

MODELO DE LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES Y DISTRIBUCIÓN LOGÍSTICA EN EL CAMPO DE BATALLA

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2019.

Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2020.

MAY. Luis San Martín Riveros¹

Resumen: *la logística militar se caracteriza por la necesidad de sostener las operaciones militares en los teatros de operaciones, enfrentando demandas inciertas, condicionando entre otros aspectos la ubicación de las instalaciones logísticas y el transporte. Este artículo presenta un enfoque cuantitativo para entregar una solución logística, combinando la elección de sitios para instalaciones logísticas en terreno con los modos de transporte de las clases logísticas. Para esto, se utiliza un modelo de optimización de dos fases para la localización de instalaciones con modos de transporte de ida y vuelta (2E-CWLPwTr) frente a escenarios de demanda a diversa intensidad. Los resultados demuestran que para esta configuración se obtiene una solución óptima en breve tiempo, siendo una herramienta útil en apoyo a la toma de decisiones. Futura investigación que puede ser desarrollada en variar el modo de transporte por ciclos (VRP), la inclusión de restricciones robustas y su extensión a un modelo multiperíodo.*

Palabras clave: *logística militar, optimización entero lineal mixta, localización de instalaciones, soluciones logísticas.*

Abstract: *military logistics are characterized by the need to support military operations on the battlefield, facing uncertain demands, conditioning among other aspects the location of logistics facilities and transportation. This article presents a quantitative approach to deliver a logistics solution, combining the selection of sites for logistics facilities in the field and the modes of transport of the logistics classes. A two-phase optimization model is used for the location of facilities with outbound and return trip*

¹ Ingeniero Politécnico Militar en Sistemas de Armas mención Armamentos de la Academia Politécnica Militar y Magíster en Investigación de Operaciones de la Universidad de Edimburgo, Reino Unido. Jefe de Sección III de la Dirección de Operaciones del Ejército de Chile. Santiago Chile. Email: luis.sanmartin@ejercito.cl



transportation modes (2E-CWLPwTr) and different demand. The results show that for this configuration an optimal solution is obtained in a short time, being a useful tool in support of decision-making process. Future research can be developed in varying the mode of transport by cycles (VRP), the inclusion of robust constraints and the its extension to a multi-period model.

Keywords: *military logistics, mixed integer linear programming, facility location, logistics solution.*

1. INTRODUCCIÓN

La logística es una disciplina reconocida en ingeniería y gestión de operaciones que combina técnicas cualitativas y cuantitativas para proporcionar un servicio particular a un número determinado de clientes. Estos métodos permiten a los directivos, en un espectro amplio, combinar los recursos de tal manera que, finalmente, se brinden soluciones reales para cumplir su tarea de sostenimiento a través de una cadena logística o de suministro. En el ámbito militar, la logística es una disciplina que abarca los recursos necesarios para mantener los medios de una operación militar y lograr los fines deseados.

La logística militar tiene dos perspectivas desde las cuales se analiza. La primera está relacionada con su aspecto cualitativo que subyace en el proceso de toma de decisiones que un comandante y su personal siguen para obtener el curso de acción deseado. Esta parte de la logística militar se refiere al proceso cognitivo que una persona ejecuta para construir un plan para enfrentar un problema particular, entregando una solución logística.

La segunda perspectiva es cuantitativa, también llamada perspectiva científica. Desde poco antes de la Segunda Guerra Mundial, científicos de diversas disciplinas han participado en la parametrización y medición del desempeño de los cursos de acción logísticos, brindando soluciones más precisas a problemáticas particulares y cada vez más complejos.

Aunque la logística militar requiere una combinación de ambas perspectivas, el enfoque de este estudio es cuantitativo y, específicamente, orientado a las tareas de optimización que deben llevarse a cabo para obtener un resultado deseable, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo, recursos, espacio y riesgo, que son inherente a las operaciones militares.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y CONTEXTO

Bajo las consideraciones descritas anteriormente, es posible afirmar que las tareas logísticas tienen una importancia fundamental en las operaciones militares. Las unida-



des que operan en el campo de batalla desértico requieren atención especial porque la velocidad y el alcance de sus operaciones son mayores que otro tipo de unidades. Esta suposición se basa en las características particulares de los teatros de operaciones desérticos, como la falta de grandes obstáculos, espacios de amplio frente y profundidad y, en algunos casos, superficies extremadamente planas.

En este contexto, el enfoque ficticio de este trabajo se basa sobre una unidad del nivel división, que opera en el ambiente desértico. Para llevar a cabo este estudio, primero, es necesario establecer la estructura de estas unidades y, luego, conocer cómo funcionan con respecto al apoyo logístico.

Para fines académicos, una división tendrá dos brigadas. Una brigada motorizada y una brigada acorazada. A continuación, se muestra la estructura de ambas brigadas:



Figura N° 1 "Estructura de la Brigada Blindada".

Fuente: Elaboración propia.

