



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPTO. INGENIERIA INDUSTRIAL

Profesor Guía: Felipe Baesler A.

**“APLICACIÓN DE SIMULACIÓN DISCRETA PARA UN SISTEMA
DE LOGÍSTICA MILITAR BASADO EN CASOS HISTÓRICOS DE
LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL”**

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

David Andrés Muñoz Soto

Concepción, 20 de Abril de 2009

DEDICATORIA

A Dios por guiarme durante este largo proyecto y poder ver materializado lo que hace algunos años era sólo un sueño que veía de manera lejana.

Dedico esta tesis y en general toda mi carrera universitaria a mis padres y hermanos por su incondicional apoyo durante estos seis años de estudio. Gran parte de este logro es gracias a su esfuerzo y dedicación.

Quiero también hacer un reconocimiento especial a todas aquellas personas con las que compartí buenos y malos momentos durante el largo proceso universitario, en especial a Carolina, Juan Pablo y Manuel.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este largo proceso universitario, y en especial en el desarrollo de esta tesis, no puedo dejar de agradecer a la Universidad del Bío Bío, y en especial al Departamento de Ingeniería Industrial por haberme dado las herramientas que hoy se ven reflejado tras el título de Ingeniero Civil Industrial.

Agradezco también al Ejército de Chile, institución que me dio la oportunidad de realizar mi trabajo de titulación, en especial a todo el personal del Centro de Modelación y Simulación del Ejército, los que crearon un grato ambiente laboral que me permitió desarrollar con éxito el proyecto de tesis. Quiero agradecer particularmente al Coronel Sergio Quijada, por su preocupación y apoyo durante mi estadía en Santiago.

En cuanto a lo académico, me gustaría dar las gracias al Profesor Felipe Baesler, quien hizo crecer mi interés por la simulación, y quien además, me dio la oportunidad de desempeñarme como alumno ayudante e hizo los contactos para poder desarrollar mi tesis en el Ejército.

Un agradecimiento especial merecen mis padres y hermanos, de los cuales recibí todo el apoyo durante esta tesis. Además quiero agradecer a mi Abuelita Estela, tío Fidel, Bernardita, Nicolás y Angelo, con quienes compartí gran parte de mi tiempo durante estos últimos seis meses.

RESUMEN

La generación de modelos ha ayudado al ser humano a mejorar el proceso de toma de decisiones al que se encuentra expuesto día a día. Durante la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron una serie de modelos que a la larga contribuirían no sólo en el ámbito militar, sino que además en la actualidad son ampliamente aplicados y estudiados en la sociedad civil. Una de las herramientas que sirvió como método de optimización y que posteriormente influyó sobre el desenlace final de la Segunda Guerra Mundial, fue la Investigación Operativa. Desde ese momento, se han desarrollado técnicas que permitan una modelación certera, en este sentido, la simulación ha sido una de las herramientas que más beneficios ha reportado, especialmente en ámbitos civiles. Dentro de las principales ventajas que presenta la simulación, es que permite analizar el sistema real bajo distintos escenarios y ver cómo sería el comportamiento de los indicadores de desempeño, expuesto a distintas condiciones propuestas. La simulación aun no siendo una herramienta optimizante, permite proponer mejoras que puedan estar cada vez más cercanas al óptimo.

En este trabajo de investigación, se utiliza la simulación discreta para la propuesta de modelos computacionales, que permitan dar soporte a distintos sistemas de logística militar bajo una serie de escenarios. La simulación discreta, permitirá reducir la alta incertidumbre existente ante diversos ambientes complejos que puedan presentarse en ámbitos castrenses, ya sean de desastre, catástrofe, ayuda humanitaria o misiones de paz. Ya desde la época de Napoleón se consideraba a la logística militar como el tercer pilar fundamental del arte de la guerra, complementada con la estrategia y la táctica. Según expertos, el desenlace final de la batalla podría explicarse en un setenta por ciento por el rendimiento de los sistemas logísticos.

Dentro de los principales objetivos de este trabajo, se encuentra la propuesta del desarrollo de modelos de combate, estudiadas desde un enfoque

discreto. Para dichos efectos, se utilizan las ecuaciones diferenciales propuestas por Lanchester (1916).

La información utilizada, se basa principalmente en datos recopilados desde textos referentes a la 2GM. En esta investigación se hace el análisis de la Segunda Batalla de El Alamein, ocurrida en el Norte de África, utilizando las ecuaciones de Lanchester, con las que se busca mostrar cuál hubiera sido el tamaño de las fuerzas bajo ciertos escenarios.

Para finalizar esta investigación, se proponen tres modelos de logística militar, los que abarcan las áreas de abastecimiento de combustible, logística médica y logística de mantenimiento y recuperación. De este trabajo se concluye que la simulación discreta puede ser de gran ayuda al momento de evaluar el rendimiento de un determinado sistema de logística militar, sujeto a ciertas circunstancias y políticas adoptadas. Con motivos de realizar la simulación, para la modelación y posterior análisis de resultados, se utilizó el software Arena.

INDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del Estudio	4
1.1.1 Objetivo General	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 Metodología	5
1.3 Limitaciones	6
1.4 Estructura	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1 Simulación	9
2.1.1 ¿Qué es la Simulación?	9
2.1.2 Etapas de un Estudio de Simulación	13
2.1.3 Clasificaciones de la Simulación	17
2.1.4 Simulación de Eventos Discretos	18
2.1.5 Ventajas y Desventajas de la Simulación	19
2.1.6 Errores Típicos en la Simulación	21
2.1.7 Resumen	21
2.2 Arena	23
2.2.1 ¿Qué es Arena?	23
2.2.2 Paneles del Software Arena	25
2.3 Conclusión	27
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO DE LA LOGÍSTICA MILITAR UNIVERSAL	
3.1 Logística Militar Universal.....	28
3.2 Logística Militar Vs Logística Civil	29
3.3 Roles de la Logística Militar	30
3.4 Ramas de la Logística Militar	31
3.5 Clasificación de los Suministros	31
3.6 Movimiento y Transporte	33
3.6.1 Logística Militar de Transporte	34
3.6.2 Selección del Tipo de Transporte.....	34

3.7 Cadena de Abastecimiento	36
3.7.1 Herramientas para la Gestión de la Cadena de Abastecimiento	40
3.7.2 Indicadores KPI de Logística y Cadena de Abastecimiento	41
3.7.3 Enfoques Futuros	42
CAPÍTULO IV: MODELOS MATEMÁTICOS DE COMBATE	
4.1 Ecuaciones de Lanchester	44
4.2 Análisis de las Ecuaciones de Lanchester	47
4.2.1 Modelo AIMED.Fire	47
4.2.1.1 Predicción del Ejército Ganador	48
4.2.2 Modelo Area-Fire	49
4.2.2.1 Predicción del Ejército Ganador	50
4.2.3 Modelo Guerrilla	51
4.2.4 Resumen de Modelos de Lanchester	52
4.3 Ecuaciones de Lanchester Generalizado	53
4.4 Término del Combate	54
4.4.1 Reglas de Decisión de Término de Combate	54
4.4.1.1 Regla de decisión absoluta	54
4.4.1.2 Regla de decisión proporcional	55
4.4.1.3 Regla AOP	56
4.4.1.4 Regla AAP	56
4.5 Ecuaciones de Lanchester Modeladas en Arena	59
4.5.1 Modelo Lanchester Lineal sin Incorporación de Nuevas Tropas	59
4.5.2 Modelo Lanchester Lineal con Incorporación de Nuevas Tropas	62
4.5.3 Modelo Lanchester Cuadrático sin Incorporación de Nuevas Tropas	63
4.6 La Fatiga y su Incidencia sobre el Combate	65
4.6.1 Fatiga del Combate y fatiga en Combate	65
4.6.2 Pérdida de Rendimiento Proyectado dada la Fatiga en Operaciones Continuas	66
4.6.3 Análisis Matemático para una Fuerza Blindada	71

4.6.4 Conclusiones y Recomendaciones	73
4.6.5 Incorporación de la Fatiga a Modelos de Lanchester	75
4.7 Reglas de Decisión de Término de Combate Aplicadas en Arena	78
4.8 Conclusión	79
CAPÍTULO V: SEGUNDA BATALLA DE EL ALAMEIN	80
5.1 Introducción a El Alamein	81
5.2 Desarrollo de la Batalla	84
5.3 Análisis Logístico de El Alamein	88
5.4 Ajuste de Ecuaciones de Lanchester	92
5.4.1 Aplicación de Lanchester Cuadrado	93
5.4.2 Aplicación de Lanchester Generalizado	95
5.5 Modelo Computacional	97
5.5.1 Datos de Entrada	99
5.5.2 Descripción de Módulos	99
5.5.3 Análisis de Resultado	101
5.5.4 Experimentación	102
5.6 Conclusión	104
CAPÍTULO VI: MODELOS COMPUTACIONALES REALIZADOS ..	106
CON ARENA	
6.1 El Combustible y su Importancia	111
6.1.1 Objetivos del Modelo	112
6.1.2 Descripción del Modelo	112
6.1.3 Resumen de Supuestos y Limitaciones del Modelo ..	114
6.1.4 Modelo Conceptual y Computacional	116
6.1.5 Descripción de Módulos	119
6.1.6 Análisis de Resultados	121
6.1.7 Propuesta de Escenarios y Experimentación	122
6.1.8 Importancia del Abastecimiento de Combustible	124
6.1.9 Logística de Abastecimiento Futura	124
6.1.9.1 Estanques Plegables	125
6.1.9.2 Abastecimiento aéreo de combustible ..	129

6.1.10 Conclusiones	133
6.2 Logística Médica Militar	135
6.2.1 Triage	135
6.2.1.1 Clasificación del Triage	137
6.2.2 Mortalidad de Soldados Heridos	139
6.2.3 Modelo de Logística Médica Militar	142
6.2.4 Descripción del Modelo	143
6.2.5 Resumen de Supuestos y Limitaciones del Modelo	144
6.2.6 Modelo Conceptual y Computacional	145
6.2.7 Descripción de Módulos	147
6.2.8 Análisis de Resultados	149
6.2.9 Propuesta de Escenarios y Experimentación	152
6.2.9.1 Aumento de capacidad de las ambulancias ..	152
6.2.9.2 Aumento en la cantidad de ambulancias	154
6.2.10 Conclusión	155
6.3 Logística de Mantenimiento y Recuperación	158
6.3.1 Descripción del Modelo	161
6.3.1.1 Batalla del Kursk	161
6.3.1.2 Datos de Entrada	162
6.3.2 Objetivos del Modelo	163
6.3.3 Supuestos y Limitaciones	163
6.3.4 Modelo Conceptual y Computacional	164
6.3.5 Descripción de Módulos	166
6.3.6 Análisis de Resultados	168
6.3.7 Propuesta de Escenarios y Experimentación	169
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES	172
Bibliografía	179
Glosario	185
Anexo A Mapas de Movimientos de los Ejércitos en El Alamein ..	187
Anexo B Resultados del Modelo de Logística Médica	189

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Módulos del panel de procesos básicos	25
Tabla 2.2	Módulos del panel de procesos avanzados	26
Tabla 3.1	Clasificación de los suministros	32
Tabla 3.2	Medios militares de transporte	35
Tabla 4.1	Resumen de predicción para las ecuaciones de Lanchester	52
Tabla 4.2	Resumen de reglas de decisión de término de combate	57
Tabla 4.3	Descripción modelo Lanchester lineal sin incorporación	60
Tabla 4.4	Variables Utilizadas para Lanchester lineal sin incorporación	61
Tabla 4.5	Descripción de módulos Lanchester lineal con incorporación	62
Tabla 4.6	Descripción de módulos Lanchester cuadrático sin incorporación	64
Tabla 4.7	Variables utilizadas para Lanchester cuadrático sin incorporación	64
Tabla 4.8	Rendimientos para miembros de una fuerza blindada	71
Tabla 4.9	Ecuaciones predictoras de rendimiento	72
Tabla 4.10	Descripción modelo Lanchester lineal con incorporación de cansancio	76
Tabla 4.11	Variables utilizadas en Modelo Lanchester Lineal con incorporación de cansancio	76
Tabla 5.1	Estadísticas diarias de El Alamein	92
Tabla 5.2	Estimación de bajas diarias según Lanchester Cuadrado ..	94
Tabla 5.3	Errores de estimación de bajas según Lanchester Cuadrado	94
Tabla 5.4	Estimación de bajas diarias según Lanchester Generalizado	96
Tabla 5.5	Errores de estimación de bajas según Lanchester Generalizado	96
Tabla 5.6	Datos de entrada para El Alamein	99

Tabla 5.7	Descripción de módulos de El Alamein	99
Tabla 5.8	Estadística descriptiva de corridas piloto de El Alamein	101
Tabla 5.9	Intervalos de Confianza para el tamaño de fuerzas	103
Tabla 6.1	Resumen de datos de entrada modelo de abastecimiento .	115
Tabla 6.2	Descripción de módulos del modelo de	119
	abastecimiento de combustible	
Tabla 6.3	Variables utilizadas para modelo de abastecimiento	120
Tabla 6.4	Nivel de Combustible	121
Tabla 6.5	Combustible total según escenario	122
Tabla 6.6	Estanques Plegables	125
Tabla 6.7	Tasa de mortalidad histórica	140
Tabla 6.8	Tasa de mortalidad histórica modificada.....	140
Tabla 6.9	Descripción de módulos del modelo médico	147
Tabla 6.10	Estadísticas descriptivas de corridas piloto del modelo	150
	médico	
Tabla 6.11	Estadísticas descriptivas reales del modelo médico	151
Tabla 6.12	Estadísticas descriptivas del modelo médico escenario 1 ..	153
Tabla 6.13	Estadísticas descriptivas del modelo médico escenario 2 ..	154
Tabla 6.14	Vehículos de Recuperación.....	160
Tabla 6.15	Datos de entrada del modelo de recuperación	162
Tabla 6.16	Descripción de módulos del modelo de recuperación	166
Tabla 6.17	Variables utilizadas en el modelo de recuperación	168
Tabla 6.18	Vehículos en combate al quinto día	168
Tabla 6.19	Intervalos de confianza por escenario en modelo de	171
	recuperación	

Índice de Gráficos

Gráfico 4.1	Proyección de rendimiento de los miembros de	68
	una fuerza mecanizada en operaciones continuas	
Gráfico 4.2	Proyección de rendimiento de los miembros	70
	de una fuerza blindada en operaciones continuas	
Gráfico 6.1	Ajuste tasa de mortalidad	141

Gráfico 6.2	Tamaño de fuerzas al quinto día para los distintos escenarios	170
-------------	---	-----

Índice de Figuras

Figura 1.1	Metodología Tesis	6
Figura 2.1	Relación Sistema – Modelo – Implementación	11
Figura 2.2	Diagrama Decisión Modelo	12
Figura 2.3	Carta Gantt de un Proyecto de Simulación	13
Figura 2.4	Etapas de un estudio de simulación	14
Figura 2.5	Motor de simulación de eventos discretos	19
Figura 2.6	Diagrama simple realizado en Arena	24
Figura 3.1	Principios básicos del transporte y movimiento	33
Figura 3.2	Cadena de abastecimiento	37
Figura 3.3	Cadena de abastecimiento para una organización civil	39
Figura 3.4	Cadena de abastecimiento para un Ejército	39
Figura 3.5	Cadena de influencia KPI	42
Figura 4.1	Regla de decisión de término de combate	58
Figura 4.2	Modelo Computacional Lanchester Lineal sin Incorporación	59
Figura 4.3	Modelo Computacional Lanchester Lineal con Incorporación	62
Figura 4.4	Modelo Computacional Lanchester Cuadrático sin Incorporación	63
Figura 4.5	Consecuencias de la Fatiga del Combate	67
Figura 4.6	Modelo Lanchester Lineal con Incorporación de Cansancio	75
Figura 5.1	Metodología Capítulo 5	81
Figura 5.2	Movimiento de los Ejércitos en El Alamein	83
Figura 5.3	Modelo Computacional para El Alamein	98
Figura 6.1	Metodología del Capítulo 6	107
Figura 6.2	Validación Estadística	108
Figura 6.3	Elementos básicos de la simulación	109
Figura 6.4	Mapa conceptual del modelo de abastecimiento de combustible	116

Figura 6.5	Modelo computacional de la logística de abastecimiento ... de combustible	118
Figura 6.6	Transporte de tambores plegables mediante camiones	127
Figura 6.7	Transporte de tambores plegables mediante arrastre	127
Figura 6.8	Helicóptero transportando un tambor plegable	128
Figura 6.9	Plataforma de transporte de estanques plegables para un avión C-130	129
Figura 6.10	Repostaje aéreo mediante sistema de pértiga	131
Figura 6.11	Repostaje aéreo mediante sistema de cesta y sonda	132
Figura 6.12	Mapa conceptual del modelo de logística médica	145
Figura 6.13	Modelo computacional de la logística militar médica	146
Figura 6.14	Mapa conceptual del modelo de reparación y mantención ..	164
Figura 6.15	Modelo computacional para la logística de reparación y mantención	165

Índice de Ecuaciones

Ecuación 4.1	Modelo Aimer Fire	47
Ecuación 4.2	Ley Cuadrática de Lanchester	48
Ecuación 4.3	Modelo Area Fire	49
Ecuación 4.4	Ley Lineal de Lanchester	49
Ecuación 4.5	Modelo Guerrilla	51
Ecuación 4.6	Ley de Guerrilla de Lanchester	51
Ecuación 4.7	Ecuación de Lanchester Generalizado	53
Ecuación 4.8	Rendimiento Lineal Porcentual	72
Ecuación 5.1	Ecuación Lanchester Cuadrático Ajustada	94
Ecuación 5.2	Ecuación Lanchester Generalizado Ajustada	96
Ecuación 6.1	Tasa de Mortalidad	141

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

La logística militar tiene su origen en el siglo XIX tras los pensamientos de Jomini, quién sirvió al Ejército de Napoleón. Este teórico militar expresa que la logística es la tercera rama principal del arte de la guerra, y que ésta, es la combinación de la táctica y la estrategia.

Luego de la Segunda Guerra Mundial, el concepto de logística militar, pasa desde un enfoque netamente de abastecimiento físico a un enfoque integral, en el que el área de servicios toma un papel fundamental.

El actual concepto de logística militar se refiere la planificación y ejecución necesaria para sostener y brindar apoyo logístico a sus fuerzas operativas en el momento, lugar y con la cantidad adecuada.

La capacidad logística que posea un ejército, ha resultado ser un factor importante y decisivo en el desenlace final de las batallas, diversos ejemplos existen en conflictos históricos, ocurridos principalmente desde la Segunda Guerra Mundial en adelante. En muchas ocasiones no es la capacidad de combate la que marca la diferencia en operaciones militares, sino que la capacidad logística que posea un determinado ejército.

La logística militar a lo largo de la historia, ha sido estudiada de distintas maneras. Desde la Segunda Guerra Mundial, se comenzó con la generación de modelos matemáticos que permitieran la optimización de recursos y movimientos logísticos. Debido a los esfuerzos bélicos, existía una necesidad de asignar los escasos recursos a las diversas operaciones de forma más efectiva. Por estos motivos, los Ejércitos de Estados Unidos y Británico hicieron los esfuerzos para reclutar científicos de distintas áreas, los que gracias a sus estudios, generaron lo que hoy se conoce como Investigación de Operaciones.

Ejemplos concretos de la utilización de la Investigación de Operaciones, pueden verse en el triunfo aéreo inglés en la isla de Campaña en el Pacífico, en la Batalla del Atlántico Norte y muchas otras. Cifras concretas muestran que

se logró aumentar en un cien por ciento la efectividad de los ataques aéreos contra los submarinos, los radares de detección aérea y submarina tuvieron una efectividad prácticamente completa.

Gracias al éxito de la herramienta creada, las organizaciones civiles comenzaron un proceso de adaptación de las técnicas desarrolladas, las que luego de algunos años ya estaban en pleno funcionamiento. Antes del término de la década del 1950, ya estaban desarrolladas las técnicas de programación lineal, programación dinámica, teorías de cola y de inventario. Todas estas herramientas ayudaron y facilitaron el proceso de toma de decisiones.

Un buen ejemplo de sistemas de logística militar y la utilización de herramientas de Investigación Operativa y Simulación, se puede ver en la Operación Escudo del Desierto por parte del Ejército de Estados Unidos, los que movieron enormes cantidades de suministro realizando una armónica y coordinada movilización entre fuerzas aéreas, navales y terrestres de 33 países.

Es por esto que se hace fundamental el estudio y conocimiento de las distintas herramientas de modelación que permitan prestar un eficaz y eficiente apoyo ante posibles catástrofes y operaciones de paz.

Es importante que el ámbito militar sepa aprovechar y nutrirse de las herramientas largamente trabajadas en el plano civil, en este sentido una de las áreas que presenta gran avance es la adecuada gestión de la cadena de abastecimiento, la que dadas las similitudes existentes entre las cadenas civiles y militares, puede existir un traspaso y adecuación del conocimiento desarrollado. La aplicación de estas herramientas debe ser estudiada y puesta a prueba en caso de catástrofes y en el abastecimiento en operaciones de paz.

Para asegurar la paz y seguridad dentro de operaciones de paz, es necesaria la coordinación y cooperación de diversos Ejércitos, es por esto que la adecuada gestión de la cadena de suministro debe ser estudiada para

aprovechar las potencialidades que pueden ser ofrecidas por cada país que vele por la paz mundial, y así, reducir la cadena de suministro.

El contexto de los modelos y antecedentes realizados en este trabajo de investigación, se encuentra fundamentado en base a información pública encontrada, obtenida preferentemente desde reportes y bases de datos del Ejército de Estados Unidos, Organización del Tratado Atlántico Norte (OTAN) y recopilaciones hechas desde bibliografía de la Segunda Guerra Mundial.

La modelación es una técnica de mucha ayuda para el entendimiento de los sistemas logísticos, la que permite probar y modificar las tácticas, estrategias y soluciones doctrinales. Dentro del área de la modelación, la herramienta que se encuentra encabezando el siglo XXI es la simulación, la que al ser bien utilizada, da gran soporte a la toma de decisiones y puede ser aprovechada por la mayoría de los procesos u operaciones militares. El nivel de detalle utilizado para simular, dependerá de la naturaleza del problema, ya que no existe un modelo único que permita dar respuesta a todas las interrogantes.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1.1 Objetivo General

Generar modelos computacionales de logística militar de aplicación universal, que permitan simular en forma discreta los procesos de un sistema operativo militar clásico. Los modelos permitirán apoyar la toma de decisiones bajo distintos escenarios presentados en la problemática planteada para casos de desastre y/o misiones de paz.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Proponer modelos de logística militar de aplicación universal, que permitan analizar el comportamiento de distintos indicadores de desempeño ante cambios en los parámetros de entrada.
2. Identificar los elementos de un sistema operativo militar posibles de simular en forma discreta, de acuerdo a experiencias de la 2ª Guerra Mundial.
3. Determinar una metodología que permita el desarrollo de las ecuaciones de Lanchester de forma discreta, para luego ser modeladas en Arena, que permitan estudiar la influencia de combates históricos en la logística militar.
4. Identificar y documentar ejemplos clásicos de empleo de la logística militar en base a la experiencia de EEUU, OTAN y 2ª Guerra Mundial.
5. Desarrollar un modelo computacional en Arena que simule la Segunda Batalla de El Alamein ocurrida en 1942.
6. Identificar nuevas formas de abastecimiento de suministro que podrían ser simuladas, basado en sistemas utilizados por la logística civil y en Ejércitos con mayor experiencia.

1.2 METODOLOGÍA

La manera en cómo se abordó este proyecto de tesis, consiste en tres áreas principales, el marco teórico, aplicaciones matemáticas y modelación computacional.

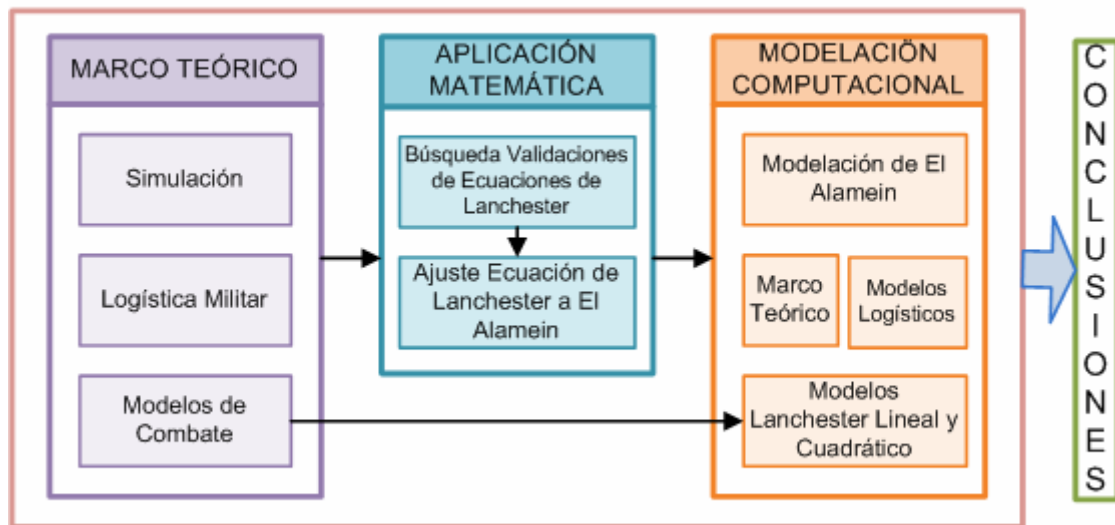
En el marco teórico, se aborda la ciencia, conceptos y teoría que permiten dar el soporte y fundamentación necesaria para el desarrollo de esta investigación. Dentro del marco teórico se abordaron la ciencia de la simulación, conceptos de logística militar, teorías y modelos de combate.

La segunda área o fase de este proyecto de tesis, consistió en la búsqueda de estudios en los que se hayan aplicado los modelos propuestos por Lanchester, para luego, hacer el ajuste de estas ecuaciones a la Segunda Batalla de El Alamein.

La modelación computacional y experimentación son la parte final de esta investigación, para la cual se integró el marco teórico y los modelos matemáticos vistos, con motivo de sugerir una técnica que permitiera trabajar las ecuaciones de Lanchester de manera discreta, para luego, modelar la batalla estudiada y realizar la propuesta de distintos modelos de logística militar universal.

El esquema de la metodología que se siguió para abordar esta investigación, se muestra en la figura 1.1.

Figura 1.1 Metodología Tesis



Fuente: Elaboración Propia

1.3 LIMITACIONES

- La mayoría de las cifras expuestas en este trabajo de investigación fueron recopiladas desde documentos públicos o datos históricos encontrados principalmente en literatura de la Segunda Guerra Mundial, por lo que no necesariamente representan las condiciones actuales de los Ejércitos.
- El proceso de recolección de datos no se incluyó dentro de este estudio. La razón principal de esto, son las limitaciones de tiempo. Es por esto que sólo se trabajó con cifras históricas encontradas y estimaciones dentro de parámetros lógicos.
- Dado el escaso nivel de cifras históricas, los modelos propuestos no tendrán un proceso de validación estadística complejo.

1.4 ESTRUCTURA

Capítulo II Marco Teórico

En el capítulo II se analiza la ciencia de la simulación, realizando una breve explicación de cada tipo o clase de simulación. Además, se analizan las etapas generales que se deben seguir en cada estudio de simulación, y las ventajas y desventajas que puede presentar esta ciencia. En la parte final de este capítulo, se hace una breve introducción al software Arena y a su estructura.

Capítulo III La Logística Militar Universal

El capítulo III, comienza con una serie de definiciones sobre el concepto de logística militar, los objetivos que persigue, y como ha ido evolucionando a través de los años. Posteriormente, se realiza un paralelo entre logística militar y civil, además se muestran las diferencias y similitudes entre las cadenas de abastecimiento de organizaciones comerciales y militares.

Capítulo IV Modelos Matemáticos Militares

En este capítulo, se hace el estudio de las distintas ecuaciones de combate propuestas por Lanchester. Luego, se analizan matemáticamente, las condiciones para el término de un conflicto y se proponen modelos en Arena, que permitan trabajar de forma discreta, las ecuaciones de combate vistas.

Capítulo V La Segunda Batalla de El Alamein

El desarrollo de la Segunda Batalla de El Alamein se encuentra en este capítulo. La primera parte, consiste en los antecedentes teóricos acontecidos en la batalla en estudio y su análisis logístico. Luego, se hace el ajuste de las ecuaciones de Lanchester, y para finalizar, se propone un modelo computacional que represente lo ocurrido en El Alamein.

Capítulo VI Propuesta de Modelos desarrollados en Arena

En el capítulo VI, se proponen tres modelos de logística militar desarrollados en Arena, los que tienen relación con logística de reabastecimiento de combustible, logística médica y logística de reparación y mantenimiento. Para cada modelo se muestra un marco teórico, luego se propone el modelo computacional, finalmente se realiza el análisis de resultados y se procede a la experimentación.

Capítulo VII Conclusiones y Trabajos Futuros

El capítulo VII, contiene las principales conclusiones que se sacaron de este proyecto de título. Además, contiene propuestas para trabajos de investigación a futuro.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

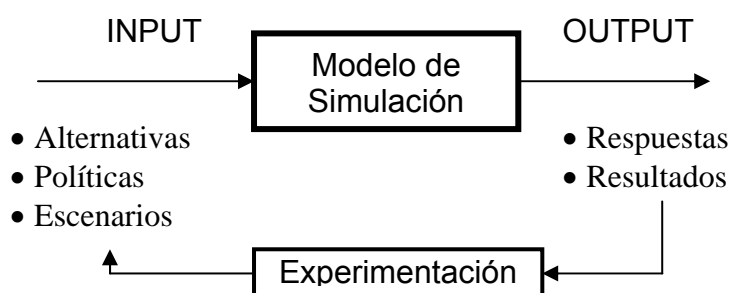
2.1 SIMULACIÓN

2.1.1 ¿Qué es la simulación?

La simulación es una técnica que mediante condiciones lógicas matemáticas y supuestos, permite representar un sistema real. Por lo general, el proceso de simulación se realiza mediante softwares computacionales.

Según Kelton, Sadowski & Sadowski (2008), la simulación *“es una amplia colección de métodos y aplicaciones, que permiten imitar el comportamiento de un sistema real. La simulación, puede ser un término extremadamente general, que se aplica en muchos campos, industrias y otras aplicaciones.”*

Carson, define a un modelo de simulación como *“un modelo descriptivo de un proceso o sistema, que usualmente incluye parámetros para representar diferentes configuraciones del sistema o proceso”*. Además, dice que la simulación puede ser usada para experimentar, evaluar y comparar muchos escenarios alternativos. Los resultados que entrega son la predicción del rendimiento e Identificación de los problemas del sistema.



Para realizar un buen estudio de simulación, es necesario comprender muy bien lo que se quiere simular y las respuestas que se quieren obtener del modelo, para tales motivos, se realiza una serie de aproximaciones y

suposiciones que hagan que el modelo sea lógico y válido. Para simular, se hace necesaria la creación de un modelo representativo y creíble.

La generación de modelos, nace de las necesidades del día a día, en las que el hombre se encuentra frecuentemente expuesto al proceso de toma de decisiones. Para decidir, el ser humano debe generar criterios de comparación, para así tomar la opción que más beneficios le reporte.

El nivel de complejidad del modelo, dependerá de la naturaleza del sistema a modelar. El modelo puede ir desde un complicado sistema computacional, hasta un simple esquema mental, que puede ser aplicado tanto en seres individuales, como en grandes organizaciones.

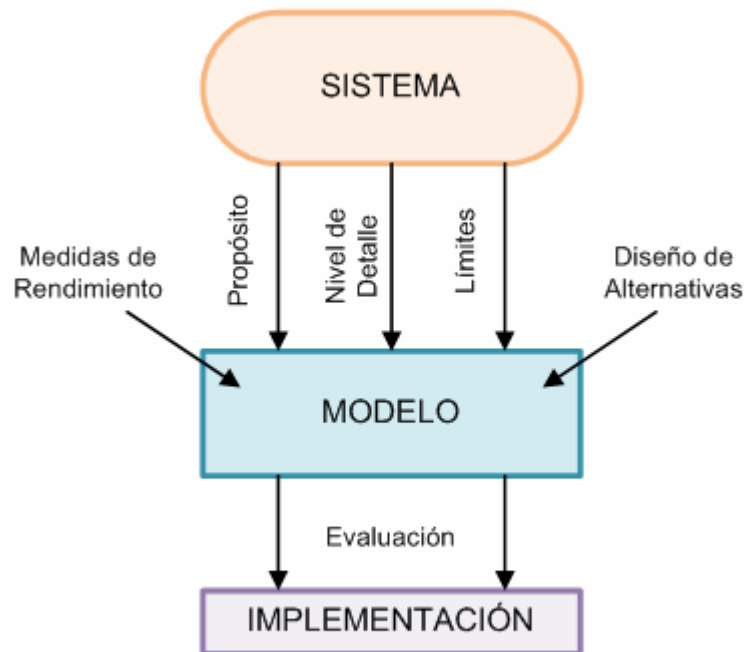
Finalmente, el modelo no escogerá una opción por si mismo, sino que guiará y apoyará la toma de decisiones. El proceso de modelamiento, buscará proponer la opción más eficaz y eficiente que sea posible tomar bajo un dilema determinado.

