

Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Depto. de Ingeniería Industrial

Profesor Guía:
Dr. Guillermo Latorre Núñez



**“PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES
CONSIDERANDO AUTORIZACIÓN DE VIAJES MULTIPROPÓSITO
EN VARIOS PERIODOS DE TIEMPO”**

**“FACILITY LOCATION PROBLEM CONSIDERING MULTI-
PURPOSE TRIP AUTHORISATION IN VARIOUS TIME PERIODS”**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el título de Ingeniero Civil Industrial

Concepción, 06 de marzo de 2023

Ignacio Pincheira Lagos
Ingeniería Civil Industrial

DEDICATORIA

A mis padres, Erica y Victor, a mis hermanas, Erica y Daniela, y a mi sobrina Agustina, por ser los pilares fundamentales que tengo en la vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor guía, el Dr. Guillermo Latorre N., por su compromiso, dedicación y entrega durante el desarrollo del presente Proyecto de Título. Espero seguir trabajando y aprendiendo de él.

A mis padres, Erica y Víctor, por su apoyo y amor incondicional que siempre me han entregado durante esta etapa de mi vida.

A mis hermanas, Erica y Daniela, y a mi sobrina Agustina, quienes siempre me han acompañado y apoyado en todo momento.

A mis compañeros y amigos Matías, Diego y Raúl, con quienes he crecido durante esta etapa de mi vida, aprendiendo y compartiendo diferentes experiencias. Con los cuales espero seguir manteniendo nuestra amistad.

RESUMEN

En los problemas tradicionales de localización de instalaciones, se supone que las instalaciones funcionan bajo cualquier condición. Sin embargo, en las aplicaciones del mundo real, las instalaciones pueden actuar bajo diferentes contextos debido a desastres naturales como pandemias, terremotos y condiciones climáticas adversas. Por lo tanto, es de gran relevancia desarrollar modelos que funcionen no solo en condiciones normales sino también luego de una interrupción. En un contexto de pandemia, las personas quieren realizar diversas actividades esenciales y no esenciales con un número limitado de permisos, con el fin de evitar aglomeraciones, una suposición adecuada es suponer viajes multipropósitos. Por lo tanto, el tomador de decisiones tiene que decidir sobre volver a cerrar y reabrir las instalaciones (en múltiples periodos) y decidir sobre autorizar permisos para algunos usuarios que requieren visitar más de una instalación en el mismo viaje. Este problema puede verse como un Problema de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos considerando la Autorización de Viaje, el cual no ha sido estudiado hasta el momento. Este proyecto tiene como objetivo investigar este problema y sus extensiones, con la finalidad de contribuir a las actividades gubernamentales en la toma de decisiones. Se propone un modelo de programación lineal entera para resolver el Problema General de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos. Se utiliza una instancia de 50 nodos con instalaciones de dos tipos de servicios y nodos de demanda, analizando los casos en que varía el porcentaje de la población que prefiere visitar un tipo de servicio por sobre el otro, comparando la máxima aglomeración de personas. Los resultados obtenidos indican que las instalaciones se deben abrir en diferentes periodos, permitiendo decidir sobre el cierre y reapertura de instalaciones.

Palabras clave: Aglomeración, Localización Multipropósito, Localización Multiperiodo, Autorización de Viajes.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1: Introducción.....	1
1.1 Origen del tema.....	1
1.2 Contexto de la situación bajo estudio.....	1
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general.....	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
1.5 Alcances y Ámbito del estudio	7
1.6 Metodología	8
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	10
2.1 Investigación de Operaciones	10
2.1.1 Clasificación de los Problemas de Investigación de Operaciones	10
2.1.2 Metodología de la Investigación de Operaciones	11
2.2 Problemas de Localización	13
2.2.1 Problema de Localización Multipropósito	14
2.2.2 Problema de Localización Multiperiodo	15
CAPITULO 3: revisión bibliográfica.....	16
3.1 Problema de Localización de Viajes Multipropósito	16
3.2 Problema de Localización de Viajes Multiperiodo	18
3.3 Problema de Localización de Viajes Multipropósito Multiperiodo	19
CAPITULO 4: El problema general de LOCALIZACIÓN de viajes multipropósito de varios períodos.....	20
4.1 Descripción del modelo	20
4.2 Supuestos del modelo.....	20

4.3	Parámetros del modelo	20
4.4	Conjuntos del modelo.....	21
4.5	VARIABLES del modelo.....	22
4.6	Formulación matemática	23
CAPITULO 5: RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA GENERAL DE LOCALIZACIÓN DE VIAJES MULTIPROPÓSITO DE VARIOS PERÍODOS.....		26
5.1	Ejemplo de aplicación del modelo para resolver el Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo.	26
5.1.1	Datos del modelo.....	26
5.2	Experiencias computacionales para la red de 50 nodos	28
5.2.1	Análisis de los Resultados Experimentales	29
CAPITULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES		34
6.1	Discusión de resultados	34
6.2	Conclusiones.....	35
6.3	Futuras Investigaciones	35
REFERENCIAS.....		37

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ilustración de ejemplo	6
Figura 2.1: Clasificación de la Investigación de Operaciones	11
Figura 5.1: Red de 50 Nodos	28
Figura 5.2: Resultados del Experimento 2	31
Figura 5.3: Resultados del Experimento 10.....	32
Figura 5.4: Resultados del Experimento 18.....	33

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Red de 50 nodos	26
Tabla 5.2: Comparación Resultados Experimentales.....	30

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se detalla con claridad la naturaleza, el contexto y el origen del presente trabajo de titulación y se entregan las razones por las cuales es relevante llevar a cabo este estudio. Se da a conocer cuál es el principal problema que se presenta y que podría solucionarse con la propuesta, se presentan los objetivos del estudio, tanto general como específicos, el alcance y ámbito del estudio y la metodología que se utilizó para alcanzar los objetivos propuestos.

1.1 Origen del tema

El tema desarrollado fue propuesto por el académico del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad del Bío-Bío, Dr. Guillermo Latorre Núñez, en respuesta a la necesidad de realizar una investigación acerca del Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo considerando la Autorización de viajes. Con la finalidad de contribuir a las autoridades gubernamentales en un contexto de pandemia, se estudia la autorización de viajes de usuarios, cierres y reapertura de instalaciones considerando múltiples periodos para evitar la aglomeración de personas.

1.2 Contexto de la situación bajo estudio

En el momento en que apareció una devastadora pandemia de COVID-19, el mundo no fue el mismo de antes: surgieron una serie de eventos que impidieron el correcto funcionamiento de la sociedad durante algún tiempo y la contingencia surgida a partir de tal evento hizo que los consumidores alrededor del mundo no fueran exentos de esta crisis. Con el paso del tiempo y a medida que la situación se agravaba, cuantiosos efectos fueron notados en la población, afectando su comportamiento con relación a su salud personal y la de su entorno.

Históricamente, las epidemias han tenido un impacto significativo en el diseño de las ciudades y el desarrollo de las tipologías inmobiliarias. Durante los últimos siglos, los asentamientos urbanos se han visto alterados como resultado de las políticas públicas, infraestructura y medidas de prevención frente al brote de enfermedades. Algunos ejemplos incluyen la influencia de la peste bubónica del siglo XVIII en el

surgimiento de ciudades renacentistas en Europa, así como también las últimas tres de las siete epidemias de cólera del siglo XIX que inspiraron un movimiento sanitario mundial en las ciudades coloniales (Lai et al., 2020) incluyendo la aparición de los sistemas de alcantarillado modernos, y las instalaciones de tratamiento de agua.

Los cambios de comportamiento que se están generando en las personas a raíz de la crisis sanitaria producto del COVID-19 están teniendo una repercusión importante en el consumo de bienes y servicios en todos los ámbitos y, en especial, en la manera en la que los usuarios interactúan. Es evidente que la pandemia traerá muchas consecuencias que cambiarán la vida de las personas para siempre (Ruíz, 2020). Ha alterado cada aspecto de la vida diaria de sociedades y economías en más de 200 países. Los impactos de la enfermedad y de las medidas para controlarla han planteado preguntas sobre la preparación para epidemias, en general, sobre el pasado, presente y futuro de los modelos de desarrollo.

Durante la pandemia, la movilidad se redujo debido a los cambios individuales en el comportamiento, pero lo más relevante, por las políticas gubernamentales dirigidas a evitar la propagación del contagio. Los gobiernos implementaron intervenciones no farmacéuticas a gran escala para prevenir y controlar el crecimiento del COVID-19. La evidencia epidemiológica es uno de varios criterios para la toma de decisiones con respecto a las intervenciones no farmacéuticas. En Chile, estas intervenciones incluyeron toque de queda nocturno y bloqueos localizados.

Los bloqueos localizados son intervenciones aplicadas para la “contención comunitaria” diseñadas para reducir las interacciones y los movimientos personales (Wilder-Smith y Freedman, 2020). Los bloqueos localizados se implementan en un área geográfica limitada (área de cuarentena), que van desde un vecindario hasta una ciudad, incluidos los suburbios, distritos o pueblos, permite a los gobiernos reabrir y volver a cerrar jurisdicciones específicas. Las áreas con un mayor número de casos totales y un número creciente de nuevos casos eran candidatas probables para estas políticas. En Chile, se implementaron bloqueos localizados a nivel municipal, donde no se permitía el tránsito de personas en áreas de cuarentena sin autorización.

No obstante, los confinamientos localizados tienen un efecto significativo en la actividad económica local. Un bloqueo de tres a cuatro meses tuvo un efecto similar al de un año de la gran recesión de 2009 en la actividad económica (Asahi et al., 2021). Por lo tanto, muchos países de ingresos medios levantaron los bloqueos, independientemente del nivel de contagio. El gobierno chileno brindó apoyo financiero a las pequeñas y medianas empresas, sin embargo, no fueron suficientes para soportar el declive económico (Caqueo-Urizar et al., 2020). En el país se implementó la estrategia “paso a paso”, considerando cinco etapas de apertura gradual (Tariq et al., 2021). Dependiendo de la etapa en la que se encontraba la comuna, los vecinos podían realizar un grupo específico de actividades. De acuerdo al seguimiento de los indicadores epidemiológicos y del sistema de salud, el área podía estar en condiciones más o menos restrictivas.