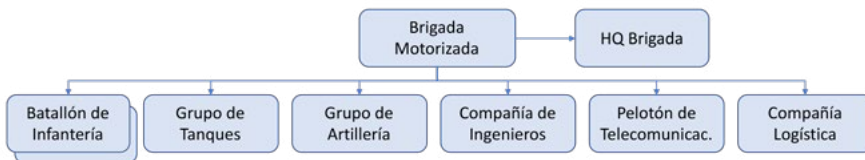


Figura N° 2 "Estructura de la Brigada Motorizada".

Fuente: Elaboración propia.

La solución logística puede brindarse mediante una distribución centralizada o descentralizada. El método centralizado implica que el batallón logístico divisionario proporciona el apoyo requerido a las compañías logísticas de la brigada y luego estas suministran lo requerido a las unidades de combate. El método descentralizado se diferencia en que la unidad logística intermedia (brigada) se elimina, transformándose dichos sitios en los puestos de transbordo. Esta conceptualización, independiente al grado de simplificación que pueda tener, guiará el resto del trabajo.

El material que requieren las unidades de combate está agrupado en clases logísticas. De esta manera, los planificadores militares pueden gestionar adecuadamente las necesi-



dades logísticas de la unidad de combate separándolos en esas categorías y asignando algunas prioridades, según su naturaleza. Las clases logísticas que se utilizarán durante este estudio, para fines didácticos, son los grupos de clasificación de la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) que se muestran en la siguiente tabla.

CLASE	DESCRIPCIÓN
I	Ítem de subsistencia como agua y comida
II	Vestuario y equipo individual y grupal
III	Combustible y lubricante
IV	Materiales de construcción
V	Munición

Tabla N° 1 "Clases logísticas".

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de este estudio es proporcionar un modelo cuantitativo que se ocupe de la localización de la unidad logística de la divisionaria (una o más agrupaciones de instalaciones) y de la brigada (una o más instalaciones o puestos de transbordo), e igualmente del abastecimiento de las clases logísticas, mediante traslados de ida y vuelta, en función de los recursos disponibles, la demanda, el tiempo y las limitaciones de distancia y de capacidades de la unidad.

Este estudio se enfocará solo en el método de suministro centralizado porque, dado que puede considerarse más complejo desde el punto de vista de la coordinación y el uso medio, constituye una generalización del método descentralizado, siendo útil para ambos enfoques de distribución. Igualmente, se utilizará una formulación del problema de localización de centros de distribución con modos de transporte, el que se caracteriza por seleccionar simultáneamente instalaciones a ser activadas, entre un grupo de sitios candidatos, y realizar viajes solo de ida y vuelta entre dos puntos, con el propósito de minimizar el costo total del abastecimiento, bajo ciertos escenarios.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Este capítulo presenta una breve, pero exhaustiva, revisión de la literatura asociada a trabajos que se han desarrollado para proveer una solución logística cuantitativa a las operaciones militares, mediante la combinación de diversos modelos matemáticos.

El "problema de diseño de la red de distribución de teatros de operaciones", (Craig, Lunday, Hill, & Nesbitt, 2017) presenta un modelo matemático para seleccionar aero-



puertos, puertos marítimos para el desembarque de tropas y centros intermedios de distribución logística. Su propósito es minimizar el riesgo total de transporte, la distancia recorrida y la carga de trabajo per cápita.

Igualmente, se desarrolló un modelo de optimización dinámica llamado “optimización de red logística intermodal (LITNO)”, (Kress, 2016), el que constituye un 2E-LRP (two-echelonlocation-routeing problem o problema de localización y ruteo de dos niveles) con una ubicación de depósito fijo igual a uno y estructurada en un modelo de programación dinámica. Este modelo utiliza una formulación de flujo donde el objetivo es minimizar el costo total de la operación en función de las capacidades, el transporte y el almacenamiento de municiones.

Yew Soon (2003), presenta un modelo de programación dinámica para gestionar y optimizar una cadena de suministro militar en presencia de demandas aleatorias y no estacionarias. Este estudio se centra en satisfacer los requisitos de municiones porque se considera la clase con demanda más impredecible de ser determinada. Además, el autor resuelve este problema mediante el uso de un modelo estocástico basado en escenarios de dos fases y períodos múltiples.

Otro avance en la disciplina es un modelo de distribución dinámica para la logística militar con el objetivo de reducir la cantidad de inventario en tierra para unidades anfibia del Cuerpo de Infantería de Marina de EE.UU. (Gue, 2003). El modelo considera un enfoque de múltiples períodos, ubicación de la instalación y flujo de material bajo activos de transporte limitados.

Toyoglu, Ekin Karasan, & Yetis Kara (2011) desarrolla un modelo de red de distribución en el campo de batalla, una formulación MILP (Mixed integer linear program - Programación lineal entera mixta). Este modelo está destinado a proporcionar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para suministrar munición a un sistema logístico de tres capas, con un enfoque LRP y restricciones de ventana de tiempo para su transporte. En el modelo, las decisiones de cantidad de depósitos y su ubicación se toman junto con la definición de los respectivos planes de ruta. Además, presentan modelos estáticos y dinámicos para seleccionar la mejor configuración.

Toyoglu *et. al.* (2012) presentan una nueva formulación de este problema, pero ahora bajo una perspectiva de flujo de producto basado en nodos (Node-BPF), que tiene la ventaja de tener menos restricciones y variables, lo que facilita el proceso de cálculo computacional. Este nuevo método supera su formulación anterior al calcular la solución exacta basado en una agrupación de tres fases.