Los modelos permiten estudiar un sistema bajo distintos escenarios, lo que hace que sean flexibles y capaces de dar respuesta a cada uno de éstos de forma más rápida que al buscar las respuestas desde el sistema mismo.

Para modelar, hay que tener claro las interrelaciones que deben considerarse entre las fases, las que van desde el sistema en si, hasta la final implementación de los cambios propuestos. Para tal motivo, se deben fijar los indicadores de desempeño adecuados, propósito que se persigue, nivel de detalle con el que se abordará, los límites, supuestos y abstracciones que tendrá el modelo. Sólo al considerar los factores nombrados, se podrá desarrollar un modelo que represente fielmente al sistema, y con esto, luego de evaluar el modelo, se estará en condiciones de implementar en el sistema los cambios propuestos para el modelo.

La figura 2.1, muestra la relación existente entre sistema, modelo e implementación.

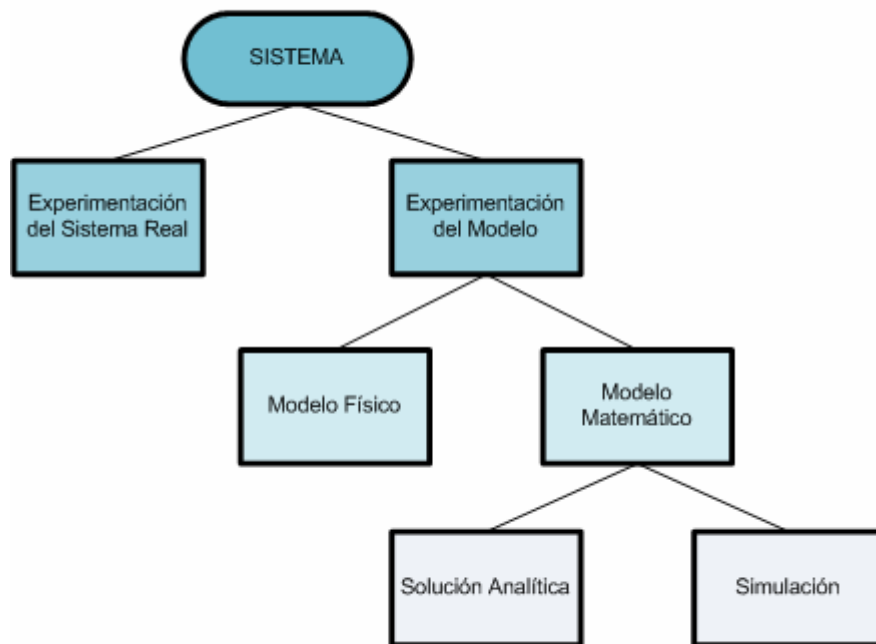
Figura 2.1 Relación Sistema – Modelo - Implementación



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a Law y Kelton, existen diversas formas de abordar un modelo, ya sea trabajándolo de forma física, o mediante un modelo matemático, cuya solución puede buscarse a través de la simulación o mediante una solución analítica. Los autores anteriormente nombrados, presentan una formalización del proceso de decisión del modelo y el tipo de experimentación que se escogerá. El diagrama que proponen se muestra en la figura 2.2

Figura 2.2 Diagrama decisión modelo



Fuente: Basado en Law y Kelton (2000)

Tal cual muestra la Figura 2.2, la experimentación del sistema puede ser llevada a cabo mediante la realización de cambios en el sistema real, o mediante la experimentación de un modelo. Cada una de estas formas de prueba tendrá sus ventajas y desventajas. La elección de experimentar mediante la modelación, tendrá directa relación con que tan fiel representa el modelo propuesto al sistema analizado.

La decisión de analizar el modelo mediante un enfoque matemático o físico, va a depender de la naturaleza del sistema en estudio y de la facilidad o dificultad que presente al estudiar el modelo mediante estos enfoques. La mayoría de las veces, se requiere un trabajo complementario entre la búsqueda de soluciones analíticas y la simulación. Además, las soluciones analíticas, pueden servir para verificar la validez de los resultados entregados por la simulación.

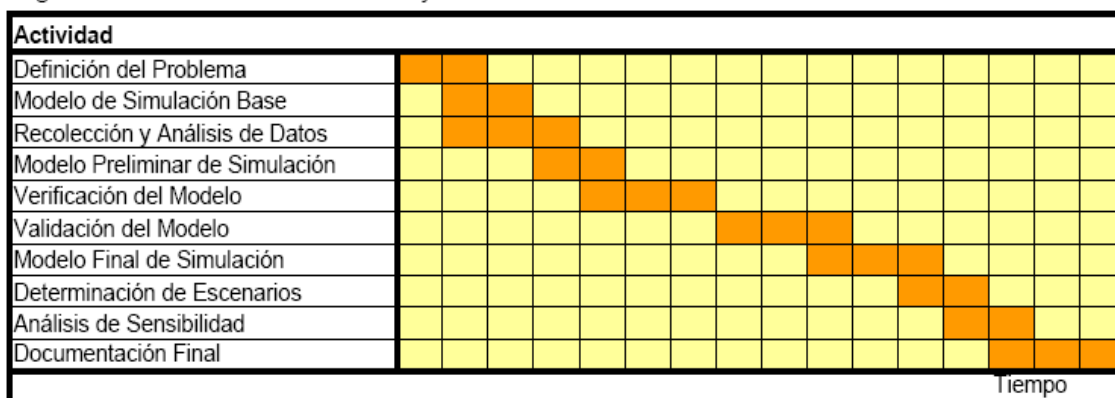
2.1.2 Etapas de un estudio de simulación

Law y Kelton (2000), plantean una serie de pasos o estructura básica a seguir para realizar un completo y ordenado estudio de simulación. Las fases propuestas van desde el reconocimiento y formulación del problema, hasta la final presentación de los resultados obtenidos. Los pasos que estos autores plantean son los siguientes:

1. Comprensión del sistema real y planteamiento claro de los objetivos del estudio.
2. Recogida de datos y formulación del modelo conceptual.
3. Creación del programa utilizando el software adecuado.
4. Verificación del programa: ¿refleja realmente el modelo conceptual deseado?.
5. Validación del modelo: ¿el modelo representa fielmente el sistema real?.
6. Experimentación.
7. Análisis de los resultados de la simulación.
8. Presentación de las conclusiones del estudio.

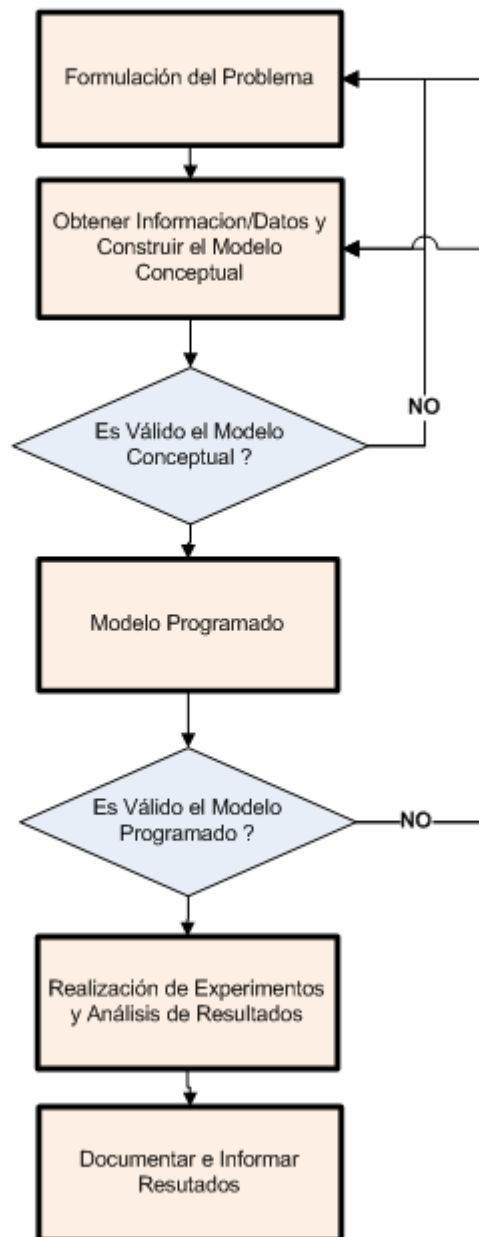
En la figura 2.3 se muestra una carta Gantt de ejemplo, que propone la planificación de los pasos principales de un estudio de simulación. Además, en la figura 2.4 se muestra el ciclo iterativo y conexión entre las etapas ya mencionadas.

Figura 2.3 Carta Gantt de un Proyecto de Simulación



Fuente: García, García y Cardenas (2006)

Figura 2.4 Etapas de un estudio de simulación



Fuente: Basado en Law y Kelton (2000)

Los pasos propuestos, no necesariamente representan una regla, sino más bien una recomendación para abordar el estudio de manera ordenada. Al existir retroalimentación entre algunos pasos, es posible que mientras se esté desarrollando el modelo, sea necesario volver a pasos anteriores, por lo que el procedimiento se torna iterativo.

El primer gran paso para todo proyecto de simulación, es la definición del problema y los objetivos o metas que se quiere alcanzar con el estudio. En caso de no tener claro los objetivos, se medirán indicadores de desempeño que no son representativos para el sistema, luego, la modificación en ellos no presentará una mejora del sistema en estudio. En este paso, es imprescindible que el analista trabaje en conjunto con la gerencia o altos mandos de la organización que ha solicitado la realización del proyecto.

Una vez finalizada la etapa anterior, se procede a hacer la recolección de datos relevantes, los cuales pueden o no estar presentes dentro de la organización. Si por algún motivo no existen los datos o cifras históricas, se procede a la toma de éstos, para lo que deben cumplirse los principios básicos de muestreo (independencia, homogeneidad y estacionalidad), y así, no condicionar la simulación a un intervalo de tiempo determinado. No hay que olvidar que dependiendo de la calidad de datos que se tengan, será la calidad de las respuestas que entregue el estudio de simulación.

Conjuntamente con la recolección de datos, se realiza el modelo conceptual del sistema. La construcción de los mapas conceptuales, por lo general, es más un arte que una ciencia, y requiere de gran imaginación. La creación del modelo, en un principio se debe hacer de la forma más generalizada posible, para luego ir entrando en el detalle requerido por los objetivos.

En la etapa de verificación, se revisa el modelo conceptual, los supuestos y abstracciones que se han usado, para analizar si realmente la modelación propuesta, representa de manera fiel al sistema real. Hay que recordar, que si hay errores en esta etapa, será imposible que el modelo computacional a generar represente fielmente al sistema. Para la verificación, deben realizarse reuniones con las personas involucradas en este sistema y pedir sus opiniones, para concordar sus ideas con las del analista, ya que son ellos los que realmente saben el comportamiento del sistema en análisis.

Una vez asegurados de que el modelo conceptual es el correcto, se procede a la programación computacional de éste. En esta etapa, también se realiza un proceso de verificación del modelo programado, el que por lo general, se hace a través de la revisión del código que se ha desarrollado. Además, se realiza la verificación haciendo un análisis de la animación del modelo propuesto, es por esto que softwares tales como Flexsim, Arena, Promodel, Awesim, entre otros, facilitan de gran manera el trabajo.

Para la validación del modelo, en donde se comparan datos reales con los entregados por el modelo simulado, las alternativas comúnmente usadas para validar son la creación intervalos de confianza para los estadísticos analizados y preguntar a especialistas que trabajen en el sistema modelado.

En la etapa de experimentación se proponen distintos escenarios. Los resultados entregados bajo estas condiciones, son comparados con los del modelo básico o real, para ver si existe diferencia estadística entre ellos.

Para finalizar el estudio, los resultados obtenidos serán documentados y presentados. En la documentación se debe incluir los supuestos del modelo, las distribuciones asociadas, sus alcances y limitaciones, además de la totalidad de las consideraciones de la programación. También es de importancia incluir sugerencias de uso del modelo y sobre los resultados obtenidos.

2.1.3 Clasificaciones de la Simulación

Existen muchas clasificaciones para el arte de la simulación. La elección de cada una de ellas dependerá exclusivamente de la naturaleza del problema a simular. La forma más usada se muestra a continuación (Kelton, Sadowski y Sadowski. 2007).

Estático Vs Dinámico: En un modelo estático, el estado del sistema, es invariable en el tiempo, por ejemplo la decisión entre comprar un automóvil u otro, o en la mayoría de las teorías de juego. En cambio en un modelo dinámico, el estado del sistema irá modificándose de acuerdo al tiempo, es decir, si se toma una foto al sistema en distintos tiempos, el estado de éste, debiera ser diferente. El caso dinámico es el más visto en el día a día, se aprecia en centros de salud, instituciones bancarias, fábricas manufactureras, etc.

Continuo Vs Discreto: En un modelo continuo el estado del sistema puede ir variando en cada unidad de tiempo. Ejemplo de esto es el consumo de combustible de un vehículo, el cual se consumirá continuamente. En el caso discreto, los cambios en el estado del sistema, se realizan en puntos determinados del tiempo, siendo el ejemplo más típico, las llegadas de un cliente a un cajero, el cual a su vez también tendrá un tiempo de atención discreto.

Determinista Vs Estocástico: El determinista no presentará entradas aleatorias en el sistema. En el caso estocástico, un ejemplo claro puede verse en que el tiempo de llegadas de un enfermo al hospital no es constante, tampoco lo es el tiempo de atención, es decir, estos tiempos seguirán el comportamiento que podrá ser definido generalmente mediante una distribución de probabilidad.

Por lo general, en Ingeniería Industrial se trabaja con modelos dinámicos, discretos y estocásticos. Estos serán los que además, serán integrados en este trabajo de título.

2.1.4 Simulación de Eventos Discretos

Como ya se dijo, la simulación discreta es aquella en que el estado del sistema se modifica sólo en puntos determinados del tiempo, o dicho de otra forma, cada cierto intervalo de tiempo, el sistema sufrirá un cambio.

En la mayoría de los sistemas, el tiempo representa la variable independiente, mientras que las otras variables irán modificándose de acuerdo al tiempo, es decir, serán las variables dependientes.

La simulación discreta ocurre cuando las variables dependientes del sistema, cambian discretamente en puntos específicos del tiempo de simulación.

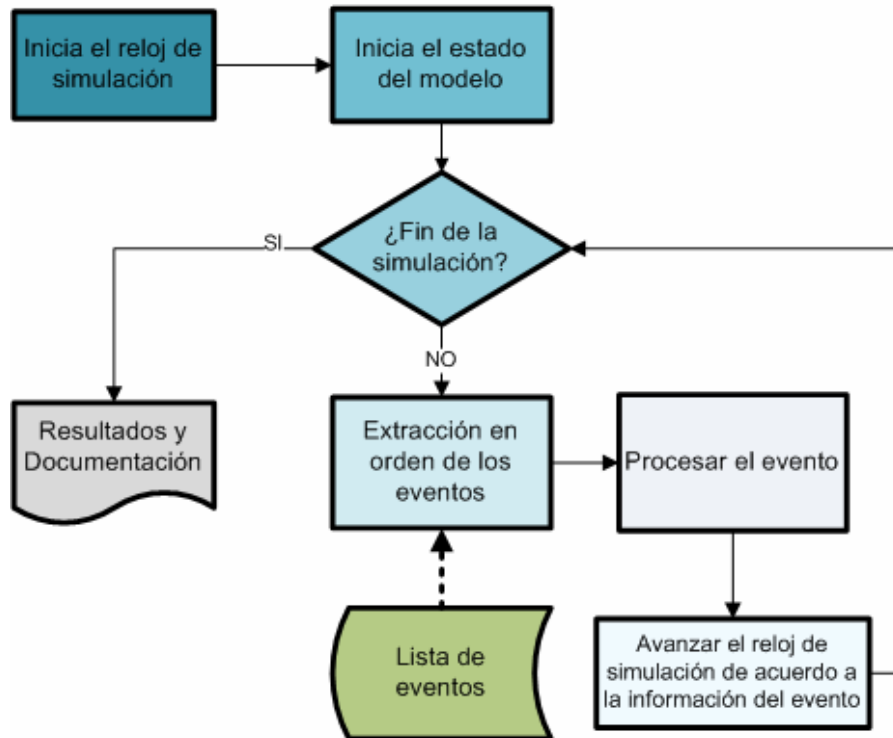
Por lo general, cuando se trabaja con simulación de eventos discretos, se hace mediante entradas estocásticas, y no, a través de calendarización u horarios fijos.

La simulación arranca con la puesta en marcha del reloj de simulación, luego, a medida que avanzan los eventos, el reloj también lo hará, hasta el punto en que comience un nuevo evento. Estos valores de entrada son almacenados y leídos por el modelo diseñado en el software de simulación empleado, y este mismo dará la orden de salida del modelo cuando haya pasado un tiempo o condición predeterminada. Los pasos que sigue el motor de simulación de eventos discretos, pueden apreciarse en la figura 2.5.

En simulación discreta, la operación de un sistema se representa como la secuencia cronológica de los acontecimientos. Cada evento se presenta en un instante determinado de tiempo y marca un cambio del estado del sistema.¹

¹ Stewart Robinson. 2004. Simulation: The Practice of Model Development and Use.

Figura 2.5 Motor de simulación de eventos discretos



Fuente: Elaboración Propia

2.1.5 Ventajas y Desventajas de la Simulación

Como toda ciencia, la simulación, posee ventajas y desventajas. A continuación se presentan de forma general, ventajas o desventajas que podrían presentarse al momento de analizar un problema mediante el uso de la simulación.

Ventajas

- Presenta un menor costo realizar experimentaciones virtuales, que llevar a cabo las modificaciones al sistema real.
- Se pueden realizar una gran serie de experimentos al modelo real, con lo cual se pueden analizar diversos escenarios, que ayuden a enfocar la toma de decisiones.

- Ayuda a entender el comportamiento del sistema.
- La simulación permite estudiar los efectos interactivos de los componentes individuales o variables para determinar las más importantes.
- Cuando no existe solución analítica, en algunos casos la simulación es el único método disponible.
- Proporciona un método más simple de solución cuando los procedimientos requieren del uso de matemática compleja.
- Una vez hecho el modelo, se pueden proponer escenarios de manera relativamente rápida.
- En la actualidad, los paquetes de softwares para simular, son cada vez más sencillos y flexibles.

Desventajas

- Un buen modelo de simulación puede resultar bastante costoso; por lo general el desarrollo de los modelos es largo y complicado.
- La simulación no genera soluciones óptimas a problemas de análisis cuantitativos. Por ensayo y error se producen diferentes resultados en de acuerdo al escenario planteado. Claramente, la simulación podrá predecir indicadores de desempeño sólo ante los escenarios o condiciones propuestas por el analista.
- Cada modelo de simulación es único. Las soluciones e inferencias no son usualmente transferibles a otros problemas.
- No se puede medir el grado de imprecisión de sus resultados.

2.1.6 Errores Típicos en la Simulación

La experiencia que posea el analista es un factor relevante para cualquier estudio de simulación. Claramente mientras mayor destreza tenga, mejores serán las respuestas y conclusiones que podrá entregar al finalizar el estudio. La experiencia del analista, también hará que se reduzcan los tiempos que demora en modelar el sistema y por ende, entregar los resultados obtenidos. Los errores generales cometidos típicamente por falta de experiencia o práctica del analista son los siguientes:

1. Carecer de objetivos bien claros al inicio del estudio.
2. Falta de comprensión por los administradores de lo que es simulación.
3. No comunicarse en forma periódica con los administradores.
4. Considerar que un estudio de simulación es un ejercicio de programación computacional.
5. Falta de conocimientos de metodologías de simulación, investigación operativa, probabilidad y estadística.
6. Falla en obtener buenos datos del sistema.
7. Nivel de detalle inadecuado del modelo.
8. Mal uso de la animación.
9. Falla en modelar la aleatoriedad del sistema.
10. No realizar un adecuado análisis de salidas del modelo.

2.1.7 Resumen

En resumen, la simulación sirve para representar de manera generalmente computacional, las características de un sistema real. A partir de la generación de un modelo representativo, pueden realizarse modificaciones, y analizar el comportamiento de los indicadores de desempeño que sean de importancia para el rendimiento del sistema. Luego de esto, se pone en práctica la mejor de las alternativas probadas en el modelo computacional.

Finalmente, la simulación:

- Permite responder de forma satisfactoria a la pregunta ¿Qué ocurriría si hago...? ¿Qué pasaría con si realizamos un cambio en ...?
- Reduce el riesgo que implicaría la toma de decisiones, sin conocer previamente las posibles respuestas bajo un escenario determinado

2.2 ARENA

2.2.1 ¿Qué es Arena?

Arena, es un software que permite realizar simulaciones por computador bajo la plataforma Microsoft Windows, lo cual hace que su entorno gráfico y características sean familiares al usuario.

Además de sus múltiples funciones, Arena tiene posibilidades de interactuar con otros softwares, por lo que permite una gran flexibilidad a la hora de interrelacionar datos de diversos softwares. Entre los programas con los que puede relacionarse, se encuentran los procesadores de texto, Microsoft Excel, Microsoft Access y softwares CAD. Otros softwares similares a Arena usados para simulaciones discretas son Flexsim, Promodel, Awesim y Simul8, mientras que para realizar simulaciones del tipo continuo, se pueden mencionar MatLab y Simulink, entre otros.

Una de las ventajas que ofrece Arena, es que, dada la gran cantidad de módulos que posee, sólo se necesita tener un buen conocimiento de las características de éstos para poder realizar un modelo, sin la necesidad de ser expertos en informática. Por lo general, sólo se necesita un gran ingenio y conocimientos estadísticos para modelar una situación el particular.

En la gran mayoría de los casos y de acuerdo a la flexibilidad ya mencionada, no hay un camino único para realizar la modelación. Dependiendo de la comodidad que presente cada módulo para un determinado analista, será el camino que seguirá para modelar. Por lo tanto, el encargado de la modelación mediante el software Arena, debe tener una alta capacidad analítica y lógica para poder ingresar el modelo conceptual a un modelo computacional.

Arena, además trae herramientas incorporadas, que sirven para realizar tanto el manejo de datos de entrada, como el procesamiento de resultados y comparación de escenarios. *Input Analyzer*, sirve para realizar el procesamiento de los datos de entrada del modelo, mediante el cual se puede:

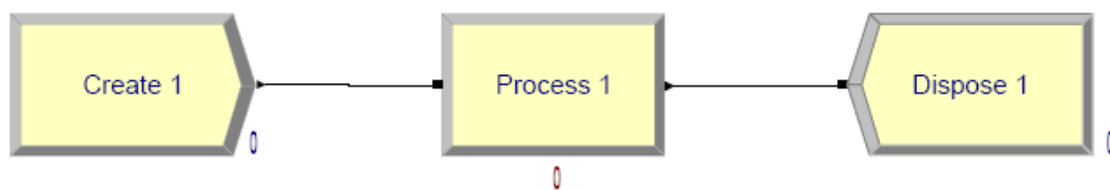
- Ajustar distribuciones de probabilidad.
- Realizar histogramas.
- Generar un sistema de puntuación de las distintas distribuciones ajustadas.
- Realizar Test de Hipótesis (Chi-Cuadrado, Kolmogorov-Smirnow, Anderson-Darling).

El procesamiento de resultados entregados por Arena, puede realizarse mediante la aplicación *Process Analyzer*, la que puede comparar y realizar gráficos de los distintos indicadores de desempeños, tanto de genéricos, como los especificados por el usuario.

Output Analyzer, es una herramienta de procesamiento de resultados, que realiza histogramas, comparaciones entre muestras, intervalos de confianza, diagramas de dispersión y otros. Este software no viene integrado en Arena, sino que mediante los reportes entregados por Arena, puede hacer el análisis de resultados.

En la figura 2.6, se puede apreciar el más simple de los modelos realizados en Arena.

Figura 2.6 Modelo básico realizado en Arena



Fuente: Elaboración Propia

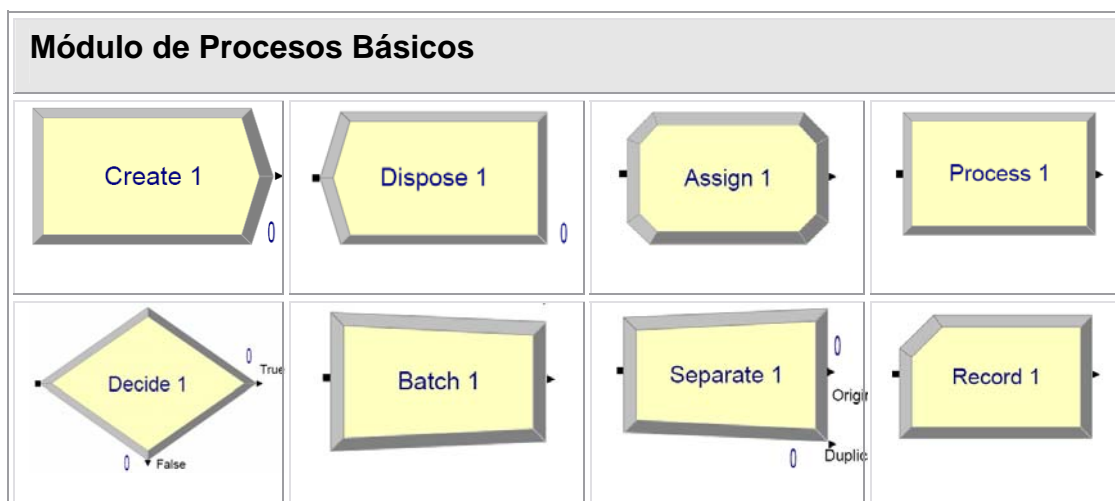
El modelo consta de un módulo *Create 1*, que representa las llegadas de las entidades, luego estas entidades son procesadas en el módulo *Process 1*, para finalmente ser sacadas del sistema por el módulo *Dispose 1*. El modelo básico presentado, puede representar un negocio, con un cajero o servidor, donde hay una entrada y salida del negocio.

2.2.2 Paneles del Software ARENA

Arena ofrece una amplia variedad de paneles, los cuales serán usados dependiendo del propósito y nivel de complejidad del sistema que se quiera modelar. Cada uno de estos paneles se encuentra formado por módulos de diagrama y por módulos de datos. A continuación se describe brevemente cada panel.

- Panel de procesos básicos:** Está compuesto por los módulos Create, Dispose, Process, Decide, Batch, Separate, Assign, y Record (Crear, Eliminar, Procesar, Decidir, Agrupar, Separar, Asignar y Grabar). Con los módulos nombrados se puede crear la gran mayoría de los proyectos simples. Los módulos de datos presentes en el panel básico son: Entity, Queue, Resource, Variable, Schedule y Set (Entidad, Cola, Recurso, Variable, Programación y Conjunto). La tabla 2.1 muestra los módulos que servirán para la creación del diagrama de flujo.

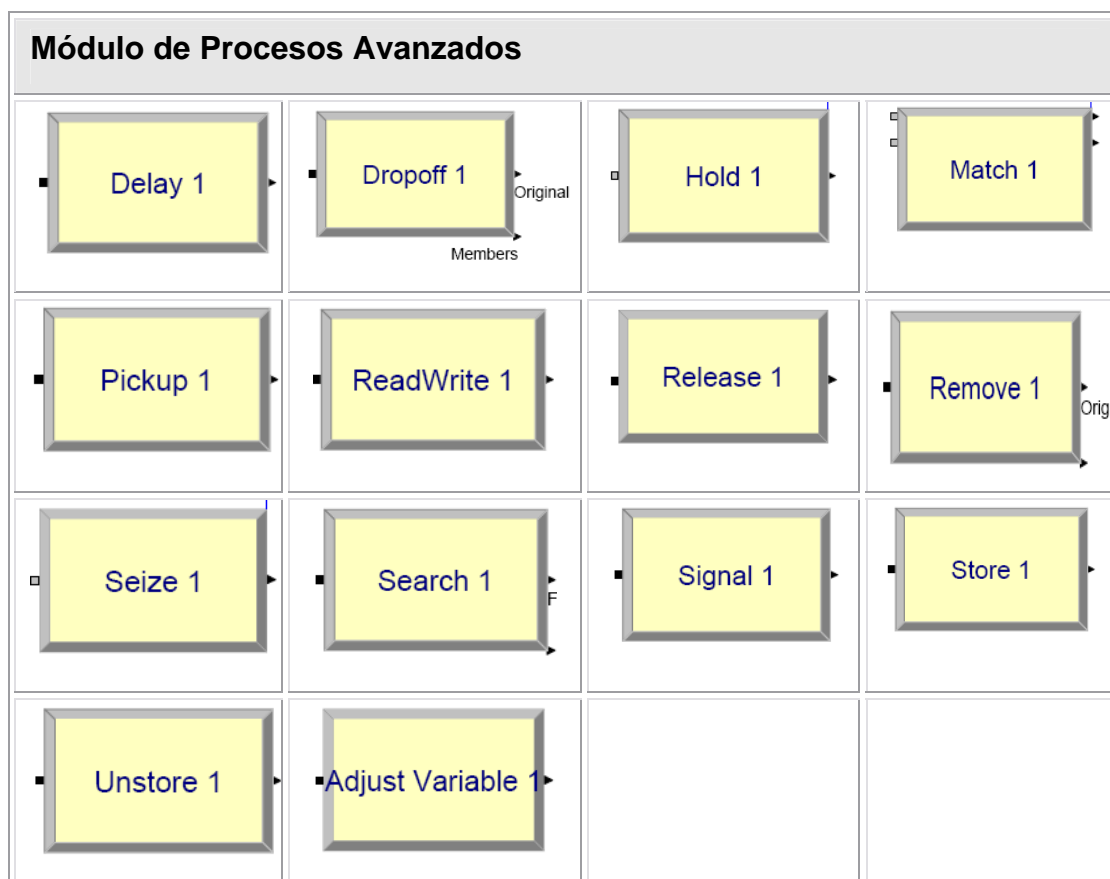
Tabla 2.1 Módulos del panel de procesos básicos



Fuente: Elaboración Propia

- Panel de Procesos Avanzados:** En caso de no ser capaces de modelar el sistema sólo con el panel de procesos básicos, se debe recurrir al panel de procesos avanzados, el cual posee módulos que se complementan de muy buena forma con los del panel básico. Los módulos del panel de procesos avanzados se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Módulos del panel de procesos avanzados



Fuente: Elaboración Propia

- Panel de Transferencia Avanzada:** Este panel se utiliza principalmente para dar una buena animación al sistema simulado. Si no se requiere realizar una animación y sólo interesan los datos de salida que entregue el sistema, se podrían utilizar elementos de los paneles anteriores en reemplazo de los de Transferencia. Este panel sirve para simular una cinta transportadora, creaciones de ruta, transportadores, entre otros.

- **Panel Flow:** Este panel sirve cuando se requiere simular algún proceso del tipo continuo. Aunque Arena está enfocado principalmente en la modelación de procesos discretos, da la posibilidad de crear modelos combinados, en que se mezclan procesos continuos como es el caso de llenado de un estanque de agua, y procesos discretos como es el caso del tiempo entre llegadas de clientes a una cierta institución financiera.

2.3 Conclusión

Diversas herramientas se han aplicado a la logística militar, ya desde la Segunda Guerra Mundial, se comenzó a trabajar en modelos, generalmente matemáticos, que permitieran dar soporte y apoyo a la toma de decisiones de los distintos Ejércitos. Gracias a los avances realizados por diversos científicos, se creó la ciencia de la investigación operativa, utilizada actualmente tanto en ámbitos civiles, como en militares.

La simulación es una nueva herramienta que permitirá el apoyo a la toma de decisiones. Esta ciencia o arte, ha sido ampliamente aplicada en logística civil, por lo tanto, se debe desarrollar algún método que permita la integración de ésta a ámbitos castrenses, para así, lograr dar apoyo ante catástrofes, operaciones de paz y posibles escenarios complejos.