Si un área era declarada en cuarentena, las personas que vivían en esa zona no podían salir de su residencia sin autorización legal. Una autorización o permiso legal consiste en dar tiempo a una persona para viajar y realizar sus actividades (una persona recibe un presupuesto de viaje). Dependiendo de la etapa del área, se implementó un conjunto de “permisos especiales”, como permisos para comprar alimentos y medicamentos, o bien para personas que debían acceder a sus lugares de trabajo. Así, se implementaron permisos especiales para pasear niños, mascotas, dejar alimentos y víveres a adultos mayores. Luego, este tipo de permisos se agrupó en uno solo que permitía realizar algunas de estas actividades (por ejemplo, comprar, abastecerse y caminar). Según la etapa en que se encontraba la comuna, se autorizaba el funcionamiento de determinados grupos de actividades económicas (instalaciones no esenciales), sin embargo, los servicios esenciales todavía se encontraban abiertos durante un tiempo.

De este modo, las autorizaciones a las personas que viajaban y las políticas de operación comercial fueron tan relevantes como la decisión de ordenar el cierre y cuarentena de un área. No obstante, los permisos tanto para personas como para empresas se otorgaron sin matices. Por ejemplo, todo el comercio asociado a un elemento se abría (o se cerraba), todos podían usar el permiso (o nadie podía

usarlo). Una mala decisión sobre autorizar permisos para personas y negocios podía resultar en aglomeraciones. Sin embargo, entre las medidas de distanciamiento social, la organización mundial de la salud propuso evitar el hacinamiento. Además, durante la pandemia, los permisos evolucionaron (por ejemplo, en términos de presupuesto de viaje, el propósito del permiso y los días de uso), al igual que los tipos de negocios autorizados para trabajar, sin embargo, aún no se conoce cuál es la mejor política (o combinación de políticas).

Es necesario considerar el comportamiento de viaje de las personas para estudiar las políticas. Es relevante ya que los resultados de una política no serían los mismos si las personas pertenecen a diferentes grupos. Varios autores han realizado diferentes suposiciones sobre el comportamiento de viaje de los usuarios, que esencialmente se dividen en dos categorías: viajes individuales y viajes de propósitos múltiples (múltiples paradas) (Marianov et al., 2020). En el contexto de una pandemia, la gente quiere realizar varias actividades esenciales y no esenciales con un número limitado de permisos (presupuesto de viaje), donde si un permiso no se utiliza en su totalidad, se pierde, una suposición adecuada sería asumir viajes multipropósito.

Por lo tanto, el tomador de decisiones tiene que decidir sobre cerrar y reabrir las instalaciones (problema de ubicación de varios periodos) y decidir sobre autorizar permisos para algunos usuarios que requieren visitar más de una instalación en el mismo viaje (mientras el presupuesto de viaje lo permita). Este problema puede verse como un Problema de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos considerando la Autorización de Viaje.

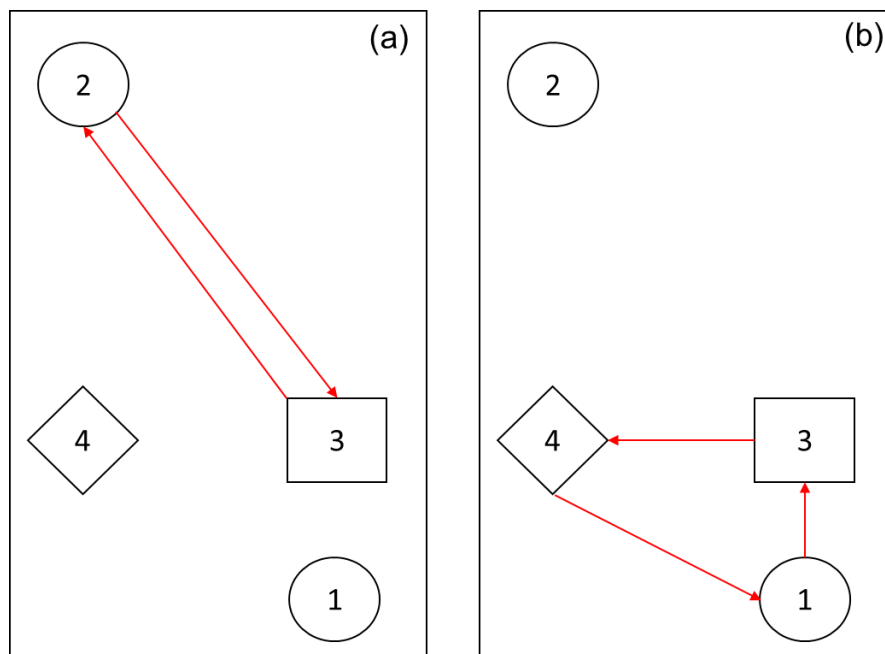
1.3 Justificación

El Problema de Localización de Viajes Multipropósito considera dos tipos de servicios diferentes, A y B, y algunos usuarios que demandan ambos servicios los obtienen durante el mismo viaje. Este problema ha sido estudiado primero en espacio discreto (Suzuki y Hodgson, 2005), luego en redes (Berman y Huang, 2007) y también en árboles (Araghi et al., 2014). Además, se ha asumido que los clientes tienen un presupuesto de viaje (Marianov et al., 2018) y se ha incluido el

comportamiento del consumidor como comparación de compras (Marianov et al., 2020). Por otro lado, el Problema de Localización de Instalaciones Multiperiodo fue introducido por Wesolowsky (1973). Luego, Wesolosky y Truscott (1975) lo ampliaron en el Problema de Localización de Instalaciones Multiperiodo con costos de apertura y cierre. Canel et al. (2001) consideran la capacidad, múltiples productos y la posibilidad de que una instalación se abra, cierre y vuelva a abrir. Luego Dias et al. (2006), Dias et al. (2007a) y Dias et al. (2007b) consideraron la diferenciación entre la apertura y reapertura de los costos fijos. El Problema de Localización de Periodos Múltiples considerando Viajes de Propósitos Múltiples y Autorización de Viaje no ha sido estudiado hasta el momento.

Considere la siguiente situación ilustrativa: hay dos tipos de servicios no esenciales (instalaciones) y usuarios que requieren acceder a ambos servicios. Los usuarios deben usar un permiso para viajar a una instalación, pero solo tienen un permiso. Si se considera que el presupuesto de viaje es suficiente para visitar ambos servicios, el usuario los visitará. Hay dos periodos de tiempo para hacer uso del permiso. La Figura 1.1 muestra la instancia donde hay cuatro puntos de demanda, una instalación tipo A (servicio A) representada por un rombo (cuando está abierto) ubicado en el nodo 4, y una instalación tipo B (servicio B) representada por un cuadrado (cuando está abierto) ubicado en el nodo 3 (los nodos 3 y 4 también tienen demanda). Todos los nodos tienen dos usuarios; uno prefiere el servicio tipo A y el otro prefiere el servicio tipo B. Suponiendo que todos los usuarios deben tener acceso al servicio de su preferencia y que todos los usuarios reciben el mismo presupuesto. Si el tiempo de servicio es el mismo en A y B, el presupuesto de viaje debe ser al menos el tiempo de viaje del nodo 2 al nodo 3, más el tiempo de servicio en el nodo 3, más el tiempo de viaje del nodo 3 al nodo 2 como se muestra en la Figura 1.1 (a). Considerando este presupuesto, los usuarios del nodo 2 solo pueden hacer un solo viaje, mientras que los usuarios del nodo 1, 3 y 4 pueden realizar un viaje multipropósito como se muestra en la Figura 1.1 (b). En un contexto de pandemia, el objetivo inicial para los clientes sería minimizar al máximo la aglomeración.

Figura 1.1: Ilustración de ejemplo



Fuente: Elaboración propia

Del contexto planteado surgen algunas preguntas: ¿Cómo viajan los usuarios si el nodo 4 y 3 puede abrir, cerrar y reabrir en diferentes periodos?, ¿Cuál es el efecto de autorizar solamente a algunos usuarios a viajar en un periodo determinado? (por ejemplo, primero los usuarios del nodo 2 y 3 y luego los del nodo 4 y 1), ¿Será posible combinar algunas políticas para evitar aglomeraciones?, Y así como otras cuestiones lógicas sobre capacidades, horarios de permiso, comportamientos de viaje, etc.

En este proyecto, se estudiará una propuesta para autorizar viajes y el funcionamiento de las instalaciones en varios periodos de tiempo. Dado que las personas necesitan realizar varias actividades (esenciales y no esenciales) y tienen un tiempo limitado para realizarlas, se supone que los usuarios están dispuestos a realizar viajes multipropósitos.

Este proyecto tiene un impacto directo en la sociedad en general, debido a que, sus resultados afectaran al movimiento y las actividades de las personas y al funcionamiento de diversas instalaciones no esenciales en un contexto de pandemia, lo que a su vez tiene un impacto económico. Además de las tiendas, se

pueden considerar espacios abiertos como parques, plazas, playas, etc. También se podría evaluar su aplicación en otros casos de emergencias sanitarias y/o estados de catástrofe.

Desde el punto de vista académico, la investigación del Problema de Localización Multipropósito y Multiperiodo y sus variantes dará lugar a muchas contribuciones:

1. Se introducirá un nuevo problema.
2. Se propondrá y se evaluará una propuesta para la autorización de viajes (viajes de usuarios y operación de instalaciones).
3. Se propondrá y se evaluarán diferentes comportamientos de los consumidores.
4. Se desarrollará y se introducirá una nueva formulación.
5. Se propondrán extensiones apropiadas para el problema planteado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático que permita resolver el Problema de Localización Multiperiodo y Multipropósito en un contexto de pandemia, como herramienta de apoyo para la toma de decisiones.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Estudiar el Problema de Localización Multipropósito y el Problema de Localización Multiperiodo.
2. Formular un modelo matemático para el Problema de Localización Multipropósito y Multiperiodo que incorpore presupuestos de viajes y periodos de viajes autorizados.
3. Comprender el impacto que tiene la ubicación de las instalaciones, los desplazamientos de las personas y la disminución de las aglomeraciones mediante el uso del modelo matemático.

