escenario 2. AnyLogic

Si se analiza la cadena $\{A, D, E, G, F\}$ y en particular el nodo “E”, este cumple con los pares de integrables $\{E, G\}$, $\{E, D\}$, $\{E, F\}$. Ahora se supondrá que “D” se lleva a cabo en 2020, “E” en 2021 y tanto “G” como “F” en 2023. Si se revisa el par $\{E, D\}$ se llevan 1 año de distancia temporal y se podría pensar que “G” y “F” no cumplirían esta distancia temporal puesto que habrían 3 años de diferencia. Sin embargo, el modelo verifica este alcance con el eslabón anterior, “E” y con este cumple el requisito. En sí, Agencia Central revisa que el antecesor y el sucesor de la cadena cumplan con las restricciones, no con eslabones previos o futuros. Del mismo modo, en ningún momento “A” estaría siendo integrado con “E” pese a pertenecer a la misma cadena de integración, en resumen, la agrupación por cadena corresponde a integraciones locales que se entrelazan, pudiendo así, generar una integración escalada como la que se mostró en la Figura 9 integrando secuencialmente.

En la realidad de la simulación pueden estar interfiriendo más proyectos con más posibilidades de integración, lo que se evidencia en la Figura 10 corresponde a una iteración o un “camino” de concatenación de proyectos. Pueden existir más caminos por revisar para encontrar la o las cadenas óptimas de la zona de estudio lo cual es tarea de Agencia Central y su optimización.

Escenario 3: Integración Vertical

A diferencia de los escenarios anteriores que buscan una interoperabilidad entre distintos grupos o agencias, el escenario de integración vertical modela una estrategia de gestión basada en la eficiencia interna de cada organismo. Bajo este enfoque, la coordinación se restringe estrictamente a proyectos del mismo rubro. Los criterios de integración que rigen este escenario contemplan los mismos dos “basales” correspondientes a radio de búsqueda y distancia temporal, sin embargo, no se considera la regla de pares compatibles, sino que busca proyectos equivalentes. La agrupación de este caso es idéntica al escenario 1, formando paquetes de máximo cinco proyectos considerando 1 proyecto principal y 4 secundarios. La idea

de este escenario y la mecánica de integración no tiene un *modus operandi* distinto a los anteriores, salvo que, en vez de buscar cualquier proyecto o par compatible, solo debe encontrar proyectos del mismo grupo, pudiendo ser Vial-Vial, AP/AL-AP/AL, Eléctrico-Eléctrico, Inf. Pública-Inf. Pública.

Mecanismos de cálculo y motor de decisión.

El problema de agrupar N proyectos en K grupos (o cadenas) es un problema de complejidad combinatoria, calcular estas combinaciones para X proyectos y verificar todas las soluciones tomaría tiempo. Para resolver esto en gran medida, el modelo usa una heurística y estocástica de búsqueda aleatoria (Monte Carlo). En lugar de buscar la solución perfecta, el algoritmo genera miles de soluciones aleatorias rápidas (cumpliendo con las métricas exigidas) y se queda con la mejor. Por una parte, una búsqueda heurística es una estrategia aproximada para encontrar una solución “suficientemente buena” a un problema complejo, sin la necesidad de evaluar todas las combinaciones posibles y por parte estocástica se refiere a que el modelo se basa en procesos aleatorios y probabilísticos en donde no siempre se obtendrá el mismo resultado si se repite el algoritmo, sin embargo, estos resultados pueden asemejarse bastante en la práctica.

Se escogió el método Monte Carlo por sobre algoritmos exactos (como la programación lineal entera) debido a la incertidumbre inherente de los proyectos urbanos. Como lo indica Abu-Samra et al. (2020), en la gestión de infraestructura, la flexibilidad y la capacidad de explorar múltiples escenarios rápidamente es más valiosa que una precisión matemática absoluta sobre datos que suelen ser estimaciones.

En consecuencia, la arquitectura del modelo no opera simplemente como una caja negra de azar puro, sino como un sistema de filtrado jerárquico. El siguiente diagrama de flujo sintetiza esta estructura de escenarios, agentes y decisiones que aborda el modelo actualmente:

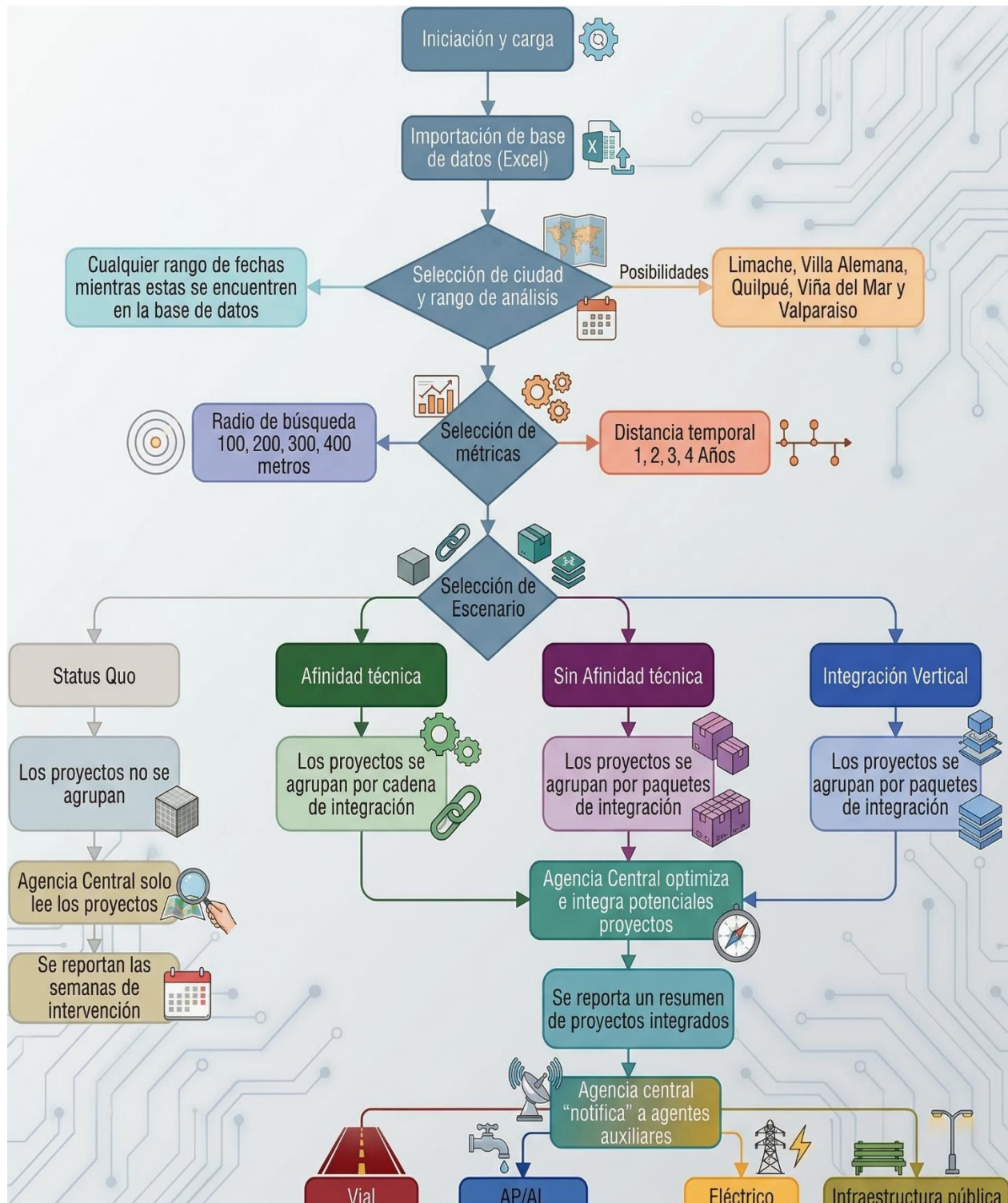


Figura 11. Diagrama de flujo resumido del modelo en AnyLogic.

4.4 Limitaciones

En primer lugar, es fundamental establecer que la investigación propone un modelo de carácter exploratorio, no predictivo del comportamiento de los proyectos en la región. Su objetivo es cuantificar el potencial teórico de la colocalización, lo que inherentemente requiere ciertas abstracciones espaciales. Una de las principales limitaciones geométricas es la omisión de la topografía natural; el uso de distancias euclidianas para agrupar proyectos resulta particularmente sensible en la Región de Valparaíso, donde dos obras pueden estar a 200 metros de distancia en el plano, pero separadas por una quebrada en casos costeros (como Viña del Mar y Valparaíso) o esteros en casos hacia el interior (como Quilpué y Villa Alemana). A esta simplificación espacial se le suma la ausencia de un “factor crítico vial”, lo que implica que el modelo valora de igual manera una semana de disrupción ahorrada en un pasaje vecinal de bajo tráfico que una arteria en plena ciudad, homogeneizando un impacto ciudadano que, en la realidad, es altamente asimétrico.

Por otra parte, el modelo opera bajo un escenario de fricción administrativa nula, asumiendo que las distintas agencias (como MOP, SERVIU, Sanitarias, etc.) siempre aceptarán coordinarse si Agencia Central lo sugiere. Esta premisa ignora la complejidad de los ritmos burocráticos dispares y las prioridades políticas de cada entidad. Estrechamente ligado a lo anterior, la simulación dota a los agentes de flexibilidades temporales en los proyectos que en ciertos casos estas están sujetas a la rigidez de los presupuestos de ejecución anual, como el Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) en donde la postergación o adelantamiento de los recursos y proyectos suele significar pérdidas.