4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

4.1. Generalidades

En esta sección, la formulación matemática para el problema del estudio se presenta a través de un modelo de optimización MILP, denominado modelo de localización de instalaciones para dos fases, con modos de transporte y restricciones de rango de tiempo (2E-CWLPwTr). Esto significa que el modelo elige entre posibles localizaciones candidatas, para instalaciones de la unidad logística divisional y potenciales ubicaciones de instalaciones de las unidades de la brigada (o puestos de transbordo), generando, igualmente, los recorridos de transporte (viajes) de ida y vuelta.

La estructura de la cadena de suministro que se trabaja en este artículo tiene tres “escalones de apoyo”. El primer escalón corresponde a las unidades de combate desplegadas que demandan clases logísticas, los que se denominarán “clientes”. El segundo escalón es el sector donde se localizan las unidades logísticas de la brigada o puestos de transbordo, al centro del dispositivo. Finalmente, el tercer escalón lo constituyen las instalaciones de apoyo de la división, en la retaguardia del dispositivo. De esta manera, la demanda acumulada de uno o más “clientes” se agrupan en los puestos de transbordo del segundo escalón, los que a su vez son absorbidos por las instalaciones divisionales.

Los escalones de apoyo permiten la configuración de dos “fases de apoyo”, la primera denominada “vanguardia” (entre las unidades de combate y la unidad logística de la brigada o puesto de transbordo) y de “retaguardia” (entre la unidad logística de la brigada y aquella de la división).

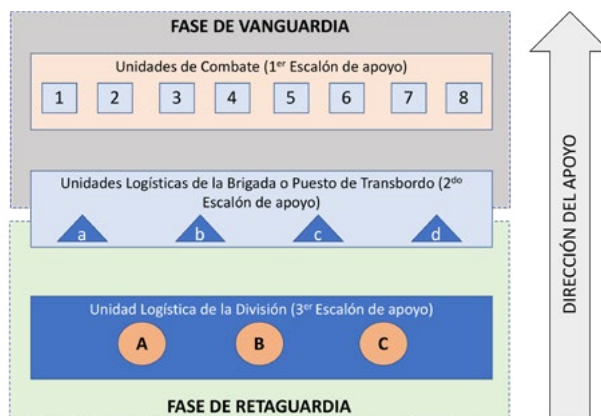


Figura N° 3 “Estructura del ciclo de apoyo logístico”.

Fuente: Elaboración propia.



4.2. Formulación 2E-CWLPwTr

El modelo 2E-CWLPwTr es un problema de localización de instalaciones para dos escalones de apoyo (segundo y tercero) el que se desarrolla en dos etapas. En una primera etapa se seleccionan las localizaciones de las instalaciones de la unidad logística de la división y de la brigada (o puestos de transbordo). Luego, en la segunda etapa se configuran los viajes de ida y vuelta, en las fases de vanguardia y retaguardia, a fin de satisfacer la demanda del primer escalón de apoyo (unidades de combate).

4.2.1. Definición de set de datos, parámetros y variables de decisión del modelo 2E-CWLPwTr

En las tablas N° 2, 3 y 4 se definen el set de datos, parámetros y variables de decisión del modelo a ser utilizados en la formulación propuesta.

SETS	
I	Set de todos los nodos de clientes (unidades de combate).
J	Set de las posibles localizaciones de puestos de transbordo o instalaciones de brigada.
\mathcal{H}	Set de las posibles localizaciones de instalaciones divisionales.
\mathcal{K}	Set de vehículos de la fase de vanguardia.
\mathcal{L}	Set de vehículos de la fase de retaguardia.
\mathcal{G}	Set de las clases logísticas transportadas a los clientes.

Tabla N° 2 "Set de datos del problema".

Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETROS	
f_j	Costo fijo de abrir una instalación de brigada o puesto de transbordo.
f_h	Costo fijo de abrir una instalación logística de división.
C_{ij}	Costo de suplir la demanda del cliente "i" desde el puesto de transbordo "j". Este costo se compone por el producto entre la distancia recorrida d_{ij} , el factor de consumo de combustible Φ^{gv} a un precio estimado pr^v .
C_{jh}	Costo de suplir la demanda del puesto de transbordo "j" por la instalación divisional "h". Este costo se compone por el producto entre la distancia recorrida d_{jh} , el factor de consumo de combustible Φ^g a un precio estimado pr^l .
d_{ij}	Distancia recorrida entre el cliente "i" y puesto de transbordo "j".
d_{jh}	Distancia recorrida entre el puesto de transbordo "j" y la instalación divisional "h".
r^{gk}	Alcance máximo de los vehículos "k".
r^{gl}	Alcance máximo de los vehículos "l".