1.5 Alcances y Ámbito del estudio

Este estudio se sitúa en el ámbito de la investigación académica, con el objetivo de investigar el Problema de Localización de Viajes Multiperiodo y Multipropósito considerando la Autorización de Viajes y sus extensiones. La principal contribución

de este trabajo es proponer una metodología cuantitativa para las autoridades en caso de un desastre natural como la catastrófica pandemia del COVID-19. Se desarrollarán herramientas de apoyo para las autoridades gubernamentales en la toma de decisiones relacionadas con la autorización tanto de viajes hacia centros comerciales como de operación de instalaciones. Para lograr esto, este proyecto se enfocará en formular un modelo matemático para autorizar viajes de usuarios y cerrar, reabrir y volver a cerrar instalaciones considerando diferentes comportamientos de viaje de usuarios y múltiples períodos en un contexto de pandemia. En resumen, el objetivo de este proyecto es investigar un problema novedoso que no se encuentra en la literatura y desarrollar una nueva formulación.

Para probar la eficiencia del modelo, se utiliza una instancia de prueba generada aleatoriamente.

1.6 Metodología

Para alcanzar los objetivos de la investigación, se aplica la metodología habitual en los proyectos de investigación de operaciones con optimización y modelamiento matemático.

Para estudiar la estructura, las propiedades y los detalles de cada uno de los problemas propuestos, se investigó la bibliografía relacionada con los métodos de resolución de los Problemas de Localización Multipropósito y de los Problemas de Localización Multiperiodo, recurriendo principalmente a información existente en distintas publicaciones realizadas por investigadores en revistas científicas, las cuales se obtuvieron en buscadores y bases de datos con acceso online. Además, se estudiaron diferentes comportamientos de viajes y estrategias de localización utilizadas en la literatura encontrada que podrían ser aplicadas como política.

Una vez definidos los problemas, se procedió a formular un modelo matemático adecuado para el problema, que permitiera entregar una solución al menos en pequeñas instancias y que pudiera ser apto para ser resuelto mediante el software AMPL.

La descripción del software que se utilizó (AMPL), se realizó principalmente haciendo uso del Manual de Usuario del software e investigación en sitios de Internet.

Se utilizó la literatura para la generación de una instancia de prueba, con la finalidad de probar el modelo y los procedimientos para generar demandas e instalaciones. Luego, se revisaron las ventajas e inconvenientes del modelo y se evaluó su eficacia para definir análisis como la relación entre la aglomeración y cierre de instalaciones, obteniendo información sobre el funcionamiento del modelo y las diferencias que presenta el problema planteado.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una breve descripción de la Investigación de Operaciones, los Problemas de Localización y los Problemas relacionados con este estudio, dando a conocer algunos datos históricos, definiciones fundamentales y sus aplicaciones, con la finalidad de mostrar el ámbito de estudio del presente Proyecto de Título.

2.1 Investigación de Operaciones

La Investigación de Operaciones (I.O) es una actividad que requiere del uso de métodos analíticos para ayudar a resolver problemas de toma de decisiones. Siendo más estricto, se podría decir que la I.O es la aplicación del método científico, por equipos interdisciplinarios, a problemas que comprenden el control de sistemas, para dar soluciones que sirvan mejor a los propósitos del sistema como un todo. (De Los Reyes y García, 1992)

La I.O se interesa en la toma óptima de decisiones y en la formulación de modelos de sistemas determinísticos y estocásticos que se originan en la vida real, de la necesidad de asignar recursos limitados. (De Los Reyes y García, 1992)

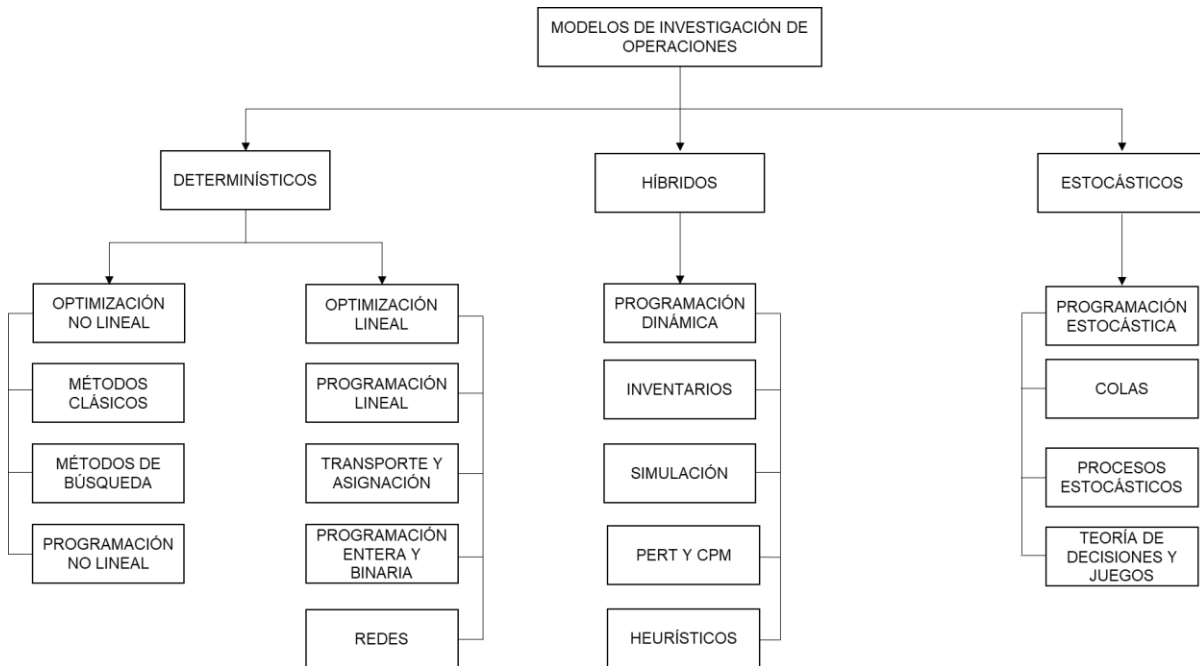
2.1.1 Clasificación de los Problemas de Investigación de Operaciones

Un modelo puede ser una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno. Así, un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real, y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas. (García, 2008)

Para clasificar los problemas, la Investigación de Operaciones los agrupa en problemas determinísticos, que son aquellos en que la información necesaria se conoce para obtener una solución con certeza y problemas estocásticos que son aquellos en los que parte de la información necesaria no se conoce con certeza, lo

que sí ocurre en el caso de los determinísticos, sino que más bien se comporta de una manera probabilística. En la Figura 2.1 se hace una agrupación aproximada, de los diferentes tipos de problema dentro de la categoría a la que pertenecen:

Figura 2.1: Clasificación de la Investigación de Operaciones



Fuente: (Soriano, 2015)

2.1.2 Metodología de la Investigación de Operaciones

La Investigación de Operaciones puede considerarse como un procedimiento que cuenta de cinco etapas (Taha, 2012):

1. Definición del problema: implica definir el alcance del problema investigado. Esta función debe ser realizada por todo el equipo de I.O. El objetivo es identificar tres elementos principales del problema de decisión:
 - a) Descripción de las alternativas de decisión.
 - b) Determinación del objetivo del estudio.
 - c) Especificación de las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema modelado.
2. Construcción del modelo: implica un intento de transformar la definición del problema en relaciones matemáticas. Si el modelo resultante se ajusta a uno de los modelos matemáticos estándar, como la programación lineal, se suele

obtener una solución utilizando los algoritmos disponibles. Por otra parte, las relaciones matemáticas son demasiado complejas como para permitir la determinación de una solución analítica, el equipo de I.O puede optar por simplificar el modelo y utilizar un método heurístico¹, o bien considerar la simulación², si es lo apropiado. En algunos casos, una simulación matemática puede combinarse con modelos heurísticos para resolver el problema de decisión.

3. Solución del modelo: es por mucho la más sencilla de todas las fases de IO porque implica el uso de algoritmos de optimización bien definidos. Un aspecto importante de la fase de solución del modelo es el análisis de sensibilidad, que tiene que ver con la obtención de información adicional sobre el comportamiento de la solución óptima cuando el modelo experimenta algunos cambios de parámetros. Este análisis es particularmente necesario cuando no se pueden estimar con precisión los parámetros del modelo. En estos casos es importante estudiar el comportamiento de la solución óptima en el entorno de los parámetros estimados.
4. Validez del modelo: comprueba si el modelo propuesto hace en realidad lo que dice que hace, es decir, ¿predice adecuadamente el comportamiento del sistema que estudia? Al principio, el equipo de I.O debe estar convencido de que el resultado del modelo no contenga “sorpresas”. En otras palabras, ¿tiene sentido la solución? ¿Los resultados son intuitivamente aceptables? Del lado formal, un método común de comprobar la validez de un modelo es comparar su resultado con resultados históricos. Si el modelo propuesto representa un sistema nuevo (inexistente), se podría utilizar la simulación como herramienta independiente para comprobar el resultado del modelo matemático.
5. Implementación: implica la transformación de los resultados en instrucciones de operación comprensibles que se emitirán a las personas que administrarán

¹Procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución. (Díaz et al., 1996)

² Herramienta que permite obtener conclusiones sobre el comportamiento dinámico de un sistema estudiando un modelo computacional. (Law, 2015)

el sistema recomendado. La responsabilidad de esta tarea recae principalmente en el equipo de I.O.

2.2 Problemas de Localización

Los Modelos de Programación Lineal aplicados a la localización de instalaciones, por lo general involucran la selección de una localización junto con la asignación de demandas a dichas localizaciones, con el fin de optimizar alguna función en particular. Los principales modelos utilizados son los Modelos de P-Mediana, el Modelo de Cobertura y el Modelo de Máxima Cobertura. En estos modelos, la demanda agregada se concentra en un número finito de puntos discretos, se asume que hay una cantidad finita de puntos discretos donde se puede ubicar las instalaciones para brindar un servicio.

El objetivo del Problema de la P-Mediana propuesto por Hakimi (1964) y Hakimi (1965), es encontrar las ubicaciones para un número determinado de establecimientos, minimizando la distancia promedio que separa a los consumidores de las potenciales instalaciones. Este modelo es aplicado por lo general a la instalación de hospitales u otros servicios públicos como también en la localización de cadenas de suministro. Una de las desventajas de este tipo de modelos tiene relación con la recolección de datos, ya que supone conocidas las distancias (longitudes entre los nodos del árbol) como también las demandas (pesos de los nodos).

Los Problemas de Localización de Cobertura buscan elegir las instalaciones en los lugares disponibles, de modo que la demanda sea cubierta. El modelo de cobertura original (Toregas et al., 1971) utiliza programación lineal entera para minimizar el número de ambulancias necesarias para cubrir todos los puntos de la demanda. Los Problemas de Cobertura tradicionales, asumen que un nodo es cubierto de manera total si la nueva localización es ubicada a menos de una cierta distancia crítica dada, en tanto que, si ésta es superada, el nodo no es cubierto.