Finalmente, el modelo carece de variables de incertidumbre operativa propias del ciclo de vida de los proyectos de ingeniería civil. A nivel de planificación, asume que la cartera proyectada se ejecutará tal y como está programada, ignorando la alta volatilidad de la visibilidad a futuro, en donde en ocasiones, las licitaciones quedan desiertas o sufren retrasos administrativos. A nivel de terreno, la simulación no incorpora variables estocásticas para modelar imprevistos comunes en la construcción como frentes de mal tiempo, paralizaciones de trabajadores o el propio mantenimiento o avería de las infraestructuras. Debido a todas estas abstracciones, el costo financiero real de la coordinación sigue siendo una interrogante, limitándose a estimaciones teóricas como en otras investigaciones; la validación empírica definitiva de los ahorros económicos propuestos por el modelo solo podrá materializarse en el futuro mediante la ejecución de proyectos piloto “gemelos”, donde se evalúe en terreno una obra con integración interinstitucional frente a otra ejecutada bajo el esquema tradicional chileno.

5. Resultados

5.1 Quilpué

El análisis cuantitativo de los escenarios de coordinación en la ciudad de Quilpué se realizó tomando como referencia la línea base de Semanas de Intervención (SDI) del Status Quo siendo esta de 1087.3 semanas de trabajo en los distintos proyectos en el periodo de 2020-2025. A continuación, se detallan los porcentajes de reducción de disrupción obtenidos para las distintas combinaciones de radio de búsqueda y distancia temporal.

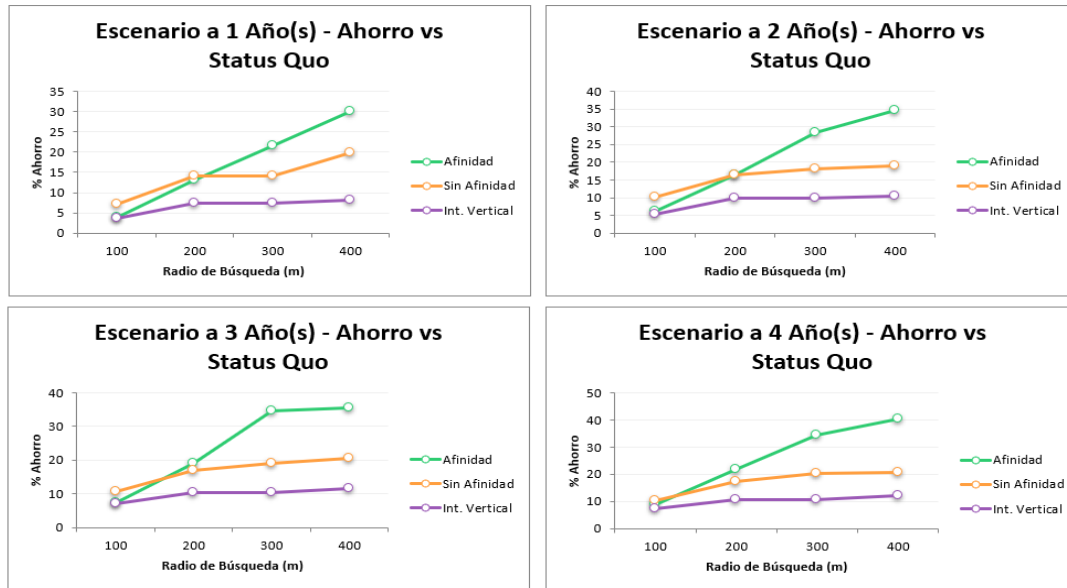
En el escenario de corto plazo ($T=1$), para los radios acotados de 100 y 200 metros, el escenario 1 (Sin Afinidad) demuestra una mayor eficiencia inicial, alcanzando un ahorro del 7.2% y 14.1% respectivamente, superando al escenario 2 (Afinidad) la cual registra un 3.9% y 13.2% en los mismos tramos. Sin embargo, esta tendencia se invierte al superar los 200 metros: en el radio de 300 metros, el escenario 2 salta a un 21.6% de ahorro sobrepasando con holgura el 14.1% del escenario 1, para finalmente consolidar su ventaja a los 400 metros con un 30.1% frente a un 19.9%.

Al extender el horizonte al mediano plazo ($T=2$), el punto de equilibrio se desplaza hacia radios menores. A los 200 metros, se registra un empate técnico exacto donde ambas estrategias (Afinidad y Sin afinidad) logran cerca de un 16.3% de reducción de disrupción. A partir de este punto, las curvas divergen significativamente a los 300 metros, la estrategia de Afinidad escala al 28.2%, estableciendo una brecha de más de 10 puntos porcentuales sobre la estrategia sin Afinidad, que se sitúa con un 18.0%. en el siguiente plazo ($T=3$) el comportamiento resulta ser similar que el anterior, con la misma tendencia.

En el largo plazo ($T=4$), la estrategia de Afinidad (escenario 2) consolida su dominio en radios amplios, registrando el máximo de toda la simulación de la zona con un ahorro del 40.4% para el radio de 400 metros. Esto contrasta con el comportamiento asintótico del escenario sin Afinidad, que encuentra un techo de rendimiento cercano al 20.6%, evidenciando una saturación de su capacidad de generar beneficios adicionales a pesar del aumento del tiempo y del radio.

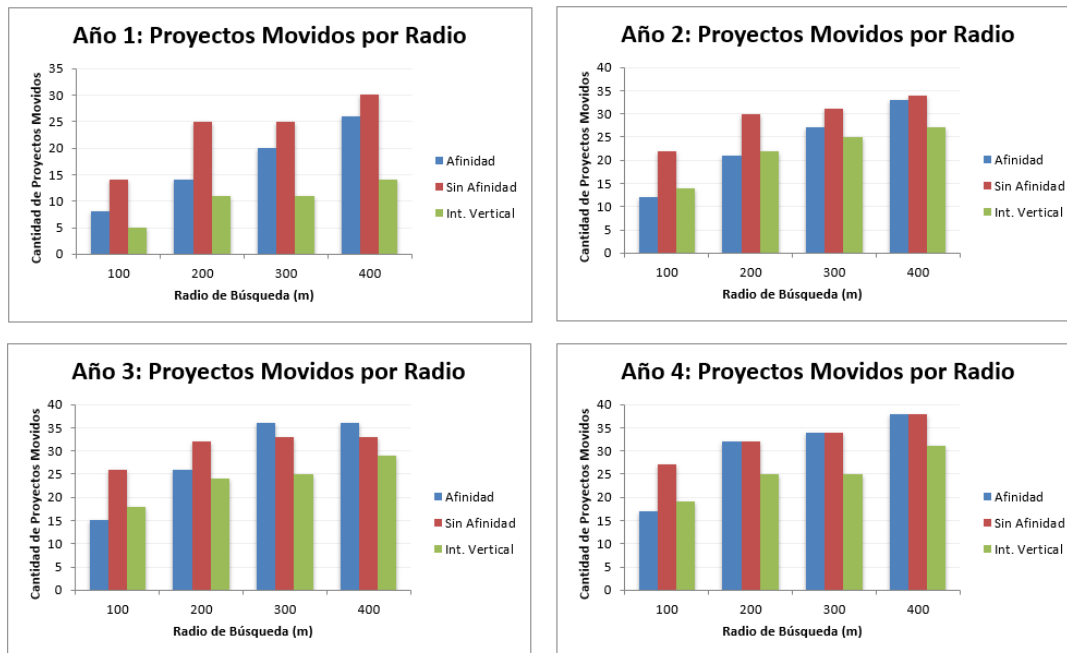
Finalmente, el escenario 3 (integración vertical) mantiene un comportamiento estable pero marginal a lo largo de todas las series temporales. Sus valores de ahorro oscilan en un rango acotado, partiendo de un mínimo de 3.7% ($T=1$, $R=100m$) y alcanzando un máximo de apenas 12.2% ($T=4$, $R=400m$). Este desempeño es consistentemente inferior al de las demás estrategias, situándose como la alternativa de menor impacto en la reducción de la disrupción social.

Gráfico 1 Resultados del modelo AnyLogic para la ciudad de Quilpué



Por otra parte, el análisis del volumen de proyectos desplazados temporalmente revela que la estrategia Sin Afinidad (Escenario 1) opera con la mayor intensidad de intervención en el corto y mediano plazo, movilizand o consistentemente una mayor cantidad de obras en radios reducidos debido a su mecánica de aglomeración por proximidad inmediata. En contraste, la estrategia de Afinidad (escenario 2), exhibe una tasa de desplazamiento incremental que solo iguala al escenario 1 en horizontes de largo plazo (T=4) y radios amplios. Por su parte, Integración Vertical mantiene los niveles más bajos de movilización de proyectos a lo largo de toda la simulación.

Gráfico 2. Proyectos movidos por radio en Quilpué



5.2 Viña del Mar

Los resultados de la dinámica de coordinación en Viña del Mar revelan una dominancia estructural del modelo de aglomeración simple (escenario 1: Sin Afinidad), el cual exhibe un rendimiento superior y sostenido a través de todas las escalas temporales y espaciales evaluadas considerando que el Status Quo es de 1742.1 semanas de intervención. A diferencia de lo observado anteriormente en Quilpué, donde las curvas se cruzan a largo plazo, en Viña del Mar la estrategia de empaquetamiento geográfico sin restricciones técnicas mantiene una brecha de eficiencia constante sobre la estrategia de Afinidad (escenario 2). Si se observa la Integración Vertical (escenario 3) muestra un comportamiento intermedio y estable, superando a la estrategia de Afinidad en la mayoría de los radios, pero sin lograr alcanzar los niveles de empaquetamiento que su rival técnico.