PARÁMETROS	
s^{gk}	Velocidad promedio de los vehículos "k".
s^{gl}	Velocidad promedio de los vehículos "l".
a^{gk}	Costo de operación de los vehículos pertenecientes al set \mathcal{K} .
a^{gl}	Costo de operación de los vehículos pertenecientes al set \mathcal{L} .
V^{gk}	Capacidad de transporte de los vehículos del set \mathcal{K} .
V^{gl}	Capacidad de transporte de los vehículos del set \mathcal{L} .
t_{ij}	Límite de tiempo para realizar los viajes de ida y vuelta en la fase de vanguardia.
t_{jh}	Límite de tiempo para realizar los viajes de ida y vuelta en la fase de retaguardia.
$b_i^{g_i}$	Demanda esperada del cliente "i" de la clase logística "g".
ρ	Número máximo de puestos de transbordo a ser abiertos.
λ	Número máximo de instalaciones divisionales a ser abiertas.
Q	Capacidad máxima de acopio de clases logísticas de puesto de transbordo.
Φ^{gv}	Factor de consumo de combustible de vehículos "v" para clases "g".
pr^v	Costo de combustible, por litro, para un vehículo "v" (USD).

Tabla N° 3 "Parámetros del problema".

Fuente: Elaboración propia.

VARIABLES DE DECISIÓN	
X_{ij}	Variable binaria para decidir si toda la demanda del cliente "i" es suplida por el puesto de transbordo "j".
y_j	Variable binaria para decidir si un puesto de transbordo es abierto o no.
V_h	Variable binaria para decidir si una instalación divisional es abierta o no.
z_{ij}^{gk}	Variable binaria que define el vehículo del set K seleccionado para la fase de vanguardia.
w_{jh}^{gl}	Variable binaria que define el vehículo del set L seleccionado para la fase de retaguardia.

Tabla N° 4 "Variables de decisión".

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Definición de restricciones de la formulación 2E-CWLPwTr

La primera restricción (ecuación N° 1) establece que cada cliente puede recibir flujo desde una sola instalación (segundo escalón) y, en consecuencia, solo se visita una



vez. Para la fase de vanguardia, la suma es igual a uno porque el número de rutas que llegan a un cliente debe ser exactamente uno. En la fase de retaguardia, no existe esa restricción porque no hay una variable definida similar en esa parte.

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in J$$

Ecuación N° 1

La segunda y tercera restricción (ecuación N° 2 y 3) establece que para todos los clientes que reciben servicio, el número total de instalaciones desde las que reciben el abastecimiento debe ser menor o igual a un número específico, representado por ρ para la fase de vanguardia y λ para la fase de retaguardia. Por lo tanto, esta restricción limita el número de puestos de transbordo abiertos e instalaciones logísticas de la división, respectivamente.

$$\sum_{j \in J} y_j \leq \rho \quad \forall i \in J$$

Ecuación N° 2

$$\sum_{h \in \mathcal{H}} v_h \leq \lambda \quad \forall j \in J$$

Ecuación N° 3

La cuarta restricción (ecuación N° 4) establece que una ruta entre la localización de un puesto de transbordo o unidad logística de la brigada (segundo escalón de apoyo) y un cliente se abre si y solo si esa instalación está disponible, lo que significa que x_{ij} debe ser igual a uno para crear la ruta entre la instalación logística ij y las unidades de combate i . De lo contrario, no existirá conexión alguna entre ellos.

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i \in J, \forall j \in J$$

Ecuación N° 4

La quinta restricción (ecuación N° 5) es bastante similar a la cuarta restricción (ecuación N° 4), pero con una diferencia relevante. Esta restricción asegura que, para todas las instalaciones del segundo escalón abiertas, existirá al menos una ruta desde este lugar y un cliente (unidad de combate) i .

$$\sum_{i \in J} x_{ij} \geq y_j \quad \forall j \in J$$

Ecuación N° 5



La sexta restricción (ecuación N° 6) se refiere a la asignación de demanda total para cada puesto de transbordo (segundo escalón de apoyo) abierto. Significa que para cada puesto de transbordo que se usa o selecciona, con una capacidad particular Q_j , la demanda total que debe satisfacer no puede exceder su capacidad.

$$\sum_{i \in J} b_i^g x_{ij} \leq Q_j \quad \forall j \in J, \forall g \in G$$

Ecuación N° 6

La séptima restricción (ecuación N° 7) se refiere a la asignación de capacidad del vehículo. Para la fase de vanguardia, la demanda asociada con cada ruta debe ser menor o igual a la capacidad total del vehículo, teniendo en cuenta que cada vehículo puede tener una capacidad específica y usarse para una clase determinada. Por lo tanto, si la cantidad de carga a transportar excede la capacidad del camión, habrá otro vehículo que se asignará hasta satisfacer esta restricción.