El Problema de Máxima Cobertura fue introducido por Church y ReVelle (1974), con el objetivo de identificar cuáles de las potenciales localizaciones entregan acceso a los clientes dentro de una distancia previamente determinada. Este tipo de modelos

resulta importante en problemas de localización cuando es necesario mantener una cierta calidad de servicio. Por lo general se aplica a clientes que se ubican cerca del establecimiento en estudio como lo son cines o bancos. También ha sido utilizado en la localización de antenas de telecomunicación y servicios de emergencia. En general, los Modelos de Máxima Cobertura, maximizan el total de personas servidas dentro de una distancia máxima, dado el número fijo de instalaciones o limitaciones de presupuesto. Un ejemplo de una variación de este modelo es un estudio que desarrolla un modelo de localización de máxima cobertura capacitado que permite asignación múltiple. Según este modelo la demanda de los clientes puede ser servida por varias instalaciones debido a que las variables de asignación son continuas (Haghani, 1996).

2.2.1 Problema de Localización Multipropósito

A diferencia de la suposición de viajes de un solo propósito. Hodgson (1900), Hodgson y Rosing (1992) y Berman et al. (1995) estudian un patrón de viaje diferente, el Viaje Multipropósito. Formularon lo que llamaron captura de flujo e intercepción de flujo. En estos modelos, los consumidores viajan entre dos puntos conocidos, por ejemplo, el hogar y el trabajo, siguiendo un camino conocido y realizando su compra en el camino. Este escenario podría considerarse como un viaje de dos paradas en el que se conoce el origen, la segunda parada y la ruta de los consumidores.

Los usuarios generalmente suelen obtener algunos tipos de servicio en viajes polivalentes en los que se visitan dos o más establecimientos en viajes vinculados. La gente suele organizar mandados para que se puedan obtener varios servicios en un solo viaje. Suzuki y Hodgson (2005) consideran la situación simple en la que se pueden solicitar dos servicios en un solo viaje: por ejemplo, una visita a un médico y una visita a una farmacia. Aunque esta es una situación muy simple, este es el primer modelo que se adapta explícitamente a la realización de viajes multipropósito.

2.2.2 Problema de Localización Multiperiodo

Los problemas de localización de instalaciones de periodos múltiples es una generalización de los problemas de localización en el que se incorpora una dependencia del tiempo en forma de un escenario multiperiodo. La inclusión del tiempo como otra dimensión de estos modelos afecta la estructura del problema, requiriendo una visión global para resolverlo. Los modelos dependientes del tiempo aparecen en forma natural al considerar algunas decisiones dinámicas, tales como, gestión de inventario, apertura y cierre de instalaciones y cambios de capacidad, como otras cuestiones derivadas de las limitaciones presupuestarias (Laporte et al., 2016).

Las extensiones de las restricciones sobre la apertura y el cierre de instalaciones incluyen la apertura de instalaciones para un período mínimo de tiempo, abriendo un número mínimo de instalaciones cada período (Albareda et al., 2009) y solo permitiendo para que un subconjunto de instalaciones cierre (Roodman et al., 1977). También se pueden implementar cambios en la capacidad operativa, ya sea reduciendo o aumentando la capacidad, lo cual Shulman (1991) hizo para el problema de localización de instalaciones de periodos múltiples. Estos suelen ser acompañado de economías de escala, donde se otorgan descuentos por volumen en función del volumen de producción. Las extensiones consideran múltiples productos y múltiples etapas de producción, como se muestra en (Hinojosa et al., 2000).

CAPITULO 3: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se detallan las aplicaciones que se encontraron en la literatura relacionada con el Problema de Localización de Viajes Multipropósito y el Problema de Localización de Viajes Multiperiodo considerando las autorizaciones de viaje, en base a evidencias empíricas que permiten aclarar y orientar el desarrollo investigativo.

3.1 Problema de Localización de Viajes Multipropósito

La literatura de Localización de Viajes Multipropósito es escasa. Suzuki y Hodgson (2005) consideran dos tipos de servicios diferentes, A y B, y tres grupos de usuarios: usuarios del servicio tipo A; usuarios del servicio tipo B; y los usuarios de ambos servicios que los obtienen durante un mismo viaje. Berman y Huang (2007) estudian el mismo problema, pero en una red e investigan aproximaciones heurísticas generales al problema en redes. Tong et al. (2012) se ocupan de la variación temporal de la demanda, el encadenamiento de viajes multipropósito incorporando dichas características en la planificación de la provisión de servicios del mercado agrícola. Araghi et al. (2014) estudian el mismo problema de Suzuki y Hodgson (2005) pero en un árbol, en su artículo presentan un algoritmo $O(n^5)$ para Problemas de Localización de Instalaciones Multipropósito. Li y Tong (2017) consideran el espacio de actividad del cliente, asumiendo que puede desviarse de su ruta para visitar otra instalación. Marianov et al. (2018) resuelven el problema de localización propuesto por Suzuki y Hodgson (2005), pero a diferencia de los estudios anteriores, Marianov et al. (2018) asumen que los clientes tienen un presupuesto de viaje, las tiendas son no esenciales y que no es necesario satisfacer toda la demanda. Marianov et al. (2020) incluyen el comportamiento del consumidor como una compra de comparación, en la que los consumidores visitan varias tiendas que venden productos no idénticos y en las que las empresas son competidoras. Lüer-Villagra et al. (2022), usando programación binaria de dos niveles, resuelven el problema de ubicación que enfrenta una empresa que ingresa a un mercado consciente de que un segundo entrante que vende productos no sustitutos ingresará más tarde y ubica sus tiendas de manera inteligente, considerando compras multipropósito. Méndez-

Vogel et al. (2022) proponen un modelo que permite una mejor representación de lo que sucede en la práctica cuando se consideran compras multipropósito, el cual reconoce las incertidumbres en el comportamiento de los clientes.

Los Problemas de Localización de Viajes Multipropósito están relacionados con los Problemas de Localización Ida y Vuelta (Araghi et al., 2014). El viaje de ida y vuelta original fue introducido por Chan y Francis (1976) y Chan y Hearn (1977) como una extensión del Problema de Localización Minimax, en el que la distancia de ida y vuelta comienza desde una nueva instalación a través de un par de instalaciones existentes y luego regresa a la nueva instalación. Para las extensiones del Problema de Ida y Vuelta, también se puede ver Drezner y Wesolowsky (1982); Tamir y Halman (2005); Wang et al. (2012). Otros problemas relacionados son los Problemas de Localización de Instalaciones de Intercepción de Flujos, donde los usuarios viajan entre dos puntos conocidos (por ejemplo, el hogar y el trabajo), siguiendo una ruta conocida (por ejemplo, el camino más corto), obteniendo un servicio en el camino (Marianov et al., 2018). Si una instalación se encuentra en su ruta pre planificada, las unidades de flujo pueden interrumpir voluntaria/obligatoriamente el viaje para obtener el servicio (Boccia et al., 2009). Una instalación de servicio de gasolina es un ejemplo de los Problemas de Localización de Instalaciones de Flujo porque una fracción significativa de los clientes consume este servicio en sus desplazamientos diarios. Una suposición importante realizada en trabajos preliminares (Hodgson, 1990; Hodgson y Rosing, 1992) es que no se permite a los usuarios desviarse de su viaje pre planificado para recibir el servicio. Luego, esta suposición fue relajada por Berman (1995); Berman et al. (1995a); y Berman et al. (1995b). No obstante, en la realidad el enrutamiento puede ser difícil de obtener (Hodgson 1990). Para otros modelos heurísticos y extensiones, véase Wu y Lin (2003); Boccia et al. (2009); Jung et al. (2014); y Markovic et al (2017). Todos estos trabajos de localización que asumen los viajes de varias paradas como el comportamiento del consumidor no han considerado la posibilidad de abrir, cerrar o reabrir las instalaciones durante más de un periodo, tampoco han considerado las autorizaciones de viaje.

3.2 Problema de Localización de Viajes Multiperiodo

El Problema de Localización Multiperiodo fue introducido por Wesolowsky (1973) que trata la localización de una sola instalación como un problema continuo. El costo de apertura y cierre fue introducido por Wesolowsky y Truscott (1975) en el Problema de Localización de Instalaciones Multiperiodo en una Red. Drezner y Wesolowsky (1991) estudiaron diferentes tipos de problemas continuos considerando una única instalación cuando los pesos asociados a cada punto de demanda cambian de forma conocida. Drezner y Wesolowsky (1991) investigan los Problemas de Localización de Instalaciones *minisum* y *minimax*, encontrando los “puntos de ruptura”, esto es, el momento en el que se debe cambiar la localización de la instalación. En la literatura que estudia la posibilidad de abrir y cerrar instalaciones, son más los trabajos que consideran que si una instalación está abierta/cerrada al inicio/fin de un periodo, permanecerá abierta/cerrada hasta el final del horizonte de planificación. Wesolowsky y Truscott (1975) son una excepción, ya que los costos fijos de apertura de una instalación son los mismos, aunque dicha instalación estuviera operando antes. Otra excepción es Canle et al. (2001), donde consideran el problema capacitado, de múltiples mercancías y la posibilidad de que una instalación se abra, se cierre y vuelva a abrir. Algunos estudios (Dias et al., 2007b, 2007a, 2006) relajan este supuesto incorporando la posibilidad de abrir, cerrar y reabrir una instalación más de una vez considerando la diferenciación entre la apertura y reapertura de los costos fijos. Samunderu y Brose (2022) desarrollaron un modelo en un entorno competitivo que analiza la posición estratégica de una empresa, investigando que instalaciones deben cerrar, reabrir, reducirse o expandirse, de acuerdo a los costos de cierre y reapertura. Véase Bolori Arabani y Farahani (2012) y Nickel y Saldanhada-Gama (2019) y sus referencias para más información sobre la Localización Multiperiodo de Instalaciones. En resumen, los trabajos de Localización Multiperiodo no han asumido los viajes con múltiples paradas como comportamiento del consumidor. Por otro lado, la posibilidad de reconexión y reapertura de instalaciones ya localizadas ha sido poco estudiada.