Si se observa el Gráfico 4 se muestra un patrón repetitivo y creciente dominado por el escenario 1 (Sin Afinidad). En el corto plazo ($T=1$), esta estrategia desplaza entre 32 y 42 proyectos a medida que el radio de búsqueda aumenta, superando con creces al escenario 2 (Afinidad) cuya tasa de movimiento es baja y estable oscilando entre 5 y 7 proyectos bajo el mismo tramo. Esta brecha se amplifica en el largo plazo ($T=4$), donde el escenario alcanza un pico de movilización de 56 proyectos a los 400 metros, en contraste con los 15 movilizados por el escenario 2. Por su parte, la Integración Vertical exhibe un comportamiento intermedio, con una tendencia de crecimiento lineal para los radios de 100 y 200 metros, sin embargo, se ve limitada y estancada para los radios de 300 y 400 metros, oscilando en total entre 11 y 33 proyectos movidos, ubicándose por encima de la estrategia de Afinidad en términos de volumen de proyectos intervenidos.

Gráfico 3. Resultados del modelo AnyLogic para la ciudad de Viña del Mar.

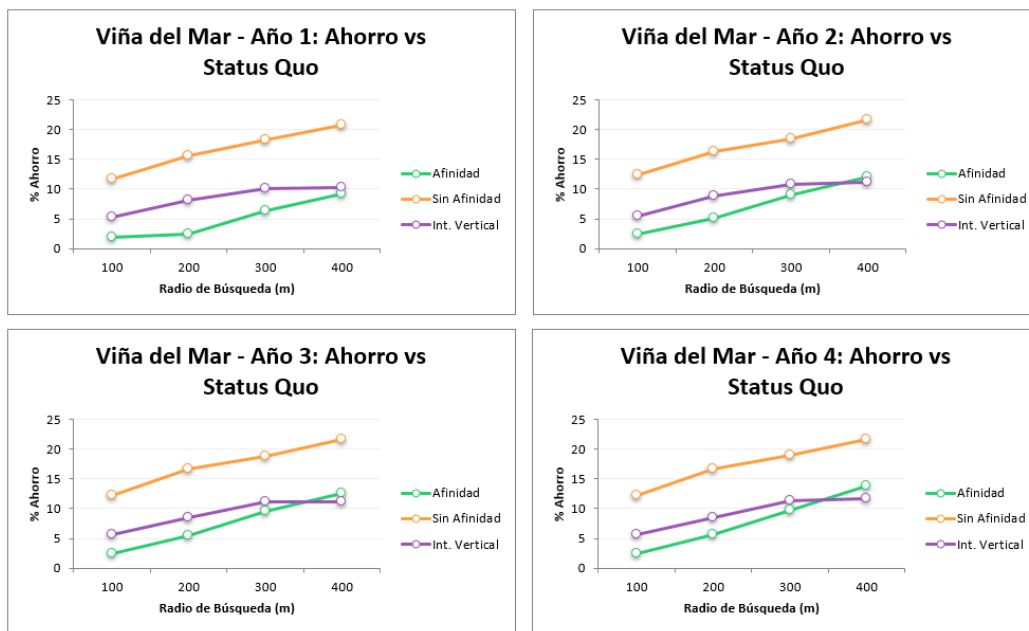
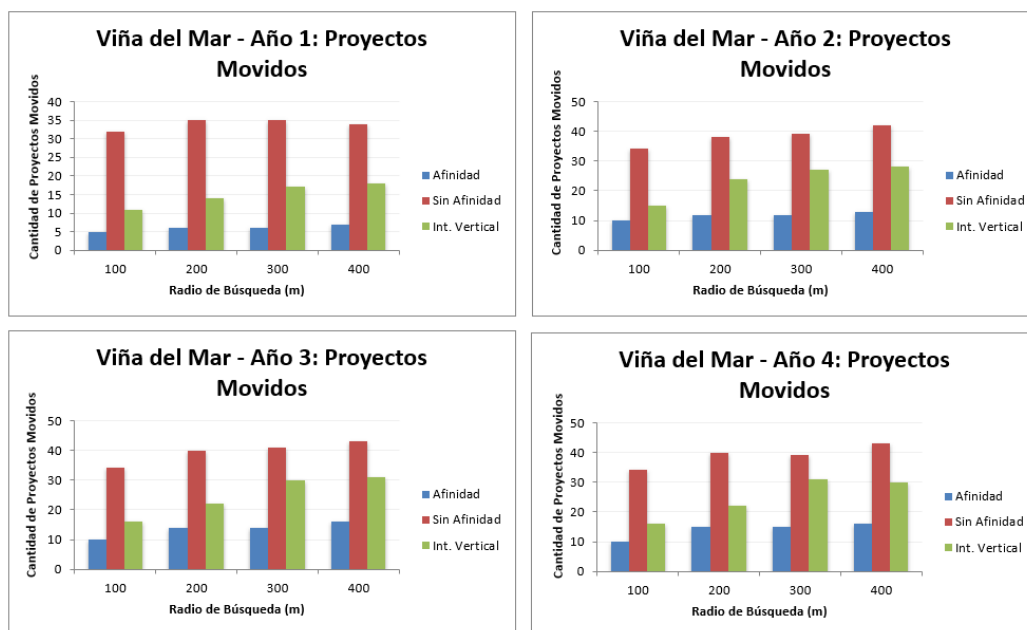


Gráfico 4. Proyectos movidos por radio en Viña del Mar

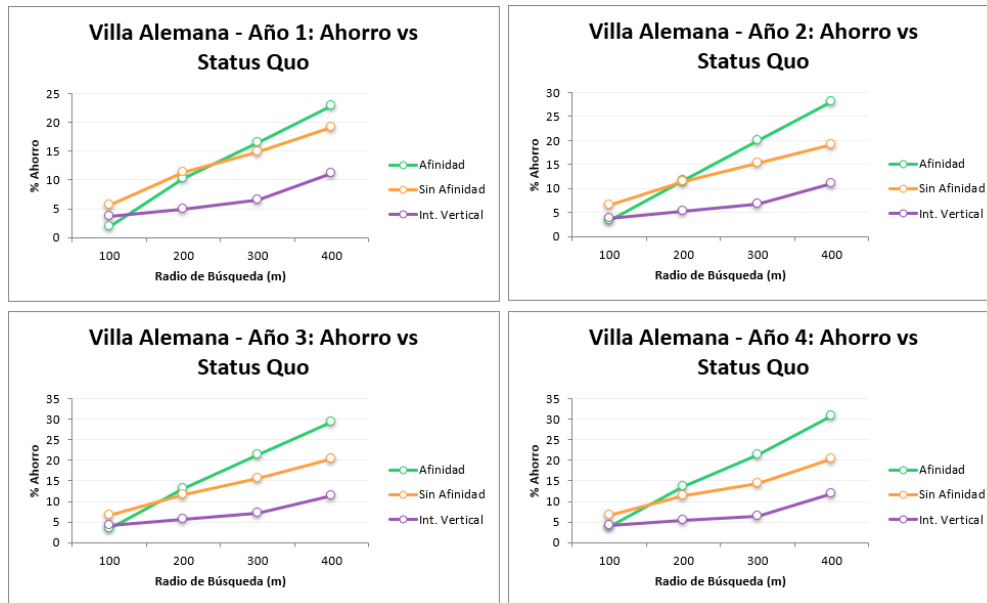


5.3 Villa Alemana

El desempeño de las estrategias de coordinación en esta ciudad, sobre la línea base de 1453.4 semanas de intervención, revela una competencia inicial equilibrada que deriva en una clara diferenciación a largo plazo. En los escenarios de corto plazo ($T=1$), la estrategia de agrupación por proximidad simple (escenario 1: Sin Afinidad) muestra una ventaja competitiva en pequeños radios, logrando un 5.7% de ahorro a los 100 metros frente al 1.9% de la estrategia de Afinidad. Sin embargo, esta ventaja se diluye rápidamente al ampliar el radio de búsqueda, donde ambas estrategias convergen en resultados similares tanto en $T=1$ y $T=2$ (alrededor del 10-11% a los 200 metros). Evidenciando que en etapas tempranas la comuna responde indistintamente a criterios de cercanía o compatibilidad técnica.

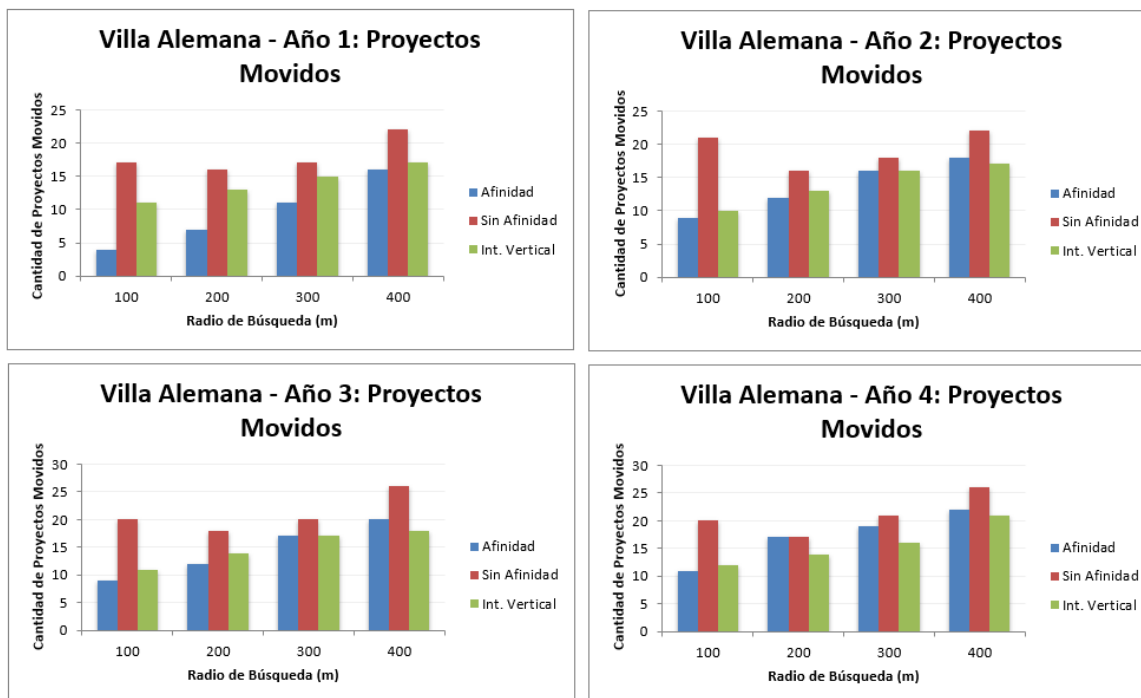
A medida que se extiende el horizonte temporal hacia los 3 y 4 años, emerge un patrón de divergencia significativo a favor de la coordinación técnica. El escenario 2 (Afinidad) rompe la tendencia de paridad y exhibe un crecimiento sostenido, casi de manera lineal, alcanzando su máximo rendimiento del 30.7% de ahorro en el escenario más favorable ($T=4$, $R=400m$) superando al escenario 1 por 10 puntos porcentuales aproximadamente. Por otro lado, la Integración Vertical (escenario 3) mantiene un perfil de bajo impacto constante, con ahorros que fluctúan entre el 3.7% y 11.9%, quedando así rezagada frente a las estrategias de integración multi-rubro.