En esta investigación se utilizará la modelación y simulación, basada en el contexto de ejemplos históricos ocurridos en la Segunda Guerra Mundial. Tal como ya se mencionó, el software con el que se realizó la simulación es Arena, el que dado que es flexible e intuitivo, facilita la creación de modelos computacionales, los que luego podrán ser fácilmente analizables y modificables.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO DE LA LOGÍSTICA MILITAR UNIVERSAL

3.1 LOGÍSTICA MILITAR UNIVERSAL

La logística militar es la encargada de planificar y ejecutar las acciones necesarias y adecuadas para sostener y brindar apoyo logístico a sus fuerzas operativas. El principal objetivo de las unidades encargadas de las funciones logísticas es estar en el lugar adecuado en el momento preciso, al cumplir con esta tarea, las tropas podrán moverse y combatir, sin caer en preocupaciones de faltas de suministros, enfocando así todos sus esfuerzos en el cumplimiento de la misión encomendada. La logística militar por lo tanto, estará presente en tiempos de conflicto, operaciones humanitarias, catástrofes y operaciones de paz.

De acuerdo a las primeras definiciones de logística militar propuestas por el diccionario del Ejército de EEUU, la logística es *la planificación de transporte y reabastecimiento*, esta definición cambia a partir del año 1944, momento en el que además de lo expuesto en la definición anterior, se incluyen también el sector de asistencia y capacitación del personal.

Para entrar más a fondo en la logística militar, es necesario conocer cuáles son las distintas fases o pilares fundamentales de una campaña militar. En este sentido Julio César afirma que una campaña militar debe centrarse en “llegar, ver y vencer”. Así, la logística militar es la encargada de darle vida a la función de “llegar”; las fuerzas deben llegar al lugar en el momento adecuado, con las condiciones de abastecimiento necesarias para poder realizar las tareas que les fueron asignadas. “Ver” es la acción al mando de la inteligencia militar, que entrega estudios estratégicos e información necesaria sobre el enemigo, para así, adoptar las decisiones operativas pertinentes. Por último, “vencer”, son las maniobras y acciones que se realizan en el campo de batalla mismo. Para ser capaces de vencer, deben estar cumplidos los dos pilares anteriores.

El Coronel General Golushko, Jefe del Equipo Logístico de la Fuerza Armada Soviética (1984) expresa que *“En la guerra moderna, no es posible la victoria a menos que se cuente con un adecuado soporte de combustible, alimentos, municiones y mantenimiento. Las batallas modernas se caracterizan por la dinámica de sus acciones y los bruscos cambios de escenarios que en ella se producen, en los que se requiere una gran cantidad de suministros, tal como aconteció en la segunda guerra mundial. Desde ese momento se ha hecho cada vez más importante el rol de la logística, la que debe proveer suministros continuamente a cada soldado en el momento oportuno, para que posea todo lo que necesita para poder dar cumplimiento a su misión”*

De acuerdo a las fases de una campaña militar, propuestas por Julio César, el General del Ejército Británico, Michael Jackson, ex jefe del Cuerpo de Ejército de Reacción Rápida de la OTAN, estima que la fase de “llegar”, es la más importante de las tres, y que el resultado de la batalla dependerá en un 70% de la capacidad de logística que tenga un determinado ejército. Es por estos motivos, que el rol del soporte logístico es determinante en el campo de batalla y puede hacer ganar o perder batallas.

3.2 LOGÍSTICA MILITAR VS LOGÍSTICA CIVIL

Aunque ambos conceptos se encuentran estrechamente relacionados, existen dos claras diferencias, que demuestran los distintos enfoques entre el plano civil y el militar. Las diferencias expuestas por el Capitán de fragata (R), Hugo Fontena² son:

- La logística militar, tiene un enfoque en el ciclo de vida de sistemas como aviones, tanques y buques, los que darán el respaldo necesario para su operación. En el plano civil, la orientación de la logística se aplica principalmente al área comercial, orientada a determinados productos.

² Oficial de Estado Mayor de la Armada de Chile. Magíster en Ciencias Navales y Marítimas y Magíster en Logística y Calidad. Actualmente Director de la Escuela Politécnica de Defensa de la UNAB

- La segunda diferencia, es el grado de preocupación por el tema económico presente en el proceso logístico. En el ámbito civil, aquellas actividades que no presenten un beneficio monetario, no son ejecutados. En el plano militar en cambio, hay ciertas actividades que no pueden dejar de realizarse, independiente de los costos asociados, claramente esta diferencia radica en los distintos objetivos de las organizaciones. El mundo civil se basa en la eficiencia, el militar en la eficacia.

3.3 ROLES DE LA LOGÍSTICA MILITAR

Tal como se pudo ver en párrafos anteriores, el concepto de logística militar, hoy en día, cubre muchas más áreas de las que abarcaba hace algunas décadas, en donde se pasó desde un enfoque netamente de abastecimiento físico, a un plano de abastecimiento integral, el que incluye tanto suministros, como servicios. Bajo este concepto, el soldado debe ser considerado como un cliente, al que se debe ser capaz de entregar un servicio de calidad, abasteciéndolo de todas las herramientas y servicios que éste necesite en un momento determinado. Las funciones actuales de la logística militar pueden resumirse en:

- Planificación del reabastecimiento y transporte
- Conservación y renovación de las fuerzas combativas
- Normas para el consumo
- Organización y funcionamiento del aprovisionamiento
- Repuesto y suministro de material bélico

El actual concepto de la logística militar y sus roles, se deben en gran medida al connotado General Suizo Antoine Henri de Jomini, quien considera que la logística es la tercera parte del arte de la guerra, siendo la primera; la estrategia militar y la segunda; la táctica militar. Según Jomini, la logística es el fruto de la combinación de estrategia y táctica.

3.4 RAMAS DE LA LOGÍSTICA MILITAR






Dentro del alcance de la logística militar se pueden encontrar cinco ramas principales, con las que se pueden representar todos los aspectos o áreas de la logística militar. Las ramas son las siguientes:

- **Materiales de Guerra:** Es la encargada de suministrar las municiones necesarias a las tropas, realizar la mantención de los armamentos y dar soporte de combustible.
- **Necesidades básicas de las tropas:** Se encarga del soporte de abastecimiento de alimentos, incluyendo comida y agua, y de los sueldos.
- **Transporte:** Es la encargada de distribuir los suministros a las tropas. Su objetivo es mantener abastecidos a los soldados en el momento justo y lugar adecuado.
- **Cuerpo Médico:** Responsable de mantener y asegurar un buen funcionamiento de los hospitales instalados y además de organizar la logística que deberán seguir las ambulancias o carros de salvataje.
- **Cuerpo Veterinario:** Es el responsable de prestar atención a los animales empleados por un ejército, principalmente caballos.

3.5 CLASIFICACIÓN DE LOS SUMINISTROS

Una de las principales funciones de la logística militar, es la de abastecimiento de suministros, para tales motivos la OTAN, presenta en su Manual de Logística, una clasificación de los distintos tipos de suministros, la que es mostrada en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Clasificación de los suministros

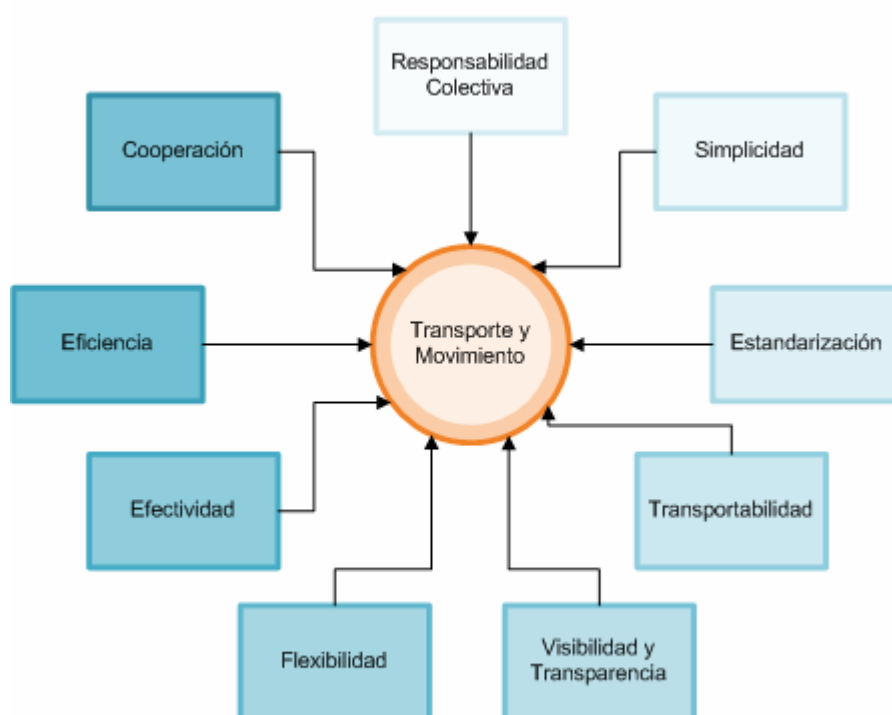
Clase I	
	<p>Elementos de Subsistencia, tales como comida y forraje, los que son consumidos por el personal y animales de manera aproximadamente uniforme, independiente del tipo de combate o condiciones del terreno.</p>
Clase II	
	<p>Suministros de equipamiento de tropas tales como la vestimenta, armamento, herramientas, repuestos y vehículos.</p>
Clase III	
	<p>Petróleo, Aceite y Lubricante para todos los propósitos, exceptuando los suministros para operaciones aéreas.</p>
Clase IV	
	<p>Suministros para instalación inicial, normalmente se incluyen fortificaciones y materiales de construcción. La clase IV, es de alta importancia para la preparación de un determinado teatro de operaciones.</p>
Clase V	
	<p>Municiones, explosivos y agentes químicos de todo tipo.</p>

Fuente: NATO Logistics Handbook 2007

3.6 MOVIMIENTO Y TRANSPORTE

Para la realización de una eficiente y eficaz operación logística, es necesario que el alto mando y encargados de planificar los procesos de movimiento y transporte tanto de tropas, como de suministros, consideren los principios básicos mostrados en la figura 3.1.

Figura 3.1 Principios básicos del transporte y movimiento



Fuente: Basado en Manual OTAN 2007

Cada uno de estos factores, contribuirá a lograr procedimientos de movimiento y transporte adecuados, que puedan dar el soporte requerido por las tropas.

3.6.1 Logística Militar de Transporte

El Teniente Coronel Español, José Ruiz Arévalos, expone que el apoyo a las operaciones militares³, presenta las siguientes características:

- La logística de transporte, es un problema de gran magnitud, dado el volumen de los recursos a transportar, las grandes distancias a las que, en ocasiones, se va a actuar, así como los reducidos plazos del que se dispone.
- El transporte es una función muy interoperable: permite sin dificultad integrar apoyos del sector civil o de otros ejércitos aliados u organizaciones multinacionales.
- A los transportes en apoyo a las operaciones militares de proyección les son de aplicación una amplia gama de normas de origen muy diverso: normas civiles nacionales e internacionales, especialmente comunitarias y normas de tipo militar, nacional o internacional. En determinados contextos, la normativa civil se subordina a la militar, pero con carácter general, aquélla prevalece sobre ésta, que tiene un carácter supletorio.

3.6.2 Selección del Tipo de Transporte

Al analizar las ventajas y desventajas que presenta cada medio de transporte, no es posible afirmar que uno es mejor que otro para todo momento. Es preciso conocer cuál es el objetivo o meta que se persigue, en un determinado escenario. En condiciones de estar preparando el teatro de operaciones, el transporte más utilizado (en caso de ser necesario) es el marítimo, caso distinto ocurre cuando una unidad militar se encuentra en pleno enfrentamiento y necesita suministros de forma urgente, bajo estas condiciones la mejor opción es el transporte vía aérea. Para escoger de buena forma el transporte a utilizar, es necesario conocer a priori cuales son los objetivos que se persigue.

³ Expuesto en su libro. "Llegar, Manual de Transportes en Operaciones de Proyección" publicado el 2007.

En la tabla 3.2 se muestran algunos medios militares de transporte utilizados.

Tabla 3.2 Medios militares de transporte



Fuente: Imágenes Prediseñadas de Microsoft Office 2003

Los factores que deben tomarse en cuenta al momento de seleccionar un medio de transporte adecuado pueden resumirse en:

- Urgencia
- Volumen
- Flexibilidad
- Seguridad
- Economía (Sólo cuando es posible)

Comúnmente, para realizar las tareas de abastecimiento de suministro, se utiliza una mezcla de transportes, lo que hace que la cadena de abastecimiento pase por fases marítimas, aéreas y terrestres. En este caso, se busca que el abastecimiento por medio de todos los terrenos, posea un rendimiento uniforme, de tal forma de optimizar la cadena de suministros.

3.7 CADENA DE ABASTECIMIENTO

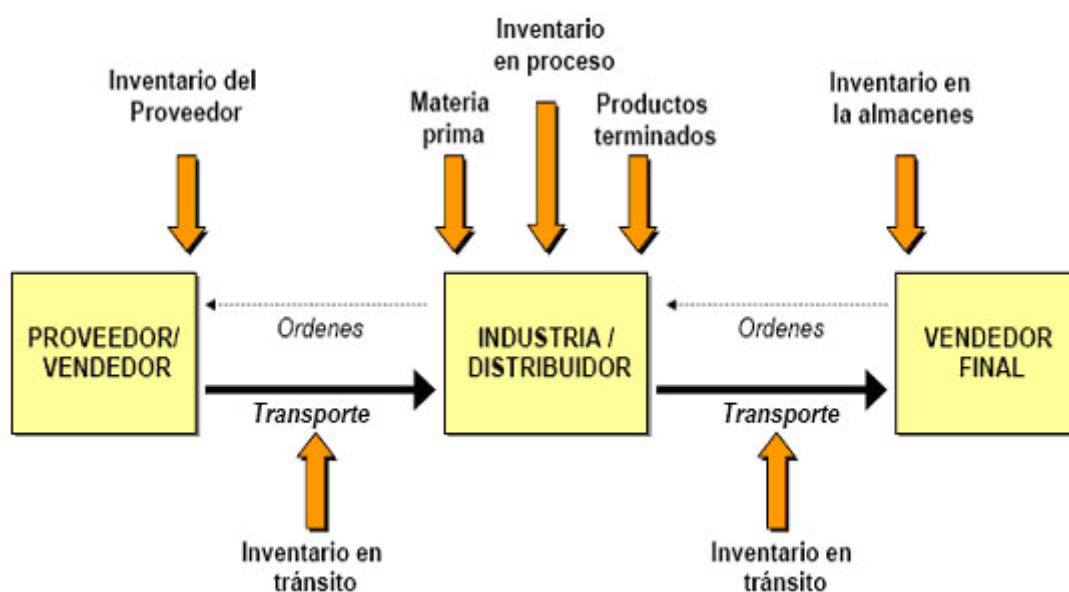
La cadena de abastecimiento de un determinado bien, cubre el flujo desde el origen del producto o servicio, hasta que es entregado al usuario final. La administración de la cadena de suministro, busca optimizar la gestión de los flujos, ya sea de productos físicos, servicios o de información, a través de la cadena logística desde el proveedor inicial, hasta el cliente final. Por lo tanto, una buena gestión de esta cadena, generará una ventaja competitiva, ya sea tanto en el ámbito civil, como en el militar.

Según el Departamento de Defensa de Estados Unidos (DOD), La cadena de abastecimiento es: *“las actividades vinculadas con la provisión y flujo a partir de un material en bruto, hasta la etapa final de un producto terminado”*. El DOD define a la administración o gestión de la cadena de suministro como: *“La gestión para la adquisición, producción y distribución de productos y servicios para los consumidores. Incluye la gestión de sub-proveedores, proveedores, información interna y flujo de fondos”*.

El Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), entrega dos definiciones para la cadena de abastecimiento: *“La cadena de abastecimiento eslabona a muchas compañías, iniciando con materias primas no procesadas y terminando con el consumidor final utilizando los productos terminados”* y *“Todos los proveedores de bienes y servicios y todos los clientes están eslabonados por la demanda de los consumidores de productos terminados, al igual que los intercambios materiales e informáticos en el proceso logístico, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final.”*

La gestión de la cadena de suministro es definida por el CSCMP como: *“Proceso de planear, implantar y controlar procedimientos para la transportación y almacenaje eficientes y efectivos de bienes, servicios e información relacionada, del punto de origen al punto de consumo con el propósito de conformarse a los requerimientos del cliente.”* Un claro ejemplo de cadena de suministro puede verse en la figura 3.2.

Figura 3.2 Cadena de abastecimiento

Fuente: www.webpicking.com

El CSCMP, define a la logística como: *“aquella parte de la gestión de la Cadena de Abastecimientos que planifica, implementa y controla el flujo - hacia atrás y adelante- y el almacenamiento eficaz y eficiente de los bienes, servicios e información relacionada desde el punto de origen al punto de consumo con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los consumidores”*.

Tal como se puede apreciar, existe una extrema similitud entre el concepto militar y civil de cadena de abastecimiento, siendo la diferencia, los indicadores que señalan una buena gestión para entidades militares versus civiles y las prioridades asignadas al costo económico, flexibilidad, urgencia, entre otras. Dependiendo de la organización, será la complejidad que presente la cadena de suministros, que van desde sólo un eslabón, en adelante.

Es importante que cada rama del eslabón de la cadena de abastecimientos se maneje de manera adecuada. Tal cual en el plano civil, la cadena de abastecimiento, será tan débil como el más débil de sus eslabones o fases, por lo tanto, se busca lograr una eficiencia y eficacia integral en cada una de ellas, y así, no debilitar o romper los esfuerzos realizados por las demás fases. Esto último, fue lo ocurrido con el Ejército de Irak en la Guerra del Golfo,

conflicto en el que el apoyo logístico fue deplorable, aun cuando en algunos eslabones eran más eficaces que el Ejército Norteamericano.

Para el Teniente Coronel del Ejército estadounidense, Joshua M. Lenzini, la gestión de la cadena de suministro, tiene siete componentes esenciales y seis factores de éxito. Los componentes son:

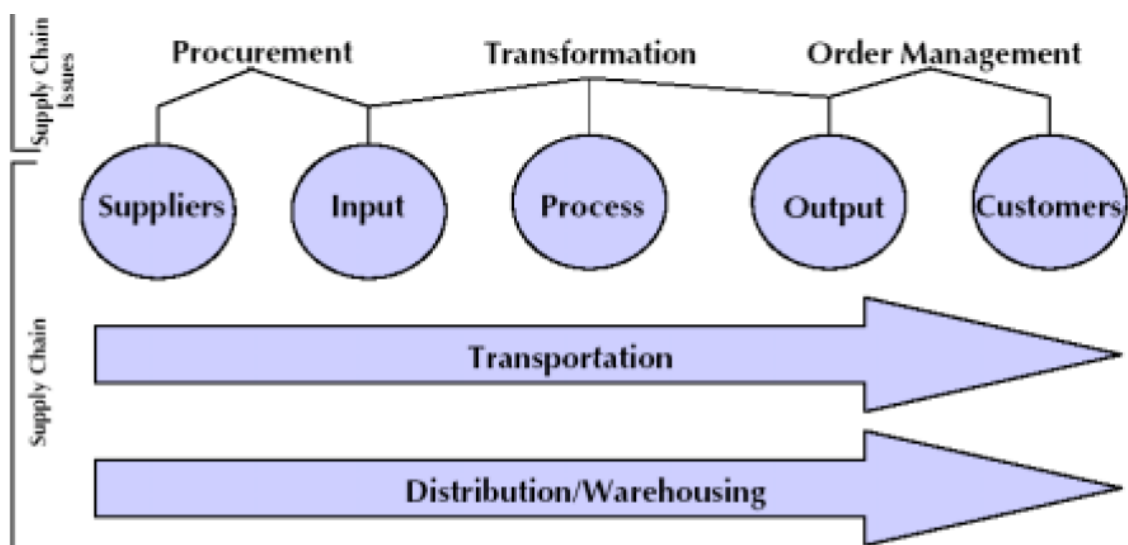
- Proveedores
- Adquisiciones
- Fabricación
- Gestión de Pedidos
- Transporte
- Almacenamiento
- Clientes

Mientras que los factores de éxito son:

- La demanda de los consumidores
- Tecnologías de información y comunicación
- Globalización
- Competencia
- Regulaciones gubernamentales
- Preocupaciones ambientales

Cada uno de estos factores estará presente en mayor o menor medida, de acuerdo al tipo de organización. En las figuras 3.3 y 3.4, se hace un contraste de la cadena de abastecimiento civil y militar

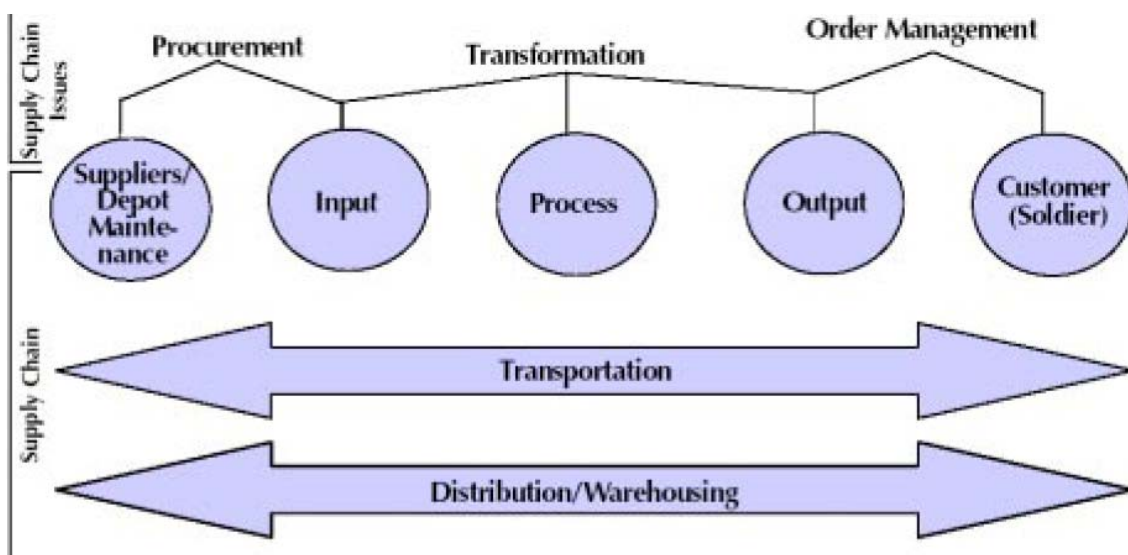
Figura 3.3 Cadena de abastecimiento para una organización civil



Fuente: Army Logistician Review 34 (5). Sept-Oct 2002

Los factores externos que influyen en la cadena de abastecimiento para organizaciones civiles son: Globalización, regulaciones gubernamentales, preocupaciones medioambientales y la competencia.

Figura 3.4 Cadena de abastecimiento para un Ejército



Fuente: Army Logistician Review 34 (5). Sept-Oct 2002

Para el caso militar, los factores externos presentes en la cadena de suministro son: las necesidades del usuario final (tropas), doctrina militar,

medioambiente, interoperabilidad necesaria entre los servicios de mando, control, comunicaciones, informática e inteligencia, requerimientos de la misión.

De acuerdo a las figuras mostradas, no sólo existe diferencia entre los factores externos que influyen sobre la cadena de abastecimiento, sino que además, las cadenas difieren en el proceso de mantención (influyente en mantención de armamento, vehículos y salud) y los procesos de transporte, distribución y almacenamiento, siendo el caso civil del tipo unidireccional, y en el militar; bidireccional.

Otra diferencia que puede observarse es la flexibilidad que deben tener las organizaciones para hacer frente a las demandas dinámicas. Si bien es cierto, las empresas civiles deben adecuar un sistema que permita dar abastecimiento a demandas cambiantes, esta variabilidad no se compara con la que deben afrontar los ejércitos, quienes durante época de paz o distintas fases de la guerra deben abastecer demandas de suministros cambiantes e impredecibles.

Los distintos enfoques de estas organizaciones, hacen que la cadena de suministro del Ejército se concentre en los logros, mientras que la de organizaciones civiles, está orientada principalmente a la rentabilidad.

3.7.1 Herramientas para la gestión de la cadena de abastecimiento

Si ya se vio la clara similitud entre la cadena de suministro civil y militar, es preciso entonces, preguntarse si las herramientas de gestión de cadena de abastecimiento civil, son posibles de usar en las organizaciones militares. Los conceptos de tecnologías de información y comunicación (TICS), gestión de pedidos y almacenamiento, control de inventario y transporte, pueden dar gran soporte a la óptima gestión de la logística de abastecimiento y soporte militar.

El sector militar, debe aprovechar la experiencia y conocimiento desarrollado por el sector privado. Los conceptos o herramientas actualmente utilizadas para la gestión de la logística civil que pueden ser internalizadas por

los Ejércitos son el Just in Time (JIT), Material Requirements Planning (MRP), Manufacturing Resource Planning (MRP II), Enterprise Resource Planning (ERP), Optimized Production Technology (OPT) y Theory Of Constraints (TOC), entre otras.

La investigación operativa, actualmente es largamente utilizada para la optimización de los procesos logísticos. Uno de los softwares más usados para estas tareas es WINQSB, permitiendo el cálculo de rutas óptimas, lote económico, asignaciones, entre otras. La simulación, especialmente discreta, se encuentra largamente trabajada para sistemas logísticos civiles.

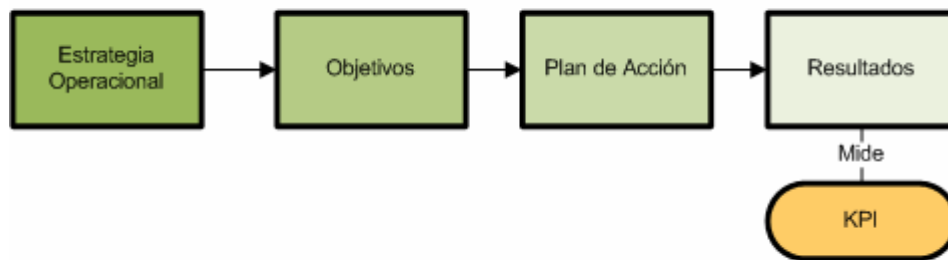
3.7.2 Indicadores KPI de Logística y Cadena de Abastecimiento

El término KPI, proviene del inglés *Key Performance Indicators*, o Indicadores Claves de Desempeño. Los indicadores KPI, tienen como objetivo la mejora de la gestión de la cadena de suministro, y como consecuencia de esto, la mejora de los resultados de la organización.

Las herramientas presentes en los KPI, permiten mejoras en la evaluación de la gestión, el diagnóstico, comunicación, flujo de información, motivación y mejoramiento continuo. En la figura 3.5 se muestra el diagrama desde la estrategia operacional adoptada por las organizaciones, hasta la obtención de resultados, que serán medidos a través de los KPI.

Para la creación de un KPI adecuado, se debe cumplir con la norma SMART, la que muestra que los indicadores deben ser: específicos (specific), medibles (measurable), alcanzables (achievable), realistas (realistic) y a tiempo (timely).

Figura 3.5 Cadena de influencia KPI



Fuente: Elaboración Propia

Los KPI enfocados a la logística y cadena de abastecimiento más usados son los de previsión de venta, aprovisionamiento, stock, almacén y de transporte.

3.7.3 Enfoques Futuros

Hay cuatro áreas en las que organizaciones civiles pretenden crear metodologías para optimizar los procesos de la logística, y que pueden llegar a ser, en un plazo no muy lejano, utilizadas y adaptadas para el uso en ámbitos de logística militar.⁴

- Reducción de inventario
- Mayor dependencia de la tecnología
- Estrategias de Outsourcing
- Utilización y planificación conjunta de bienes públicos

Actualmente el Ejército de Estados Unidos, está trabajando en conjunto con la empresa SAP (Empresa proveedora de sistemas ERP), para la creación de un módulo que permita el manejo de la cadena de abastecimiento de manera eficiente y eficaz. Este sistema ERP, está siendo probado actualmente por las tropas norteamericanas en Irak.

⁴ Áreas expuestas por Kristine Leiphart Lee. Ph.D en Políticas Públicas. Universidad de Illinois.

El sistema busca gestionar la demanda, disponibilidad de suministro, distribución, control financiero y realizar una gestión de los datos de forma más dinámica y flexible.

CAPÍTULO IV: MODELOS MATEMÁTICOS DE COMBATE

4.1 ECUACIONES DE LANCHESTER

Las ecuaciones de combate analizadas en este capítulo, fueron propuestas por el ingeniero Frederick Lanchester en el año 1914, quien publicó dos ecuaciones diferenciales que permitirían modelar un combate de acuerdo a las variables de tamaño y eficiencia o rendimiento de cada ejército⁵.

Los modelos matemáticos de Lanchester, aún son utilizados y estudiados por la doctrina de la mayoría de las fuerzas armadas del mundo. Si bien es cierto, cada escenario de batalla presenta condiciones distintas y por lo tanto los resultados presentes en ellas pueden ser drásticamente diferentes, se cree que las ecuaciones de Lanchester presentan una buena aproximación para caracterizar y entender el combate. La forma más común de validar estas distintas ecuaciones propuestas, es mediante el análisis de batallas históricas acontecidas, siendo el gran problema que se presenta en este sentido, la escasez y poco nivel de detalle numérico que expone la actual literatura militar; por otro lado, también se ha intentado demostrar la veracidad de los modelos propuestos por Lanchester, mediante simulacros de combate en terreno y, a través de simuladores.

Una de las validaciones más importantes realizadas para los modelos de combate, fue tras el análisis de la batalla de Iwo Jima, realizado por Engle en 1962, la que incluyó los 36 días de conflicto. La concordancia existente entre los resultados calculados y los reales fue sorprendente.

Otras validaciones conocidas y de gran veracidad dado la alta confiabilidad de cifras históricas con las que se trabajó, son las modelaciones hechas para las Batallas de Seoul, en la Guerra de Korea (Busse 1971), la de Kursk, la de Inglaterra, y para la de Ardenas, la que tuvo dos modificaciones desde el primer ajuste de las ecuaciones de combate, la modelación original fue hecha por Bracken en 1995, luego Fricker en 1998, genera un modelo

⁵ Publicadas en el libro *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm*. Capítulos V y VI: *The Principle of Concentration*.

utilizando la ley logarítmica, y finalmente en el 2000, Wiper ajusta las ecuaciones mediante el método bayesiano, incorporando dos parámetros defensivos.

Mediante las ecuaciones de Lanchester, no sólo se hace el estudio de quién será el posible ganador del combate, sino que además, estos modelos matemáticos entregan cuál será el nivel de bajas que tendrá que sufrir un ejército para alcanzar la victoria o resignarse a la derrota.

Muchas modificaciones y generalizaciones se le han hecho a las conocidas ecuaciones de combate, entre las más importantes se encuentran las realizadas por Osipov y Chase, el cual genera un modelo que hoy es conocido como Chase-Lanchester-Osipov (CLO). El ruso Osipov, generó un modelo similar al propuesto por Lanchester, tras realizar un largo estudio, en el que de forma empírica, analizó 86 batallas, desde Austerlitz (1805), hasta Mukden (1905), Osipov encontró que la mejor forma de modelar un combate es mediante una mezcla de leyes lineales y cuadráticas.

Lanchester hace la diferencia entre dos tipos de combate, motivo por el cual, genera dos ecuaciones; la primera, puede emplearse a conflictos con fuego concentrado de puntería (o fuego directo), de modo que las posiciones de las unidades enemigas son conocidas (combates entre tanques o infantería, por ejemplo). Las ecuaciones que describen este estado de guerra, conducen a la llamada 'ley cuadrática'. La segunda variante, es apropiada cuando no es posible la puntería, debido a que no existe certeza de las posiciones del enemigo (fuego indirecto, como casos de bombardeo). Sus ecuaciones conducen a la 'ley lineal' de Lanchester.

Luego de un estudio realizado por Dietchman en 1962⁶, en el cual se aplicaron las leyes de Lanchester a un conflicto entre guerrilla y contraguerrilla, concluyó que la ley cuadrática se ajusta de mejor forma a escenarios en que ambos lados son visibles al otro, es decir, cuando ambos ejércitos pueden ver

⁶ Publicado en "A Lanchester Model of Guerrilla Warfare" Operations Research 10

qué es lo que está haciendo el oponente. Por otro lado, Deitchman afirmó que la ley lineal presenta un mejor ajuste cuando cada lado es invisible al otro. McCormick y Giordano en el año 2002, guiados por el análisis realizado por Deitchman, concluyen que los grupos guerrilleros actúan y aplican sus estrategias, sabiendo que es lo que está realizando su adversario (contraguerrilla), y que éste a su vez no puede ver lo que la guerrilla está haciendo, es decir le es invisible, de aquí nace el modelo matemático para aplicaciones en casos de guerrilla.

Para validar y demostrar la veracidad las ecuaciones de combate guerrilla – contraguerrilla propuestas por Deitchman, se han analizado una serie conflictos históricos, entre los que destacan los ocurridos en Grecia (1946-1949), Kenya (1963), Filipinas (1948-1952), Indonesia (1945-1947), Indochina (1945-1954) y Argelia (1956-1962). A través de estos estudios, se ha calculado el tamaño necesario de fuerzas regulares para derrotar a la guerrilla.