3.3 Problema de Localización de Viajes Multipropósito Multiperiodo

Dentro de la literatura más relacionada con el Problema de Localización de Viajes Multipropósito Multiperiodo. El artículo más relacionado es el descrito por Marianov et al. (2018), sin embargo, no considera la posibilidad de cerrar, abrir, reabrir y volver a cerrar instalaciones, además de decidir los permisos de autorización para los usuarios en un contexto de pandemia.

El Problema de Localización Multiperiodo que considera los Viajes Multipropósitos y la autorización de viajes no ha sido estudiado hasta el momento. Además, es fundamental destacar que los problemas de localización que consideran la captura de flujo y los viajes con múltiples paradas no han incorporado el cierre, la reapertura y la reconexión de las instalaciones.

CAPITULO 4: EL PROBLEMA GENERAL DE LOCALIZACIÓN DE VIAJES MULTIPROPÓSITO DE VARIOS PERÍODOS

En el presente capítulo se presenta la formulación del Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo utilizando una formulación mediante programación lineal entera.

4.1 Descripción del modelo

Se plantea un modelo de optimización para el problema de localización de instalaciones (cierre, reapertura y recierre de instalaciones) considerando diferentes periodos y asumiendo que los usuarios pueden realizar viajes polivalentes. El problema consiste en determinar que instalaciones deben estar abiertas y cerradas en los diferentes periodos de tiempo para minimizar la máxima aglomeración en una instalación en un periodo. Se considera que las instalaciones no son esenciales (ejemplo: tiendas minoristas). Por lo tanto, todas las instalaciones pueden estar abiertas o cerradas sin restricción.

4.2 Supuestos del modelo

La formulación del modelo del Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo considera los siguientes supuestos:

1. Se permite no abrir una tienda, abrir en un periodo o abrir en ambos periodos.
2. Es necesario satisfacer toda la demanda.
3. Un porcentaje de la población requiere de la tienda A y otro de la tienda B, pero si el tiempo del permiso permite ir a ambas tiendas, realizará un viaje multipropósito (visita la tienda A y la tienda B).
4. Si un cliente no puede realizar un viaje multipropósito visitará la tienda más cercana.
5. El cliente tiene 1 permiso, lo que implica viajar solo en un periodo.

4.3 Parámetros del modelo

d_{ij} : Distancia desde el nodo i hasta el nodo j .

T : Periodos de tiempo para usar el permiso (solo puede ser usado en un periodo).

w_i : Demanda del nodo i .

V_{Pa} : Porcentaje de la población que prefieren visitar el servicio de tipo A (sobre el servicio de tipo B).

V_{Pb} : Porcentaje de la población que prefieren visitar el servicio de tipo B (sobre el servicio de tipo A).

4.4 Conjuntos del modelo

N : Conjunto de puntos de demanda.

Pa : Localización del conjunto de instalaciones que brindan servicio tipo A .

Pb : Localización del conjunto de instalaciones que brindan servicio tipo B .

r : Presupuesto o permiso para visitar los servicios A o B en términos de distancia de viaje.

El presupuesto r debería ser suficiente para todos los usuarios de la visita A o B ; por lo tanto, el mínimo r puede ser calculado como:

$$r = \max_{\{j \in N\}} \left(\max_{\{a \in Pa\}} \left(\min (d_{ja} + d_{aj}), \min_{\{b \in Pb\}} (d_{jb} + d_{bj}) \right) \right) \quad (4.1)$$

Así es posible definir Na_i como el conjunto de instalaciones de tipo A que el usuario i puede visitar en un solo viaje:

$$Na_i = \{a \in Pa \mid d_{ia} + d_{ai} \leq r\} \quad (4.2)$$

Además, de la misma manera, para definir Nb_i como el conjunto de instalaciones de tipo B que el usuario i puede visitar en un solo viaje:

$$Nb_i = \{b \in Pb \mid d_{ib} + d_{bi} \leq r\} \quad (4.3)$$

Asimismo, es posible definir Nab_i como el conjunto del par (a, b) instalaciones de tipo A y B que el usuario i puede visitar en un viaje multipropósito:

$$Nab_i = \{(a,b) \in Na_i \times Nb_i \mid \min(d_{ia} + d_{ab} + d_{bi}, d_{ib} + d_{ba} + d_{ai}) \leq r\} \quad (4.4)$$

4.5 Variables del modelo

$$ya_a^t = \begin{cases} 1 & \text{Si la instalación de tipo A ubicada en el sitio } a \text{ está abierta en el periodo } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$$yb_b^t = \begin{cases} 1 & \text{Si la instalación de tipo B ubicada en el sitio } b \text{ está abierta en el periodo } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$$za_{ia}^t = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del servicio A por } i \text{ es cubierta por la instalación } a \\ & \text{en el periodo } t \text{ utilizando un viaje de propósito único.} \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$$zb_{ib}^t = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del servicio B por } i \text{ es cubierta por la instalación } b \\ & \text{en el periodo } t \text{ utilizando un viaje de propósito único.} \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

$$zab_{i(a,b)}^t = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda de los servicios A y B por } i \text{ es cubierta por el par de} \\ & \text{instalaciones } (a,b) \text{ en el periodo } t \text{ utilizando un viaje multipropósito.} \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$$

4.6 Formulación matemática

$$\text{Minimizar } Z = C_{\max} \quad (4.5)$$

(4.5) es el objetivo de minimizar la aglomeración máxima

$$\sum_{(a,b) \in Nab_i} \sum_{t=1}^T zab_{i(a,b)}^t + \sum_{a \in Na_i} \sum_{t=1}^T za_{ia}^t = 1 \quad \forall i \in N \quad (4.6)$$

$$\sum_{(a,b) \in Nab_i} \sum_{t=1}^T zab_{i(a,b)}^t + \sum_{b \in Nb_i} \sum_{t=1}^T zb_{ib}^t = 1 \quad \forall i \in N \quad (4.7)$$

Las restricciones (4.6) y (4.7) establecen que un usuario realiza un único viaje o un viaje multipropósito.

$$za_{ia}^t \leq ya_a^t \quad \forall i \in N, a \in Na_i, t = 1 \dots T \quad (4.8)$$

$$zb_{ib}^t \leq yb_b^t \quad \forall i \in N, b \in Nb_i, t = 1 \dots T \quad (4.9)$$

$$2zab_{i(a,b)}^t \leq ya_a^t + yb_b^t \quad \forall i \in N, (a,b) \in Nab_i, t = 1 \dots T \quad (4.10)$$

Las restricciones (4.8) – (4.10) garantizan que hay una instalación localizada que cubre la demanda utilizando un solo viaje por (4.8) y (4.9) o utilizando un viaje multipropósito por (4.10).

$$ya_a^t + yb_b^t \leq 1 + \sum_{(aa,bb) \in Nab_i} \sum_{tt=1}^T zab_{i(aa,bb)}^{tt} \quad \forall i \in N, (a,b) \in Nab_i, t = 1 \dots T \quad (4.11)$$

La restricción (4.11) obliga a realizar un viaje multipropósito si hay un par de instalaciones situadas que permiten un viaje multipropósito.

$$1 - ya_{aa}^t \geq za_{ia}^{tt} \quad \forall i \in N, a \in Na_i, aa \in Na_i, t = 1 \dots T, tt = 1 \dots T \mid Ma_{ia} > Ma_{iaa} \quad (4.12)$$

$$1 - yb_{bb}^t \geq zb_{ib}^{tt} \quad \forall i \in N, b \in Nb_i, bb \in Nb_i, t = 1 \dots T, tt = 1 \dots T \mid Mb_{ib} > Mb_{ibb} \quad (4.13)$$

$$2 - ya_{aa}^{tt} - yb_{bb}^{tt} \geq zab_{i(a,b)}^t \quad \forall i \in N, (a,b) \in Nab_i, (aa,bb) \in Nab_i, t = 1 \dots T, tt = 1 \dots T \mid Mab_{i(a,b)} > Mab_{i(aa,bb)} \quad (4.14)$$

Las restricciones (4.12) – (4.14) obligan a que la captación de la demanda se realice por la instalación con menor tiempo de viaje. Ma_{ia} es el tiempo de viaje más corto para visitar la instalación de tipo a desde i en un solo viaje $Ma_{ia} = d_{ia} + d_{ai}$ y $Mab_{i(a,b)}$ es el tiempo más corto para visitar las instalaciones (a,b) desde i en un viaje multipropósito $Mab_{i(a,b)} = \min(d_{ia} + d_{ab} + d_{bi}, d_{ib} + d_{ba} + d_{ai})$.

$$\sum_{i \in N} \sum_{b \in Pb \mid (a,b) \in Nab_i} w_i zab_{i(a,b)}^t + \sum_{i \in N \mid a \in Na_i} V_{-pa} w_i za_{ia}^t \leq C_{\max} \quad \forall a \in Pa, t = 1 \dots T \mid a \notin Pb \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{a \in Pa \mid (a,b) \in Nab_i} w_i zab_{i(a,b)}^t + \sum_{i \in N \mid b \in Nb_i} V_{-pb} w_i zb_{ib}^t \leq C_{\max} \quad \forall b \in Pb, t = 1 \dots T \mid b \notin Pa \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in N} \sum_{bb \in Pb \mid bb \neq b \wedge (a,bb) \in Nab_i} w_i zab_{i(a,bb)}^t + \sum_{i \in N} \sum_{aa \in Pa \mid aa \neq a \wedge (aa,b) \in Nab_i} w_i zab_{i(aa,b)}^t + \\ & \sum_{i \in N} \sum_{(a,b) \in Nab_i} w_i zab_{i(a,b)}^t + \sum_{i \in N \mid a \in Na_i} V_{-Pa} w_i za_{ia}^t + \\ & \sum_{i \in N \mid b \in Nb_i} V_{-Pb} w_i zb_{ib}^t \leq C_{\max} \quad \forall a \in Pa, b \in Pb, t = 1 \dots T \mid b \in Pa \quad (4.17) \end{aligned}$$

Las restricciones (4.15) – (4.17) permiten captar la máxima multitud.

$$za_{ia}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, a \in Na_i, t = 1 \dots T \quad (4.18)$$

$$zb_{ib}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, b \in Nb_i, t = 1 \dots T \quad (4.19)$$

$$zab_{i(a,b)}^t \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, (a,b) \in Nab_i, t = 1 \dots T \quad (4.20)$$

$$ya_a^t \in \{0,1\} \quad \forall a \in Pa, t = 1 \dots T \quad (4.21)$$

$$yb_b^t \in \{0,1\} \quad \forall b \in Pb, t = 1 \dots T \quad (4.22)$$

$$C_{\max} \geq 0 \quad (4.23)$$

Finalmente, las restricciones (4.18) – (4.23) definen el dominio de las variables.