Para la fase de retaguardia, la octava restricción (ecuación N° 8) funciona de manera similar a la anterior. Sin embargo, dado que no todos los puestos de transbordo están abiertos, esta restricción establece que, para todas las instalaciones del segundo escalón de apoyo, de modo que esté disponible porque tiene una asignación a un cliente i y una ruta existente x_{ij} , la suma de todas las demandas que atiende constituirá la demanda que debe satisfacer cada instalación divisionaria abierta.

$$b_i^g x_{ij} \leq \sum_{k \in K} z_{ij}^{gk} v^{gk} \quad \forall i \in J, \forall j \in J, \forall g \in G$$

Ecuación N° 7

$$\sum_{i \in J} b_i^g x_{ij} \leq \sum_{l \in L} w_{jh}^{gl} v^{gl} \quad \forall j \in J, \forall h \in H, \forall g \in G$$

Ecuación N° 8

La novena y décima restricción (ecuación N° 9 y 10) define que, para las fases de vanguardia y retaguardia, un vehículo se puede utilizar como máximo solo una vez, teniendo en cuenta que cada vehículo se especifica por su tamaño y la utilización por clase logística. Además, para el segundo escalón de apoyo indica que la suma es menor o igual a v_h , lo que corresponde a la variable binaria de localización debido a su dependencia de la fase de vanguardia.



$$\sum_{i \in J} \sum_{j \in J} z_{ij}^{gk} \leq 1 \quad \forall g \in G, \forall k \in K$$

Ecuación N° 9

$$\sum_{j \in J} w_{jh}^{gl} \leq v_h \quad \forall h \in H, \forall g \in G, \forall l \in L$$

Ecuación N° 10

La undécima y duodécima restricción (ecuación N° 11 y 12) se centra en las restricciones de rango en cada fase. Teniendo en cuenta que en este modelo los recorridos solo se ejecutan bajo la modalidad de ida y vuelta, el alcance máximo de cada vehículo no puede exceder la distancia recorrida. Esta restricción corresponde a dos veces la distancia entre un cliente (primer escalón de apoyo) i y un puesto de transbordo (segundo escalón de apoyo) j , para la fase de vanguardia, y entre una instalación divisionaria (tercer escalón de apoyo) j y un puesto de transbordo h , para la fase de retaguardia.

$$2d_{ij}z_{ij}^{gk} \leq r^{gk} \quad \forall i \in J, \forall j \in J, \forall k \in K$$

Ecuación N° 11

$$2d_{jh}w_j^{gl} \leq r^{gl} \quad \forall j \in J, \forall h \in H, \forall l \in L$$

Ecuación N° 12

Las ecuaciones N° 13 y 14 establecen que habrá una restricción de tiempo para cada vehículo, dependiendo de su velocidad promedio s . Por lo tanto, para ambas fases, el tiempo total para cubrir el viaje entre la fuente (instalación logística o puesto de transbordo) y el cliente, ida y vuelta, es menor o igual al tiempo máximo permitido t .

$$\frac{2d_{ij}z_{ij}^{gk}}{s^{gk}} \leq t_{ij} \quad \forall i \in J, \forall j \in J, \forall k \in K$$

Ecuación N° 13

$$\frac{2d_{jh}w_j^{gl}}{s^{gl}} \leq t_{jh} \quad \forall j \in J, \forall h \in H, \forall l \in L$$

Ecuación N° 14

La ecuación N° 15 definen las restricciones asociadas a las variables de decisión como variables binarias, para todos los conjuntos en los que están definidas.

$$x_{ij}, y_j, z_{ij}^{gk}, v_h, w_{jh}^{gl} \in 0,1 \quad \forall i \in J, j \in J, h \in H, k \in K, g \in G, l \in L$$

Ecuación N° 15



4.2.3. Definición de la función objetivo 2E-CWLPwTr

La ecuación N° 16 corresponde a la función objetivo a minimizar en esta formulación. La primera parte busca cuantificar el costo fijo que existe cuando se abre un puesto de transbordo (segundo escalón de apoyo). La situación análoga ocurre con la tercera parte de la ecuación, pero se relaciona con la decisión de apertura de una instalación divisional (tercer escalón de apoyo). La segunda y cuarta parte de la función objetivo corresponden a los costos de transporte y uso del vehículo para las fases de vanguardia y retaguardia, respectivamente.

$$\min_{x,y,v,z,w} \sum_{j \in J} f_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} \sum_{k \in K} z_{ij}^{gk} (2 c_{ij} + a^{gk}) + \sum_{h \in H} f_h y_h + \sum_{h \in H} \sum_{j \in J} \sum_{g \in G} \sum_{l \in L} w_{jh}^{gl} (2 c_{jh} + a^{gl})$$

Ecuación N° 16

5. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Este capítulo se centra en el hecho de que la formulación matemática presentada en la sección anterior debe probarse utilizando datos reales. Hay dos partes en este capítulo: experimentos, que incluye suposiciones hechas y datos utilizados para configurar los modelos y resultados, donde se presentan los resultados principales relacionados con los datos.

La formulación matemática 2E-CWLPwTr está escrita en el optimizador FICO Xpress 8.7 utilizando el “solver” Xpress, mediante una licencia académica. Igualmente, se utilizó un computador con un procesador Intel Core i5 de 2.6 GHz, con 8 GB de memoria RAM y disco duro de estado sólido de 250 GB (SSD).

5.1. Experimentos

Los datos para el experimento se determinan utilizando escenarios, lo que significa que se establecen tres niveles de intensidad de combate: alto, medio y bajo. Estos escenarios se traducen en un parámetro cuantitativo, en toneladas, para las clases logísticas críticas que requieren las unidades de combate.