Diversas opiniones existen en cuanto a la veracidad de las ecuaciones de Lanchester. Para algunas batallas, se hace mejor ajuste con la ley lineal, y para otras; con la ley cuadrática. Hartley y Helmbold (1995) concluyen tras su estudio en 1995 que toda ley cuadrática contiene factores ocultos, y que para realizar un buen ajuste de las ecuaciones de combate, es necesario dividir la batalla en tres fases, o en su defecto, hacer el ajuste de una nueva ecuación cada seis o siete días.

Los principales detractores de los modelos propuestos por Lanchester, argumentan que es imposible establecer modelos de combate sin la consideración del factor humano presente dentro del campo de batalla, un ejemplo de esto es el factor psicológico, representado por la moral, poder de cohesión, confianza en el alto mando, estrés, miedo y por otro lado la capacidad de toma de decisiones del alto mando.

Además, los detractores cuestionan la veracidad del factor de rendimiento o eficiencia presentado por Lanchester, dado el alto grado de complejidad que representa medir un parámetro como este.

4.2 ANÁLISIS DE LAS ECUACIONES DE LANCHESTER

4.2.1 Modelo AIMED Fire

El modelo Aimered Fire, también conocido como modelo para guerra moderna, es con el que Lanchester busca hacer un contraste entre condiciones de guerra antigua (Ley Lineal) y moderna (Ley Cuadrática).

Éste, pone real énfasis en el denominado “principio de concentración”, el cual expone que, más importante que la eficiencia de cada ejército, es la cantidad de tropas presentes en el enfrentamiento. Este principio puede verse claramente demostrado en la Batalla de Cannas (216 A.C.), en donde el Ejército de Aníbal, muy inferior en número, derrotó al Ejército Romano, generando ataques con grandes contingentes a pequeñas unidades romanas, demostrando así su gran poder táctico⁷.

La ecuación que describe este modelo, indica que las bajas de un ejército se relacionan proporcionalmente con el tamaño y efectividad del ejército contrario. La fórmula matemática asociada a este planteamiento es:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\beta B \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\alpha A \quad (4.1)$$

En donde A y B representan el tamaño de cada ejército, mientras que α y β representan la eficiencia en el combate de los ejércitos A y B respectivamente, es decir a cuantos puede dar de baja una unidad militar (soldado, tanque, avión, vehículo blindado, etc) en un tiempo determinado.

La ecuación de estado de la fórmula (4.1), viene dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial B} = \frac{\beta B}{\alpha A} \rightarrow \alpha \int A dA = \beta \int B dB$$

⁷ Cuya explicación puede verse en el artículo de María Maestre Yenes, “Una Explicación Matemática del Triunfo Militar de Aníbal en la Batalla de Cannas”.

Integrando esta ecuación se obtiene:

$$\alpha(A_0^2 - A_t^2) = \beta(B_0^2 - B_t^2) \quad (4.2)$$

La ecuación (4.2) es la llamada ley cuadrada de Lanchester, conocida también como Ecuación para Guerra Moderna, la que fue trabajada casi paralelamente por el ruso Osipov.⁸

4.2.1.1 Predicción de Ejército Ganador para Lanchester Cuadrado

Para predecir quién ganará la batalla, se hace un análisis de acuerdo a las ecuaciones de estado que presenta la ecuación cuadrática de Lanchester.

Para el caso de igualdad de fuerzas, lógicamente se producirá un empate entre los ejércitos, con lo se puede deducir que al terminar la batalla, los sobrevivientes de ambos ejércitos tenderán a cero a medida que vaya pasando el tiempo del conflicto, esto se puede expresar como:

$\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = 0$ y $\lim_{t \rightarrow \infty} B(t) = 0$, incorporando esta condición a la ecuación de estado, se obtiene:

$$\alpha(A_0^2 - A(\infty)^2) = \beta(B_0^2 - B(\infty)^2) \rightarrow \alpha(A_0^2) = \beta(B_0^2)$$

De similar forma se procede para el caso en que el Ejército A sea el vencedor y suponiendo aniquilación total del Ejército B, se tiene que $\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) > 0$ y $\lim_{t \rightarrow \infty} B(t) = 0$.

Además, se puede observar que los resultados de estas ecuaciones seguirán trayectorias hiperbólicas, es decir $c = \beta B_0^2 - \alpha A_0^2$, cuando $c = 0$, se

⁸ Osipov, publicó sus estudios en The influence of the Numerical Strength of Engaged Sides on Their Casualties, Voennyi Sbornik, Vol. 6-10.

estará en presencia de un empate entre las fuerzas de combate, cuando $c > 0$, el ganador será el Ejército B, finalmente cuando $c < 0$, el Ejército A derrotará al B. Los escenarios posibles estudiados pueden mostrarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} = \frac{A_0}{B_0} & \rightarrow \text{Empate} \\ \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} > \frac{A_0}{B_0} & \rightarrow \text{Gana el Ejército B} \\ \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} < \frac{R_0}{B_0} & \rightarrow \text{Gana el Ejército A} \end{aligned}$$

4.2.2 Modelo Area-Fire

El modelo de Area-Fire tiene este nombre dado a que supone que los tiradores no tienen objetivos específicos dentro del ejército contrario, si no que más bien, se realizan disparos a la zona o área en donde se encuentran ubicados los objetivos, que en este caso, serían los soldados adversarios.

Esta ecuación ha sido utilizada ampliamente para situaciones de fuego del tipo indirecto.

El modelo expone que las bajas de cada ejército son proporcionales al grado de efectividad del ejército adversario y al tamaño de ambos ejércitos.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\beta BA \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\alpha AB \quad (4.3)$$

De la ecuación (4.3) puede obtenerse la ecuación de estado para este modelo, la cual viene dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial B} = \frac{\beta}{\alpha} \rightarrow \alpha(A_0 - A) = \beta(B_0 - B) \quad (4.4)$$

La ecuación (4.4) es la llamada "Ley Lineal de Lanchester"

4.2.2.1 Predicción de ejército ganador para Lanchester Lineal

Análogamente al desarrollo hecho para el caso de la ley cuadrática para predecir quién ganará la batalla, se procede tal cual al caso anterior, es decir, para igualdad de fuerzas se producirá un empate, lo que indica que $\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = 0$ y $\lim_{t \rightarrow \infty} B(t) = 0$, por lo tanto $\alpha A_0 = \beta B_0$. Para el caso en que el ganador sea el Ejército A, se tiene: $\lim_{t \rightarrow \infty} A(t) > 0$ y $\lim_{t \rightarrow \infty} B(t) = 0$. De este análisis se ve la relación $\alpha A_0 > \beta B_0$, de igual forma cuando el Ejército B es el ganador, ocurre que $\alpha A_0 < \beta B_0$.

Este modelo estará descrito por las ecuaciones rectilíneas, y estará determinado por condiciones iniciales de (A_0, B_0) y por la constante

$$c = B_0 - \frac{\alpha}{\beta} A_0.$$

Resumiendo las predicciones de ganador, se tiene:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{A_0}{B_0} \rightarrow \text{Empate}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} > \frac{A_0}{B_0} \rightarrow \text{Gana el Ejército B}$$

$$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{A_0}{B_0} \rightarrow \text{Gana el Ejército A}$$

Por lo tanto en caso de que los ratios de los rendimientos $\frac{\beta}{\alpha}$ y el ratio de fuerzas $\frac{A_0}{B_0}$ sean iguales, habrá un empate entre los Ejércitos. En caso de que el ratio de los rendimientos sea mayor, el Ejército B saldrá victorioso. En caso de ser mayor el ratio del tamaño de las fuerzas, el Ejército ganador será el A.

4.2.3 Modelo Guerrilla

Este modelo propone que las bajas del Ejército regular A, son proporcionales a la efectividad del Ejército irregular B multiplicado por el tamaño de ambos ejércitos, mientras que las bajas del Ejército irregular B serán, proporcionales a la efectividad del Ejército regular R, multiplicado por el tamaño del Ejército regular R. Como se verá a continuación, la ecuación representa una mezcla de las ecuaciones lineal y cuadrática de Lanchester; fenómeno que ocurre debido a que sólo uno de los lados le es visible al otro.

La ecuación que modela esta situación es la siguiente:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\beta AB \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\alpha A \quad (4.5)$$

La ecuación de estado obtenida para este modelo será:

$$\frac{\alpha}{2}(A_0^2 - A^2) = \beta(B_0 - B) \quad (4.6)$$

Haciendo el análisis hecho para los modelos anteriores, se llega a las siguientes predicciones de ganador:

$$\begin{aligned} \frac{2\beta}{\alpha} &= \frac{A_0^2}{B_0} && \rightarrow \text{Empate} \\ \frac{2\beta}{\alpha} &> \frac{A_0^2}{B_0} && \rightarrow \text{Gana el Ejército Irregular B} \\ \frac{2\beta}{\alpha} &< \frac{A_0^2}{B_0} && \rightarrow \text{Gana el Ejército Regular A} \end{aligned}$$

El modelo de guerrilla presentado, ha sido ampliamente estudiado por universidades y Ejército Colombiano con el fin de poder mantener un relativo nivel de control sobre las FARC⁹.

⁹ Un ejemplo del desarrollo colombiano de las ecuaciones de Lanchester se encuentra en el libro "Modelos Dinámicos de Guerra", desarrollado en conjunto por la Fundación Mazda y el Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia.

4.2.4 Resumen de Modelos de Lanchester

Tal como se mostró, las ecuaciones de Lanchester representan una gran aproximación para la modelación de combate, si bien es cierto, cada batalla representa sólo un caso particular, una buena forma de estudiar el conflicto y sus indicadores, es a través de los modelos expuestos, los que consideran como datos de entrada al rendimiento y tamaño de fuerzas de cada ejército.

En la tabla 4.1 se encuentra un resumen de las predicciones de ganador para los tres modelos analizados anteriormente

Tabla 4.1 Resumen de predicción para las ecuaciones de Lanchester

Modelo	Gana A	Gana B	Empate
Lanchester Cuadrado	$\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} < \frac{A_0}{B_0}$	$\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} > \frac{A_0}{B_0}$	$\sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} = \frac{A_0}{B_0}$
Lanchester Lineal	$\frac{\beta}{\alpha} < \frac{A_0}{B_0}$	$\frac{\beta}{\alpha} > \frac{A_0}{B_0}$	$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{A_0}{B_0}$
Lanchester Guerrilla	$\frac{2\beta}{\alpha} < \frac{A_0^2}{B_0}$	$\frac{2\beta}{\alpha} > \frac{A_0^2}{B_0}$	$\frac{2\beta}{\alpha} = \frac{A_0^2}{B_0}$

Fuente: Elaboración Propia

4.3 ECUACIONES DE LANCHESTER GENERALIZADO

La forma generalizada de los modelos creados por Lanchester, fue propuesta por Bracken en 1995. Las fórmulas a las que éste llegó, son las siguientes:

$$\begin{aligned}\dot{A}(t) &= \beta\left(\frac{1}{d} \text{ o } d\right)B(t)^p A(t)^q \\ \dot{B}(t) &= \alpha\left(d \text{ o } \frac{1}{d}\right)A(t)^p B(t)^q\end{aligned}\tag{4.7}$$

Donde $A(t)$ y $B(t)$, son los tamaños de los Ejércitos A y B respectivamente, en un tiempo t . $\dot{A}(t)$ y $\dot{B}(t)$, indica la cantidad de bajas ocurridas en un tiempo t para los Ejércitos A y B respectivamente. α y β , son los índices de eficiencia de los Ejércitos A y B. p es el parámetro de ataque, q es el parámetro de defensa, d es un parámetro táctico de ajuste, dependiendo si se está defendiendo o atacando. Los parámetros p y q no tienen una justificación matemática o empírica, son usados solamente para facilitar la modelación.

Hartley (2001) haciendo el análisis de 857 batallas, ocurridas desde el 280 A.C. hasta 1973, ajusta los parámetros generales que más representaban el general de los conflictos en análisis, para lo cual llega a un modelo lineal-logarítmico, con los parámetros $p = 0,45$ y $q = 0,7$.

Aunque la ecuación generalizada de Lanchester presenta un gran avance con respecto de los modelos básicos, aún se sigue desconociendo el importante factor humano y de estrategia presente en cada uno de los combates. Además, tal como ya se dijo, los factores p y q , sólo son parámetros que permiten realizar un mejor ajuste, y no existe un estudio más a fondo que indique cuáles son los elementos que influyen sobre estos, y en que medida lo hacen.

4.4 TÉRMINO DEL COMBATE

Dentro del desarrollo del combate, en algún momento el alto mando de un determinado ejército deberá tomar la decisión de retirada o rendición. A lo largo de la historia, han sido muy pocas las batallas en que se ha llegado a la aniquilación total de algún bando. El encargado de tomar esta importante decisión, debe saber en qué momento la batalla se encuentra en condiciones tales, que ya no se puede cambiar el rumbo de ésta, por ende, es mejor no exponer a las unidades militares sobrevivientes hasta ese instante.

Para modelar matemáticamente la decisión de terminación de combate, se han expuesto dos reglas básicas generales de decisión, de las cuales se derivan cuatro reglas, dependiendo si se trabaja con las reglas básicas por si solas o con la intersección de éstas. A continuación se muestra de forma más detallada cada una de las reglas de decisión para la terminación del combate.

4.4.1 Reglas de Decisión de Término de Combate

Las reglas que se verán a continuación, sólo sirven para abordar de forma matemática el término del combate, y así, ser capaces de realizar un estudio preferentemente sobre batallas ya ocurridas y ver cuáles fueron las condiciones propuestas por el ejército perdedor, al momento de rendirse o retirarse del combate. En la actualidad, la decisión de término de combate, no pasa por una decisión tan estructurada como las que se verán aquí, sino más bien por decisiones estratégicas.

4.4.1.1 Regla de decisión absoluta (A)

El combate termina cuando el número de sobrevivientes de un ejército, baja de un nivel mínimo dado por los parámetros f_b y f_a fijado por cada ejército.

- $f_b * B_0$, $f_a * A_0$

Para dicho caso, el Ejército A decide su retirada cuando $f_a * A_0 \geq A_t$, lo cual indica que se retirará del combate cuando el tamaño del Ejército en un cierto tiempo t , sea menor al nivel mínimo de sobrevivientes aceptado por el ejército, tal como se puede apreciar, $f_a * A_0$, representará un porcentaje del tamaño inicial del ejército.

De igual modo para el Ejército B, el cual decidirá retirarse del combate cuando $f_b * B_0 \geq B_t$.

Ejemplo:

Si un ejército posee inicialmente un número de 500 soldados, y además para su condición de retiro se exige un mínimo de sobrevivientes del 40% de los soldados, se aprecia que $B_0 = 500$ y además $f_b = 0,4$, por lo tanto, de acuerdo a las condiciones enunciadas, el ejército en cuestión decidirá retirarse cuando el nivel de sobrevivientes baje de 200 soldados.

4.4.1.2 Regla de decisión proporcional (P)

El combate termina cuando el ratio del tamaño de las fuerzas sobrepasa (o baja) un valor dado, para éste caso se usarán los parámetros k_b y k_a .

$$\bullet \quad \frac{A}{B} = k_b \quad , \quad \frac{A}{B} = k_a$$

La decisión de retiro o rendición en el caso de usar la regla de decisión proporcional, se basa en el cálculo de ratios entre los tamaños de ambos ejércitos. Por ejemplo, si lo máximo que decide mantenerse en combate el Ejército B, es hasta cuando el Ejército A lo doble en tamaño, el Ejército B decidirá fijar su parámetro k_b en un valor de 2, de esta forma, mientras el valor de k_b se mantenga por debajo de 2, éste decidirá mantenerse combatiendo, de lo contrario, la elección que éste tomará será la rendición.

De igual forma se puede hacer el análisis para el caso de rendición o retiro del combate del Ejército A, suponiendo que éste también decide mantenerse en combate siempre y cuando el ejército oponente no lo doble en tamaño, en este caso el Ejército A debe fijar el parámetro k_a en 0.5, por lo tanto, mientras el ratio se mantenga por sobre 0.5, el combate seguirá, en caso contrario, el Ejército A decide rendirse.

4.4.1.3 Regla AOP

El combate termina cuando el tamaño de un ejército cruza las líneas de la decisión absoluta o la de decisión proporcional. (A o P).

Para la regla de decisión AOP, en caso de que se cumpla cualquiera de las condiciones mencionadas en el caso de decisión absoluta o decisión proporcional, el combate se terminará, es decir, el Ejército A será ganador cuando:

$f_b * B_0 \geq B_t$ o $\frac{A}{B} \geq k_b$, mientras que el Ejército B saldrá victorioso cuando:

$f_a * A_0 \geq A_t$ o $\frac{A}{B} \leq k_a$

4.4.1.4 Regla AAP

El combate termina cuando el tamaño de un ejército cruza las líneas de la decisión absoluta y la de decisión proporcional. (A y P)

Para la regla de decisión AAP, se deben cumplir ambas condiciones, es decir, tanto la de regla absoluta, como la proporcional, en este caso, el Ejército A será ganador cuando se cumpla lo siguiente:

$f_b * B_0 \geq B_t$ y $\frac{A}{B} \geq k_b$, y el Ejército B lo hará cuando:

$$f_a * A_0 \geq A_t \text{ y } \frac{A}{B} \leq k_a$$

En la tabla 4.2 se resumen las distintas reglas de decisión y las condiciones para la victoria de un ejército.

Tabla 4.2 Resumen de reglas de decisión de término de combate

Regla	A se retira	B se retira
RDA	$f_a * A_0 \geq A_t$	$f_b * B_0 \geq B_t$
RDP	$\frac{A}{B} \leq k_a$	$\frac{A}{B} \geq k_b$
AOP	$f_a * A_0 \geq A_t \text{ o } \frac{A}{B} \leq k_a$	$f_b * B_0 \geq B_t \text{ o } \frac{A}{B} \geq k_b$
AAP	$f_a * A_0 \geq A_t \text{ y } \frac{A}{B} \leq k_a$	$f_b * B_0 \geq B_t \text{ y } \frac{A}{B} \geq k_b$

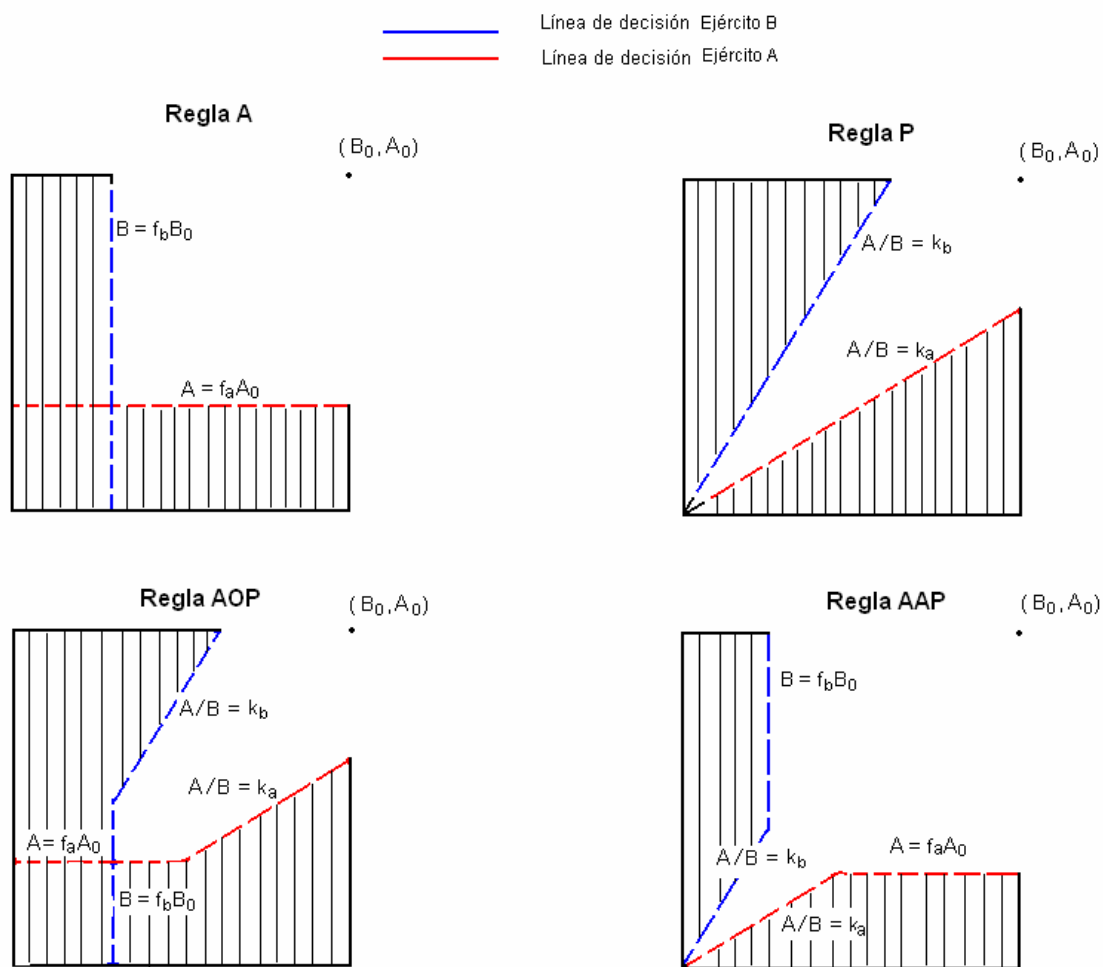
Fuente: Elaboración Propia

Las condiciones lógicas básicas para los parámetros expuestos son las siguientes:

1. $0 \leq f_b < 1$
2. $0 \leq f_a < 1$
3. $0 \leq k_a < \infty$, $0 \leq k_b < \infty$
4. $k_a < \frac{A_0}{B_0} < k_b$

En la figura 4.1 se muestran de forma gráfica las distintas reglas de decisión analizadas anteriormente.

Figura 4.1 Reglas de decisión de término de combate



Fuente: Warfare Modeling. MORS

Una vez que alguno de los ejércitos traspase las líneas de terminación de combate, se retirará, es decir, esto ocurrirá cuando ingrese al área achurada. Claramente, la regla que más dilata el combate, será la regla AAP y la que tiene mayor posibilidad de término temprano, es la regla AOP.

4.5 ECUACIONES DE LANCHESTER MODELADAS EN ARENA

Objetivos

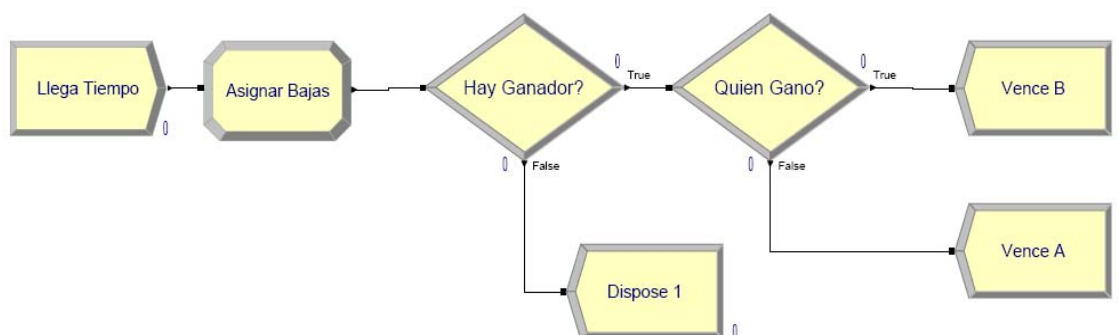
La realización del modelamiento de las ecuaciones de Lanchester mediante el software Arena tiene por objetivos:

- Proponer un método que sea capaz de trabajar en forma discreta las distintas ecuaciones propuestas por Lanchester.
- Ver cómo incide en los resultados finales la reincorporación de nuevas tropas al combate.
- Proponer un factor de cansancio y rendimiento para modelar cada una de las ecuaciones de Lanchester y ver cómo se comportan los indicadores finales, al incluir estas nuevas variables.

4.5.1 Modelo Lanchester Lineal sin Incorporación de Nuevas Tropas

El siguiente modelo pretende realizar el cálculo de la ecuación de Lanchester Lineal suponiendo que no existe reincorporación de nuevos combatientes y el rendimiento de ambos ejércitos se mantiene constante en el tiempo. El modelo computacional propuesto para este caso, se muestra en la figura 4.2.


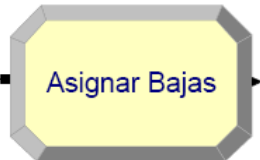
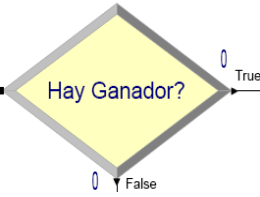
Figura 4.2 Modelo Computacional Lanchester Lineal sin incorporación

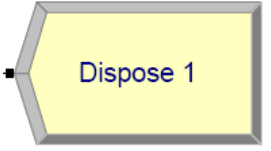
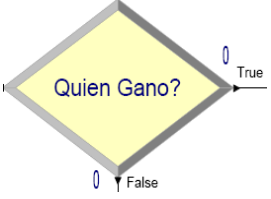
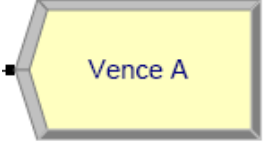
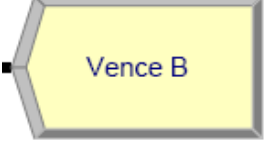


Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.3 se hace una breve descripción de los elementos utilizados para el modelo mostrado. La tabla 4.4 muestra las variables utilizadas para este modelo.

Tabla 4.3 Descripción de módulos Lanchester lineal sin incorporación

Módulo	Descripción
	<p>Mediante este módulo, se generarán llegadas cada un cierto tiempo constante t, es decir, se le dará la instrucción de cada cuánto tiempo deberá realizarse el chequeo de las condiciones de combate. La entidad creada en este módulo sólo representará una entidad ficticia, pudiendo representar a un supervisor que controla los indicadores tras un intervalo de un tiempo t.</p>
	<p>Este módulo se encargará de aplicar la ecuación de Lanchester y recalcular la cantidad de entidades militares activas en combate actualmente.</p> <p>La ecuación para el Modelo Lineal de Lanchester está dada por:</p> $\frac{\partial A}{\partial t} = -\beta BA \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\alpha AB$ <p>y su ecuación de estado es $\alpha(A_0 - A) = \beta(B_0 - B)$, por lo tanto el cálculo de combatientes activos puede obtenerse como:</p> $A_{t+1} = A_t - \beta B_t A_t$ <p>es decir, en el tiempo $t+1$, el número de sobrevivientes estará dado por el número de supervivientes en el periodo t, menos el número de bajas en dicho periodo.</p> $B_{t+1} = B_t - \alpha A_t B_t$
	<p>Aquí, se decide mediante las condiciones analizadas anteriormente sobre terminación de combate si es que existe algún ganador. La programación del módulo se verá en la sección 4.7.</p>

 <p>Dispose 1</p>	<p>Al no haber ganador en el instante t, el módulo <i>Hay Ganador?</i>, enviará la entidad hacia el <i>Dispose 1</i>, que servirá como puerta de salida a la entidad.</p>
 <p>Quien Gano?</p> <p>True</p> <p>False</p>	<p>En caso de haber ganador, <i>Hay Ganador?</i> Enviará la entidad hacia el módulo <i>Quien Gano?</i> Para que decida cuál fue el ejército ganador.</p>
 <p>Vence A</p>	<p>Recibe la única entidad enviada por <i>Quien Gano?</i> En caso de ser vencedor el Ejército A</p>
 <p>Vence B</p>	<p>Recibe la única entidad enviada por <i>Quien Gano?</i> En caso de ser vencedor el Ejército B</p>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.4 Variables Utilizadas para Lanchester lineal sin incorporación

Variable	Descripción
Fuerza.A	Número de actuales combatientes del Ejército A
Fuerza.B	Número de actuales combatientes del Ejército B
Rend.A	Rendimiento o eficiencia del Ejército A
Rend.B	Rendimiento o eficiencia del Ejército B

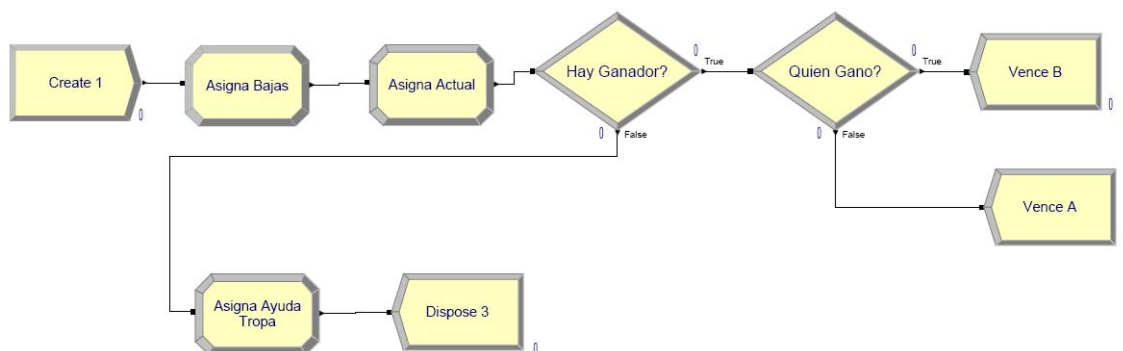
Fuente: Elaboración Propia

A las variables mencionadas se les asignará un valor inicial para poder comenzar a realizar las corridas del modelo.

4.5.2 Modelo Lanchester Lineal con Incorporación de Nuevas Tropas

Hasta el momento, se ha analizado a Lanchester suponiendo que las fuerzas iniciales no reciben más soporte de personal luego de iniciado el combate. Para el caso en que dentro del desarrollo del conflicto exista la posibilidad de incorporación de nuevos combatientes, se trabaja de manera similar al modelo anterior, sólo que al momento de pasar por el lado falso del módulo Decide *Hay Ganador?*, se asigna una nueva cantidad de tropas, las que serán sumadas a las actuales. La figura 4.3 muestra el modelo computacional realizado en Arena para dicho escenario.


Figura 4.3 Modelo Computacional Lanchester Lineal con Incorporación



Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.5 se describen los nuevos elementos que deben estar presentes para el modelo propuesto.

Tabla 4.5 Descripción de módulos Lanchester lineal con incorporación

Módulo	Descripción
	<p>En este módulo, se asignarán nuevas tropas a cada ejército, las cuales se sumarán a las actuales que se encuentran en combate. Por lo tanto, la programación sería la siguiente:</p> $\text{Actual A} = \text{Actual A} + \text{Reincorporados.A}$ $\text{Actual B} = \text{Actual B} + \text{Reincorporados.B}$

Fuente: Elaboración Propia

4.5.3 Modelo Lanchester Cuadrático Sin Incorporación de Nuevas Tropas

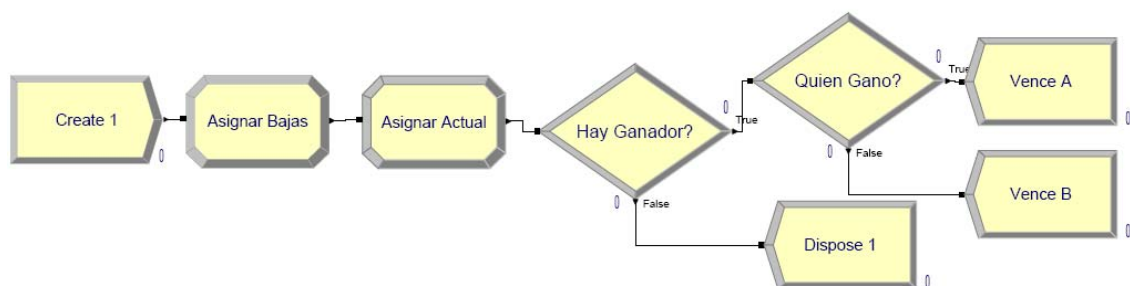
En esta sección, implementa la ecuación de Lanchester cuadrado a la simulación discreta, lo que se hará en base a lo acordado en párrafos anteriores. El único cambio se produce en la programación de la ecuación. La ecuación cuadrática de Lanchester viene dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\beta B \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\alpha A \quad \text{y su ecuación de estado es}$$

$$\alpha(A_0^2 - A_t^2) = \beta(B_0^2 - B_t^2).$$

Además, se hizo un pequeño cambio, al insertar en el modelo otro módulo assign llamado *Asignar Bajas*, con el motivo de calcular primero las bajas de cada ejército, y en el módulo siguiente, realizar el cálculo de los sobrevivientes actuales de cada ejército. La inclusión de dicho módulo no afecta a la estructura o resultados del modelo, el cual es mostrado en la figura 4.4.