CAPITULO 5: RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA GENERAL DE LOCALIZACIÓN DE VIAJES MULTIPROPÓSITO DE VARIOS PERÍODOS

En este capítulo se resuelve el Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo con la finalidad de exponer el procedimiento completo de obtención de las diferentes soluciones del problema. El Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo se resolvió mediante la formulación planteada en el capítulo 4.

5.1 Ejemplo de aplicación del modelo para resolver el Problema de Localización de Viajes Multipropósito y Multiperiodo.

Se generó una instancia aleatoria compuesta por 50 nodos y su demanda. Se detallan los resultados y datos estadísticos obtenidos al implementar el modelo.

5.1.1 Datos del modelo

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados de la red creada de forma aleatoria de 50 nodos con su coordenada X, coordenada Y y su demanda, la cual de igual forma se generó de manera aleatoria.

Tabla 5.1: Red de 50 nodos

NODO	COORDENADA X	COORDENADA Y	DEMANDA
1	37	52	7
2	49	49	30
3	52	64	16
4	20	26	9
5	40	30	21
6	21	47	15
7	17	63	19
8	31	62	23
9	52	33	11
10	51	21	5
11	42	41	19
12	31	32	29
13	5	25	23

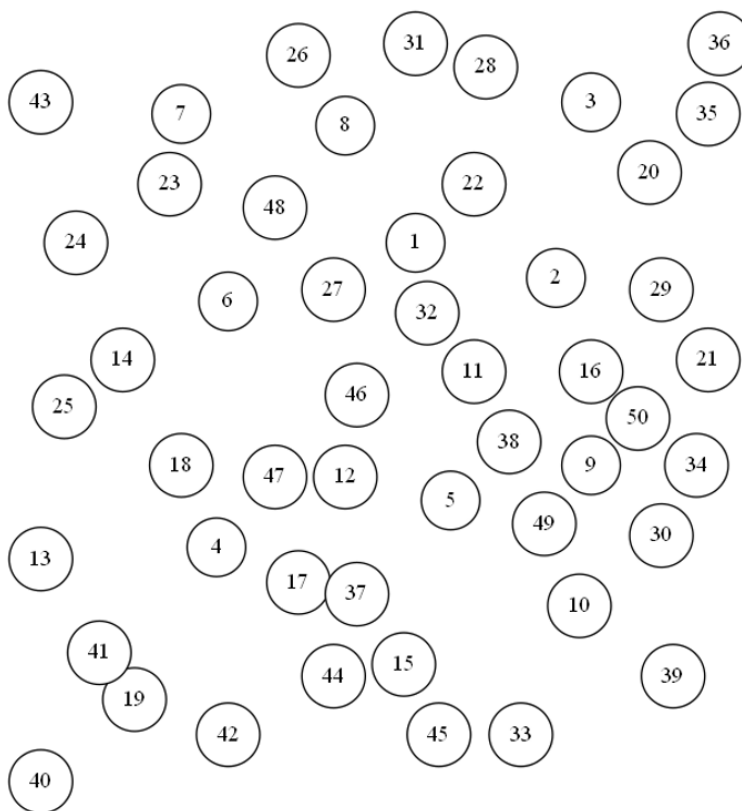
14	12	42	21
15	36	16	10
16	52	41	15
17	27	23	3
18	17	33	41
19	13	13	9
20	57	58	28
21	62	42	8
22	42	57	8
23	16	57	16
24	8	52	10
25	7	38	28
26	27	68	7
27	30	48	15
28	43	67	14
29	58	48	6
30	58	27	19
31	37	69	11
32	38	46	12
33	46	10	23
34	31	33	26
35	62	63	17
36	63	69	6
37	32	22	9
38	45	35	15
39	59	15	14
40	5	6	7
41	10	17	27
42	21	10	13
43	5	64	11
44	30	15	16
45	39	10	10
46	32	39	5

47	25	32	25
48	25	55	17
49	48	28	18
50	56	37	10

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.1 muestra la red de 50 nodos.

Figura 5.1: Red de 50 Nodos



Fuente: Elaboración propia

Las distancias entre los pares de nodos de la red se generaron con el software AMPL y se deriva de la Figura 5.1. Se utilizó el algoritmo de distancia euclidiana, el cual es una fórmula matemática que permite medir la distancia en línea recta entre dos puntos en un espacio n-dimensional.

5.2 Experiencias computacionales para la red de 50 nodos

En esta sección se exponen los resultados de las experiencias computacionales con la red de 50 nodos. Las pruebas computacionales en el modelo se ejecutaron en un

servidor DESKTOP-B54610N con un procesador AMD Ryzen 5 3500 6-Core 3.59 GHz y 16.0 Gb RAM, Sistema operativo de 64 bits. En este equipo se configuró el sistema operativo Windows 10 Pro, utilizando 2 memorias de RAM de 8 Gb cada una.

Para la obtención de resultados, se utilizó el lenguaje de modelado AMPL con CPLEX 20.1.0.0.

Se consideran la localización del conjunto de instalaciones que brindan servicio tipo A (P_a) a los nodos 47, 38, 37 y 33; y la localización del conjunto de instalaciones que brindan servicio tipo B (P_b) a los nodos 47, 38, 48 y 44. Los periodos de tiempo para usar el permiso son 2 (solo puede ser usado en un periodo).

Se muestran los tiempos de CPU, el resultado de la función objetivo (ecuación 4.5) y el GAP del Problema General de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos mediante la formulación planteada en la sección 4.6, además se muestran los resultados gráficamente, teniendo en cuenta que la instalación tipo A está representada por un rombo (cuando está abierta), la instalación tipo B representada por un cuadrado (cuando está abierta), el color verde representa un viaje simple a la instalación tipo B, el color amarillo representa el viaje simple a la instalación tipo A (en diferentes periodos), el color rosado representa el viaje sencillo a la instalación tipo A y B, y el color rojo representa el viaje multipropósito a la instalación A y B.

5.2.1 Análisis de los Resultados Experimentales

Se realizaron experimentos donde el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo A sobre el servicio de tipo B (V_{Pa}) va de 5% a 95%, aumentando su porcentaje en pasos de 5% y el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo B sobre el servicio de tipo A (V_{Pb}) va de 95% a 5%, disminuyendo su porcentaje en pasos de 5%.

En la Tabla 5.2 se muestra una comparación de los experimentos realizados:

Tabla 5.2: Comparación Resultados Experimentales.

N°	V_Pa (%)	V_Pb (%)	Cmáx	Tiempo (s)	Opt Gap (%)
1	5	95	230.70	1800.030	0.15
2	10	90	230.40	1800.280	0.09
3	15	85	230.10	1800.050	0.02
4	20	80	224.00	27.39060	11.60
5	25	75	210.00	17.48440	11.73
6	30	70	196.00	13.51560	7.21
7	35	65	182.00	7.18750	0.00
8	40	60	168.00	7.92188	0.00
9	45	55	154.00	6.96875	0.00
10	50	50	140.00	10.39060	0.00
11	55	45	144.65	9.34375	0.00
12	60	40	157.80	9.00000	0.00
13	65	35	170.95	11.00000	0.00
14	70	30	184.10	11.28120	0.00
15	75	25	197.25	15.48440	3.47
16	80	20	210.40	13.31250	3.81
17	85	15	223.55	11.59380	0.00
18	90	10	228.00	1800.080	0.09
19	95	5	228.00	1800.17	0.15

Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Tabla 5.2 que cuando el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo A sobre el servicio de tipo B es de un 50% y el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo B sobre el servicio de tipo A de un 50% se minimiza la aglomeración máxima de personas.

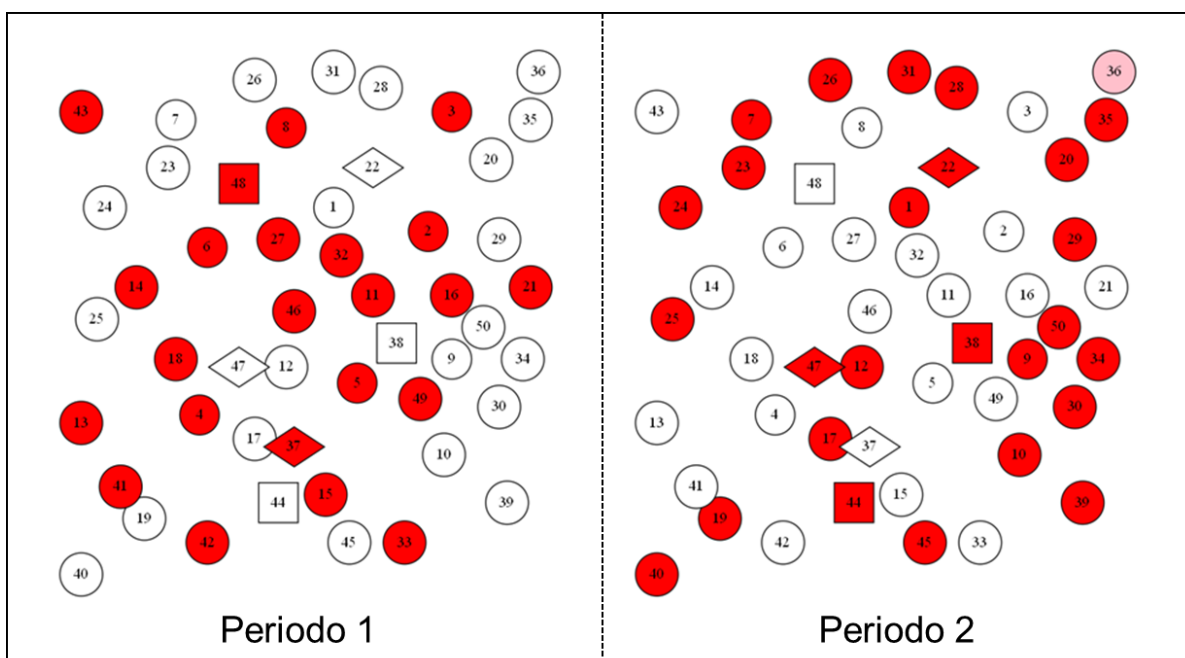
En algunos experimentos el tiempo de cómputo (tiempo de CPU) aumentaba considerablemente, por lo que se ejecutó en un tiempo limitado de 1800 segundos (30 minutos). De la Tabla 5.2 se puede observar que los tiempos de CPU aumentan en mayor cantidad en los extremos, es decir, cuando el porcentaje de la población

que prefiere visitar el servicio de tipo A y el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo B es de 5 – 10% y 95 – 90% respectivamente.