Gráfico 5. Resultados del modelo AnyLogic para la ciudad de Villa Alemana.



Para el caso de los proyectos movidos (correspondientes al Gráfico 6), se revela una diferencia estructural significativa en la “intensidad operativa” de cada estrategia. El escenario Sin Afinidad se comporta como la estrategia de mayor fricción, movilizandoo el volumen más alto de proyectos en casi todos los radios y tiempos evaluados; por ejemplo, en el corto plazo ($T=1$) y radio de 100 metros, esta estrategia requiere mover 17 proyectos para funcionar, en contraste con Afinidad, que apenas desplaza 4 proyectos en el mismo tramo (obviando el porcentaje de ahorro que genera cada uno). Este comportamiento ocurre en los radios de búsqueda menores, sin embargo, en los siguientes años y radios tiende a estabilizarse y la diferencia entre ellos se reduce. La estrategia Sin afinidad alcanza un pico de 26 proyectos movidos, mientras que la estrategia de Afinidad gestiona la integración moviendo 22 proyectos. La integración vertical muestra un comportamiento intermedio y estable, oscilando entre 11 y 21 proyectos desplazados, situándose consistentemente por debajo de la estrategia de empaquetamiento de los otros 2 escenarios, pero para 100 metros supera a la estrategia de Afinidad. Esto confirma que el modelo Sin Afinidad depende de una perturbación extensiva del cronograma base, mientras que el modelo de Afinidad logra sus objetivos de coordinación interviniendo una fracción menor de la cartera total.

Gráfico 6. Proyectos movidos por radio en Villa Alemana.



5.4 Limache

Los resultados de la comuna de Limache, calculados sobre una línea base de 1105.2 semanas de intervención, evidencian una dinámica competitiva en las etapas iniciales que evoluciona a un claro contraste a una diferenciación técnica en el tiempo. Durante el primer año, se observa una leve superioridad del escenario 1 (Sin Afinidad) en radios acotados, logrando un ahorro del 7.6% a los 100 metros frente a su rival próximo de Afinidad con un 5.2%.

Sin embargo, al proyectar el análisis hacia el largo plazo ($T=4$), el comportamiento cambia drásticamente, revelando una superioridad de la coordinación técnica. La estrategia de Afinidad logra alcanzar un ahorro máximo del 37.3% para un radio de 400 metros. Y como ya se ha evidenciado en las comunas anteriores, la situación se vuelve reiterativa con el bajo impacto de Integración Vertical que, en el mejor de los casos, logra un ahorro del 17.4%. Estos datos confirman que, a medida que aumenta la escala de la red intervenida en Limache, la selectividad por actividades técnicas genera retornos crecientes que no logran ser replicados por los demás escenarios.

Por parte de los proyectos movidos que se pueden observar en el Gráfico 8, muestran una correlación directa y sostenida entre el aumento de radio de búsqueda y la cantidad de proyectos movilizados por la estrategia de Afinidad. En el corto plazo, este escenario desplaza entre 7 y 19 proyectos, siendo mayor que el escenario 1 (Sin Afinidad) que solo mueve entre 11 y 15 proyectos en los mismos rangos. Esta brecha se acentúa en el largo plazo, donde la estrategia de Afinidad alcanza un pico de movilización de 25 proyectos a los 400 metros. En cuanto a Integración Vertical mantiene un comportamiento intermedio y estable, con una tasa de desplazamiento que oscila entre 7 y 18 proyectos.

Gráfico 7. Resultados del modelo AnyLogic para la ciudad de Limache.

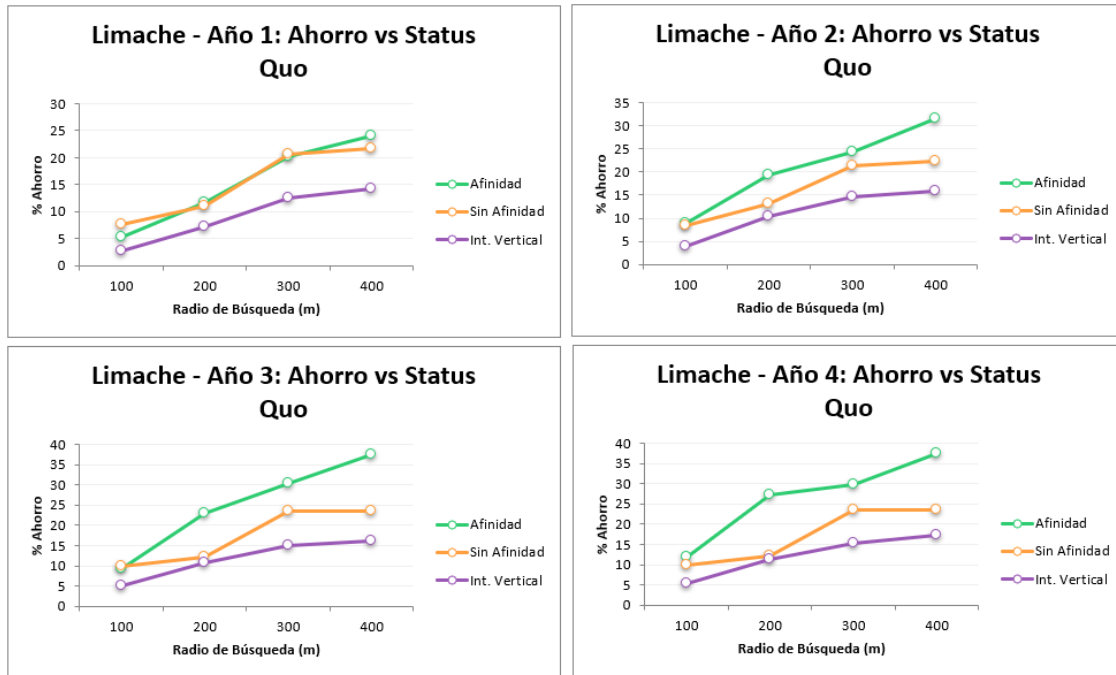
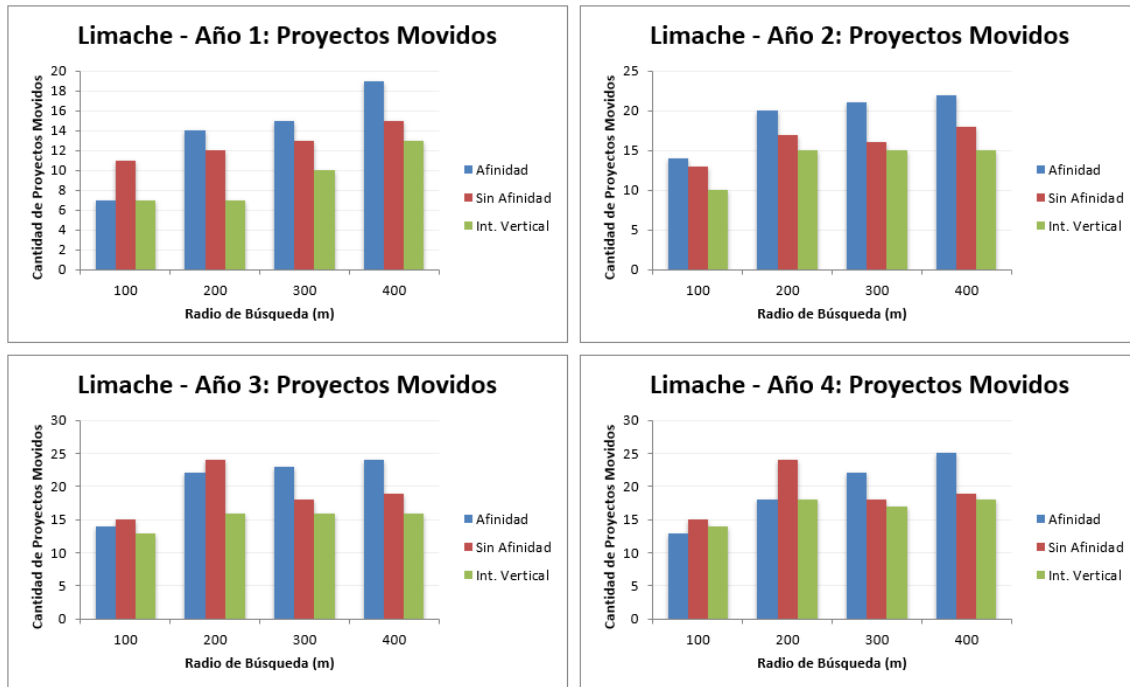


Gráfico 8. Proyectos movidos por radio en Limache.