Una de las primeras suposiciones realizadas es la cantidad de clases de logística a considerar. Para este estudio, hay tres clases que fueron seleccionadas debido a su relevancia en las operaciones militares. La clase I (alimentos y agua), clase III (combustible) y clase V (municiones) son las clases de logística que serán objeto de análisis mediante el uso de tres escenarios definidos.

La tabla N° 5 muestra las necesidades de las clases, expresadas en tonelaje, para cada nivel de intensidad de enfrentamiento.



Unidad	Escenario	MUNICIÓN			AGUA			COMIDA			COMBUSTIBLE		
		AI	MI	BI	AI	MI	BI	AI	MI	BI	AI	MI	BI
Batallón de Infantería		27	19	8	6	6	6	4	4	4	17	12	5
Grupo de Tanques		13	9	4	4	4	4	3	3	3	18	13	5
Grupo de Artillería		22	16	7	5	5	5	3	3	3	8	6	2
Compañía de Ingenieros		1	1	1	3	3	3	2	2	2	5	3	1
Pelotón de Telecomunicaciones		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
Compañía Logística		1	1	1	3	1	3	2	1	2	6	4	2
HQ de Brigada		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla N° 5 "Demandas de las unidades de combate a distinta intensidad".

Fuente: Elaboración propia.

El segundo elemento que se establece para este estudio es la estructura de una división (unidad de armas combinadas). Se supondrá una homogeneidad desde el punto de vista logístico. Aunque esta no es una situación estándar que se observa en una división real, es una buena aproximación para obtener un resultado factible para el problema. Además, el modelo matemático considera una flota no homogénea de vehículos y clases logísticas que transportarán.

La tabla N° 6 contiene todos los datos para alimentar los parámetros que se utilizan en estos modelos matemáticos.

VALORES DE LOS PARÁMETROS UTILIZADOS			
f_j	USD 16.000	f_h	USD 450.000
r^{gk}	300 km	r^{gl}	300 km
s^{gk}	10 km/h	s^{gl}	8 km/h
a^{gk}	USD 100	a^{gl}	USD 180
V^{gk}	5 toneladas	V^{gl}	20 toneladas
t_{ij}	24 horas	t_{jh}	24 horas
b_i^{gk}	Según tabla N° 5	Φ^{gv}	0,3
ρ	Menor o igual a 3	λ	Menor o igual a 4
Q	1.000 toneladas	pr^v	USD 1,00 por litro

Tabla N° 6 "Valores de los parámetros del problema".

Fuente: Elaboración propia.

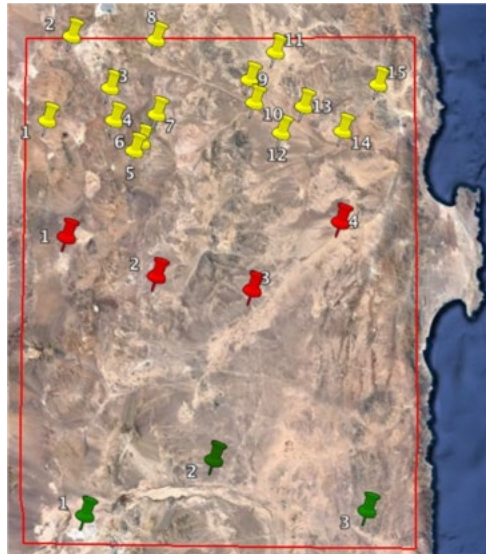


Figura N° 4 "Distribución geográficas de las unidades".

Fuente: Elaboración propia.

El experimento se ejecuta en la Región de Antofagasta, al norte de Chile, en un ancho de 170 km y una profundidad de 220 km ubicados inmediatamente hacia el este desde la ciudad de Antofagasta. Esta región tiene un clima desértico con una superficie relativamente plana. La dirección de apoyo para la operación es de norte a sur. El esquema de la distribución de división en el terreno se muestra en la figura N° 4. Cada unidad de combate está representada por una figura amarilla, donde las unidades del lado izquierdo son las unidades de la brigada motorizada y las unidades del lado derecho, son las unidades de la brigada acorazada. Del mismo modo, la marcación roja corresponde a los sitios candidatos para la unidad logística de la brigada o puesto de transbordo y los de color verde a los sitios candidatos para localizar las instalaciones divisionales.

La asignación numérica de las unidades de combate desplegadas en el terreno se presenta en la siguiente tabla.

BRIGADA ACORAZADA		BRIGADA MOTORIZADA	
N° DE CLIENTE	UNIDAD	N° DE CLIENTE	UNIDAD
1	Pelotón de Telecomunic.	9	Grupo de Artillería
2	Batallón de Infantería	10	HQ de Brigada
3	Grupo de Artillería	11	Batallón de Infantería
4	Compañía de Ingenieros	12	Compañía Logística



BRIGADA ACORAZADA		BRIGADA MOTORIZADA	
Nº DE CLIENTE	UNIDAD	Nº DE CLIENTE	UNIDAD
5	Compañía Logística	13	Grupo de Tanques
6	HQ de Brigada	14	Compañía de Ingenieros
7	Grupo de Tanques	15	Pelotón de Telecomunic.
8	Batallón de Infantería		

Tabla Nº 7 "Asignación de números de clientes a las unidades de combate".