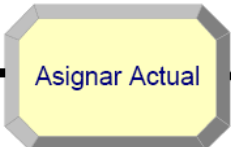
Figura 4.4 Modelo Computacional Lanchester Cuadrático sin Incorporación



Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.6 puede verse la descripción de los módulos más representativos usados para la creación del modelo computacional propuesto para el caso de Lanchester cuadrático sin incorporación de nuevas tropas. Además, en la tabla 4.7, se muestran las variables que fueron utilizadas para el modelo.

Tabla 4.6 Descripción de módulos Lanchester cuadrático sin incorporación

Módulo	Descripción
	<p>Aquí se hace el cálculo de las bajas para cada ejército, mediante las ecuaciones de Lanchester, para tales efectos, se realiza la creación de dos variables, <i>Bajas.A</i> y <i>Bajas.B</i>. El cálculo realizado es el siguiente</p> $\text{Bajas.A} = \text{Rend.B} * \text{Actual.B}$ $\text{Bajas.B} = \text{Rend.A} * \text{Actual.A}$
	<p>Este módulo realizará el cálculo de los actuales combatientes de cada ejército.</p> $\text{Actual.A} = \text{Actual.A} - \text{Bajas.A}$ $\text{Actual.B} = \text{Actual.B} - \text{Bajas.B}$

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.7 Variables utilizadas para Lanchester cuadrático sin incorporación

Variable	Descripción
Actual.A	Número de actuales combatientes del Ejército A
Actual.B	Número de actuales combatientes del Ejército B
Bajas.A	Número de bajas del Ejército A en un periodo determinado.
Bajas.B	Número de bajas del Ejército B en un periodo determinado.

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso en que exista la posibilidad de incorporación de nuevas tropas al combate, se procede de la misma forma que en el modelo lineal de Lanchester, por lo que no se entró en detalle en esta investigación.

4.6 LA FATIGA Y SU INCIDENCIA SOBRE EL COMBATE

Hasta el momento, se han trabajado las ecuaciones de Lanchester y modelos propuestos en Arena, bajo el supuesto de rendimiento constante durante el desarrollo del combate. Estas consideraciones, hacen una abstracción bastante grande de la realidad, para nadie sería lógico mantener un mismo rendimiento luego de empezar a acumular cansancio. Por lo tanto, en esta parte del capítulo, se analizarán los conceptos de cansancio y rendimiento, en base al planteamiento de doctrina general mundial, en que se considera que el combate se realiza en forma continua.

4.6.1 Fatiga del Combate y Fatiga en Combate

Ambos conceptos suelen confundirse dada su similitud de nombre, y aunque se encuentran muy relacionados entre sí, cada uno representa conceptos diferentes. La fatiga del combate, es la suma de diversos factores, entre los que se encuentra la fatiga en combate o cansancio en combate, que pueden afectar tanto física como psicológicamente a los miembros del combate. Por lo general, los síntomas de la fatiga del combate, se manifiestan luego de la continua exposición a situaciones extremas (de combate), lo cual se asemeja mucho al estrés ocurrente en ámbitos civiles, por lo que, también es conocido como estrés del combate.

Dadas las actuales condiciones de combate, el soldado tendrá mínimas opciones reales de descanso. En este sentido, la visión soviética sobre las actuales condiciones de guerra es *“La ofensiva se llevará a cabo de día y noche sin cesar, hasta que el enemigo sea derrotado”*.

El estrés del combate, según el Departamento de Defensa de EEUU, es *la tensión mental, emocional o física, o dolor resultante de la continua exposición del soldado a situaciones de combate*. Es el alto mando quien debe velar por el control de esta enfermedad, ya que, al manifestarse, podría afectar muy seriamente el rendimiento de las tropas, y este a su vez, el cumplimiento de la misión encomendada.

Otra definición similar es la entregada por Turner y cols, quienes definen el estrés del combate como la *tensión emocional, mental o física que deriva de la exposición al combate o a situaciones similares a éste, incluso en situaciones que no implican un contacto directo con el mismo.*

La fatiga del combate, según la definición dada por Stephen Krauss, Doctor en psiquiatría, es: *“Aquellos cambios de rendimiento que se producen durante cierto tiempo en que una cierta parte de los mecanismos involucrados tanto sensoriales como centrales o musculares se sobrecargan en forma sostenida como resultado directo de estar participando en una actividad durante largo tiempo”.*

Ya desde la 1ª Guerra Mundial, se empezó a considerar como un problema grave la llamada fatiga del combate, por lo que es de vital importancia que se tomen las medidas necesarias para mantener controlados los factores psicológicos de las tropas.

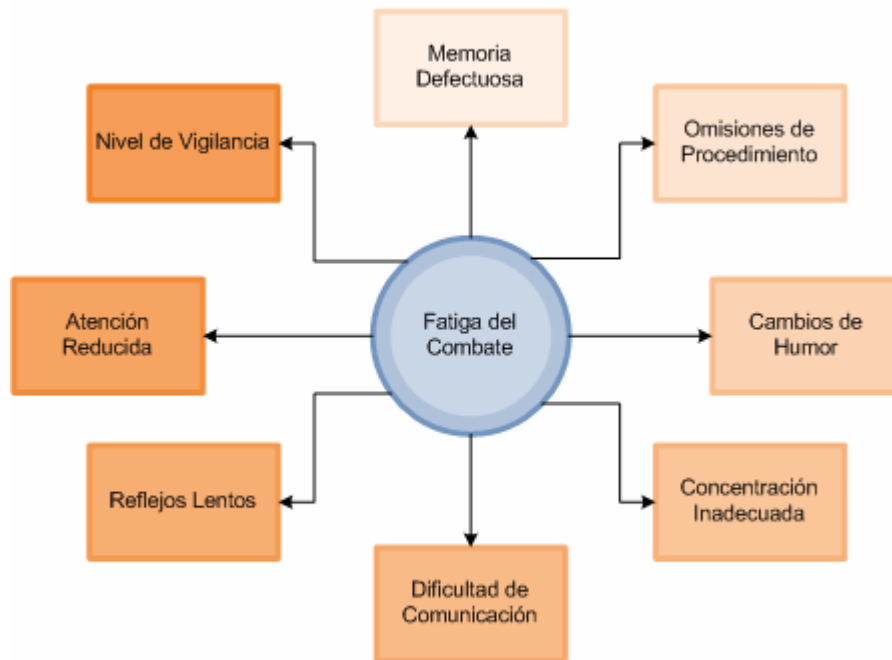
El riesgo de caer en condiciones de fatiga de combate, irá en aumento a medida que vaya aumentando el tiempo del conflicto. En este sentido, se verán debilitados tanto factores físicos como psicológicos debido a la falta de descanso, lo que incidirá directamente en la capacidad de lucha de la tropa y esto; sobre el desenlace final del conflicto.

4.6.2 Pérdida de rendimiento proyectado dada la fatiga en operaciones continuas

Ya conocido el concepto general de fatiga del combate, se verá la relación existente entre la pérdida de rendimiento del soldado y las horas que lleva en condiciones de combate ininterrumpido. Claramente, las habilidades que poseen las tropas se van a ver afectadas a medida que pasen las horas del conflicto, las tareas encomendadas comenzarán a ser realizadas más lentamente que al inicio de las operaciones.

Durante las operaciones de combate ininterrumpidas, cada soldado comenzará a exhibir signos de cansancio, los cuales pueden verse reflejados en los siguientes factores mostrados en la figura 4.5.

Figura 4.5 Consecuencias de la Fatiga del Combate



Fuente: Basado en Revista del Suboficial N° 639. Año 2000

Proyecciones de cuánto es la pérdida de rendimiento en operaciones continuas, han sido estudiadas a través de simulaciones computacionales y mediante estudios de investigación militar sobre la degradación de la eficiencia. Los supuestos que presentan estos estudios son:

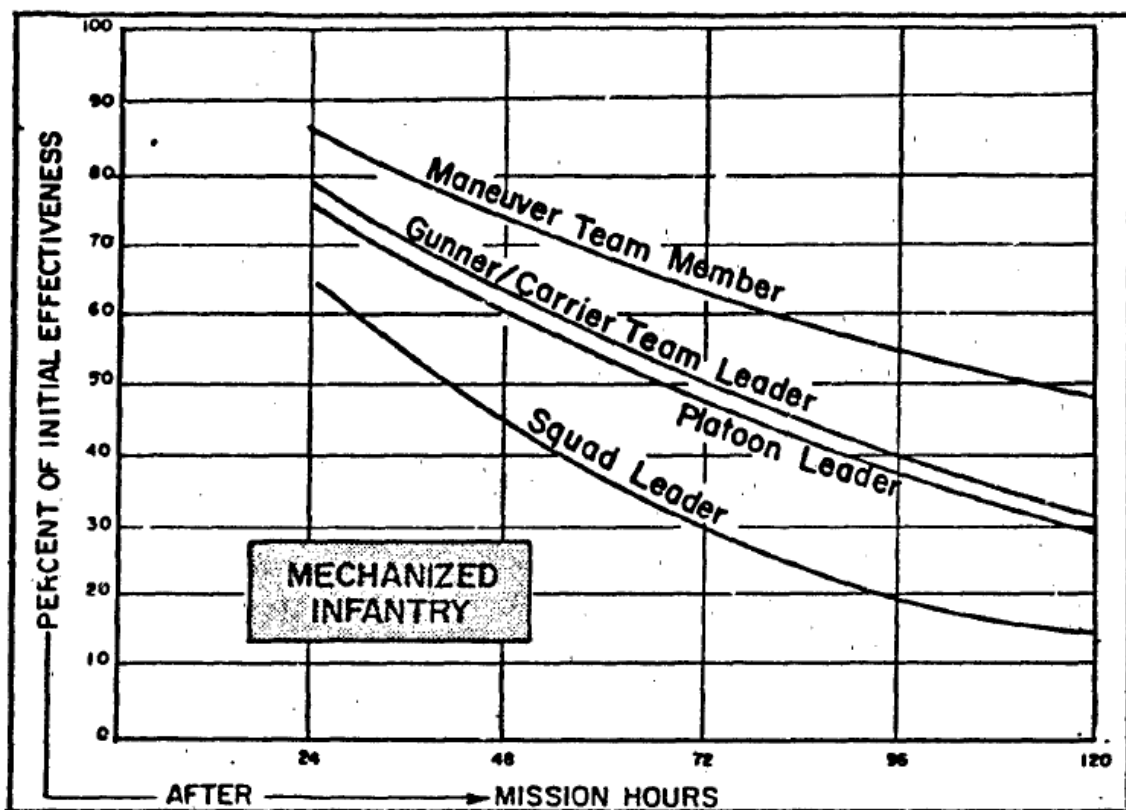
- Condiciones adversas presentes todo el tiempo
- Las tropas no tienen posibilidad de dormir

Las proyecciones mostradas a continuación, se basan en la observación de las tareas más importantes que deben realizar los distintos miembros de

una fuerza blindada y mecanizada. Las que fueron estudiadas por el ejército de Estados Unidos¹⁰.

En el gráfico 4.1, se presenta la efectividad porcentual, de los distintos miembros de una fuerza mecanizada y blindada, con el pasar de las horas de misión.

Gráfico 4.1 Proyección de rendimiento de los miembros de una fuerza mecanizada en operaciones continuas¹¹.



Fuente: Soldier Performance in Continuous Operations. Research Institute for the Behavioral and Social Sciences

La primera gran conclusión que se puede ver del gráfico, es que los puestos en donde se realizan tareas que requieren un elevado trabajo mental, presentan un decrecimiento más rápido en su rendimiento, mientras que la

¹⁰ Publicado en el reporte "Soldier Performance in Continuous Operations" por el Instituto de Investigación del Ejército de Estados Unidos en 1985.

¹¹ Las proyecciones fueron realizadas mediante simulación computacional, apoyada por doctrina y estudios de rendimiento de tropas realizados para operaciones continuas.

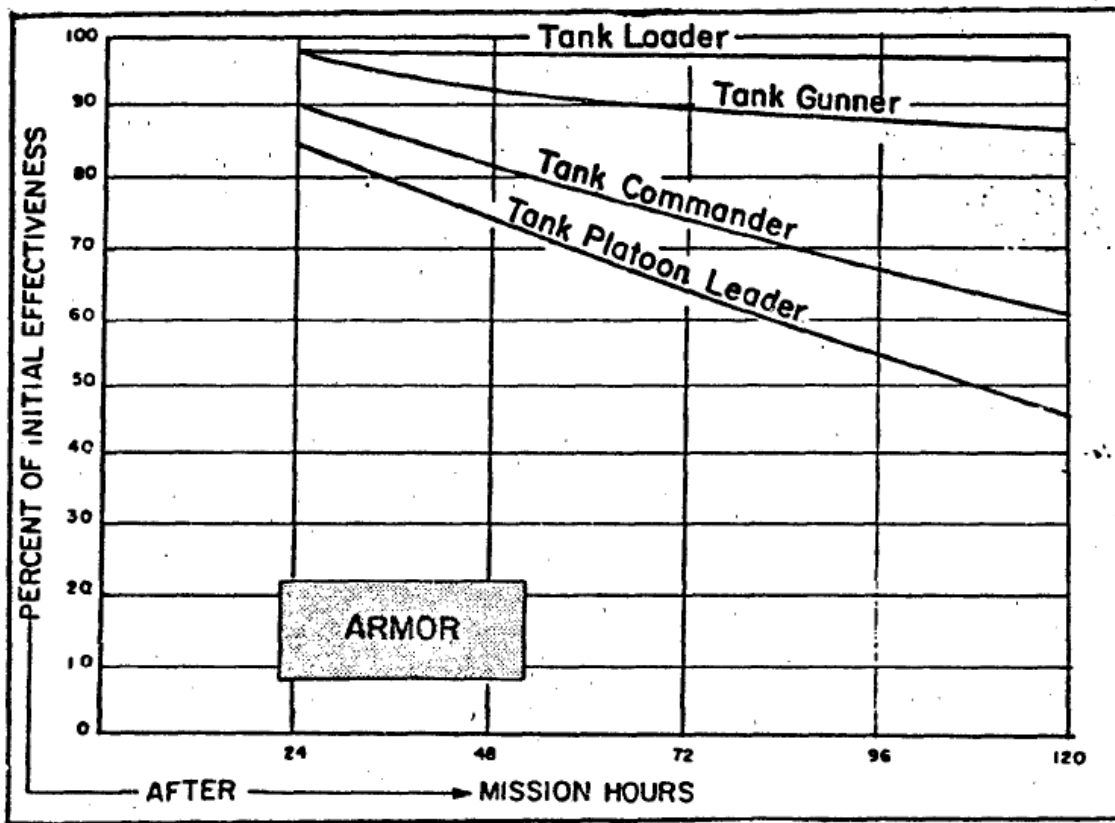
efectividad de aquellas posiciones en donde el trabajo físico es el principal, se mantiene relativamente constante.

Según lo analizado, serán los soldados que deban tomar decisiones o que estén expuestos a un gran trabajo mental, los que tendrán prioridad de sueño, es decir, se les asignará una mayor cuota de descanso, para que puedan recuperar la fatiga que implican la exposición a condiciones de combate.

En el gráfico de Fuerzas Mecanizadas, puede observarse que, al iniciarse el combate, el miembro del equipo de maniobra posee un alto nivel de efectividad al llevar 24 horas en combate, cercano al 75%, el cual, con el pasar de las horas, se va debilitando hasta llegar a una efectividad de 47% al 5º día. Por otro lado, el artillero, jefe de grupo y jefe de sección presentan rendimientos muy similares en todo momento del combate. De los anteriormente nombrados, es el jefe de sección quien debe realizar el mayor trabajo mental de una fuerza mecanizada. Las tareas que éste tiene asignadas son: dar permiso para abrir fuego, establecer las posiciones y coordinar las tácticas a seguir por el escuadrón, al finalizar el quinto día de combate, su rendimiento es de apenas un 16%, lo que refleja que el cansancio al cual estuvo expuesto fue superior al de los demás miembros de la fuerza mecanizada.

Las condiciones para el caso de una fuerza blindada, presenta características similares a las encontradas para las fuerzas mecanizadas, siendo aquellos puestos en que se realizan tareas mentales, las que ven más afectado su rendimiento a medida que van pasando las horas en combate. Para este caso, se aprecia claramente que el cargador del tanque, quien realiza tareas de carácter físico, prácticamente no ve reducido su rendimiento, llegando a finalizar el quinto día con un rendimiento de aproximadamente un 96%. En el gráfico 4.2 se ve la relación existente entre rendimiento y horas en combate para una fuerza blindada.

Gráfico 4.2 Proyección de rendimiento de los miembros de una fuerza blindada en operaciones continuas



Fuente: Soldier Performance in Continuous Operations. Research Institute for the Behavioral and Social Sciences

En este gráfico, puede verse que el cargador de tanque y el apuntador, presentan un nivel de efectividad relativamente constante, es decir, no varía mucho con el pasar de las horas. Por su parte el jefe de tanque y jefe de sección, presentan una mayor sensibilidad de su nivel de rendimiento conforme van pasando las horas en combate, lo que puede verse en su pendiente más pronunciada, incluso el jefe de sección, al llevar 120 horas en combate, ve su eficiencia reducida al 46%, lo que representa menos de la mitad de su rendimiento inicial.

4.6.3 Análisis Matemático para una Fuerza Blindada

Tal como pudo verse en los gráficos 4.1 y 4.2, el comportamiento de la eficiencia o rendimiento respecto del tiempo en combate, presentan una relación relativamente lineal, por tal motivo, y para poder realizar luego una modelación en el software Arena, se ajustará una recta que permita predecir el nivel de rendimiento de los miembros de la fuerza, en un momento determinado.

Obviamente, se supondrá que el nivel de rendimiento inicial de cada miembro de la fuerza blindada, es su 100%. En la tabla 4.8 se muestra el rendimiento del soldado luego de 120 horas de combate y el decrecimiento de rendimiento porcentual cada una hora suponiendo exposición continua a condiciones de combate.

Tabla 4.8 Rendimientos para miembros de una fuerza blindada

Fuerzas Blindadas		
Miembro	Rendimiento a las 120 horas (%)	Baja rendimiento cada una hora (%)
Cargador de Tanque	96	0,0333
Apuntador	86	0,1166
Jefe de Tanque	61	0,5083
Jefe de Sección	46	0,3833

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, al suponer linealidad, se llega a las siguientes ecuaciones predictoras de rendimiento porcentual mostradas en la tabla 4.9. Cabe recordar que la pendiente de la recta representa en cuánto porcentaje disminuye el rendimiento cada una hora.

Tabla 4.9 Ecuaciones predictoras de rendimiento

Miembro	Ecuación de Rendimiento
Cargador de Tanque	$\eta_{CT} = 100 - 0,0333x$
Apuntador	$\eta_{AT} = 100 - 0,1166x$
Jefe de Tanque	$\eta_{JT} = 100 - 0,325x$
Jefe de Sección	$\eta_{JS} = 100 - 0,450x$

Fuente: Elaboración Propia

x : Número de horas en misión

De acuerdo a las ecuaciones presentadas, el factor que se restará al rendimiento, representa el nivel de cansancio o fatiga del soldado para un determinado número de horas, es decir, para el caso del jefe de tanque, el cansancio acumulado luego de 20 horas de combate, vendrá dado por $0,325 * 20$, o sea, el cansancio acumulado será de 6,5%, por lo cual, se puede decir que el rendimiento porcentual del jefe de tanque, luego de 20 horas en misión es de 93,5%.

La ecuación general para modelar el rendimiento porcentual, suponiendo linealidad, vendrá dada por:

$$\eta = 100 - c * x \tag{4.8}$$

Donde c indica el cansancio o pérdida de rendimiento del soldado en una hora de combate.

4.6.4 Conclusiones y Recomendaciones

La fatiga o cansancio en combate, es uno de los factores que pueden llevar a la llamada “fatiga del combate o tensión del combate”, que dentro de sus otros factores preponderantes se encuentran la inseguridad, el temor y la indignación de los miembros de las unidades militares, es por esto que dado el alto grado de incertidumbre existente, el alto mando deberá realizar las acciones necesarias para dar seguridad a cada miembro de la tropa, ya que en estos casos, se produce el denominado “efecto dominó” en donde una persona insegura puede transmitir este sentimiento a toda la unidad.

Un claro ejemplo de la importancia de saber como tratar la fatiga del combate lo señala la Dra Zahava Solomon, Mayor del Ejército Israelí, quien señala que en la guerra de 1973, todas las bajas por fatiga de combate fueron evacuadas a la retaguardia y ninguno de estos pudo volver a la guerra, quedando con incapacidad crónica. Siguiendo la doctrina estadounidense, la Fuerza de Defensa israelí, en la Guerra del Líbano (1982) pudo recuperar un 6% de los bajas por fatiga de combate en menos de 72 horas¹².

Luego de haber conocido algunos antecedentes sobre la importancia que tiene dentro del conflicto la llamada fatiga de combate, se hace recomendable que se realicen tratamientos preventivos, para no llegar a un elevado número de bajas por fatiga de combate.

La preparación psicológica del soldado es de vital importancia, ya que será el factor de diferenciación entre los soldados de uno u otro ejército, para factores físicos, el entrenamiento y preparación de los ejércitos es similar, por lo cual no es posible obtener ventajas significativas en este sentido. El alto mando debe entregar las herramientas necesarias para que las tropas puedan controlar su ansiedad y distintos miedos que ésta posea, se debe ir en la búsqueda del equilibrio mental del soldado en condiciones extremas. Según el Mariscal Karl von Clausewitz, la ejercitación de la mente es tan importante

¹² Military Review. Ene – Feb 1996

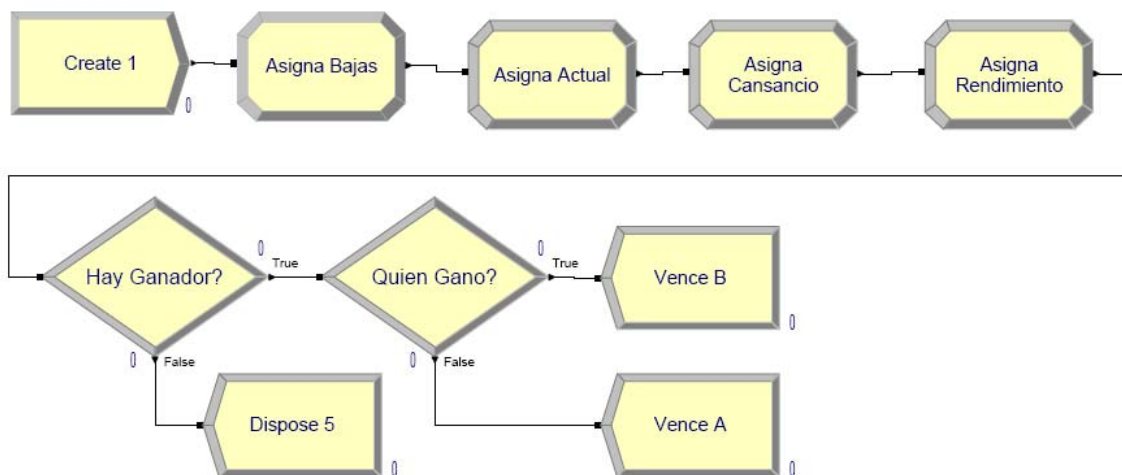
como la ejercitación física. Dentro de sus principales pensamientos en este sentido expresa que:

“Una mente fuerte, simplemente no es capaz de ejercitarse en extremo. Es aquella que en medio de los esfuerzos más azarosos, puede mantener su equilibrio, de forma que, a pesar de un desconcierto interno, la facultad para tomar decisiones y la perspicacia se mantienen constantes como la aguja de una brújula, que a pesar del meneo del barco retiene su precisión.”

4.6.5 Incorporación de la Fatiga a Modelos de Lanchester

Analizada la parte conceptual de la fatiga y rendimiento de soldados, se está en condiciones de proponer un modelo en Arena que permita modelar mediante las ecuaciones de Lanchester, un combate en donde el nivel de cansancio va en aumento de acuerdo a las horas, y con esto se asume que el rendimiento irá disminuyendo. Cabe recordar que en los modelos propuestos anteriormente, se había asumido que el nivel de rendimiento de las tropas era constante en el tiempo, es decir α y β , tenían un valor fijo. Un análisis similar, en el que se incorpora el cansancio en un modelo utilizando simulación discreta fue propuesto por Michael J. Artelli y Richard F. Deckro, pertenecientes al Headquarters Air Combat Command y Air Force Institute of Technology respectivamente¹³. El modelo computacional propuesto se muestra en la figura 4.6.

Figura 4.6. Modelo Lanchester Lineal con Incorporación de Cansancio





Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 4.10 se hace la descripción de módulos de importancia utilizados para la realización del modelo mostrado. La tabla 4.11 muestra las variables que se utilizaron en el desarrollo de este modelo.

¹³ Publicado en el artículo Modeling the Lanchester Laws with System Dynamics

Tabla 4.10 Descripción modelo Lanchester lineal con incorporación de cansancio

Módulo	Descripción
	<p>En el módulo <i>Asigna Cansancio</i>, se hace el cálculo del cansancio acumulado que lleva cada entidad militar, para tal motivo, se ingresa un valor fijo CA_t y CB_t, que representa el porcentaje en que se incrementará el cansancio para cada intervalo de tiempo t.</p>
	<p>En el módulo <i>Asigna Rendimiento</i>, se recalcula el rendimiento de acuerdo al nivel de cansancio, para este caso se está suponiendo linealidad entre el cansancio y el rendimiento. La eficiencia o rendimiento inicial de los Ejércitos A y B, está representado por Ra₀ y Rb₀ respectivamente, luego, el actual nivel de rendimiento sería de Ri₀*(1 - Cansancio Ejército i).</p>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.11 Variables utilizadas en Modelo Lanchester Lineal con incorporación de cansancio

Variable	Descripción
Rb	Representa el rendimiento del Ejército B
Ra	Representa el rendimiento del Ejército A
Cansancio B	Cansancio porcentual acumulado del Ejército B
Cansancio A	Cansancio porcentual acumulado del Ejército A
CA _t	Cansancio porcentual fijo del Ejército A en una unidad de tiempo t
CB _t	Cansancio porcentual fijo del Ejército B en una unidad de tiempo t
Rb ₀	Rendimiento inicial del Ejército B
Ra ₀	Rendimiento inicial del Ejército A

Fuente: Elaboración Propia

El cálculo realizado en el módulo *Asigna Cansancio* es el siguiente:

$$\text{Cansancio A} = \text{Cansancio A} - \text{CA}_t$$

$$\text{Cansancio B} = \text{Cansancio B} - \text{CB}_t$$

El cálculo realizado en el módulo *Asigna Rendimiento* es el siguiente:

$$R_a = R_{a0} * (1 - \text{Cansancio A})$$

$$R_b = R_{b0} * (1 - \text{Cansancio B})$$

Finalmente, el modelo se comporta del mismo modo que el indicado para los modelos anteriores, es decir, se verifica si es que hay o no un ganador dependiendo de las distintas reglas de terminación de combate.

4.7 REGLAS DE DECISIÓN DE TÉRMINO DE COMBATE APLICADAS EN ARENA

En los modelos anteriormente explicados, se dejó pendiente el análisis del módulo *Hay Ganador?*, en el cual se programarán las distintas reglas para decisión de término de combate vistas.

En el modelo, aparecerán las nuevas variables fa , fb , ka , kb , Inicio A e Inicio B, siendo estas últimas, los tamaños iniciales de los Ejércitos A y B respectivamente, las demás variables ya fueron explicadas.

- **Regla de Decisión Absoluta**

Las variables a usar en este tipo de regla de decisión serán fb y fa , las que deberán ser ingresadas como condición de expresión para el módulo *Hay Ganador?* Del tipo *2-way by Condition*. La expresión condicionante debe ser la siguiente:

$$fb * \text{Inicio B} \geq \text{Actual.B} \ || \ || \ fa * \text{Inicio A} \geq \text{Actual.A} \quad ^{14}$$

Recordando que para esta regla, cada ejército tiene sus propios parámetros fb y fa , los cuales servirán para condicionar la rendición de los Ejércitos B y A respectivamente, dependiente del nivel de sobrevivientes en un tiempo t determinado.

- **Regla de decisión proporcional**

Las variables que inciden en esta regla son kb y ka . La expresión de condición será:

$$(\text{Actual.A}/\text{Actual.B}) \geq kb \ || \ || \ (\text{Actual.A}/\text{Actual.B}) \leq ka$$

¹⁴ El código $||$ representa o.

- **La regla de decisión AOP**

La expresión de condición para esta regla es la siguiente:

$$((\text{Actual.A} / \text{Actual.B}) \geq k_b \parallel f_b * \text{Inicio B} \geq \text{Actual.B}) \parallel ((\text{Actual.A} / \text{Actual.B}) \leq k_a \parallel f_a * \text{Inicio A} \geq \text{Actual.A})$$

- **La regla de decisión AAP**

La expresión de condición para esta regla es la siguiente:

$$((\text{Actual.A} / \text{Actual.B}) \geq k_b \ \&\& \ f_b * \text{Inicio B} \geq \text{Actual.B}) \parallel ((\text{Actual.A} / \text{Actual.B}) \leq k_a \ \&\& \ f_a * \text{Inicio A} \geq \text{Actual.A}) \quad ^{15}$$

4.8 CONCLUSIÓN

Por muchos años se han utilizado los modelos propuestos por Lanchester para modelar la batalla y predecir el tamaño de las fuerzas en combate luego de un tiempo determinado. A pesar de esto, no existe algún método que permita predecir que tan certeras serán estas ecuaciones para determinadas condiciones de combate.

Aun cuando las ecuaciones propuestas por Lanchester han sido validadas para algunas batallas ocurridas, cada combate representa sólo una situación particular, y es por esto que para algunas podrá ajustarse mejor el modelo lineal y para otras el cuadrático o de guerrilla. Dado que existen muchos factores que aún no han sido modelados, ya sea, por su dificultad o por que simplemente no pueden modelarse, no existirá modelo matemático, ni computacional, que permita responder con exactitud los la generalidad de los conflictos.

¹⁵ El código &&, representa y.

CAPÍTULO V: SEGUNDA BATALLA DE EL ALAMEIN

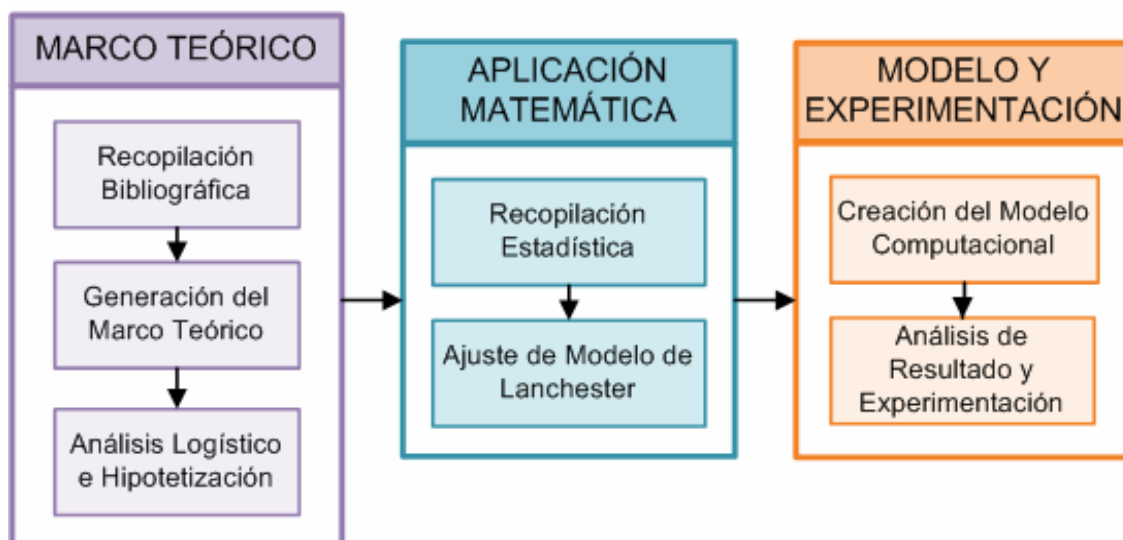
En el presente capítulo se abordó la Segunda Batalla de El Alamein de la Segunda Guerra Mundial, la que fue vista desde dos enfoques, el teórico y el matemático, para luego proponer un modelo de simulación que permita representar lo acontecido en el Norte de África. Finalmente, se proponen distintos escenarios y analizan los indicadores resultantes de cada uno de ellos.