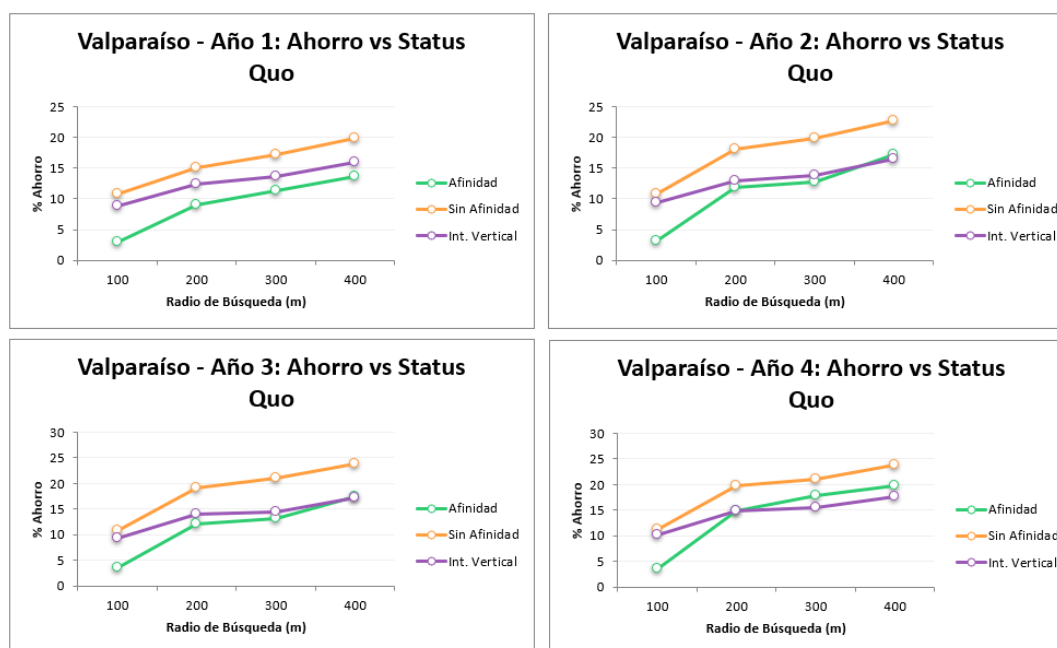


5.5 Valparaíso

Los resultados obtenidos para la comuna de Valparaíso se evalúan tomando como referencia una línea base de 1313.1 semanas de intervención. Durante el primer año de simulación y con un radio de búsqueda de 100 metros, la estrategia Sin Afinidad registró una reducción de los tiempos de intervención cercana al 11% en las mismas condiciones espaciales y temporales, el enfoque de Afinidad reporta un ahorro del 3%, posicionándose como el rendimiento más bajo. A su vez, la Integración Vertical muestra cifras intermedias, siendo mejor que la opción de Afinidad lo cual no se había reportado en las comunas anteriores.

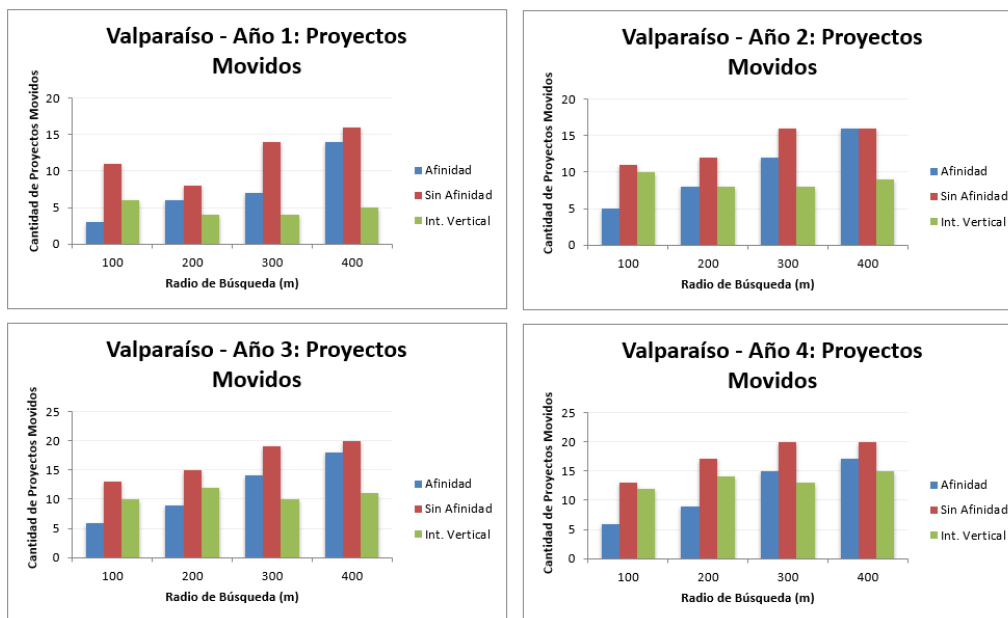
Al revisar los datos a largo plazo, las posiciones de cada estrategia se mantienen constantes y no presentan cruces. Llegando al cuarto año y extendiendo el perímetro a 400 metros, la estrategia Sin Afinidad continúa liderando en los porcentajes de ahorro. Respecto a la Integración Vertical, sus registros muestran un aumento durante las primeras expansiones de radio, pero luego sus valores tienden a estabilizarse, reflejando un estancamiento en la curva a pesar de contar con un mayor alcance espacial.

Gráfico 9. Resultados del modelo AnyLogic para la ciudad de Valparaíso.



En el Gráfico 10, el registro de proyectos desplazados en la comuna de Valparaíso indica que el escenario Sin Afinidad presenta el mayor volumen de movimientos. Durante el primer año y bajo un radio de 100 metros, este modelo interviene 11 proyectos, cifra superior a los 3 desplazados de la estrategia de Afinidad y los 6 de Integración Vertical. Al extender los parámetros se observa un incremento sostenido en la cantidad de obras movilizadas por todas las estrategias. Sin Afinidad mantuvo la mayor tasa de intervención a lo largo de las variaciones espaciales y temporales, mientras que la estrategia de Afinidad exhibe un incremento que acorta gradualmente la diferencia numérica a medida que se dispone de más área de búsqueda. Finalmente, la Integración Vertical muestra un comportamiento más rígido, registrando volúmenes estables en el desplazamiento respecto a la programación original durante la simulación.

Gráfico 10. Proyectos movidos por radio en Valparaíso.



Para evaluar la viabilidad real de las estrategias de integración en los distintos municipios, no basta con observar el volumen bruto de semanas ahorradas o la cantidad absoluta de proyectos desplazados de manera aislada. Por ello, se introduce un tipo de eficiencia logística, calculada como el ratio directo entre las semanas de intervención ahorradas y el número de proyectos que debieron ser movidos de su cronograma original para lograr dicho ahorro. Conceptualmente, este indicador representa el “cuánto cuesta llevar a cabo la integración” dado que alterar la fecha de ejecución o licitación generaría un costo de tramitación y fricción administrativa alto, entonces una estrategia exitosa debe maximizar el tiempo ganado para la ciudad minimizando la alteración de las carteras. De este modo, al interpretar los gráficos de eficiencia de cada comuna (disponibles en los Anexos A, B, C, D, y E) se podrá identificar los escenarios verdaderamente pragmáticos. Una estrategia puede representar un gran ahorro total de semanas, pero si su ratio es bajo, significa que exige mucho esfuerzo en lograr dicha integración. Por el contrario, aquellos escenarios que logren una alta tasa de semanas ahorradas por cada proyecto movido se erigen como las más eficientes para el Estado.

A modo de ejemplo, si se observa el Gráfico 9, específicamente el año 3 y 400 metros de radio, se puede apreciar que tanto como Integración Vertical y Afinidad oscilan alrededor del 17% del ahorro, entonces cabe la duda ¿Cuál sería mejor en estos casos? En el Anexo C estaría la respuesta, en donde para el caso particular expuesto, Integración Vertical posee un ratio de 18.9 frente al escenario Afinidad de 14.6, considerando lo anterior, la recomendación política sobre que estrategia elegir bajo ese contexto sería Integración Vertical, dado que su ratio es mayor, indica que para lograr ese mismo 17% de ahorro necesita mover o reorganizar menos proyectos que el caso Afinidad por la naturaleza de su modo de integrar.

6. Discusión

El desarrollo y la implementación del modelo ABM aplicado a la cartera de inversión pública de la Región de Valparaíso ha generado resultados que van más allá de la simple validación de la hipótesis inicial. Los datos no solo validan matemáticamente que la coordinación interinstitucional genera eficiencias operativas y sociales, sino que revelan una fenomenología dependiente del contexto geográfico y de los parámetros espacio-temporales aplicados.

6.1 Evaluación de los escenarios de integración

El análisis detallado del comportamiento de las cinco municipalidades estudiadas revela que el paradigma de la colocalización y la gestión integrada no opera bajo un principio de “solución única” o algún modelo de estandarizado universal. La innovación central del modelo radica en someter a prueba a 4 escenarios o lógicas de integración distintas. El rendimiento dispar de estos cuatro enfoques ofrece la respuesta empírica a los debates teóricos sobre la gestión de activos.