De los experimentos realizados, se pueden destacar el experimento número 2, el número 10 y el número 18, debido a que, los experimentos restantes entregan resultados similares gráficamente, cambiando su función objetivo.

En el experimento número 2, el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo A sobre el servicio de tipo B es de 10% y el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo B sobre el servicio de tipo A es de 90%. En la Figura 5.2 se muestran los resultados de esta experiencia computacional.

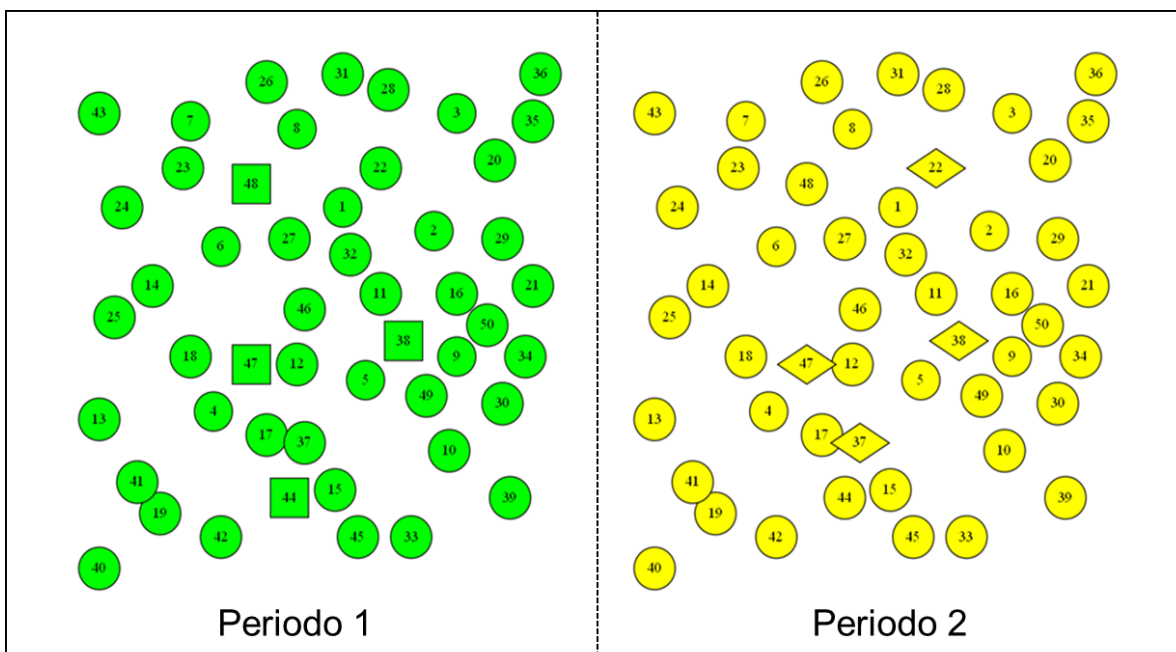
Figura 5.2: Resultados del Experimento 2



Fuente: Elaboración propia

En el experimento número 10, el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo A sobre el servicio de tipo B es de 50% y el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo B sobre el servicio de tipo A es de 50%. En la Figura 5.3 se muestran los resultados de esta experiencia computacional.

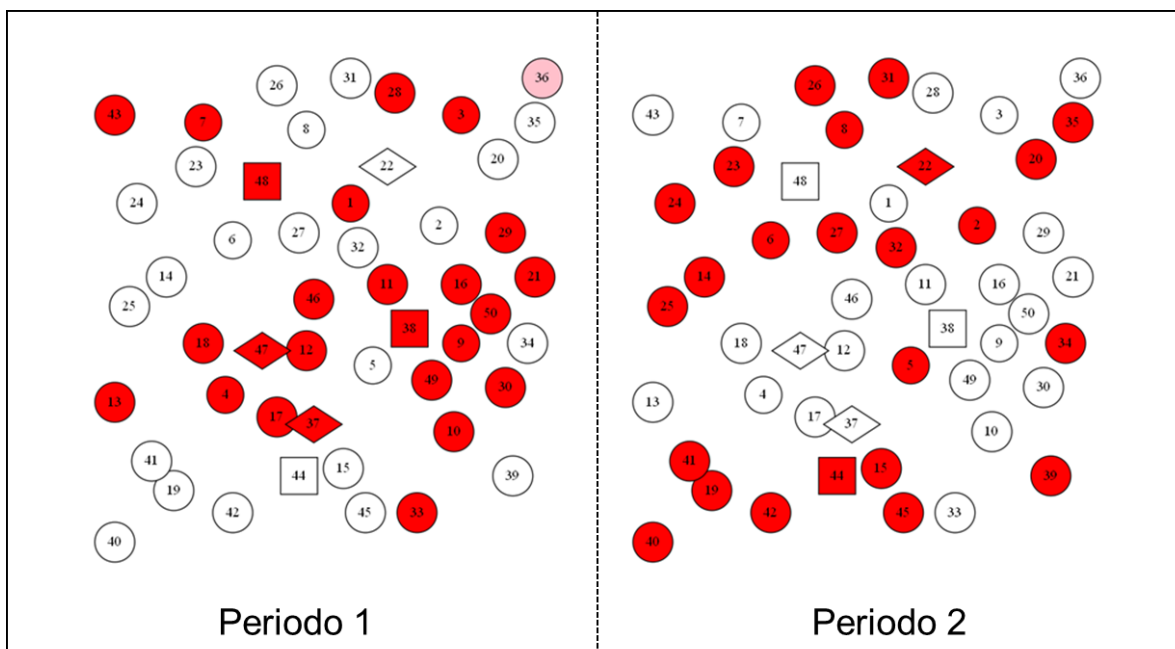
Figura 5.3: Resultados del Experimento 10



Fuente: Elaboración propia

En el experimento número 18, el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo A sobre el servicio de tipo B es de 90% y el porcentaje de la población que prefiere visitar el servicio de tipo B sobre el servicio de tipo A es de 10%. En la Figura 5.4 se muestran los resultados de esta experiencia computacional.

Figura 5.4: Resultados del Experimento 18



Fuente: Elaboración Propia

Del experimento número 4 (20% V_{Pa} – 80% V_{Pb}) al experimento número 17 (85% V_{Pa} – 15% V_{Pb}) los gráficos resultaron ser iguales al gráfico óptimo del experimento número 10 (Figura 5.3), sin embargo, como se observa en la Tabla 5.2, cambia el valor de la función objetivo (C_{máx}).

CAPITULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

6.1 Discusión de resultados

El modelo entrega soluciones exactas en tiempos razonables para la mayoría de los experimentos probados para la red de 50 nodos, sin embargo, dado que el problema es NP-Hard, para los casos en que el porcentaje de la población que prefiere el servicio tipo A es de 95% y el porcentaje de la población que prefiere el servicio tipo B es de 5% y para 90% y 10% respectivamente, es imposible encontrar una solución en tiempo razonable (menos de una hora).

Se destacaron 3 experimentos de los 19 realizados, debido a que, del experimento número 4 (20% V_Pa – 80% V_Pb) al experimento número 17 (85% V_Pa – 15% V_Pb) los gráficos resultaron ser iguales al gráfico óptimo del experimento número 10 (Figura 5.3), sin embargo, cambia el valor de la función objetivo (C_{\max}), dado a la captura de la demanda es la misma y la ponderación de los que visitan A y los que visitan B va cambiando de acuerdo a los porcentajes utilizados en cada experimento.

Los resultados obtenidos mediante la formulación del Problema de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos indican que la aglomeración máxima de personas se minimiza cuando el porcentaje de la población que prefiere el servicio tipo A es de 50% y el porcentaje de la población que prefiere el servicio tipo B es de 50%.

Respecto a los resultados obtenidos la solución consiste en abrir la instalación A y la instalación B en diferentes periodos. Entonces, todos los usuarios de los nodos que prefieren visitar las instalaciones que prestan servicio tipo A viajan usando un solo viaje en el mismo periodo. De manera similar, todos los usuarios de los nodos que prefieren visitar las instalaciones que prestan servicio tipo B viajan usando un solo viaje en el mismo periodo. Este resultado es opuesto al de Marianov et al. (2018), donde las instalaciones tienden a abrir juntas.

6.2 Conclusiones

El Problema de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos que considera la autorización de viajes no ha sido estudiado hasta el momento. Además, es fundamental destacar que los Problemas de Localización que consideran la captura de flujo y los viajes con múltiples paradas no han incorporado el cierre, la reapertura y la reconexión de instalaciones. Por lo tanto, la investigación de este problema y sus variantes dará lugar a muchas contribuciones de la literatura.

El Problema de Localización de Viajes Multipropósito de Varios periodos considerando la autorización de viajes, minimizando la máxima aglomeración de personas, se resuelve a través del modelo de programación lineal entera.

El modelo matemático para el Problema General de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos permite decidir sobre el cierre y reapertura de instalaciones, contribuyendo a la toma de decisiones gubernamentales en caso de un desastre natural como la catastrófica pandemia del COVID-19.

Este proyecto puede ser solución no solamente en el caso de una pandemia, se puede evaluar además su aplicación en otros casos de emergencias como estados de catástrofe, desastres naturales, estallido social, etc., donde lo que se busca es minimizar la máxima aglomeración de personas.

6.3 Futuras Investigaciones

En el Problema de Localización de Viajes Multipropósito de Varios Periodos presentado en este estudio, supone que las instalaciones son no esenciales, sin embargo, como futura investigación se podría incorporar al problema las instalaciones esenciales, estudiando el efecto de cerrar, reabrir y volver a cerrar instalaciones no esenciales, mientras las instalaciones esenciales (supermercados, farmacias, centros médicos, etc.) permanecen siempre abiertas.