Luego de reuniones con expertos, se decidió abordar la Batalla de El Alamein, principalmente, por los siguientes motivos:

- Importancia de la batalla para el desenlace de la Segunda Guerra Mundial.
- Cantidad de fuentes bibliográficas disponibles
- Calidad y veracidad de las cifras del combate expuestas
- Características de la batalla en relación a la logística militar que se podrían aplicar a situaciones de desastres naturales, catástrofes provocadas por el hombre u operaciones militares internacionales de mantención de la paz y seguridad.

La metodología para abordar este capítulo compone tres fases principales, el marco teórico de la batalla, el análisis matemático, y la modelación. El esquema metodológico seguido, puede verse en la figura 5.1.

Figura 5.1 Metodología Capítulo 5



Fuente: Elaboración Propia

5.1 INTRODUCCIÓN A EL ALAMEIN

La Segunda Batalla de El Alamein, fue probablemente la batalla decisiva de la segunda Guerra Mundial, ya que en ese momento se crea el punto de inflexión, en la que el bando de los Aliados sepultó las posibilidades del Eje de seguir liderando el combate armado.

El norte de África fue siempre muy codiciado por los alemanes, quienes tenían como principal objetivo tomar el control de Egipto y con esto poder controlar el estratégico Canal de Suez, que une el Mar Mediterráneo con el Mar Rojo, por el cual podrían acortar las rutas de comercio entre el Continente Europeo y el sur de Asia. Unido a esto, se encuentra el antecedente de los siempre codiciados pozos petroleros que posee el norte de África.

Para Octubre de 1942, el Ejército Alemán se encontraba al mando del General Erwin Rommel, apodado "el Zorro del Desierto". El mariscal alemán había ganado su seudónimo luego de salir victorioso en difíciles campañas ocurridas en el norte de África, lo que lo llevó a ser popular y admirado no sólo en el Ejército italo-germano, sino también entre los propios soldados británicos. A pesar de lo favorables que habían resultados los combates contra el 8º

Ejército Británico, la situación para el Africa Korps se fue tornando cada vez más crítica, dado que sus sistemas logísticos ya comenzaba a tener problemas y sus tropas ya estaban muy fatigadas.

Por su parte, el 8º Ejército Británico, era liderado por Bernard Law Montgomery, quien se destacaba por sus capacidades de estrategia, las que muchas veces le jugaron en contra al momento de tomar la decisión de comenzar el ataque en contra de Rommel, el que al contrario de Montgomery, poseía un excelente nivel táctico.

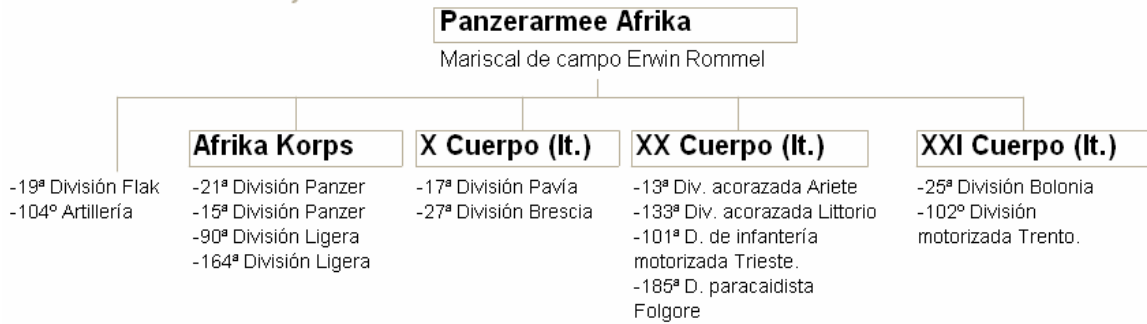
Para el segundo Alamein, Montgomery contaba con gran superioridad, tanto en calidad de armamento, como en cantidad. Por dar un ejemplo claro, el Octavo Ejército contaba con más de 250 tanques Sherman, los que en el campo de combate eran superiores a todas las escalas de los tanques Panzer que poseía el Afrika Korps. El único modelo que podía hacer frente a la calidad de los tanques usados por el Ejército Británico eran los Panzer IV, de los cuales para esa altura de la guerra, quedaba apenas una treintena. En cuanto a las tropas, el Ejército Alemán era doblado en cantidad de hombres. Además, el Octavo Ejército podía darse el lujo de contar con una gran cantidad de hombres de refresco, por lo cual el cansancio acumulado de los soldados ingleses era muy inferior con respecto a la fatiga de los alemanes, por lo que bajo este escenario, podía vaticinarse una clara victoria británica, aunque también se debía tomar en cuenta la astucia con que había actuado el General Rommel en batallas ocurridas bajo condiciones similares.

Para el 23 de Octubre de 1942, ya se encontraban todas las divisiones dispuestas sobre el campo de batalla. El Eje contaba con cinco divisiones acorazadas, ocho de infantería y una brigada de paracaidistas, los cuales en tamaño de hombres, sumaban aproximadamente 90 mil. Los aliados, con cuatro divisiones de acorazados, siete de infantería y una brigada acorazada, las que eran integradas por 210 mil hombres. El siguiente cuadro resume el orden de batalla de ambos bandos. Además, en la figura 5.2 se muestran los movimientos hechos por los Ejércitos. Para ver mapas con mayor detalle de movimiento ver ANEXO A

Orden de batalla aliado

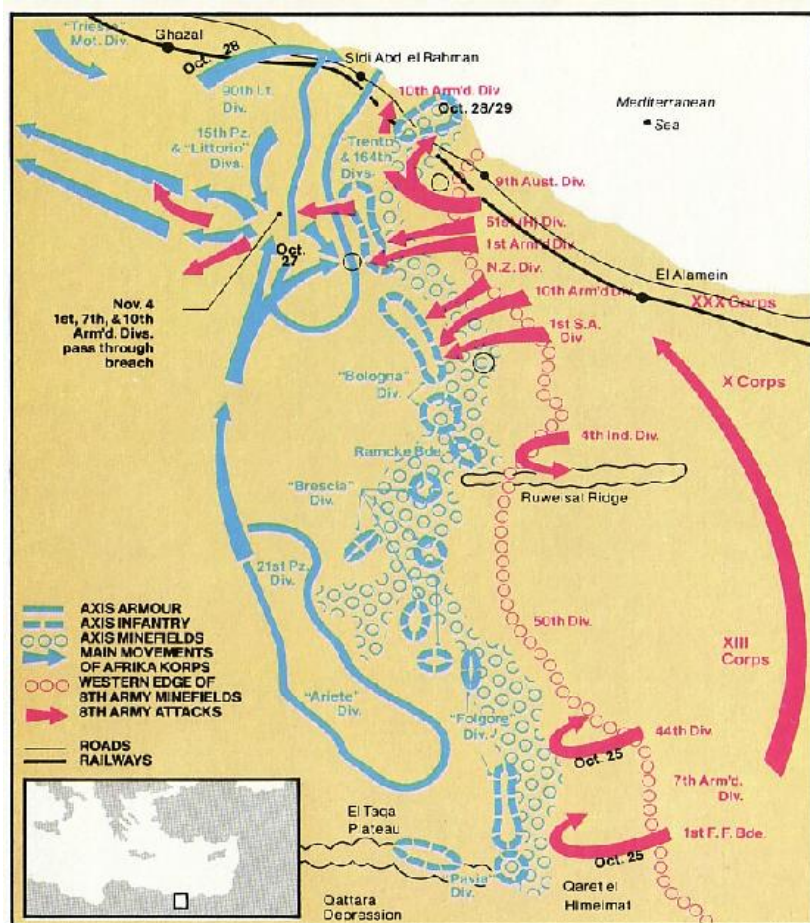


Orden de batalla del Eje



Fuente: Portal El Mundo. España

Figura 5.2 Movimiento de los Ejércitos en El Alamein



Fuente: www.islandfarm.fsnet.co.uk

5.2 DESARROLLO DE LA BATALLA

El plan de ataque del bando británico consistía en romper las líneas enemigas y traspasar los “Jardines del Diablo” (Campos minados) durante la noche del 23 de Octubre, para esto, se disponía a ir al ataque con fuerzas de infantería, apoyadas por blindados, quienes tenían la misión de evitar los contraataques en contra de la artillería que realizaría el Ejército Alemán. El ataque principal estaría a cargo del XXX Cuerpo. Por el Norte, se debían desplegar dos corredores a través de los jardines del diablo, luego de realizada esta tarea, el X Cuerpo debía seguir a través de ellos. Por el Sur, el ataque sería encabezado por el XIII Cuerpo, quienes debían realizar ataques contra Himeimat y contra Gabel Kalakh, ataque con el que se pretendía la desorientación de los alemanes, pudiendo con esto, proteger probables ataques contra el frente que estaba actuando en el Norte. El X Cuerpo, tenía como misión principal proteger al XXX Cuerpo, y luego de tener cubierto el frente de ataque, ir en contra de los blindados alemanes. Esta operación fue denominada “lightfoot”.

Por su parte, los planes de defensa del Afrika Corps, consistían en resistir a toda costa utilizando su artillería, no dejando que los ingleses pudieran realizar rupturas, ya que con esto podría comenzar una batalla de movimiento, lo cual muy bien sabía Rommel, sería nefasto para las pretensiones alemanas al no contar con gran cantidad de combustible ni municiones. Sumado a esta escasez, las líneas de abastecimiento alemanas eran demasiado extensas, sobrepasando los 1000 km, lo cual hacía que en batallas de movimiento, los ingleses tomaran considerables ventajas, sumado también a la superioridad del Ejército Británico. Los extensos campos minados, facilitaban de gran forma el actuar de la artillería alemana. Finalmente, gracias al más de medio millar de cañones livianos y medios, el XXX Cuerpo pudo abrir los corredores contemplados en los planes iniciales. En cuanto al ataque secundario realizado por el XIII Cuerpo, sólo pudo mantener al enemigo atento a nuevos ataques.

Durante el día 24 de Octubre se registraron intensos bombardeos durante todo el día, por parte de la Desert Air Force (DAF), quienes hicieron alrededor de 1000 vuelos atacando las posiciones resguardadas por el Eje. Luego de los bombardeos, el General Georg Stumme a cargo del Ejército Alemán muere de un ataque cardíaco. Rommel, quien aún se encontraba reposando de una enfermedad en Austria, prepara sus maletas para volver al norte de África y tomar el mando del Afrika Corps.

El domingo 25 de madrugada, el X Cuerpo inicia el cruce de los corredores que había abierto el XXX Cuerpo. Mientras se realizaba la avanzada británica por entre los campos minados, tuvo que actuar la Royal Air Force (RAF), para ir conteniendo los continuos ataques alemanes. Aun al estar en condiciones de batalla favorables, Montgomery ordena a las tropas del sur, marchar hacia el Norte, dado que el avance se encontraba estancado. Luego de la avanzada del X Cuerpo, las fuerzas del eje contraatacan con más de 100 tanques, de los cuales la mayoría eran italianos. Finalmente, los tanques fueron repelidos por las fuerzas aliadas, llegando a destruir aproximadamente 20 tanques italianos, los que luego del contraataque se dieron a la fuga. Al atardecer del 25, luego de los continuos enfrentamientos, la 15 Pz Div, tenía activos sólo 31 de sus 119 tanques.

Rommel hace su llegada a África al atardecer del día 25, claramente no se encontró con muy buenas noticias. Para esas alturas, la División Trento ya había perdido a más de la mitad de su infantería, muchos de sus hombres estaban enfermos y además contaba con combustible sólo para 3 días más. Aun bajo estas condiciones deplorables, el Ejército Alemán logró contener las ofensivas británicas. Tras estos hechos, el Primer Ministro británico Winston Churchill exclama "*¿Es tan difícil encontrar a un General que pueda ganar una batalla?*"

Durante el Lunes 26, un convoy del Eje, dispuesto para llevar suministros combustible y municiones a Rommel, lo que serviría para hacer frente a la ofensiva británica, es derribado luego de extensos bombardeos los días 25 y 26, con esto, la RAF logra detener la llegada de más de 12.000

toneladas de suministros. Sólo uno de los buques llegó a destino, pudiendo entregar su carga en las cercanías de Tobruk. A medio día del 26, un grupo de 160 tanques ingleses logra eliminar a un batallón de la 164 Le DI y pudo penetrar líneas ubicadas en dirección suroeste, tras esta intensa lucha, el Ejército Alemán asumió una pérdida de 61 tanques en la 15 Pz Div, mientras que los italianos asumieron 56 tanques en la Littorio. En el inter tanto se daba la orden a la 21 Pz Div de desplazarse hacia el norte, dejando sus posiciones iniciales haciéndole frente al XIII Cuerpo. Al 26 de octubre, la división de tanques más afectada era la 15 Pz Div, quienes contaban con sólo 39 tanques operativos.

Para el 27 de octubre la batalla central estaba concentrada en Tel el Aqqaqir y en Kidney. A medio día, una densa barrera de fuego dio de baja a 37 de los 40 tanques con que pretendía realizar un avance la 21 Pz Div. Montgomery recibe la noticia del lento avance por parte de los neozelandeses y australianos, motivo por el cual, decide hacer una serie de modificaciones a las formaciones del XXX Cuerpo. Los neozelandeses fueron designados en operaciones de retaguardia, enviándolos al sector de los Highlander, y siendo reemplazados por fuerzas sudafricanas e indias, la 7ª división del XIII Cuerpo también fue enviada a las batallas del norte. Mientras tanto, la 1ª División Blindada, destruía una quincena de tanques alemanes. Los contraataques alemanes eliminaron una gran cantidad de ingleses, aunque, de todas formas, debieron asumir la pérdida de 5 tanques ítalo germanos más.

A las 5 de la tarde, un grupo aproximado de 70 tanques alemanes guardan posiciones defensivas esperando la entrada de tropas alemanas. Gracias a esta acción, en menos de diez minutos logran liquidar a una docena de tanques Sherman y Grant. Finalmente de los tanques de Von Thoma, quedan 7 en acción. Dado el alto nivel de pérdidas ocurridas, Rommel decide iniciar su retirada hacia Fuka, desesperanzado por la escasez de combustible y con esto la falta de movilidad. En estos cuatro días de batalla la RAF ya se había hecho acreedor de 40 tanques y vehículos blindados alemanes.

El 28 de Octubre las unidades alemanas fueron reemplazadas en un tercio por la "Ariete", las fuerzas británicas intentaron sobrepasar las líneas italo germanas en tres oportunidades, sin resultados favorables

Entre los días 29 y 30, prácticamente no se registraron enfrentamientos entre alemanes y británicos, estos días fueron un periodo de receso, dentro de los cuales el Ejército Británico planeaba un ataque llamado "Supercharge", con el cual pretendían dejar fuera de combate a alemanes e italianos.

El día 31 de Octubre Rommel ordena a la 21ª a unirse con los restos de la 15ª, para poder hacer contrapeso a la 9ª División Australiana, quienes estaban avanzando por la costa. Para este último día del mes la 21ª Pz Div contaba con 41 tanques, la 15ª con 50, la Trieste con 27, la Ariete con 124 y la Littorio con 38. A una semana de iniciado el combate, los británicos han sufrido aproximadamente diez mil bajas, y además han perdido el doble de carros que el Ejército italo-germano.

El Domingo 1 de Noviembre, Montgomery, da un descanso a sus hombres, retrasando así en 24 horas la operación "Supercharge". Aproximadamente a las 22 horas se inicia un intenso ataque de cañones británicos. Finalmente, a las 2 de la madrugada del 2 de Noviembre se inicia el planeado ataque británico, produciéndose uno de los mayores choques de blindados ocurridos a lo largo de la historia. Pasadas las 6 de la mañana, comienza el avance de la 9ª Brigada Blindada, quienes perdieron 75 de sus 94 tanques durante este avance. Mientras, la Desert Air Force, hizo 374 salidas, con el fin de contrarrestar la defensa del Afrika Korps y proteger a los pocos vehículos blindados que le quedaban a la 9ª. Para estas alturas del día, Montgomery se encontraba sorprendido por la gran resistencia que oponía Rommel, aun así, confiaba en que la derrota alemana estaba por llegar.

Por la tarde, el Afrika Korps tenía 117 tanques que permanecían inmovilizados en el campo de batalla, de los cuales 77 eran alemanes y el resto italianos.

El 3 de Noviembre, Rommel da la señal de retirada, desobedeciendo las órdenes dadas por Hitler, quien no autorizó el repliegue de su ejército, diciendo que el Alamein debe ser conservado hasta que no queden hombres en pie, aun sabiendo que el General Von Thoma contaba sólo con 32 tanques. Desde éste momento en adelante ocurrieron hostigamientos y persecución por parte de las tropas británicas contra las tropas alemanas.

El 4 de Noviembre se produce el total rompimiento del frente alemán, mientras que al sur, las unidades italianas quedan completamente aisladas. Para ese día, se inicia el repliegue definitivo, en el cual Rommel busca salvar a sus hombres y los pocos tanques que se encuentran operativos en el Norte de África.

5.3 ANÁLISIS LOGÍSTICO DE EL ALAMEIN

Muchas opiniones pueden darse con respecto a cuáles fueron los principales factores que marcaron el conocido desenlace de esta batalla. Además de la excesiva ventaja en cuanto a la cantidad tanto de hombres como armamento y la calidad del armamento británico, cuyo soporte era obtenido desde los Estados Unidos, se encuentra el rol que jugó la logística en este conflicto bélico.

El desgaste alemán se vio acrecentado al estar combatiendo en dos frentes distintos, lo que también limitó las posibilidades de alcanzar una victoria para Rommel, quien durante su estadía en un hospital de Austria, recibe el llamado de Hitler a liderar nuevamente las misiones en África, ofreciendo un adecuado nivel de apoyo logístico en cuanto al abastecimiento de combustible y otras especies de suministros, lo cual, Rommel bien sabía que no iba a ocurrir, dado que era tal la obsesión de Hitler por derrotar a Stalin, que puso en segundo plano al combate en El Alamein.

Las tropas alemanas combatiendo en territorio soviético, acaparaban aproximadamente el 80% de los recursos y esfuerzos logísticos, lo cual

claramente iba en desmedro de las pretensiones de Rommel en el Norte de África.

El Alamein, fue lo más parecido a las batallas acontecidas durante la Primera Guerra Mundial, en donde, dentro de condiciones de guerra estática, el bando que más reservas y material pudiera enviar al frente de combate y sustituir con rapidez, sería finalmente el que saldría victorioso.

Además, el choque entre alemanes y británicos, tenía que ser del tipo frontal (como los de la 1ªGM), ya que dadas las condiciones del territorio, en el que a un lado se encontraba el mar y al otro la depresión de Quattara, no existía la posibilidad de realizar movimientos envolventes, como los que había hecho Rommel en algunas de sus victorias.

Rommel, define este conflicto como la “batalla de los refuerzos y el combustible”, las tropas alemanas se encontraban agotadas tras meses de lucha en el norte de África, esto sumado al problema de abastecimiento suministros, principalmente de combustible, que tal como el mismo General alemán afirmó, era la sangre de los ejércitos.

El problema de abastecimiento de combustible, no pasaba tanto por la falta de envío de este elemento hacia los puertos manejados por los alemanes, sino más bien, por el reducido número de camiones abastecedores, además de las largas líneas de abastecimiento que estos debían atravesar. Las distancias desde los puertos de Trípoli y Bengasi hasta el frente de combate, eran de 2.100 y 1.300 km, cifra que se encuentra muy por sobre la distancia practicable de abastecimiento de unidades mediante transporte terrestre motorizado que es de 320 km. Claramente a mayor distancia, mayor será el tiempo de traslado de combustible, se estima que desde Bengasi hasta El Alamein, los camiones abastecedores demoraban un tiempo de siete días entre ida y vuelta, mientras que desde Trípoli hasta el Alamein, el tiempo era de 15 días, obviamente bajo esas condiciones, era poco lo que Rommel podía hacer. Además para ese entonces, los camiones abastecedores, en recorrer 1600km hacían uso aproximadamente del 40% del combustible transportado.

Mientras que el Ejército Británico tenía sus principales bases de abastecimiento a menos de 110 kilómetros, lo que era como estar combatiendo prácticamente apoyados por una capacidad de abastecimiento interminable.

Muchos historiadores creen que la segunda Batalla de El Alamein, pudo haberse ganado si es que dos años antes los italianos hubiesen tomado el poder de Malta, de esa forma, al tener el control de la isla, las líneas de abastecimiento hubieran sido considerablemente menores.

Entre enero y junio de 1942, el transporte de suministros alemán se vio favorecido por la superioridad que marcó la fuerza aérea alemana. Durante este periodo, el transporte de tropas y suministros funcionó sin mayores problemas y sufriendo pocas pérdidas, lo que dio gran apoyo a la ofensiva italo-germana.

Como resultado de los avances realizados por Rommel en el territorio egipcio luego de la captura de Tobruk, la cantidad de suministros almacenados en Trípoli y Bengasi eran prácticamente inutilizables dada su lejanía con el frente de combate. Para esta altura de la guerra, la RAF ya había tomado pleno control aéreo, por lo que prácticamente los alemanes no pudieron transportar sus suministros almacenados, ni por medio terrestre, ni marítimo. Además de no ser capaces de trasladar los suministros que ya se encontraban en territorio africano, los alemanes vieron interceptadas sus rutas marítimas principales de abastecimiento, perdiéndose aproximadamente un 30% de la carga. Esta carga perdida, no solo significaba una pérdida de los suministros, sino que además, se disminuía la capacidad de abastecimiento marítimo, ya que claramente los buques transportadores quedaban destruidos.

El Ejército alemán no supo aprovechar los meses buenos en los que la Luftwaffe lideró el aire, para este tiempo, no fueron capaces de aprovisionarse y así tener una capacidad de suministro que pudiera dar soporte para mantener el control de Egipto.

Los alemanes no fueron precavidos, no tuvieron la capacidad de creación de nuevas rutas de abastecimiento cuando tuvieron el control del terreno, esto se ve reflejado en que no intentaron la construcción de líneas ferroviarias ni de oleoductos que permitieran luego realizar de forma expedita el combustible y municiones para sostener el avance de sus tropas. En cambio los británicos construyeron líneas de ferrocarril, ampliaron los puertos y construyeron oleoductos, lo que refleja la gran capacidad de planificación de los generales británicos.

La interceptación de las líneas de comunicación por parte del Ejército Británico, también fue un factor importante. La maquina “Enigma” creada por los ingleses era capaz de codificar los mensajes que se producían entre los alemanes.

De todas formas nada puede afirmarse a cabalidad, fueron muchos otros los factores que jugaron un rol importante en el desenlace final del combate.

5.4 AJUSTE DE ECUACIONES DE LANCHESTER

Para realizar el análisis matemático de El Alamein mediante las ecuaciones de Lanchester, se hizo un amplio proceso de investigación y recolección de datos históricos. Tal como se mencionó en el capítulo anterior, la dificultad de validación de las ecuaciones de combate, recae precisamente en la escasez y fidelidad de cifras. Por tal motivo, para realizar el ajuste de las ecuaciones de Lanchester, se hicieron las estimaciones y supuestos necesarios para aproximarse lo más posible a lo ocurrido en el Norte de África. Para la recolección, se utilizaron una gran cantidad de fuentes y contrastaron algunos datos entregados por los autores¹⁶.

Para acotar lo sucedido en El Alamein, y siguiendo las recomendaciones hechas por Hartley y Helmbold (1995) para el ajuste de modelos de Lanchester, el análisis se basará sólo en los primeros cinco días de combate. Para este periodo, la calidad de los datos encontrados es bastante aceptable y además, estos días marcaron la primera gran etapa del conflicto, la que fue llamada “lightfoot”.

Dado que el inicio de la batalla fue aproximadamente a las 22 horas del día 23, se consideró a modo de estudio, que el enfrentamiento armado comienza a partir del día 24 de Octubre.

Los datos recopilados, se muestran en la tabla 5.1:

Tabla 5.1 Estadísticas diarias de El Alamein

	24-oct		25-oct		26-oct		27-oct	
	Inicio	Bajas	Inicio	Bajas	Inicio	Bajas	Inicio	Bajas
Eje	527	132	426	108	387	196	347	217
Aliados	979	210	815	207	683	160	598	150

Fuente: Instituto Dupuys y otros

¹⁶ Los datos recopilados para el bando del eje, fueron obtenidos en su totalidad de la base de datos del Instituto Dupuy. Los de los aliados fueron obtenidos desde una serie de libros y a través de estimaciones.

5.4.1 Aplicación de Lanchester Cuadrado

Recordando que las ecuaciones cuadráticas propuestas por Lanchester son las siguientes:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\beta B \quad \frac{\partial B}{\partial t} = -\alpha A \quad , \text{ la ecuación de estado viene dada por:}$$

$$\alpha(A_0^2 - A_t^2) = \beta(B_0^2 - B_t^2)$$

Es decir, el número de bajas del lado del Eje y Aliados en un cierto día t , vendrán dadas respectivamente por:

$$\overset{\circ}{A}_t = \beta B_t \quad \overset{\circ}{B}_t = \alpha A_t$$

Ya se tienen las condiciones necesarias para empezar con el desarrollo numérico de esta ecuación. Para realizar el ajuste de las ecuaciones de Lanchester, se utilizó el método de minimizar la suma de los errores cuadrados. Mediante este método, es posible encontrar de forma experimental, los parámetros de las ecuaciones de Lanchester, que dan el mejor nivel de ajuste, lo que indica un mayor índice de correlación (R^2).

En relación a las estadísticas vistas, se supondrá que el rendimiento diario de los ejércitos del eje y aliados, se encuentran entre 0,2 y 0,5, y entre 0,1 y 0,4 respectivamente. La búsqueda de los parámetros de rendimientos que minimiza la suma de los errores cuadrados, se realizó mediante el uso del Software *Crystal Ball*, con el que luego de cinco mil réplicas, se encontraron valores para los parámetros α y β , que ajustan de mejor forma el modelo. Los parámetros encontrados son:

$$\alpha = 0,4311$$

$$\beta = 0,1955$$

Por lo que la ecuación propuesta para estimar las bajas de acuerdo a la ecuación de Lanchester cuadrado vendrá dada por:

$$\overset{\circ}{A}_t = 0,1955B_t \quad \overset{\circ}{B}_t = 0,4311A_t \quad (5.1)$$

De acuerdo a las ecuaciones 5.1, las estimaciones realizadas para el número de bajas diarias son las mostradas en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Estimación de bajas diarias según Lanchester Cuadrado

	24 - Octubre	25 - Octubre	26 - Octubre	27 - Octubre
Eje	191	159	134	117
Aliados	227	184	167	150

Fuente: Elaboración Propia

Comparando los valores estimados, con los valores reales, se puede calcular cuál fue el error de estimación diaria, y luego hacer el cálculo de la suma de los errores cuadrados. La tabla 5.3 muestra dicho análisis.

Tabla 5.3 Errores de estimación de bajas según Lanchester Cuadrado

	24 - Octubre	25 - Octubre	26 - Octubre	27 - Octubre
Eje	59	51	62	100
Aliados	17	23	7	0

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, la suma de los cuadrados de los errores será:

$SCE = \sum_1^4 (A_i^* - \overset{\circ}{A}_i)^2 + \sum_1^4 (B_i^* - \overset{\circ}{B}_i)^2 = 20.944$, además, se puede calcular la suma de los cuadrados totales.

$$SCT = \sum_1^4 (A_i^* - \bar{A})^2 + \sum_1^4 (B_i^* - \bar{B})^2 = 138.876$$

De acuerdo al índice de correlación, se puede ver que:

$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} = 0,8492$, lo cual, indica que con la ecuación de Lanchester Cuadrática ajustada, pueden predecirse las bajas con un 84,92% de precisión.

5.4.2 Aplicación de Lanchester Generalizado

De forma similar, a lo hecho para el ajuste de un modelo cuadrático, se procede al ajuste del modelo generalizado de Lanchester, cuyas ecuaciones vienen dadas por:

$$\begin{aligned}\hat{A}_t &= \beta B_t^p A_t^q \\ \hat{B}_t &= \alpha A_t^p B_t^q\end{aligned}$$

De igual forma que el ajuste anterior, se comienza la búsqueda de la mínima suma del cuadrado de los errores. Para este caso influyen dos parámetros más, p y q. Al analizar los datos entregados por Crystal Ball, se concluye que la combinación de valores para los parámetros requeridos que dará un mejor ajuste son:

$$\alpha = 0,4415; \quad \beta = 0,4578; \quad p = 0,1978; \quad q = 0,7296$$

Por lo tanto las ecuaciones de Lanchester generalizadas, que mejor describiría la situación acontecida en la Segunda Batalla de El Alamein, serían:

$$\begin{aligned}\hat{A}_t &= 0,4578 B_t^{0,1978} A_t^{0,7296} \\ \hat{B}_t &= 0,4415 A_t^{0,1978} B_t^{0,7296}\end{aligned}\tag{5.2}$$

La tabla 5.4, muestra las estimaciones de bajas para cada bando según las ecuaciones 5.2.

Tabla 5.4 Estimación de bajas diarias según Lanchester Generalizado

Estimación de Bajas	24 - Octubre	25 - Octubre	26 - Octubre	27 - Octubre
Eje	173	143	129	116
Aliados	232	195	168	149

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto, los errores diarios de estimación serán los mostrados en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Errores de estimación de bajas según Lanchester Generalizado

Errores de Estimación	24 - Octubre	25 - Octubre	26 - Octubre	27 - Octubre
Eje	41	35	67	101
Aliados	22	12	8	1

Fuente: Elaboración Propia

Siguiendo con el análisis, la suma de los cuadrados de los errores será:

$$SCE = 18.389$$

En dicho caso, el índice de correlación es de 0,868, con lo cual el número de bajas de los ejércitos puede predecirse en un 86,8% por la ecuación generalizada de Lanchester propuesta.

5.5 MODELO COMPUTACIONAL

En esta sección del capítulo, se hizo una propuesta de modelo que permita simular lo acontecido en la segunda Batalla de El Alamein. Para efectos de modelación de combate propiamente tal, se trabajó con la ecuación cuadrática de Lanchester ajustada en la sección anterior.

Tal como todo estudio de simulación, se intenta analizar el modelo real bajo distintos escenarios, para este caso no con el fin de proponer una mejora al modelo, si no que con motivos de hipotetizar sobre que hubiera ocurrido si por ejemplo; Rommel hubiera tenido a su disposición una mayor cantidad de tanques, si el tiempo de reparación de los blindados hubiera sido menor, etc.

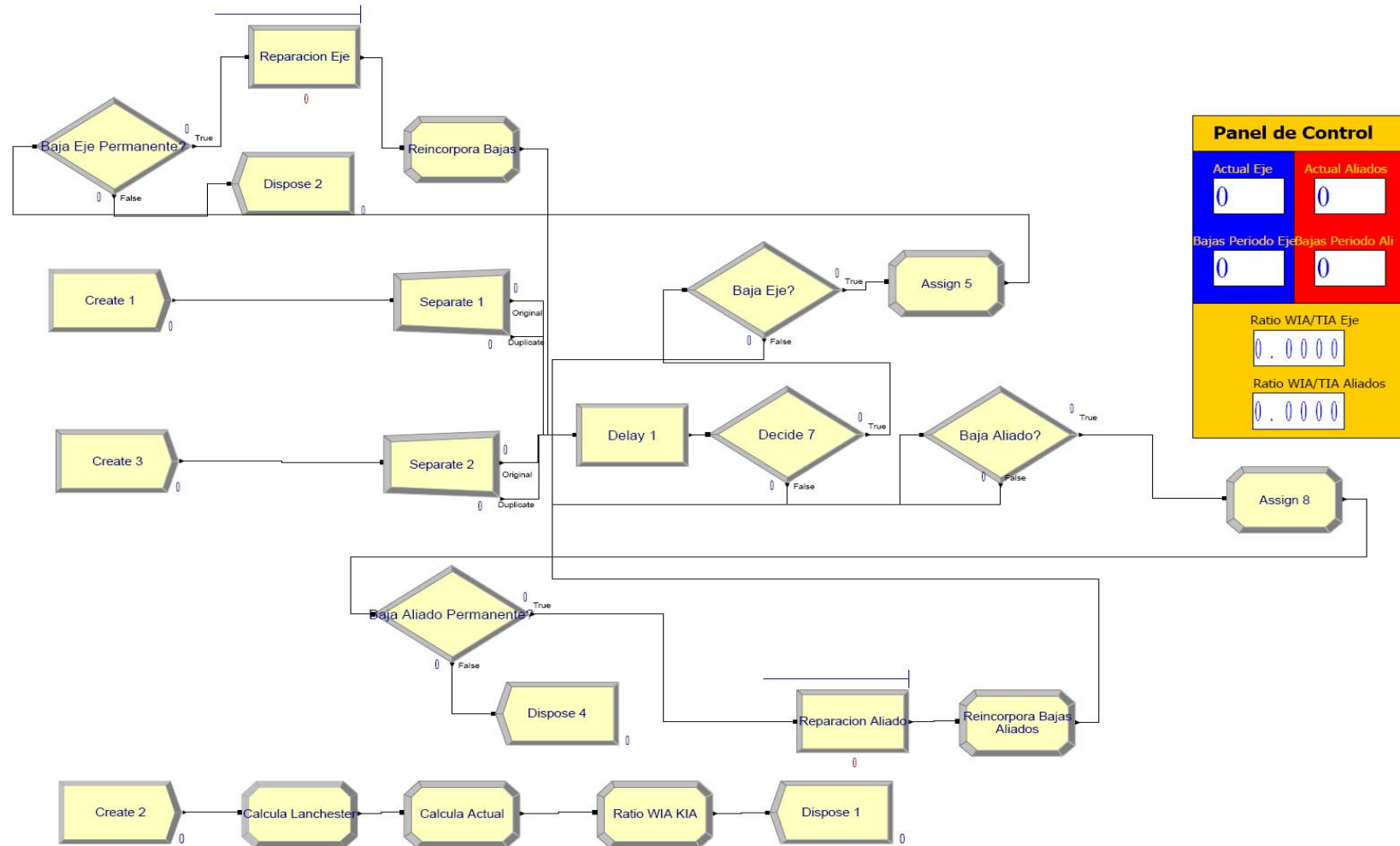
Con motivo de mayor precisión en la modelación, se simuló sólo los primeros cuatro días de combate, para así poder ingresar la ecuación de Lanchester obtenida, ya que ésta fue ajustada para ese periodo del conflicto, justo antes de que Rommel comenzará a tener problemas con su sistema logístico de abastecimiento de combustible.