En primer lugar, el sistemático bajo rendimiento del escenario de Integración Vertical resulta ser uno de los hallazgos más reveladores del estudio. A lo largo de las iteraciones en todas las comunas, el intento de simular una optimización intrainstitucional, es decir, coordinando únicamente obras de la misma naturaleza estricta, como el Ministerio de Obras Públicas (MOP) agrupando solo vialidad con vialidad, entregó resultados en su mayoría marginales, rara vez logrando superar a las otras estrategias. Este comportamiento demuestra cuantitativa y concluyentemente que la eficiencia urbana no recae en la simple mejora de los procesos internos de cada rubro. El aislamiento sectorial, incluso cuando se optimiza cronológicamente, agota rápidamente sus oportunidades de mejora espacial. Este hallazgo valida la crítica de Ouyang (2014) sobre la ineficiencia de operar en “silos”, por mucho que una agencia optimice su propia red, el espacio tridimensional del subsuelo es compartido, y la rotura asfáltica seguirá ocurriendo si no se dialoga con el vecino subterráneo.

En segundo lugar, se encuentra la estrategia de Afinidad, en donde, al observar el comportamiento de la zona interior (Quilpué, Villa Alemana y Limache), esta demuestra que a medida que los parámetros del modelo se expanden hacia un horizonte temporal estratégico (3 a 4 años) y un radio de búsqueda más amplio (300 a 400 metros), la Afinidad toma la delantera de manera disruptiva. En este escenario paramétrico expandido, alcanza ahorros máximos que llegan entre el 37-40% respecto al escenario de Status Quo. Este fenómeno de rendimientos crecientes se explica por la mecánica algorítmica de encadenamiento (*chaining effect*). Al otorgar más tiempo y espacio, los agentes logran sortear los vacíos que hay entre proyectos, pudiendo tejer ramificaciones logísticas eficientes. Desde una perspectiva institucional, la Afinidad responde directamente a los postulados de Araya y Vasquez (2022) y Shahata et al. (2022) sobre la fricción burocrática. Al hacer que se agrupen disciplinas que comparten normativas de construcción, es altamente probable que las empresas integradas puedan quedar bajo un único contrato estandarizado. Esto eliminaría la necesidad de redactar complejos acuerdos entre múltiples empresas privadas o inclusive con ministerios. Por ello es que este enfoque se perfila como la alternativa política más viable y realista a mediano plazo.

En tercer lugar, el escenario Sin Afinidad lleva a la integración a su límite teórico, emulando la política internacional estadounidense conocida como “*Dig once*” (excavar solo una vez). Esta heurística permite la agrupación de cualquier tipo de proyecto que coincida en el espacio y tiempo, mezclando vialidad, agua, saneamiento y energía en una sola zanja. Esta estrategia resulta ser dominante en comunas del “eje costero” (Viña del Mar y Valparaíso). En casos urbanos densamente poblados, la superposición geométrica de las redes es tan elevada que agrupar obras simplemente por su coincidencia en coordenadas resulta ser matemáticamente superior.

6.2 Mirada regional

Al escalar la lupa analítica desde el espacio municipal a una visión macro de la región, el modelo de simulación permite identificar disparidades territoriales que resultan ser de observación para la correcta formulación de futuras políticas públicas de desarrollo urbano. La principal lección a escala regional que se extrae de los resultados es que la imposición de una directriz unificada y estandarizada de integración total para todas las provincias constituiría un error en la gestión de la planificación.

Las municipalidades costeras que componen el núcleo duro del área metropolitanas exhiben un ecosistema de infraestructuras maduro, denso y crónicamente congestionado. En estas municipalidades, el espacio físico es la limitante absoluta. La compleja topografía accidentada de los cerros porteños y la estrechez del plan viñamarino, sumando a factores de riesgo de zonas de inundación obligan a que estas líneas vitales de las urbes discurran por los mismos ejes estructurantes. Para este territorio, la evidencia sugiere que los Gobiernos Regionales (GORE) deberían adoptar políticas de integración masiva. En este escenario, el Estado o algún agente coordinador debe asumir el costo burocrático, legal y de diseño conjunto que implicaría sentar a diferentes agencias en una mesa de licitación para determinadas oportunidades de integración. El retorno de esta inversión, medido en la liberación de las saturadas vías, compensaría el desgaste administrativo inicial.

Por el contrario, el “eje interior” exhibe una morfología distinta, caracterizada por un crecimiento paulatino, menos concentrado y con amplias zonas de consolidación residencial reciente o directamente, en activo desarrollo. En estas zonas periféricas, forzar integraciones en radios de búsqueda pequeños resulta logísticamente ineficaz debido a la menor densidad de redes. La gobernanza regional para la provincia de Marga Marga deberá enfocarse, en cambio, en la planificación a mediano plazo. Las directrices de las Secretarías Regionales Ministeriales (SEREMI) deberían orientarse a fomentar la creación de las “cadenas de afinidad técnica” demostradas por el modelo.

Por último, la mirada regional exige sincerar las profundas fricciones de la mecánica financiera y legal del aparato estatal chileno. El modelo ABM ha demostrado que para generar ahorros cercanos al 35% de disrupción, se debe disponer de un horizonte logístico dinámico de al menos 4 años, permitiendo el adelanto y retraso estratégico de obras. Sin embargo, la realidad dicta que una parte de la inversión en infraestructura depende de la asignación FNDR y de fondos sectoriales que poseen glosas de ejecución muy estrictas. La ejecución de la cartera pública obedece, en la práctica actual, a la urgencia política y administrativa de “gastar el presupuesto asignado antes del 31 de diciembre” para evitar así la pérdida de recursos o penalización presupuestaria para el año venidero. Este marco normativo incentiva la ejecución rápida, individual y aislada por sobre la coordinación estratégica meditada. Por lo tanto, la principal barrera regional que devela indirectamente el modelo no es de carácter ingenieril ni matemático, sino legislativo y procedimental.

6.3 Contribución práctica

La principal contribución práctica de esta investigación es la superación de la barrera analítica en la planificación urbana nacional, otorgando a los tomadores de decisiones a nivel gerencial, técnico y político una métrica cuantificable, objetiva y directamente centrada en el bienestar del ciudadano: las semanas de intervención.

Históricamente, los intentos teóricos de implementar una coordinación interinstitucional en la administración pública han chocado contra la incapacidad de la academia y la ingeniería para responder a la gran interrogante financiera y logística fundamental: ¿Cuánto gana realmente la ciudad si las agencias incurren en el esfuerzo burocrático de cooperar? Al carecer de un número duro y empíricamente

defendible que justifique el desgaste de redactar bases de licitación conjuntas, compartir garantías, asumir riesgos contractuales cruzados y alinear cronogramas, los funcionarios públicos optan de manera lógica por el camino de la menor resistencia: la ejecución tradicional en compartimientos estancos (Status Quo). Al introducir la métrica de las SDI como un indicador de rendimiento urbano, esta investigación logra traducir las abstracciones geométricas de la interferencia de zanjas en un argumento de política pública. Reducir las SDI significa concretamente menos calles cortadas, menor accidentabilidad vial, disminución de la quiebra del comercio local por faenas prolongadas frente a sus vitrinas.

En este sentido, el modelo ABM programado en AnyLogic no debe entenderse meramente como un experimento académico aislado, sino que está diseñado estructuralmente para operar como una plataforma de “prueba de concepto” activa. Posee potencial de evolucionar hacia una herramienta de negociación institucional. En el largo plazo, los Gobiernos Regionales, los alcaldes y directores del SERVIU pueden utilizar esta arquitectura para ingresar sus propias carteras de proyectos en un formato simple de bases de datos, modificar los parámetros de tolerancia temporal y radio según sus limitaciones geográficas legales, y visualizar en cuestión de minutos de manera estimativa la cantidad de semanas de interrupción que le ahorrarán a la comunidad.

6.4 contribución teórica

Al distanciarse de los enfoques tradicionales que priorizan el ahorro financiero directo, este trabajo posiciona las SDI como métrica central para cuantificar de manera aproximada el verdadero costo social de la fragmentación institucional. Esta reorientación permite que el modelo dialogue en cierta forma con otros estudios internacionales, como el de Abu-Samra & Amador (2019); si bien dichos autores reportan reducciones del 72% (traducidas en millones de horas) al evaluar ciclos de vida idealizados de 25 años, la presente simulación demuestra que aplicar estas heurísticas en ventanas operativas reales de hasta 4 años genera una densidad de optimización proporcionalmente comparable (considerando que en el caso de 25 años, existirán múltiples concentraciones de proyectos llevando a más oportunidades de integración). En consecuencia, el valor fundamental del estudio no recae en la invención de un nuevo algoritmo matemático, sino en demostrar que la reorganización estratégica en periodos alcaldicios podría ofrecer un retorno social, justificando así esta modernización de las maneras de gestionar los proyectos en Chile a nivel regional y municipal.

Finalmente, a nivel de diseño, los resultados derivados de la investigación otorgan la evidencia técnica y cuantitativa necesaria para justificar la creación de una Agencia Integradora, un concepto largamente discutido en las fases cualitativas de la literatura moderna de la gestión urbana. Si la matemática de la simulación demuestra que es posible generar un tipo de rebaja cercano en promedio al 35% en el tiempo físico de obras, resulta técnica e indefendiblemente mantener una separación de las distintas agencias en la región. Esta nueva agencia central propuesta reiteradas veces no necesitaría ejecutar físicamente las obras con sus propias cuadrillas como si fuesen cuadrillas municipales, sino que debería poseer la potestad legal vinculante para actuar en la capacidad de retener la aprobación de los permisos de rotura de pavimentos hasta que se verifique que no exista ninguna entidad que tenga planificado intervenir en ese radio espacial durante la ventana de coordinación estipulada. La implementación práctica de los postulados de este modelo representaría, en definitiva, la transición desde una gestión urbana reactiva hacia una planificación estratégica verdaderamente centrada en la resiliencia de la ciudad.