Además, se podrían investigar los efectos de utilizar dos tipos de permisos: los permisos para actividades esenciales y los permisos de uso libre (cualquier actividad). Suponiendo que los “permisos esenciales” pueden utilizarse en cualquier

periodo, mientras que los “permisos libres” sólo pueden utilizarse en algunos periodos (dependiendo de la ubicación del usuario).

Finalmente, se podría investigar el impacto de autorizar diferentes presupuestos de viaje para los usuarios en función de su ubicación y el tipo de permiso. Evaluando diferentes funciones de utilidad suponiendo que algunos usuarios utilizarán más presupuesto del disponible.

REFERENCIAS

- A. Wilder-Smith MD and D.O. Freedman MD. (2020). Isolation, quarantine, social distancing and community containment: pivotal role for old-style public health measures in the novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak. *Journal of Travel Medicine*.
- ALBAREDA-SAMBOLA, M., FERNÁNDEZ, E., HINOJOSA, Y., AND PUERTO, J. (2009). The multiperiod incremental service facility location problem. 36, 1356-1375. *Computers & Operations Research*.
- Albert W. Chan and Donald W. Hearn. (1977). A Rectilinear Distance Round-Trip Location Problem. *Transportation Science*, 11, 107-123.
- Alejandra Caqueo-Úrizar, Alfonso Urzúa, Diego Aragón-Caqueo, Carlo Handy Charles, Ziad El-Khatib, Akaninyene Otu, Sanni Yaya. (2020). Mental Health and the COVID-19 Pandemic in Chile. American Psychological Association.
- Alireza Boloori Arabani, Reza Zanjirani Farahani. (2012). Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. 62, ISSN 0360-8352, 408-420. *Computers & Industrial Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018>
- Amma Tariq, Eduardo A Undurraga, Carla Castillo Laborde, Katia Vogt-Geisse, Ruiyan Luo, Richar Rothenberg, Gerardo Chowell. (Enero de 2021). Transmission dynamics and control of COVID-19 in Chile, March-October, 2020. Chile: *PLoS Negl Trop*. Obtenido de <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009070>
- Arie Tamir and Nir Halman. (2005). One-way and round-trip center location problems. *Discrete Optimization*, 168-184. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2004.12.004>
- Armin Lüer-Villagra , Vladimir Marianov , H. A. Eiselt, Gonzalo Méndez-Vogel. (2022). The leader multipurpose shopping location problem. (302), 470–481. *European Journal of Operational Research*.

- Berman O, Krass D, Xu CW. (1995). Locating flow-intercepting facilities: new approaches and results. 74, 121-143. *Annals of Operations Research*.
- Biing-Feng Wang, Jhih-Hong Ye, Pei-Jung Chen. (2012). On the Round-Trip 1-Center and 1-Median Problems. *WALCOM: Algorithms and Computation*.
- Cem Canel, Basheer M. Khumawala, Japhett Law, Anthony Loh. (2001). An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem. *Computers & Operations Research*, Pages 411-427. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(99\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00126-4)
- Chan Albert W. and Francis Richard L. (1976). A Round-Trip Location Problem on a Tree Graph. *INFORMS*, 1526-5447.
- Church, R.L. and ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. 32, 101-118. *Papers of the Regional Science Association*.
- Daoqin Tong, Fang Ren, James Mack. (2012). Locating farmers' markets with an incorporation of spatio-temporal variation. *Socio-Economic Planning Sciences*, 149-156.
- Dias, J., Captivo, M.E. & Clímaco, J. (2007). A memetic algorithm for multi-objective dynamic location problems. 221–253. *Glob Optim*. Obtenido de <https://doi.org.ezproxy.ubiobio.cl/10.1007/s10898-007-9239-9>
- Díaz, A., Glover, F., Ghaziri, H.M. (1996). *Optimización Heurística y Redes Neuronales*. Madrid, España: Paraninfo.
- Drezner, Z. and G. Wesolowsky. (1982). A Trajectory Approach to the Round-trip Location Problem. *Transportation Science*, 56-66.
- Eyden Samunderu, Sven Brose. (2022). Reconfiguring a Multi-period Facility Model – An Empirical Test in a Dynamic Setting. 1, 1, 17–27. *BOHR International Journal of Operations Management Research and Practices*. Obtenido de <https://doi.org/10.54646/bijomrp.003>

- Garcia, J, M. (2008). Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Cataluña, España: Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- George O. Wesolowsky and William G. Truscott. (1975). *The Multiperiod Location-Allocation Problem with Relocation of Facilities*. MANAGEMENT SCIENCE.
- Gonzalo Méndez-Vogel, Vladimir Marianov, Armin Lüer-Villagra, H. A. Eiselt. (2022). Store location with multipurpose shopping trips and a new random utility customers' choice model. *European Journal of Operational Research*.
- Haghani, A. (1996). Capacitated maximum covering location models: Formulations and solution procedures. *30, 3*, 101-136. *Journal of advanced transportation*.
- Hakimi, S. (1964). Optimum location of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *12*, 450-459. *Operations Research*.
- Hakimi, S. (1965). Optimum location of switching centers in a communications network and some related graph theoretic problems. *13*, 462-475. *Operations Research*.
- HINOJOSA, Y., PUERTO, J., AND FERNÁNDEZ, F. R. (2000). A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. 271-291. *European Journal of Operational Research* 123.
- Hodgson MJ. (1990). A flow capturing location-allocation model. *22/3*, 270-279. *Geographical Analysis*.
- Hodgson MJ and Rosing KE. (1992). A network location-allocation model trading off flow capturing and p-median objectives. *40/1*, 247-260. *Annals of Operations Research*.
- Jaeyoung Jung, Joseph Y.J. Chow, R. Jayakrishnan, Ji Young Park. (2014). Stochastic dynamic itinerary interception refueling location problem with queue delay for electric taxi charging stations. *40*, 123-142. (I. 0968-090X, Ed.) *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.008>

- Joana Dias, M. Eugénia Captivo, João Clímaco. (Octubre de 2006). Capacitated dynamic location problems with opening, closure and reopening of facilities. *17(4)*, 317-348. *MA Journal of Management Mathematics*. Obtenido de <https://doi.org/10.1093/imaman/dpl003>
- Joana Dias, M. Eugénia Captivo, João Clímaco. (2007). Efficient primal-dual heuristic for a dynamic location problem. *34(6)*, 1800-1823. *Computers & Operations Research*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.07.005>
- Ka Yan Lai, Chris Webster, Sarika Kumari, Chinmoy Sarkar. (2020). *The nature of cities and the COVID-19 pandemic*. ELSEVIER.
- Kenzo Asahi, Eduardo A Undurraga, Rodrigo Valdés, Rodrigo Wagner. (2021). The effect of COVID-19 on the economy: Evidence from an early adopter of localized lockdowns. Santiago, Chile: *journal of global health*. Obtenido de [10.7189/jogh.10.05002](https://doi.org/10.7189/jogh.10.05002)
- Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis*, Fifth edition. Tucson, Arizona, USA: McGraw-Hill Education.
- Manuel de los Reyes García M., José C. Romero Cortés. (1992). *Investigación de Operaciones I. Primera Parte*. México D.F: AZCAPOTZALCO.
- Maurizio Boccia, Antonio Sforza, Claudio Sterle. (2009). Flow Intercepting Facility Location: Problems, Models and Heuristics. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 35–79.
- Mojtaba Araghi, Oded Berman, Igor Averbakh. (2014). *Minisum Multipurpose Trip Location Problem on Trees*. NETWORKS.
- Nikola Marković, Ilya O. Ryzhov, Paul Schonfeld. (2017). Evasive flow capture: A multi-period stochastic facility location problem with independent demand. *257*, 687-703. (I. 0377-2217, Ed.) *European Journal of Operational Research*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.020>
- Oded Berman, Rongbing Huang. (2007). *The Minisum Multipurpose Trip Location*. TRANSPORTATION SCIENCE.

- Ran Li and Daoqin Tong. (2017). Incorporating activity space and trip chaining into facility siting for accessibility maximization. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1-14.
- ROODMAN, G. M., AND SCHWARZ, L. B. (1977). Extensions of the multi-period facility phase-out model: New procedures and application to a phase-in/phase-out problem. 9, 103-107. *AIIE Transactions*.
- Ruiz, M. (27 de Abril de 2020). *La República*. Obtenido de Las 10 tendencias que buscarán los consumidores tras la pandemia del covid-19: <https://www.larepublica.co/empresas/las-diez-tendencias-que-buscaran-los-consumidores-luego-de-la-pandemia-del-covid-19-2997860>
- SHULMAN, A. (1991). An algorithm for solving dynamic capacitated plant location problems with discrete expansion sizes. 423-436. *Operations research* 39.
- Soriano, D. (2015). *Investigacion de operaciones*. Obtenido de Herramientas de investigación de operaciones: <https://es.slideshare.net/davidtsoriano/investigacion-de-operaciones-47005623>
- Stefan Nickel, Francisco Saldanha-da-Gama. (2019). Multi-Period Facility Location. *Location Science*.
- Taha, H. A. (2012). INVESTIGACION DE OPERACIONES. *Novena*. University of Arkansas, Fayetteville, México: PEARSON.
- Tai-Hsi Wu and Jen-Nan Lin. (2003). Solving the competitive discretionary service facility location problem. 144, 366-378. (I. 0377-2217, Ed.) *European Journal of Operational Research*. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00391-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00391-5)
- Toregas C., Swain, R., ReVelle, C. and Bergman L. (1971). The location of emergency service facilities. 19, 6, 1363-1373. *Operations Research*.
- TSUTOMU SUZUKI and M. JOHN HODGSON. (2005). *Optimal facility location with multi-purpose trip making*. *IIE Transactions*.

Vladimir Marianov , H.A. Eiselt , Armin Lürer-Villagra. (2018). *Effects of multipurpose shopping trips on retail store location in a duopoly*. European Journal of Operational Research.

Vladimir Marianov, H. A. Eiselt, Armin Lürer-Villagra. (2020). *The Follower Competitive Location Problem with Comparison-Shopping*. Networks and Spatial Economics.

Wesolowsky, G.O. (1973). Dynamic facility location. *Management Science*, 19(11), 1241–1248.

Zvi Drezner and G. O. Wesolowsky. (1991). Facility location when demand is time dependent. *Operations Research & Management Science*. Obtenido de [https://doi.org/10.1002/1520-6750\(199110\)38:5<763::AID-NAV3220380510>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/1520-6750(199110)38:5<763::AID-NAV3220380510>3.0.CO;2-A)