Supuestos y Limitaciones del Modelo:

- Dado que las cifras sobre las bajas diarias encontradas para el desarrollo del conflicto de mayor confiabilidad son las relacionadas con los tanques, se decidió simular la batalla tomando como entidad de combate única a dichos blindados. Además, el tanque, es el armamento más representativo para operaciones en zonas desérticas.
- El cálculo de las bajas de tanques de cada bando vendrá dada por las ecuaciones de Lanchester obtenidas en el capítulo anterior.

El modelo computacional generado se muestra en la figura 5.3

Figura 5.3 Modelo Computacional para El Alamein



Fuente: Elaboración Propia

5.5.1 Datos de entrada

Los datos de entrada al modelo son los mostrados en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Datos de entrada para El Alamein

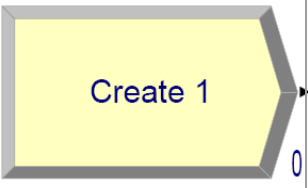
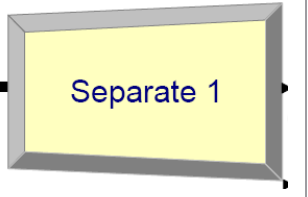
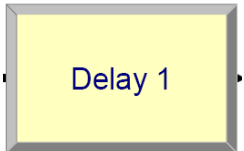
	Aliados (B)	Eje (A)
Tamaño Inicial	979	527
Rendimiento	0,1955	0,4311
Ratio WIA/TCIA ¹⁷	TRIA(0.29,0.521,0.672)	0.63+0.31*BETA(1.66,0.833)
Cantidad de Talleres Reparación	13	13
Tiempo de reparación	TRIA(2.5, 4.2, 7.3)	TRIA(1.36, 2.96, 4.8)

Fuente: Elaboración Propia




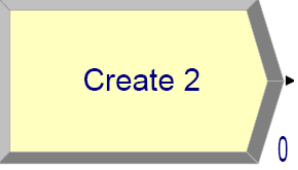
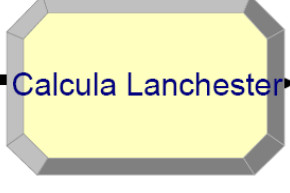
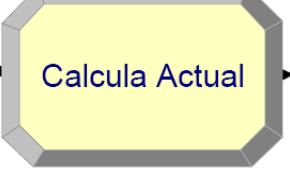

5.5.2 Descripción de Módulos

La descripción de los módulos utilizados para la modelación computacional del modelo de El Alamein, se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Descripción de módulos de El Alamein

Módulo	Descripción
	Los módulos <i>Create 1</i> y <i>Create 3</i> , generarán las llegadas de los ejércitos para efectos del modelo, se supone que ambos llegan al mismo tiempo al combate.
	Los módulos <i>Separate 1</i> y <i>Separate 2</i> , contienen las variables <i>Actual.Eje</i> y <i>Actual.Ali</i> que representan el nivel inicial de tanques del bando del Eje y Aliados respectivamente.
	El módulo <i>Delay 1</i> , servirá para mantener un manejo adecuado de la ecuación de Lanchester a calcular, para este modelo, se trabajó la ecuación suponiendo

¹⁷ WIA: Wounded In Action (Dañados) TCIA: Total Casualtie In Action (Bajas Totales)

	<p>una revisión diaria, por lo cual el retraso aplicado por el módulo debe ser de un día.</p>
	<p>Los módulos <i>Baja Eje?</i> y <i>Baja Aliado?</i>, tendrán la función de puerta, la cual dejará pasar sólo al número de entidades calculadas en el módulo <i>Calcula Lanchester</i></p>
	<p>Los módulos <i>Reparacion Eje</i> y <i>Reparacion Aliado</i>, representan el proceso en que el taller de mantenimiento realiza la reparación de un blindado dañado.</p>
	<p>En este módulo, se hará la modificación de la variable <i>Actual.Eje</i> y <i>Actual.Ali</i>, esta modificación representa la reincorporación al combate de aquellos tanques que fueron reparados por los talleres de mantención.</p>
	<p>El módulo <i>Create 2</i>, será el que dará inicio al calculo de las ecuaciones de Lanchester, lo cual de acuerdo a la ecuación ajustada anteriormente, debe hacerse cada un día.</p>
	<p>En el módulo <i>Calcula Lanchester</i>, se realiza el cálculo de la ecuación propuesta, la cual entrega el número de bajas del periodo analizado</p>
	<p>En el módulo <i>Calcula Actual</i>, se calcula el número actual de tanques en combate de cada ejército luego de realizado el cálculo de las bajas de periodo.</p>
	<p>De acuerdo a las distribuciones estadísticas para el porcentaje de tanques dañados reparables y aquellos dados de baja permanente, el módulo <i>Ratio WIA KIA</i>, entrega un indicador que es usado posteriormente en los módulos <i>Decide 2</i> y <i>Decide 5</i>.</p>

5.5.3 Análisis de Resultado

El análisis de resultado, se realizó bajo un nivel de confianza de 95%. Tras cinco corridas piloto, el modelo entregó los resultados mostrados en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Estadística descriptiva de corridas piloto de El Alamein

	Aliados	Eje
Media	602,2	340,6
Varianza	27,7	36,3
Desviación típica	5,26308	6,02495
Mínimo	596	333
Máximo	609	348
Rango	13	15
Asimetría tipi.	0,251719	0,00793055

Fuente: Elaboración Propia

Luego, el número real de corridas, para un nivel de precisión de ocho soldados, es de cinco réplicas. Los intervalos obtenidos para un nivel de confianza del 95%, son los siguientes:

- Al quinto día de combate, los aliados tenían un tamaño de entre 595 y 609 tanques.
- Al quinto día de combate, la cantidad de tanques del eje, se encontraba entre 333 y 348 tanques

Al observar los intervalos, se puede apreciar que las cifras históricas ocurridas para la Segunda Batalla de El Alamein, se encuentran dentro de los intervalos de confianza construidos para el número de tanques al quinto día de combate de cada Ejército. De esta forma puede decirse que el modelo si se aproxima a las condiciones ocurridas en la batalla estudiada. Además, ya se vio anteriormente que la ecuación ajustada representa en aproximadamente un 85% los datos de batalla analizados de forma diaria.

5.5.3 Experimentación

La experimentación en modelos de combate como este, presenta un mayor grado de incertidumbre que la gran mayoría de los modelos de simulación realizados para ámbitos civiles, en donde las decisiones son habitualmente afectadas por condiciones que ya se conocen o pueden predecirse de antemano.

En simulación militar, y más aun en la utilización de modelos de Lanchester, no existe la posibilidad de ingresar la interacción entre los elementos del sistema, un ejemplo de esto es la imposibilidad de conocer cuales son los planes del bando adversario y las estrategias que este seguiría, a partir de las decisiones tomadas por el Ejército propio. Por todos estos motivos, la experimentación que se realizó para el modelo de la Segunda Batalla de El Alamein, sólo es de forma teórica y considerando que la estrategia de un Ejército, no varía con respecto a las acciones seguidas por el otro, lo que claramente, es una gran abstracción a lo que pudo haber pasado en la realidad.

Para la experimentación se propusieron 4 escenarios distintos, los cambios estudiados son los siguientes:

- Aumento de un 25% en el rendimiento del Eje
- La 24th División Panzer del 4º Ejército de Panzer combatiente en el frente Ruso, es asignado a Rommel.
- Aumento del rendimiento en un 25% del Ejército Aliado
- Aumento en un 50% la cantidad de talleres de mantención y recuperación del Afrika Korps.

La tabla 5.9 muestra los intervalos para las medias del número de tanques para cada Ejército, al quinto día de combate.

Tabla 5.9 Intervalos de Confianza para el tamaño de fuerzas

	Aliados		Eje	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Escenario Real	595	609	333	348
Escenario 2	443	456	367	374
Escenario 3	315	322	600	607
Escenario 4	653	663	209	219
Escenario 5	525	536	448	472

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a las cifras mostradas en la tabla 5.9, se puede decir que las medias para cada uno de estos intervalos de confianza contruidos con un 95% de confianza, son estadísticamente distintos, dado que ninguno de ellos se intercepta. Al existir diferencia estadística significativa entre los intervalos para las medias, se puede decir que los escenarios propuestos, efectivamente representan condiciones distintas.

Del escenario 2, se puede ver que al aumentar en un 25% el rendimiento de los carros de combate del Eje, el Ejército Aliado presenta una pérdida de aproximadamente un 41% más con respecto de las bajas en condiciones iniciales. Por su parte, el Eje pierde el 30% de sus tanques, comparado con el 35% dados de baja en el escenario real. Por lo tanto las condiciones propuestas hacen que el Ejército Alemán, pierda un 16% menos de sus blindados.

Bajo el supuesto de que los alemanes hubieran decidido enviar a la 24th División de Panzer a reforzar las tropas de Rommel con 210 tanques, y lógicamente bajo el supuesto de que el Ejército Británico no aumenta su tamaño. Se aprecia que el bando británico, pierde aproximadamente un 67,5% de sus tanques, mientras que los ítalo-germanos, sufren una pérdida de 134 tanques, lo que equivale a un 22% de su tamaño inicial.

Al aumentar en un 25% el rendimiento de los Aliados, se puede ver que el Eje pierde aproximadamente un 68% más de tanques que bajo el

rendimiento habitual de los británicos, dando de baja a 313 de sus carros de combate, además las bajas del Ejército Aliado, disminuyen en un 15%.

Un aumento del 50% de talleres de mantención y recuperación, hubiera significado una reducción del 64% de las bajas de tanques ítalo-germanos, perdiendo así sólo 67 tanques al quinto día de combate. Por su parte, los británicos sufren un 46% de bajas con respecto de su nivel inicial, lo que equivale a un aumento en un 19% de bajas de acuerdo a las condiciones iniciales del combate.

Dados estos escenarios, nada se puede afirmar con respecto a quién hubiera salido victorioso bajo las nuevas condiciones propuestas, sólo se intenta proyectar cuál hubiera sido el tamaño de las fuerzas de cada Ejército, bajo un momento determinado.

5.6 CONCLUSIÓN

La experimentación y propuesta de escenarios para batallas históricas, pretende analizar indicadores y así poder hipotetizar cuáles serían los tamaños de los ejércitos y en algunos casos, los más aventurados pueden atreverse a predecir quien hubiera ganado la batalla bajo ciertas situaciones.

Al realizar un estudio de este tipo, se está haciendo una gran abstracción sobre otros factores de gran incidencia sobre el campo de batalla. Tal es el caso de la estrategia o táctica seguida por el Ejército adversario, dada la decisión tomada por el Ejército propio o viceversa. Claramente, para cada escenario, los Ejércitos tendrán un plan de acción distinto. Por este motivo la doctrina juega un papel primordial a la hora del combate, y por esto es que se busca validar y enseñar la doctrina mediante distintos métodos, ya sea utilizando simulación computacional, modelos conceptuales, entrenamiento, simulacros u otros.

Para los escenarios propuestos que mejoran las condiciones del Ejército del Eje, deben ser abordados desde una visión teórica, dado el bajo nivel de

reabastecimientos que estos poseían. Por ejemplo para el caso de haberse integrado la 24ª División Panzer del 4º Ejército Panzer, de nada hubiera servido la incorporación de nuevas fuerzas si no se era capaz de llegar al frente de combate con un nivel adecuado de combustible, que permitiera sostener a las tropas. Para este caso, con un mismo nivel de combustible, las pérdidas del Eje hubieran sido aun mayores, quienes además de resignarse a perder la mayor parte los tanques del Afrika Korps, hubieran tenido que exponer a la 24ª División Panzer. Además bajo el supuesto de que Rommel hubiera contado con una mayor cantidad de tanques, es de suponer que al Ejército Británico, también se hubiera incorporado un mayor número de blindados, ya sea proveniente desde Estados Unidos, URSS, u otro país aliado.

Muchos modelos de simulación pueden realizarse, pero bajo un escaso apoyo de suministros, no habrá estrategia que pueda sostenerse y dar el soporte para el cumplimiento de la misión.

CAPÍTULO VI: MODELOS COMPUTACIONALES REALIZADOS CON ARENA

El presente capítulo tiene como objetivo analizar algunos modelos de logística militar, aplicables en el apoyo militar en caso de desastre, catástrofe u operaciones de paz, haciendo uso de la simulación discreta, para lo cual se utiliza el Software Arena.

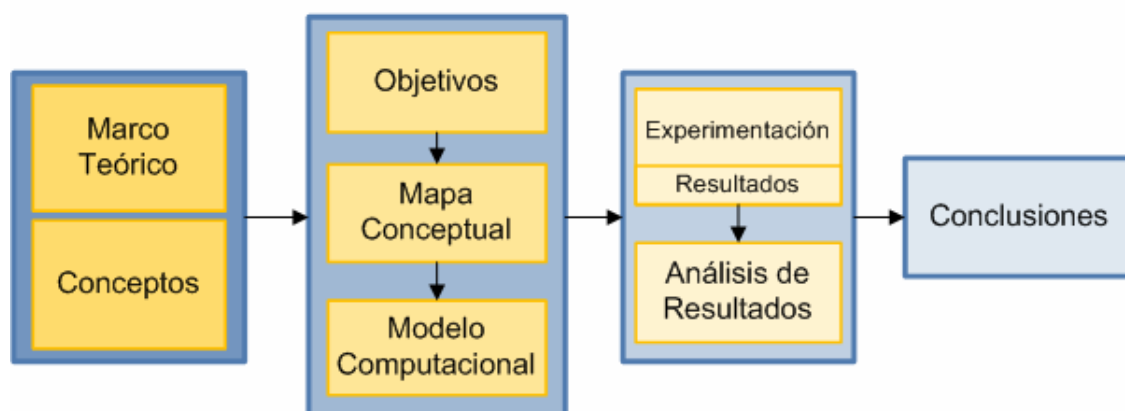
Se propusieron tres áreas distintas dentro de las ramas de la logística militar, en la primera se aborda un sistema de logística de abastecimiento de combustible para unidades militares de vehículos. En la segunda, se estudia un sistema de logística médica, para lo cual se aborda el tema de la asignación de ambulancias a un determinado número de unidades militares. Para finalizar, se propone un modelo de logística de mantención.

Metodología

La metodología y forma de abordar este capítulo, seguirá un comportamiento similar a los capítulos anteriores y estructura básica del proyecto de tesis en general. Para enfocar los modelos propuestos, se hará el análisis previo del marco teórico y se revisarán conceptos que estén presentes en dichos modelos. Luego, se procederá al planteamiento de los objetivos propuestos para cada modelo, los que serán complementados con un mapa conceptual y el diagrama realizado para Arena. Una vez analizados los indicadores que puedan dar respuesta a los objetivos, se proponen distintos escenarios, a los que de acuerdo a los resultados entregados, se hace el análisis de resultados. La recolección de las cifras, se hizo mediante la aplicación Process Analyzer, que viene integrado en el software Arena. Para finalizar, en cada modelo se exponen las conclusiones de acuerdo a los indicadores analizados y escenarios simulados.

La metodología propuesta, puede observarse de manera gráfica en la figura 6.1.

Figura 6.1 Metodología del capítulo 6



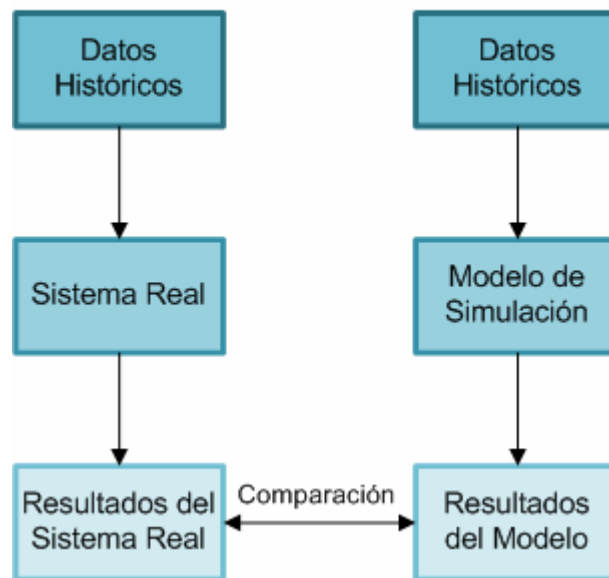
Fuente: Elaboración Propia

Validación

La desventaja que presenta en general este tipo de modelos, es la dificultad para validarlos, ya que se utilizan muchos supuestos que no necesariamente serán los que puedan ocurrir en un conflicto bélico futuro en donde existe un altísimo grado de incertidumbre.

Por lo general, la validación de modelos de simulación, se realiza mediante técnicas matemáticas y/o estadísticas, en las que se toman los indicadores más relevantes del modelo simulado y se comparan con los resultados reales del sistema, tal como lo indica la figura 6.2. Los procedimientos para validación más utilizados son los intervalos de confianza y pruebas de hipótesis.

Figura 6.2 Validación Estadística



Para el caso de los actuales Ejércitos en el mundo, no existen muchos datos o cifras históricas registradas, por lo que se hace más difícil aun el proceso de validación del modelo. Por este motivo, la gran mayoría de los datos utilizados, fueron sacados desde bibliografía de la segunda guerra mundial.

Es por esto que la opinión de expertos toma un papel fundamental para validar el modelo al menos de forma teórica.

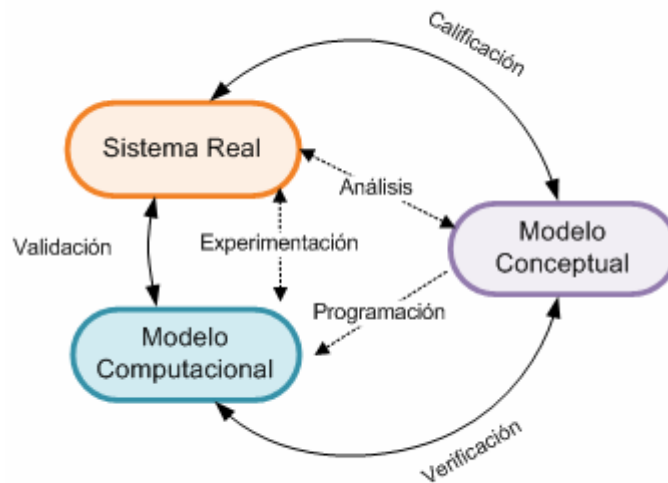
*“Como en la mayoría de los modelos militares, la validación resulta ser prácticamente imposible a un nivel que satisfaga a los críticos como a los usuarios”.*¹⁸

El Comité de Credibilidad de Modelos de la Sociedad de Técnicas de Simulación Computacional, cree que es conveniente la descomposición de la simulación en tres elementos básicos, que se muestran en la figura 6.3. El triángulo interior muestra la interrelación entre dichos elementos, y en el círculo

¹⁸ Francis Hoerber. 1981. Military Applications of Modeling: Selected Case Studies.

exterior se refiere a los procedimientos para establecer credibilidad a la simulación.

Figura 6.3 Elementos básicos de la simulación



Fuente: Basada en SCST

La interrelación existente entre los elementos es la mostrada en el triángulo interior de la figura 6.3. y se refiere a que a través del *análisis* del sistema real podrá generarse el modelo conceptual, el cual, mediante un proceso de *programación* generará un modelo computacional, el que utilizará la *simulación computacional* o *experimentación* para obtener sus resultados esperando que representen al sistema real.

Los procedimientos que permiten dar la credibilidad al modelo, son los mostrados en el círculo exterior de la figura 6.3. Mediante un proceso de *calificación*, también llamada validación conceptual, se hace la comparación de los supuestos y abstracciones del sistema real con los del modelo conceptual, el que se relaciona a su vez con el modelo computacional a través de un proceso de *verificación*, en que se busca afirmar que el modelo computacional representa fielmente al conceptual. Finalmente, los resultados entregados por el modelo computacional son comparados con los del sistema real. Este proceso se denomina de *validación*.

El modelo conceptual es la representación lógica matemática del problema a analizar. Este modelo se desarrolla en la fase de análisis y

modelación. El modelo computacional es la conversión del modelo conceptual a través de una fase de programación computacional e implementación.

El proceso de validación conceptual o calificación del modelo, se refiere a determinar si las teorías e hipótesis bajo el cual se realizó este modelo, son los correctos y representan de forma razonable al sistema o problema bajo estudio. Por lo tanto, este proceso será el de calificación en donde es comparado el sistema real, con el modelo conceptual.

El proceso de verificación del modelo es la fase de asegurar que el equipo de programación, realmente plasmó las ideas entregadas por el modelo conceptual.

La validación, se refiere a asegurar que el modelo computacional, realmente representa de manera fiel al problema en estudio, con lo cual se procede a realizar la comparación de los datos entregados por la simulación computacional, con las cifras históricas entregados por el sistema real. Por lo general se utilizan técnicas estadísticas para la validación del modelo.

Normalmente, no se considera la validación de datos dentro de la fase general de validación del modelo, lo cual es un grave error. El proceso de validación de datos estará presente en todas las fases del modelo, es decir, se puede integrar dentro del triángulo interior de la figura 6.3 Los datos, serán utilizados para la construcción del modelo conceptual, para la validación del modelo y posteriormente para el proceso de experimentación. Por lo tanto, la fase de validación de datos es muy importante dentro del proceso de validación general del modelo, dependiendo de la calidad de éstos, será la calidad de los modelos conceptual y computacional a desarrollar, los cuales tienen directa relación con los resultados finales.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, los Ejércitos, debe comenzar un proceso de recolección de datos, para así, utilizar y aprovechar de buena forma las herramientas de la simulación discreta, la que ha sido ampliamente validada y aplicada en diversas ramas del ámbito civil.

6.1 EL COMBUSIBLE Y SU IMPORTANCIA

"La condición esencial para que un ejército pueda mantener el esfuerzo de la batalla, es una adecuada reserva de armas, combustible y munición. De hecho, la batalla se libra y se decide en los cuarteles generales antes de que se inicien los tiros. Los hombres mas valientes, nada pueden hacer sin las armas, las armas nada sin munición abundante; y ni las armas ni la munición son de mucha utilidad en una guerra de movimientos si se carece de vehículos con carburante suficiente para moverlos de aquí para allá".

Erwin Rommel

De las palabras de Rommel se desprende la gran importancia que ha tenido el soporte de combustible para los ejércitos, tal como el mismo General alemán afirmaba *"el combustible es la sangre de los ejércitos"*.

La falta de combustible, lógicamente, conlleva una serie de problemas, dado que afecta tanto a la velocidad de avance, como el ritmo operativo, lo que estaría en completa discordancia con las actuales condiciones de combate, en donde lo esencial es la movilidad de las unidades militares.

Las compañías encargadas del abastecimiento y transporte de combustible (correspondiente al tipo de suministro Clase III) deben preocuparse de los siguientes factores:

- Método de Distribución (A la Unidad, o por Punto de Distribución).
- Ubicación del Punto de Distribución.
- Horario de Apertura del Punto.
- Restricciones, en caso de que existan.
- Instrucciones específicas.

6.1.1 Objetivos del Modelo

El modelo de reabastecimiento de combustible tiene como principales objetivos:

- Aplicar la complejidad del abastecimiento militar a posibles escenarios complejos en operaciones de paz y/o catástrofes.
- Analizar cuál es el stock mínimo de combustible mantenido por las unidades militares bajo un escenario dado.
- Realizar un análisis que permita ver cuáles serían las condiciones de las unidades militares bajo ciertos escenarios.
- Calcular las horas de autonomía bajo escenarios en donde no se logra alcanzar la autonomía de combustible requerida.

6.1.2 Descripción del Modelo

En el siguiente modelo, se analizó la logística de reabastecimiento de combustible para tres unidades, cada unidad está compuesto por tres escuadrones de diez vehículos cada una, más el vehículo del comandante de la unidad. Por lo tanto, cada unidad se encuentra formada por 31 vehículos. Para efectos de estudio no se considerarán los consumos realizados por otras áreas o armamento dentro de la unidad.



Los datos de entrada del modelo, se basan principalmente en datos históricos encontrados, que no necesariamente representan la realidad del los Ejércitos, sino que fueron estimados dentro de parámetros lógicos.

La concepción actual de combate, lleva a analizar las batallas bajo un escenario de operaciones continuas, es decir, bajo las actuales condiciones de

tecnología existente, la noche ya no es un impedimento para el desarrollo del conflicto bélico. La gran parte de los ejércitos, buscará la manera más rápida de salir victorioso. Para esto, será necesario que el combate dure el menor tiempo posible, lo que hace que las operaciones se mantengan durante el día y la noche.

Para efectos de consumo de combustible de unidades militares, los kilómetros recorridos no son preponderantes en el análisis de reabastecimiento de combustible. El vehículo se encontrará las 24 horas del día con su motor encendido, haciendo que el consumo de combustible sea a su vez continuo. El análisis visto, no quiere decir que los vehículos se mantengan combatiendo las 24 horas del día, pero si, deben estar con sus sistemas activados para realizar el ataque o para repeler al ejército enemigo en el momento menos esperado.

Lo anteriormente dicho, lleva a concluir que el consumo de combustible para efectos militares, deben estudiarse con respecto las horas en operación, lo que hace que la unidad de medida adecuada sea la cantidad de litros que se consume por hora (lt / hr).

En los distintos Ejércitos y de acuerdo a las necesidades de cada país, se encuentra estimado cuanto sería la autonomía aproximada que tendría un vehículo de combate en condiciones de enfrentamiento. Para realizar esta estimación, se hacen proyecciones en base a que porcentaje del día se encuentra detenido el vehículo, porcentaje del día en que se traslada por carretera y porcentaje del día en que se traslada por campo traviesa. Para efectos de esta investigación se supuso que la autonomía de un vehículo, es de 20 horas, tomando como referencia que el consumo aproximado, se encuentra entre 90 y 120 litros por hora.

De acuerdo a las políticas de abastecimiento de combustible de los Ejércitos de la OTAN, en caso de no ser suficiente la cantidad de combustible para llenar el estanque de cada uno de los vehículos. La asignación de carburante, se hará bajo la condición de dejarlos a todos en un mismo nivel. Esto se explica dado que no se puede dejar unos vehículos llenos de

combustible y otros vacíos, ya que esta acción disminuiría la capacidad de movilidad, y además, su velocidad de marcha. Para lo dicho anteriormente el cálculo de la cantidad de combustible presente en cada vehículo luego del proceso de reabastecimiento de combustible, en caso de no poseer la capacidad para dejarlos con el estanque lleno, sería el siguiente:

$$\text{Nivel de combustible} = \frac{\text{combustible total disponible} + \text{abastecimiento combustible}}{\text{número de vehículos de la unidad}}$$

En caso de tener una capacidad de abastecimiento de combustible, tal que se llenen todos los estanques, los camiones abastecedores simplemente regresan a las bodegas de abastecimiento con el combustible sobrante o en caso de hostigamiento enemigo es dejado en terreno. Para este estudio, la capacidad de los vehículos es de 1100 litros, por lo cual obviamente, luego del proceso de reabastecimiento, esta capacidad será la máxima posible para cada vehículo.

El tiempo abarcado para el modelo de simulación será de 10 días, lo que concuerda con las expectativas de duración de enfrentamiento, y es aplicable prácticamente en todos los ámbitos castrenses. Se puede asumir que, luego de aproximadamente 5 días de combate, comienzan a actuar los organismos internacionales (ONU), dando así término al conflicto bélico.

6.1.3 Resumen de supuestos y limitaciones del modelo

- Al comienzo del combate, los vehículos se encuentran con su capacidad de combustible al máximo.
- El nivel inicial de vehículos, se mantiene hasta el término del conflicto.
- Las operaciones de reabastecimiento de combustible serán realizadas de manera constante cada 12 horas.
- La política de reabastecimiento, tal como ya se mencionó, será dejar los estanques de los vehículos en un mismo nivel de combustible.
- El conflicto bélico tendrá una duración de 10 días.

Los datos a analizar, son tomados en la base del peor escenario, basados en la premisa de “si se puede hacer más, se podrá hacer menos”, lo cual llevándolo a temas militares, indica que si se es capaz mantener un buen funcionamiento logístico dadas las peores condiciones de combate, claramente se podrá mantener un buen funcionamiento bajo mejores condiciones.

De los párrafos anteriores, se crea la tabla 6.1, que resume los datos de entrada mencionados anteriormente.

Tabla 6.1 Resumen de datos de entrada modelo de abastecimiento

	<i>Estadísticas</i>
<i>Cantidad de vehículos</i>	93
<i>Capacidad Estanque</i>	1.100 litros
<i>Autonomía (horas)</i>	Normal(20, 4)
<i>Camiones Abastecedores</i>	20
<i>Capacidad Camiones</i>	5.000 lt
<i>Doctrina Abastecimiento</i>	Todos los estanques al mismo nivel
<i>Frecuencia Abastecimiento</i>	Cada 12 horas

Fuente: Elaboración Propia

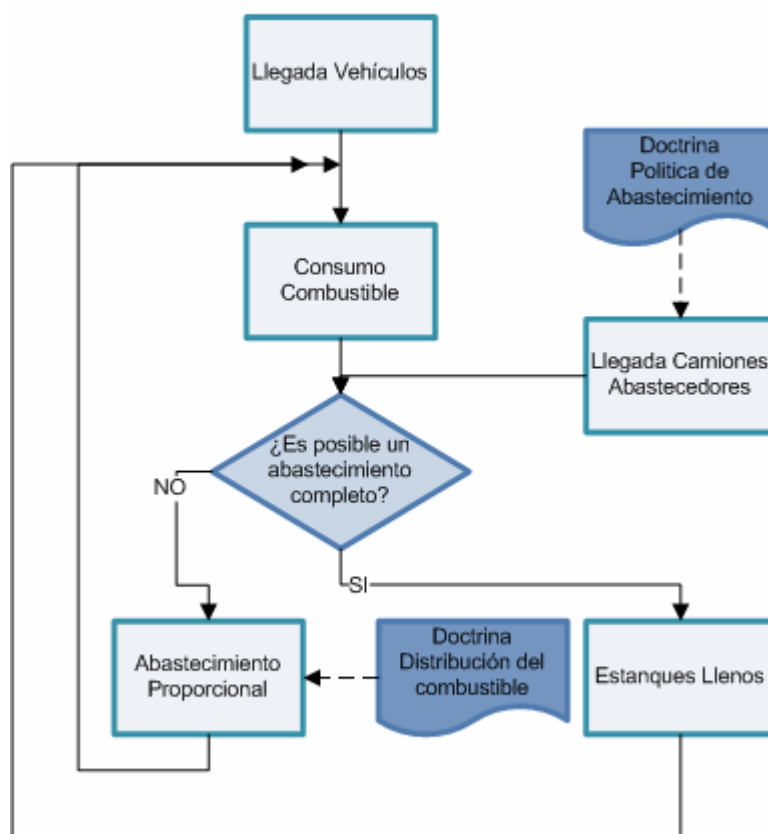
Las posibles interrogantes que podría responder un modelo con éste, serían ¿que pasaría si se asignan más camiones abastecedores?, ¿Cuántos vehículos se pueden abastecer de forma óptima con la actual cantidad de camiones?, ¿Qué pasaría si interceptan la mitad de los camiones abastecedores? ¿Qué pasaría si aumenta la capacidad de estos camiones?, etc

6.1.4 Modelo Conceptual y Computacional

De acuerdo a la descripción del modelo analizado, se propuso un esquema o modelo conceptual, que contiene las ideas principales, que permiten hacer la representación del proceso de reabastecimiento de combustible.