7. Conclusiones

El diagnóstico del estado de la práctica confirma que la gestión fragmentada, operando bajo lógicas institucionales de silos, es estructuralmente ineficiente. Al someter esta realidad a los escenarios simulados queda demostrado por parte de ahorro en semanas, que los intentos de una optimización intrainstitucional (o Integración Vertical) son insuficientes para resolver el problema, logrando ahorros marginales y evidenciando que el verdadero salto cuantitativo en la modernización de la política de Estado reside casi en su totalidad, en el cruce intersectorial de las obras públicas.

Los resultados basados en los escenarios propuestos han demostrado, además, que no existe una estrategia de integración universal para toda la región. Para las comunas costeras densas y congestionadas, la estrategia Sin Afinidad es la única vía capaz de maximizar el ahorro. Sin embargo, en comunas de crecimiento, la Afinidad técnica, en su caso, probó ser superior bajo la misma métrica.

Estos hallazgos fundamentan una recomendación clara de la política pública: la viabilidad de la gestión integrada de infraestructura requiere de una flexibilidad temporal y presupuestaria que el actual sistema chileno no posee. La investigación justifica de manera matemática y técnica la necesidad de transitar hacia horizontes de planificación y ejecuciones plurianuales, así como la pertinencia de establecer una Agencia Integradora Central que posea facultades para coordinar y hacer converger los esfuerzos de los distintos municipios y empresas privadas. Si bien el modelo ABM desarrollado marca un precedente en la cuantificación de las SDI, su carácter exploratorio abre la necesidad de acercar esta simulación a la complejidad operativa de la ingeniería civil en futuras investigaciones. Para lograrlo, un primer paso será avanzar hacia una representación geométrica y espacial más avanzada. La integración del modelo con GIS permitiría ingresar los proyectos como polígonos o líneas exactas en lugar de una serie de puntos coordenados, lo que podría habilitar el cálculo de traslapes volumétricos reales en casos de zanjas y la incorporación de la topografía natural para evitar la agrupación de obras que, aunque cercanas en el plano, se encuentren divididas por accidentes geográficos. En la misma línea de realismo operativo, el modelo podría acoplarse con herramientas de microsimulación de tráfico para evaluar como la colocación de obras satura vías o genera bloqueos dinámicos (en el software AnyLogic también podría implementarse), identificando así, zonas críticas en donde la intervención simultánea de proyectos podría no llevarse a cabo por normativa o colapso vehicular. Asimismo, la ejecución de las obras debe modelarse incorporando variables estocásticas y de incertidumbre propias de la construcción, asignando, por ejemplo, distribuciones de probabilidad para eventos adversos y ajenos al proyecto, con el objetivo de entregar un grado de confiabilidad superior a los resultados temporales.

Por otro lado, la conceptualización del ahorro logístico debe expandirse para incluir los principios del *Asset Management* (gestión de activos). Dado que el modelo actual premia la postergación de proyectos en pos de lograr una mejor integración en algunos casos, resulta necesario que futuras versiones introduzcan un tipo de penalización a este movimiento. Esta penalización deberá cuantificar tanto el riesgo de deterioro o falla estructural inminente de un activo al ser retrasado (para los casos de mantenimiento), como el costo social que asume una comunidad al ser privada de una mejora o reparación de su entorno durante el tiempo de postergación, apuntando hacia un equilibrio entre el ahorro de la integración con los beneficios propios de la ciudadanía circundante a la integración por realizar.

Finalmente, para que esta arquitectura ABM se consolide como una herramienta de la toma de decisiones, debe, en un futuro, someterse a restricciones presupuestarias dinámicas. Simular el caso actual, que es la asignación de presupuestos anuales finitos y tratar de que los municipios puedan competir o negociar estos fondos permitiría evaluar la resiliencia de la coordinación bajo un estrés financiero más real. El perfeccionamiento de todas estas variables tiene como fin último permitir que las autoridades puedan

utilizar un símil del modelo para diseñar y calibrar nuevos mecanismos de gestión y financiamiento público, tales como glosas especiales que exijan la coordinación como requisito para la adjudicación de fondos, o que premien financieramente a aquellas municipalidades que demuestren una planificación urbana verdaderamente integrada.

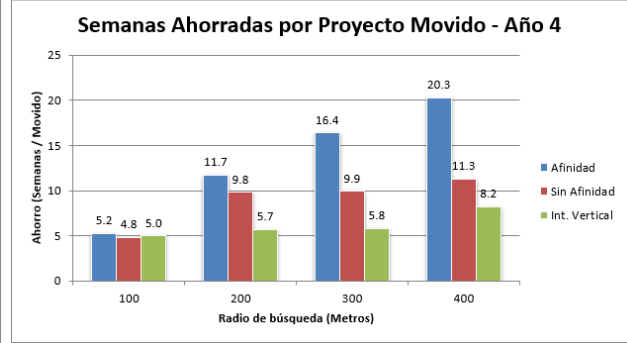
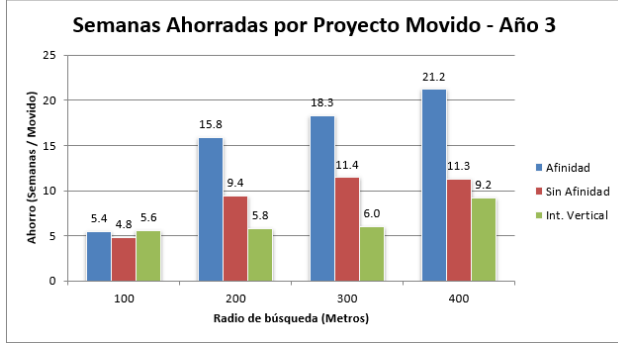
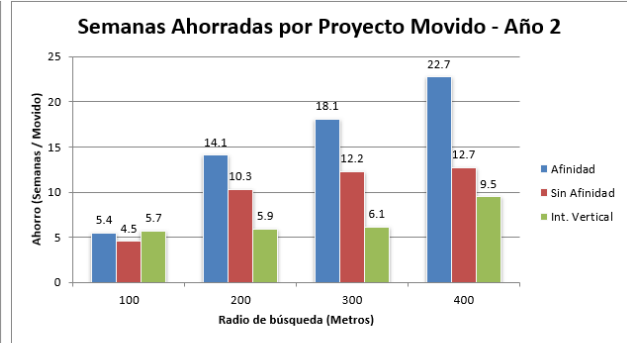
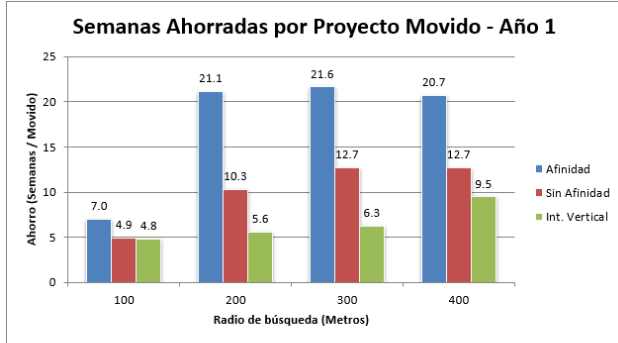
8. Referencias

- 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)
- Abu-Samra, S., & Amador, L. (2019). *Performance-based contracts and multi-objective optimization framework for coordinated infrastructure*. CSCE Annual Conference, Laval (Greater Montreal), QC, Canadá.
- Araya, F., & Vasquez, S. (2022). Challenges, drivers, and benefits to integrated infrastructure management of water, wastewater, stormwater and transportation systems. *Sustainable Cities and Society*, 82, 103913. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103913>
- Araya, F., Vasquez, S**, Spearing, L. and Sierra, L. (2026). Exploring Metrics to Evaluate Integrated Infrastructure Management of Water, Wastewater, and Transportation Infrastructure using Agent Based Modeling. *Journal of Infrastructure Systems*. <https://doi.org/10.1061/JITSE4/ISENG-2882>
- Daulat, S., Roghani, B., Langeveld, J., Rokstad, M. M., & Tscheikner-Gratl, F. (2024). Metrics to quantify the degree of co-location of urban water infrastructure. *Water Science & Technology*, 90(1), 168-185.
- Goodman, R. E., & Hastak, M. (2015). *Infrastructure planning handbook: Planning, engineering, and economics*. McGraw-Hill Education.
- Grafius, D. R., Varga, L., & Jude, S. (2020). Infrastructure interdependencies: Opportunities from complexity. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(4), 04020036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000575](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000575)
- Halfawy, M. R. (2008). Integration of municipal infrastructure asset management processes: Challenges and solutions. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22(3), 216-229. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3801\(2008\)22:3\(216\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3801(2008)22:3(216))
- Manny, L. (2023). Socio-technical challenges towards data-driven and integrated urban water management: A socio-technical network approach. *Sustainable Cities and Society*, 104360. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104360>
- Manny, L., Angst, M., Rieckermann, J., & Fischer, M. (2022). Socio-technical networks of infrastructure management: Network concepts and motifs for studying digitalization, decentralization, and integrated management. *Journal of Environmental Management*, 318, 115596. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.115596>
- Minaei, A., Abu-samra, S., Hajibabaei, M., Savic, D., Zecchin, A. C., Creaco, E., & Sitzenfrei, R. (2024). Optimized phased planning for dynamic rehabilitation of integrated municipal infrastructure. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(7), 1389-1405. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.083>