Fuente: Elaboración propia.

La formulación matemática actual es estática, por lo que se ejecuta en un período de tiempo fijo y no considera su evolución dinámica. Se establece de esta manera porque facilita el proceso computacional, obteniendo mejores resultados en un menor tiempo. Se requiere otra formulación para lidiar con una naturaleza dinámica, la que no se trata en este estudio. Además, bajo los mismos criterios seguidos por Toyoglu *et. al.* (2012) un modelo estático para un solo período de tiempo se considera útil para una estimación logística real ejecutada para una división con instalaciones fijas (permanente) ya que, debido a que el comportamiento del conflicto es incierto, la estimación cuantitativa puede actualizarse en cada período y ajustarse a la situación que se presente en dicho momento.

5.2. Resultados del modelo 2E-CWLPwTr

Los resultados para los tres escenarios utilizados en este estudio se presentan en la tabla Nº 8 para la demanda de alta intensidad, en la tabla Nº 9 para demanda de intensidad media y en la tabla Nº 10 para demanda de baja intensidad. Además, en la tabla Nº 11 se presentan los costos totales, fijos y de transporte.

RETAGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
Desde (i)	Hasta (f)	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	2	5	2	1	5
	3	4	2	1	4

VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES				VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible	i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	1	1	1	1	1	3	9	5	1	1	2
	2	6	2	1	4		10	1	1	1	1



VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES				VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible	i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	3	5	1	1	2	3	11	6	2	1	4
	4	1	1	1	1		12	1	1	1	2
	5	1	1	1	2		13	3	1	1	4
	6	1	1	1	1		14	1	1	1	1
	7	6	1	1	4		15	1	1	1	1
	8	3	1	1	4						

Tabla N° 8 "Resultados en escenario de alta intensidad".

Fuente: Elaboración propia.

RETAGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
Desde (i)	Hasta (f)	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	2	4	2	1	4
	3	3	2	1	3

VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES				VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible	i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	1	1	1	1	1	3	9	4	1	1	2
	2	4	2	1	3		10	1	1	1	1
	3	4	1	1	2		11	4	2	1	3
	4	1	1	1	1		12	1	1	1	1
	5	1	1	1	2		13	2	1	1	3
	6	1	1	1	1		14	1	1	1	1
	7	4	1	1	3		15	1	1	1	1
	8	2	1	1	3						

Tabla N° 9 "Resultados en escenario de media intensidad".

Fuente: Elaboración propia.

RETAGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
Desde (i)	Hasta (f)	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	2	2	2	2	2
	3	1	1	1	1



VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES				VANGUARDIA		NÚMERO DE CAMIONES			
i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible	i	f	Munición	Agua	Comida	Combustible
2	1	1	1	1	1	3	10	1	1	1	1
	2	2	2	1	1		11	2	2	1	1
	3	2	1	1	1		12	1	1	1	1
	4	1	1	1	1		13	1	1	1	1
	5	1	1	1	1		14	1	1	1	1
	6	1	1	1	1		15	1	1	1	1
	7	2	1	1	1						
	8	1	1	1	1						
	9	2	1	1	1						

Tabla Nº 10 “Resultados en escenario de baja intensidad”.

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas presentadas anteriormente muestran la asignación de localizaciones y vehículos en los tres escenarios de demandas. En la primera parte de la tabla, el nodo inicial, que corresponde a la instalación de la división seleccionada “i” llega al puesto de transbordo asignado “f”. Además de las asignaciones, la tabla muestra el número de camiones que se utilizan para cada tipo de clase y ruta.

De manera similar, la segunda parte de las tablas muestran los resultados de la fase de vanguardia para todos los escenarios. Bajo la misma estructura, primero presentan el nodo inicial “i”, que corresponde al puesto de transbordo candidato seleccionado que llega a un cliente particular “f” (unidad de combate). Además de las asignaciones respectivas, la tabla presenta el número de camiones que se utilizan para cada tipo de clase y ruta.

Los resultados de 2E-CWLPwTr son interesantes ya que, en los tres casos, las instalaciones seleccionadas para las fases de retaguardia y vanguardia fueron las mismas. La única diferencia, aparte del número de vehículos en cada escenario, es que, en el escenario de baja intensidad, el puesto de transbordo admite las primeras ocho unidades de combate de una brigada más otra unidad de la brigada vecina.

Además, la tabla Nº 11 muestra que a medida que se debe satisfacer una menor demanda, la relevancia del costo fijo aumenta y el costo de transporte disminuye en peso relativo. En este caso, para el escenario de alta intensidad, el costo fijo es un 7,56% del total, 8,91% para la intensidad media y 12,31% para el escenario de baja intensidad. Este comportamiento se explica porque a medida que se debe cubrir una menor demanda, disminuye el número de vehículos y los costos de transporte, bajo un costo fijo que no disminuye.



Costo	INTENSIDAD DE DEMANDA (M USD)		
	Alta (A)	Media (M)	Baja (B)
Fijo	482	482	482
Transporte	5.898	4.928	3.434
Total	6.380	5.410	3.916

Tabla N° 11 "Costos de abastecimiento en diversos escenarios".