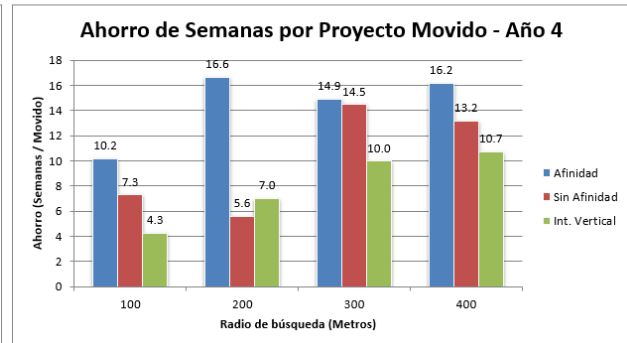
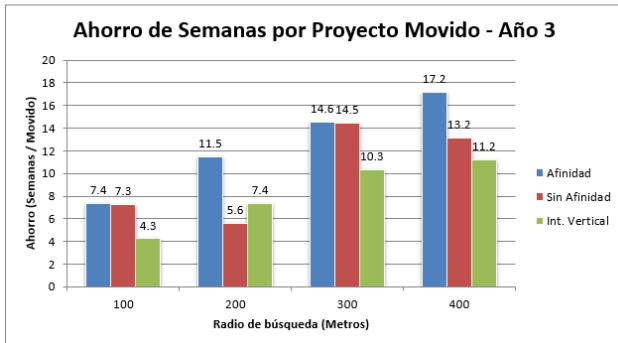
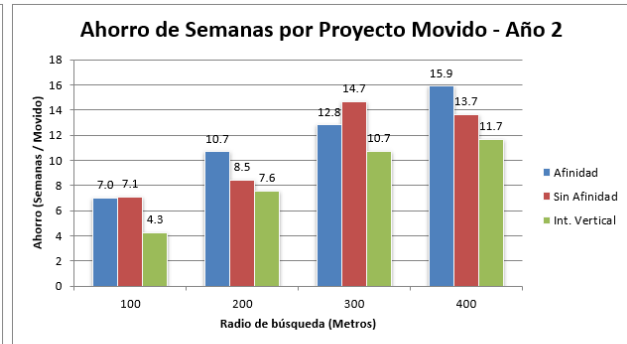
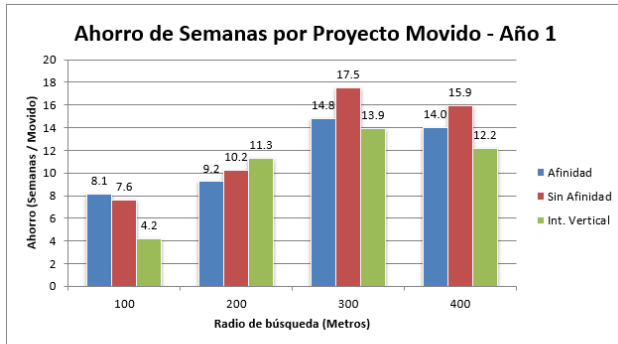
- Ministerio del Interior. (2006). Ley 18695: Fija el texto refundido, coordinado y sistematizado de la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/2f703>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2008). Ley 20285: Sobre acceso a la información pública. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/2f6v1>
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2014). Ley 20730: Regula el lobby y las gestiones que representen intereses particulares ante las autoridades y funcionarios. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://bcn.cl/2f7k8>
- Osman, H. (2012). Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities. *Automation in Construction*, 28, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.004>
- Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 43-60. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.06.040>
- Rinaldi, S. M., Peerenboom, J. P., & Kelly, T. K. (2001). Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(6). <https://doi.org/10.1109/37.969131>
- Shahata, K., El-Zahab, S., Zayed, T., & Alfalah, G. (2022). Rehabilitation of municipal infrastructure using risk-based performance. *Automation in Construction*, 140, 104335. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104335>
- Vásquez Ávila, S., & Araya, F. (2023). Identifying the level of development of integrated urban infrastructure management practices in Chile. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 239. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0503-2_30

9. Anexos

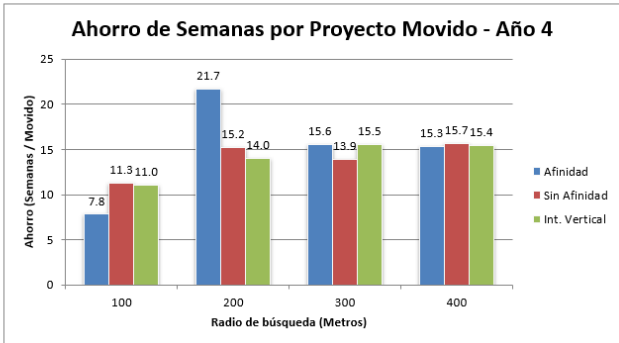
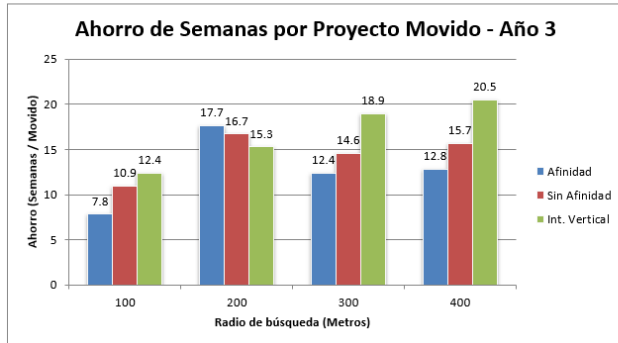
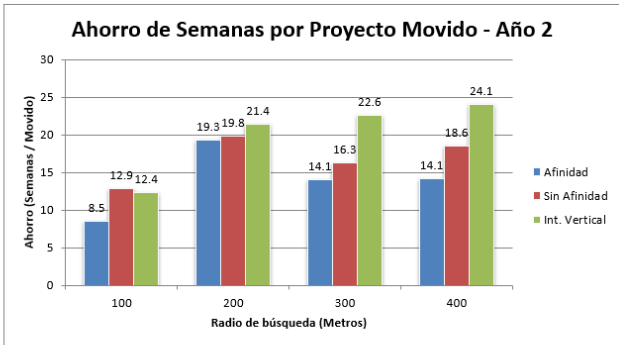
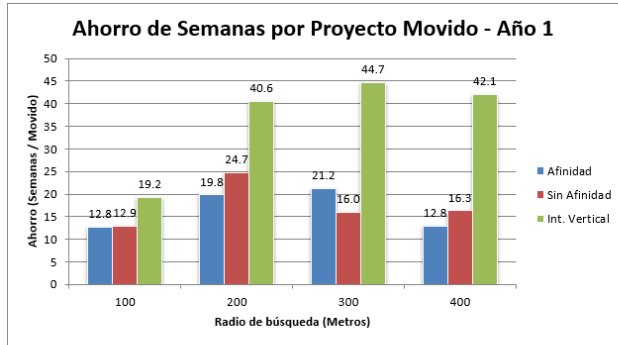
A. Ratio Villa Alemana



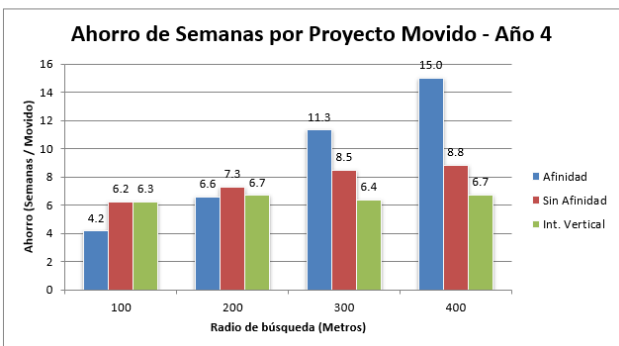
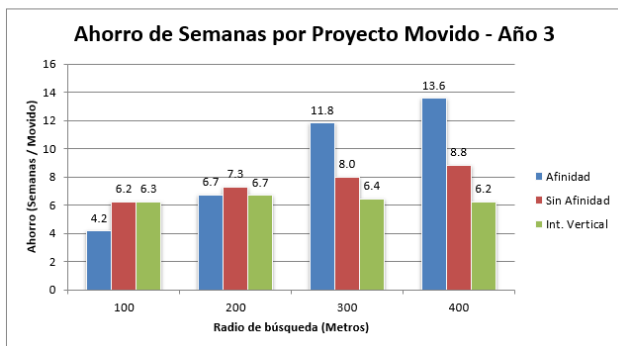
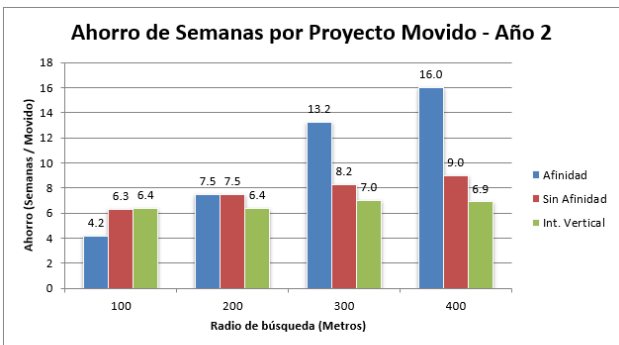
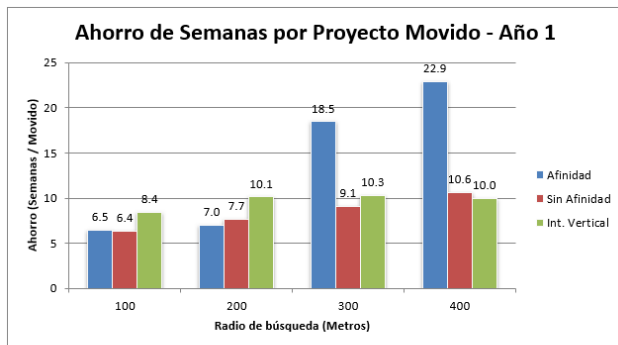
B. Ratio Limache



C. Ratio Valparaíso



D. Ratio Viña del Mar



E. Ratio Quilpué