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se alcanzó la condición de optimalidad en los tres casos, con un 100% de convergencia entre los valores objetivos mejor vinculados y MILP. El tiempo máximo requerido fue de 4,36 segundos para el modelo de alta intensidad.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. Conclusiones

Esta formulación se basa en el modelo tradicional MILP - CWLP (capacitated warehouse location problem) extendida, no solo para seleccionar los puestos de transbordo, sino también para determinar la ubicación óptima las instalaciones de la división y programar los traslados de vehículos de ida y vuelta, dentro del rango y limitaciones de tiempo.

Esta formulación matemática se considera más fuerte que otras similares porque garantiza, por restricción de ecuación N° 4 que, si se selecciona una instalación, al menos un vehículo debe realizar un viaje a un cliente o punto de transbordo, según el caso particular, de modo que el sistema se construirá al costo mínimo, bajo un conjunto de restricciones.

Otro elemento de utilidad de esta formulación es que permite a los planificadores obtener el número óptimo de vehículos de tal manera que el costo total sea el mínimo en todas las condiciones mencionadas. Evita la problemática que existe cuando los planificadores deben estimar el tamaño de la flota porque dichas estimaciones pueden generar un resultado no factible.

Además, esta formulación elimina una variable de decisión binaria en la fase de retaguardia, similar a *x_{ij}* de la fase de vanguardia, porque no es necesario asignar las demandas de los clientes en las instalaciones de la división. Esta suposición se justifica por el hecho de que, en la fase de vanguardia, todos los clientes deben asignarse como máximo a un puesto de transbordo, por lo que, para todos los clientes, la suma de todas las rutas para conectarse a un puesto de transbordo es igual a uno. Ese no



es el caso de la fase de retaguardia, donde no se seleccionan todos los puestos de transbordo para ser atendidos. Además, el modo de enrutamiento se ejecuta mediante la variable binaria w_{jh}^{gl} y la demanda final sobre la instalación divisional se obtiene agregando la demanda de los puestos de transbordo una vez que se asigna a una instalación (tercer escalón).

En general, este modelo muestra un adecuado comportamiento en relación con el tiempo de resolución y la coherencia de los resultados que genera. En condiciones experimentales, el mayor tiempo para resolver la instancia de demanda de alta intensidad fue de 4,36 segundos. Debido a que el modelo solo realiza viajes de ida y vuelta, su formulación de flujo es suficiente para proporcionar un resultado óptimo en un corto tiempo.

La debilidad que tiene este modelo está relacionada con la eficiencia en el uso de los medios logísticos. Aunque las soluciones son óptimas, esta asignación es solo un límite superior en todo el proceso de optimización en comparación al modelo LRP (locating routing problem, el cual cambia los viajes de ida y vuelta por recorridos VRP). Se espera que el modelo 2E-LRP tenga un costo total menor o al menos igual al modelo 2E-CWLPwTr.

6.2. Futuras líneas de trabajo

En primer lugar, la definición de una demanda estocástica, basada en distribuciones de probabilidades o múltiples escenarios, permitirá realizar estimaciones que incorporen la variabilidad propia de una cadena de suministro. Por lo tanto, al momento de definir una variable, se establecen los escenarios para los que se requiere que la solución sea siempre factible, aunque no necesariamente óptima (optimización robusta).

En segundo término, se requiere integrar el problema logístico estratégico (localización de instalaciones) y el problema de nivel operativo (ruteo) con el nivel táctico de la logística, representado por la gestión de inventarios en las instalaciones logísticas.

La tercera línea de trabajo futura consiste en modificar el modo de transporte de esta formulación, desde viajes de ida y vuelta a ciclos de abastecimiento (VRP), implementándose un modelo 2E-LRP, lo que permitirá hacer un uso más eficiente de los recursos disponibles.

Finalmente, la cuarta línea de trabajo está constituida por la modelación y resolución de estos problemas desde una perspectiva multiperíodo, donde la técnica a utilizar sea las mencionadas anteriormente u otras, tales como optimización dinámica.



BIBLIOGRAFÍA

- CRAIG, R.; LUNDAY, B.; HILL, R. & NESBITT, P. (2017). The Military Theater Distribution Network Design Problem. *Business Premium Collection*, 28-37.
- GUE, K. (2003). A Dynamic Distribution Model for Combat Logistics. *Computer and Operations Research*, 367-381.
- KRESS, M. (2016). Optimizing Logistic Network. In MOSHE, K. *Operational Logistics: The Art and Science of Sustaining Military Operations*, (pp. 203-218). Springer International Publishing.
- TOYOGLU, H.; EKIN KARASAN, O. & YETIS KARA, B. (2011). Distribution Network Design on the Battlefield. *Naval Research Logistics*, 188-209.
- TOYOGLU, H.; EKIN KARASAN, O. & YETIS KARA, B. (2012). A New Formulation Approach for Location-Routing Problems. *Network and Spatial Economics*, 635-659.
- YEW SOON, N. (2003). *Optimizing a Military Supply Chain in the Presence of Random, Non-Stationary Demands*. Monterey: Naval Postgraduate School.