El modelo conceptual construido para el proceso de abastecimiento de combustible, se muestra en la figura 6.4

Figura 6.4 Mapa conceptual del modelo de abastecimiento de combustible



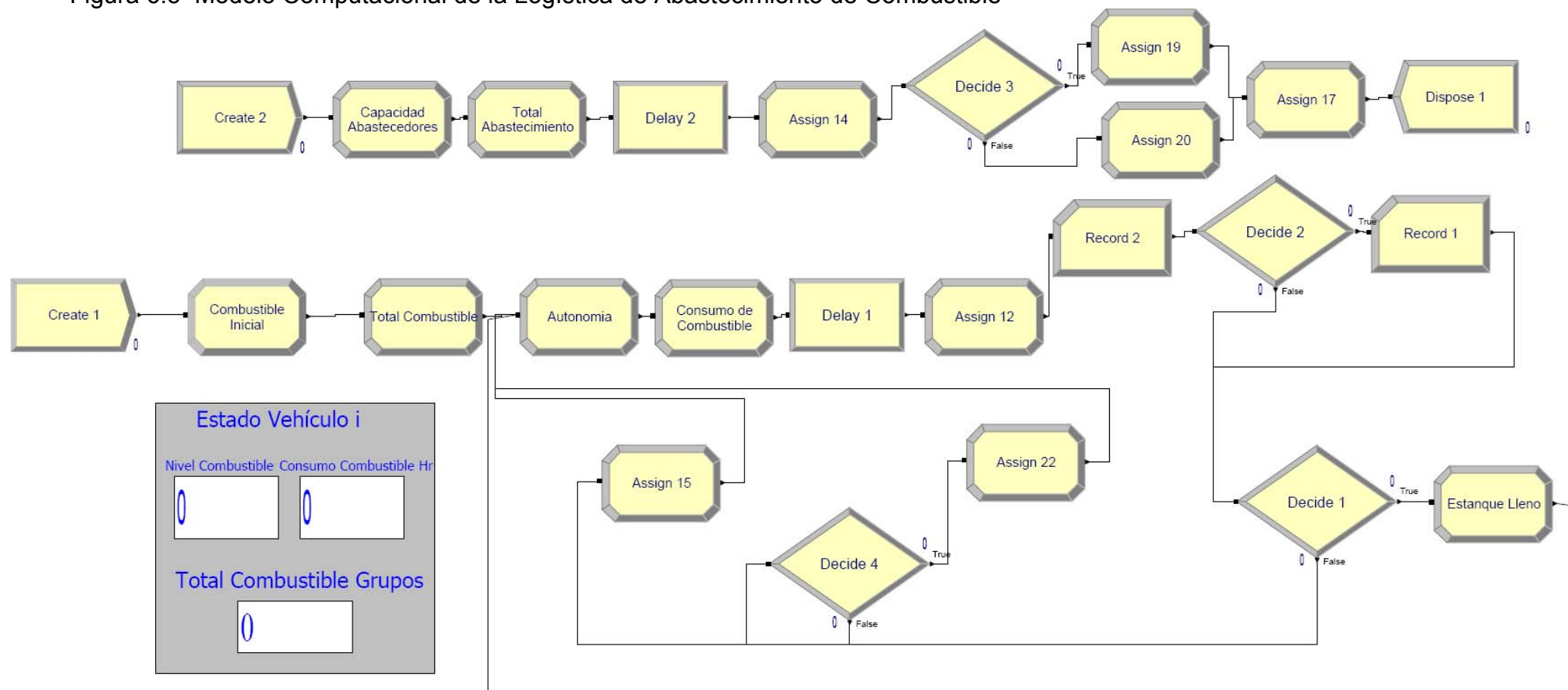
Fuente: Elaboración Propia

Tal como se aprecia del diagrama, el modelo consiste en la llegada de los grupos de vehículos al campo de batalla, en el cual a medida que van pasando las horas, hay un consumo de combustible. En un momento

determinado, guiado por la actual doctrina y políticas de abastecimiento de combustible, se asigna una cierta cantidad de camiones abastecedores, con una capacidad determinada para realizar el repostaje de los vehículos. En caso de ser suficiente el combustible transportado por los camiones, los estanques de los vehículos son llenados al máximo y vuelven al campo de batalla. En caso de no ser suficiente el combustible, la repartición de combustible para los vehículos, se hace de acuerdo a las políticas de reabastecimiento de combustible. Para este modelo, se considera que la política de reabastecimiento, es dejar a todos los vehículos en un mismo nivel de combustible.

De acuerdo al mapa conceptual creado, el modelo computacional propuesto para el software Arena, es el que se muestra en la figura 6.5

Figura 6.5 Modelo Computacional de la Logística de Abastecimiento de Combustible


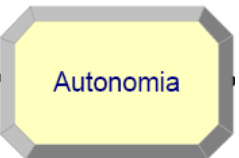
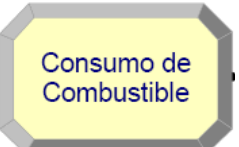
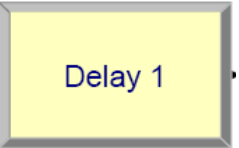
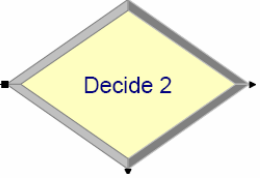


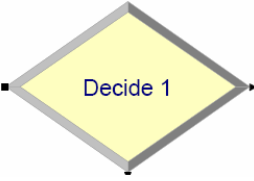
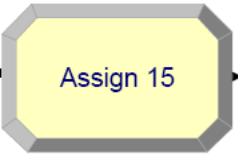

Fuente: Elaboración Propia

6.1.5 Descripción de Módulos

A continuación, se verá en la tabla 6.2, la descripción de los módulos más representativos para el modelo de reabastecimiento de combustible propuesto para tres unidades de vehículos. Además, en la Tabla 6.3 se muestran y describen las variables usadas.

Tabla 6.2 Descripción de módulos del modelo de abastecimiento de combustible

Módulo	Descripción
	<p>El módulo <i>Create 1</i> contiene la información de llegada de las unidades de vehículos, por lo cual se realizará sólo una llegada con la cantidad de vehículos asignadas en la variable "<i>Inicio.Vehiculo</i>".</p>
	<p>Asigna la autonomía que posee cada vehículo. El atributo <i>Autonomía</i>, asume valores siguiendo una distribución normal con una media de 20 horas y una desviación estándar de 4 horas.</p>
	<p>Modifica el atributo de <i>Capacidad.Comb</i>, restándole a éste, el atributo generado <i>Consumo.Comb</i>.</p>
	<p>Cada una hora se irán chequeando los indicadores de combustible de cada vehículo, para lo cual, se introduce un tiempo de retraso de una hora (Se asignó una hora para mejor manejo en caso de modificaciones de tiempo entre abastecimientos).</p>
	<p>Revisa la condición $Capacidad.Comb < 0$, a modo de luego en el módulo <i>Record 1</i>, llevar la cuenta de cuántos vehículos se quedan sin combustible.</p>

	<p>Este módulo, diferencia cuando hay o no combustible de sobra para el reabastecimiento. Separa de acuerdo la siguiente expresión condicionante: $((\text{Total.Abastecimiento} + \text{Total.Combustible}) / \text{Inicio.Vehiculo}) \geq 1100$.</p>
	<p>En caso de no tener capacidad suficiente para llenar los estanques de los blindados, la modificación del atributo <i>Capacidad.Comb</i> debe ser la siguiente: $(\text{Total.Combustible} + \text{Total.Abastecimiento}) / \text{Inicio.Vehiculo}$</p>
	<p>En caso de tener capacidad de sobra, el atributo <i>Capacidad.Comb</i> será llevado a su nivel máximo, para el modelo tratado será de 1.100 litros.</p>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6.3 Variables utilizadas para modelo de abastecimiento

Variable	Descripción
Inicio.Vehiculo	Indica el número de vehículos que entrarán en combate
Cant.Camiones	Indica la cantidad de camiones dispuestos para la realización de reabastecimiento de combustible
Capacidad.Abastecedores	Indica la capacidad en litros capaz de ser transportados por cada camión
Total.Abastecimiento	Indica el total de combustible que pueden ser abastecidos por los camiones cada vez
Total.Combustible	Indica la cantidad de combustible presente en un cierto momento para la totalidad de los vehículos

Fuente: Elaboración Propia

6.1.6 Análisis de Resultados

Una de las preguntas a las que se busca dar respuesta mediante este modelo es ¿cuál es el nivel de combustible de los vehículos, al momento en que llegan los camiones abastecedores para comenzar la tarea de reabastecimiento de combustible?.

A continuación, en la tabla 6.4 se muestra el mínimo nivel de combustible de las tres unidades de vehículos, claramente estos valores se daban justo en el momento antes de recibir el combustible transportado por los camiones cisterna.

Tabla 6.4 Nivel de Combustible

<i>Réplica</i>	<i>litros</i>
1	37.529
2	37.245
3	37.243
4	37.109
5	36.960

Fuente: Elaboración Propia

Para las condiciones iniciales dadas, se pudo ver que nunca existieron problemas de combustible y siempre se mantuvo un nivel final de combustible bastante alto, siendo el promedio 37.217 litros para las tres unidades de vehículos, es decir, la cantidad de camiones abastecedores fue suficiente para abastecer a las unidades de vehículos suponiendo reabastecimiento cada 12 horas. Con dichas características, los vehículos son llenados completamente cada vez que se realiza el repostaje.

El nivel de stock mantenido por los vehículos antes de llegar los camiones abastecedores, para un nivel de confianza del 95%, se encuentra entre 36.956 y 37.478 litros para las tres unidades, lo que equivale, aproximadamente, a decir que cada vehículo tenía 400 litros al momento del repostaje.

Además, puede decirse con un 95 % de confianza, que la desviación estándar de la cantidad de combustible, se encuentra entre 126 y 604 litros.

6.1.7 Propuesta de Escenarios y Experimentación

Construido ya el modelo que caracteriza las condiciones actuales de la logística de abastecimiento de combustible, es posible proponer distintos escenarios y ver cómo varían algunos indicadores de importancia.

Para este caso, se proponen dos escenarios alternativos, por lo que el modelo se va a analizar bajo el supuesto de:

- Pérdida del 50 % de los camiones abastecedores, ya sea por intercepción de rutas u otros factores.
- Aumento en la capacidad de los camiones abastecedores a 6.000 litros, bajo el supuesto del escenario anterior.

Los indicadores que se consideraron de importancia, y por tal motivo, se basarán los siguientes análisis son: horas de autonomía de las unidades desde el inicio del combate y horas de autonomía de los vehículos entre los reabastecimientos.

La tabla 6.5, muestra el nivel total de combustible de las tres unidades de vehículos con el pasar del tiempo, bajo los dos escenarios propuestos.

Tabla 6.5 Combustible total según escenario

Horas	Escenario 2	Escenario 3
12	43.013	43.013
24	28.513	37.800
36	14.325	33.612
48	346	29.168
60	0	24.886
72	0	20.942
84	0	16.657
96	0	12.635
108	0	8.533
120	0	4.324
132	0	777
140	0	0

Fuente: Elaboración Propia

¿Qué pasaría si el bando enemigo intercepta el 50% de los camiones abastecedores, perdiéndose así la carga que hay en ellos?

Al analizar el comportamiento del modelo bajo este escenario, se aprecia que los camiones restantes, no son suficientes para el abastecimiento de los 93 vehículos. Aproximadamente luego de 47 horas de combate, hay algunos vehículos que comienzan a quedarse sin combustible, lo cual claramente acarrearía problemas, siendo un flanco muy fácil para el enemigo.

Para el escenario planteado, las unidades comenzarían a recibir 50.000 litros de combustible cada 12 horas de acción, luego del 2º día, la logística de abastecimiento presenta serios problemas, siendo capaces las unidades de vehículos, de combatir sin problemas de combustible por 10 horas luego de abastecidos, lo que indica que las 2 horas restantes el nivel de combustible, y por ende la movilidad y capacidad de combate de los vehículos serán prácticamente nulas.

Para el mismo escenario, ¿Qué pasaría si la capacidad de los camiones fuera de 6.000 litros?

Bajo este escenario, las unidades de vehículos, pudieron combatir sin problemas de abastecimiento por 120 horas, tiempo luego del cual algunos de éstos comienzan a quedarse sin combustible. A partir de este momento, la cantidad de combustible que se reabastece durará aproximadamente 11 horas, lo cual claramente sigue siendo insuficiente, ya que el reabastecimiento se realiza cada 12 horas.

6.1.8 Importancia del Abastecimiento de Combustible

Por dar un claro ejemplo de cómo ha aumentado la importancia de los sistemas de soporte de reabastecimiento en la actualidad, se pueden ver las cifras en que, en 1944 el 3er Ejército de Estados Unidos, utilizó 400.000 galones de gasolina (1.540.000 litros) para 400.000 soldados, mientras que hoy en día, en Irak, el mismo número de soldados utiliza 12 galones cada uno (45,4 litros). Tal como puede apreciarse, el consumo de combustible ha aumentado de manera difícilmente sostenible en caso de no contar con un buen soporte logístico.

Para reafirmar la idea anterior, en la década pasada del total de tonelaje de suministros transportados un 30% era combustible, un 20% comida y agua y un 50% municiones. En la actualidad el transporte de combustible representa un 70% del total de suministros¹⁹.

6.1.9 Logística de Abastecimiento Futura

La importancia que adquirió el soporte de combustible para el desenlace de la batalla, hace que los Ejércitos deban prepararse y enfocar sus esfuerzos en la creación de nuevos procedimientos para realizar la tarea del repostaje.

El objetivo que deben perseguir los futuros sistemas de abastecimiento de combustible, deben basarse principalmente en ser capaces del traslado del combustible en forma segura, rápida, de manera flexible y mediante todo tipo de terreno. Por lo dicho anteriormente, se hace visible la necesidad de buscar un sistema de estanques que pueda ser adaptado para ser trasladados por tierra, mar y aire sin la necesidad de grandes realizar cambios en la forma o estructura del estanque. Además, al buscar la flexibilidad, rapidez, adaptabilidad y seguridad, el transporte que mejor se adapta a estos factores es el aéreo. A continuación se presenta un marco teórico que muestra el estado de las investigaciones y nuevos sistemas de transporte de

¹⁹ Robert Bryce. 2005. Gas Pains. The Atlantic May 2005

combustibles, basados principalmente en la experiencia de Estados Unidos en Irak.

6.1.9.1 Estanques Plegables

En la actualidad, existen varias formas y procedimientos para realizar el transporte de combustible, ya sea por vía aérea, terrestre o marítima. Dentro de los elementos requeridos por los sistemas de transporte de suministros, se encuentra la necesidad de reducción de tiempos de carga y descarga, por este motivo se busca una estandarización y adaptabilidad de los estanques de combustible. En este sentido, los estanques plegables han ganado terreno con respecto a los metálicos, y son adaptables a todo tipo de transporte.

Los estanques plegables, son utilizados por lo general a modo de almacén de combustible, el tamaño de estos estanques varía desde los 380 hasta los 795.000 litros. Una de las ventajas significativas que presentan estos estanques, es que son fácilmente camuflables y movibles, lo que da una flexibilidad enorme al movimiento de las unidades militares. La descarga de dichos estanques puede hacerse mediante motores de extracción o simplemente utilizando el concepto de gravedad. En la tabla 6.6, se muestra una serie de estanques plegables.

Tabla 6.6 Estanques Plegables



Fuente: www.pronal.com y www.water-storage-tank.com

El Ejército de Estados Unidos está utilizando este tipo de estanques desde principios de la década de los 40, época en la que las capacidades de éstos, variaban desde 3.500 hasta 11.500 litros. Tanto ha sido el éxito de los

estanques plegables, que el Ejército de Estados Unidos prácticamente desecho la totalidad de los antiguos estanques de acero.

El avance tecnológico, ha permitido que los materiales con los cuales son fabricados estos estanques, sean cada vez de mayor resistencia y más livianos, lo cual permite su utilización en todo tipo de terreno, además de su capacidad de ser puesta en servicio de manera muy rápida.

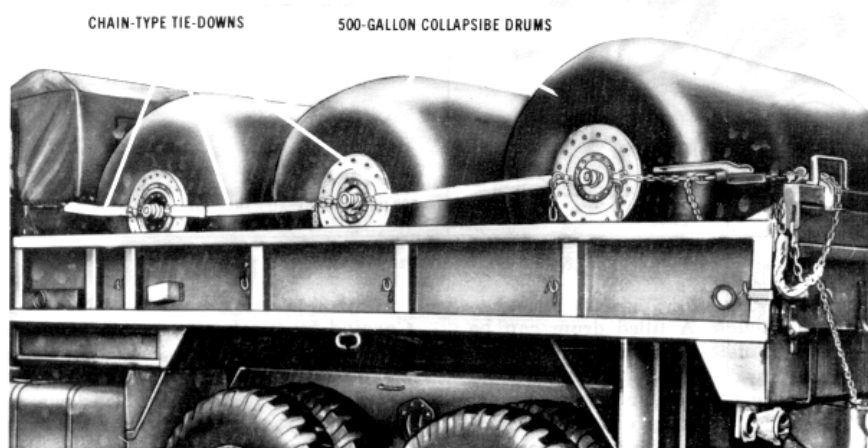
Transporte terrestre de estanques plegables

El transporte de los estanques plegables a través de medios terrestres puede realizarse a través del prototipo de estanque visto o mediante tambores plegables, en el primer caso, es transportado principalmente en camiones los que son adecuados para transportar capacidades de 3.000 hasta 12.000 litros.



La otra opción mencionada, sobre tambores plegables generalmente de 1900 litros, puede ser transportado mediante camiones más pequeños o por sistema de arrastre en un vehículo menor. En las figuras 6.6 y 6.7 pueden apreciarse las opciones de abastecimiento mediante tambores plegables.

Figura 6.6 Transporte de tambores plegables mediante camiones



Fuente: Manual de Campo Ejército de EEUU²⁰

Figura 6.7 Transporte de tambores plegables mediante arrastre



Fuente: Manual de Campo Ejército de EEUU

Transporte aéreo de estanques plegables

Este caso es utilizado principalmente cuando alguna unidad militar requiere abastecimiento de combustible de manera inmediata. La gran ventaja que presenta el transporte aéreo es que existen menores posibilidades de ser interceptado por el enemigo y no necesita de una ruta especial a seguir para llegar a destino, para este motivo pueden transportarse los estanques en forma de tambor o en su forma original. En la figura 6.8 se puede ver un helicóptero transportando un tambor de 1900 litros

²⁰ FM 10-67-1 Concepts and Equipment of Petroleum Operations

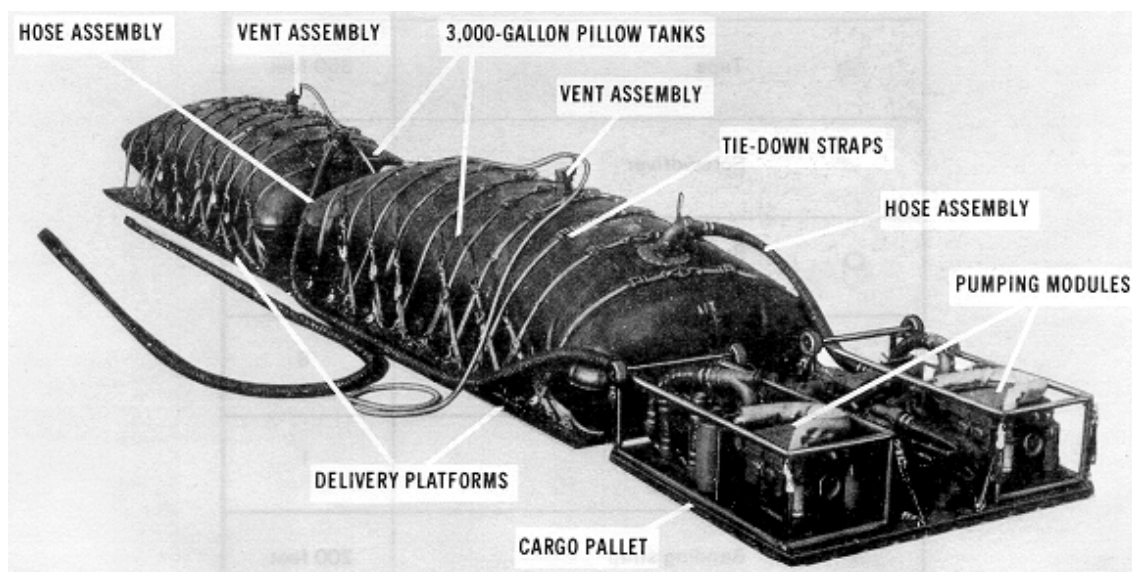
Figura 6.8 Helicóptero transportando un tambor plegable



Fuente: Manual de Campo Ejército de EEUU

No sólo es posible realizar el transporte aéreo del combustible a través de helicópteros, sino que además esta tarea puede hacerse mediante el uso de aviones, en los cuales son ensamblados los estanques plegables mediante una plataforma metálica para facilitar el anclaje y que la carga se transporte de manera más segura. Este tipo de transporte es conocido como ABFDS, sigla proveniente del inglés Aerial Bulk Fuel Delivery System. El sistema de plataformas originalmente puede ser anclada en los aviones C-130, C-141 y C-5A. El sistema ABFDS, es cargado con estanques (o cojines) plegables de 3.000 galones (11.350 litros). La plataforma de un C-130 o Hércules, , tiene la capacidad para transportar dos estanques de 3.000 galones, lo que equivale aproximadamente al abastecimiento diario que requieren 17 tanques. El sistema ABFDS es mostrado a continuación en la figura 6.9.

Figura 6.9 Plataforma de transporte de estanques plegables para un avión C-130



Fuente: Manual de Campo Ejército de EEUU

Este sistema de reabastecimiento de combustible, puede ser utilizado para los movimientos iniciales de cargas de combustible hacia el teatro de operaciones. El ABFDS es muy útil en situaciones en donde no es posible el reabastecimiento de combustible a través de camiones cisterna u otros camiones o carros abastecedores, ya sea por la intercepción de rutas o por la dificultad de acceso. Además de la ventaja que posee de mover cargas de combustible por largas distancias en cortos tiempos.

6.1.9.2 Abastecimiento Aéreo de Combustible

El abastecimiento aéreo de combustible ha tenido un papel protagónico dentro de los conflictos bélicos acontecidos en las últimas décadas, dado que cada día se hace más complicado dar el soporte y seguridad necesaria para mantener el buen funcionamiento de las líneas de abastecimiento terrestres.

Además de ser un medio más seguro de transporte, presenta la característica de ser capaz de transportar los suministros en cortos tiempos y con la posibilidad de acceder a todo tipo de terreno.

Ya desde la década del 20, las grandes potencias mundiales, comienzan a ver las ventajas que podría conllevar un avión que realice funciones de carguero y tanquero. Uno de los primeros aviones en ser transformado para realizar labores de tanquero es el KC-130, el que nace de la modificación del Hércules C-130.

Los aviones tanqueros poseen una gran versatilidad en cuanto a su capacidad para abastecer combustible, estas pueden abastecer tanto a aeronaves en pleno vuelo como a otras unidades militares en superficie terrestre. La capacidad de estanque promedio de los actuales aviones cisterna es de aproximadamente 65 mil litros.

En 1949, se realiza el primer reabastecimiento de combustible aéreo, el bombardero estadounidense B-50, se mantuvo en vuelo durante 94 horas, haciendo el repostaje en tres ocasiones

El repostaje aéreo, permitirá al avión receptor mantenerse en el aire por mayor tiempo, logrando distancias inimaginables. Lo que ayudará a que los cazas o bombarderos puedan apoderarse de las vías aéreas y cumplan funciones de escolta a los transportes terrestres. El proceso de reabastecimiento de combustible, también ayudará a que los aviones puedan disminuir su carga de combustible, asignando más carga a su armamento y a poder extender su radio de acción, lo que resulta determinante para toda operación aérea.

En la actualidad se utilizan dos sistemas para el abastecimiento aéreo. El de pértiga, utilizado principalmente por la Fuerza Aérea de Estados Unidos, y el de cesta y sonda, que es el más utilizado mundialmente.

El sistema de pértiga, consiste en un dispositivo tubular hueco, que sobresale por la parte inferior del avión. La gran ventaja que presenta el repostaje por pértiga es su mayor capacidad de transferencia en menor tiempo. La desventaja con respecto al sistema de cesta, es que el tanquero puede llevar sólo una pértiga, con lo cual se puede abastecer a una aeronave a la vez,

además al ser rígido, requiere de gran coordinación entre el avión cisterna y el receptor, por lo que la transferencia de combustible resulta compleja. La figura 6.10 muestra el proceso de reabastecimiento mediante pértiga

Figura 6.10 Repostaje aéreo mediante sistema de pértiga



Fuente: www.dreamlandresort.com

El sistema de cesta y sonda, consiste en un estanque y una manguera, en el extremo de la manguera se encuentra una cesta, que posee un pequeño paracaídas para dar mayor estabilidad a la manguera. Dentro de las ventajas que presenta este sistema, esta la posibilidad de abastecer tanto a cazas y bombarderos, como a helicópteros. El tanquero HC-130, fue especialmente diseñado para abastecer helicópteros. Otra ventaja significativa, es que el avión cisterna, puede llevar hasta tres sondas, lo que permite el reabastecimiento de tres aeronaves. El principal problema que presenta el sistema de sondas, es cuando se quiere realizar la transferencia de combustible en condiciones atmosféricas poco aptas, fuertes vientos hacen casi imposible la coordinación entre los aviones, dada la poca estabilidad de la manguera. El proceso de reabastecimiento mediante cesta y sonda se muestra en la figura 6.11.

Figura 6.11 Repostaje aéreo mediante sistema de cesta y sonda



Fuente: Airport Journal

Los principales aviones cisternas utilizados en la actualidad, son el KC-135 Stratotanker, KC-10 Extended y KC-130 Hércules, operados principalmente por Estados Unidos y el Airbus A130, utilizado por la RAF (Royal Air Force) y la Luftwaffe (Fuerza aérea alemana).

Actualmente, el avión cisterna con mayor avance tecnológico es el KC-135, de los cuales la gran mayoría está en manos de la USAF (United States Air Force), también es utilizado por Marruecos, Francia y Turquía. Además, la USAF se encuentra en pleno desarrollo de un nuevo avión cisterna, que se basará en el diseño de un nuevo avión tanquero, el KC-767, que utilizará como base al Boeing 767.

6.1.10 Conclusiones

Este tipo de simulación es ampliamente utilizada en sistemas de abastecimiento civil. Con la realización del modelo queda demostrado que esta herramienta, puede ser de gran uso en la logística militar de abastecimiento. Para el caso visto sólo se estudio el comportamiento de indicadores de desempeño para el reabastecimiento de combustible, modelos similares podrían crearse para el abastecimiento de agua, alimento, vestimenta, carguío de municiones y otros.

La lógica indica que esta herramienta además puede ser de gran utilidad en el vital rol que cumplen los Ejércitos al prestar ayuda ante desastres o catástrofes, ya sean por causa natural o provocadas por el hombre que afecten a la sociedad. Además la simulación puede dar soporte para el reabastecimiento en operaciones militares internacionales de mantención de paz y seguridad.

Mediante la simulación, es posible la modificación de las actuales políticas de reabastecimiento en las distintas clases de suministros, e ir en la búsqueda de planes de acción que mejoren la forma en que actualmente se realizan los procedimientos de reabastecimiento.

La creación de un modelo computacional, permite observar en qué etapas de la cadena de abastecimiento se encuentra el cuello de botella o proceso más ineficiente, lo cual permite la adopción de medidas adecuadas para gestionar de mejor forma la actividad de reabastecimiento de suministros.

La logística militar se encuentra permanentemente en la búsqueda de nuevas técnicas o herramientas que permitan apoyar la toma de decisiones y que estas desencadenen finalmente en el uso eficaz y eficiente de los recursos disponibles, en este sentido, la simulación es muy flexible y entrega resultados relevantes para un sinfín de escenarios propuestos, ya sea para en aumento de vehículos en cada unidad, aumento en las unidades abastecedoras, aumento o

disminución de distancia entre las bases centrales de abastecimiento, menor cantidad de rutas, variación en el consumo de las tropas, etc.

Las nuevas tendencias de abastecimiento, se encuentran enfocadas principalmente a los transportes aéreos, dada su flexibilidad y su capacidad para dar una rápida respuesta ante situaciones inesperadas. El único inconveniente actual que presenta el abastecimiento aéreo, es que se consumen altos recursos económicos, es por esto que en diversos países actualmente se estudian nuevas técnicas que permitan realizar esta tarea de forma más económica.

En cuanto al reabastecimiento de combustible, los Ejércitos de mayor experiencia, están prefiriendo la utilización de estanques flexibles, los que permiten la realización de carga, descarga, mantención, traslado y abastecimiento, de forma más eficiente y eficaz.

En base a estas nuevas tendencias, sería de gran ayuda la realización de un estudio de simulación que permita medir el rendimiento y las ventajas cuantitativas y cualitativas que representa la puesta en marcha de estas nuevas formas de abastecimiento.

6.2 LOGÍSTICA MÉDICA MILITAR

Un eficaz y confiable sistema de apoyo médico militar, debe contribuir a preservar el tamaño de las fuerzas combatientes, pero también, debe cumplir con las expectativas del paciente y derecho que éste posee a recibir una atención de alta calidad. Debe además, preocuparse por la prevención de las enfermedades, el rápido tratamiento de los heridos, la evacuación médica, la recuperación de paciente y el regreso de éste a su lugar de destino. Los servicios médicos hacen una importante contribución a la sostenibilidad de las fuerzas de combate. El concepto de salud no sólo debe ser abordado desde el punto de vista de las heridas o lesiones, sino que también, deben ser tratados los factores psicológicos que enfrentan día a día al soldado.²¹

Para entender de mejor forma el modelo que se propuso en cuanto a un sistema de logística médica, es necesario conocer algunos conceptos que se verán a continuación.

6.2.1 Triage

El concepto de triage, proviene del francés “trier”, que significa escoger (seleccionar). El triage, consiste en la clasificación de pacientes en base a sus necesidades terapéuticas, es decir, se agrupan a los heridos dependiendo del nivel de gravedad de éstos. El objetivo fundamental es salvar el mayor número de vidas posibles. Luego, este proceso es complementado con la evacuación de los heridos y finalmente con la atención médica definitiva.

En el siglo XVIII, Dominique Jean Larrea, cirujano jefe de las tropas de Napoleón, fue el primero que utilizó un plan de selección de heridos. Los principios que utilizó fueron: el rescate de los heridos, aplicación inmediata de un tratamiento adecuado, transporte oportuno, selección basada en gravedad de heridas y retiro de los cuerpos de los fallecidos en el campo de batalla.

²¹ Ideas obtenidas desde el Manual de Logística de la OTAN

Enfocando el triage al ámbito militar, dada la gran cantidad de heridos que se producen en combate o ante algún desastre de otro tipo, es necesario contar con un sistema de triage flexible y que pueda actuar de la forma más rápida posible, y además, bajo la doctrina actual, debe realizar el proceso de evacuación de soldados heridos del campo de batalla o del lugar en condiciones de desastre, de manera eficaz y eficiente.

Antiguamente, los soldados lesionados, permanecían en dicha condición hasta que terminará la batalla o se iniciaran lapsus de estancamiento, en el cual, los encargados de la recuperación de soldados heridos, debían ingresar al campo de batalla para realizar su misión.

Las preguntas básicas que debe plantearse el encargado de realizar el triage es ¿Cuán enfermo se encuentra el herido?, ¿Cuántas horas podría soportar el paciente sin recibir atención médica definitiva?, con lo que debe ser capaz de ajustar el tiempo y tipo de respuesta, a los recursos disponibles.

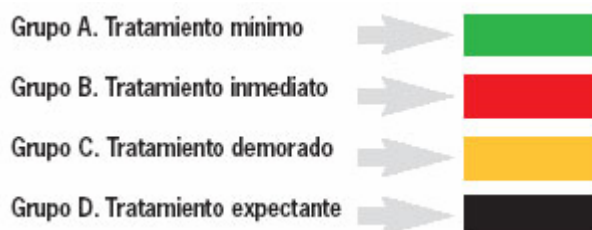
Lo mencionado anteriormente, lleva a concluir que los objetivos del triage son:

- Rápida evaluación de las lesiones y establecer tratamientos que permitan la conservación de la vida del paciente, con este procedimiento, se ayuda a la eficiente gestión de los centros médicos que darán el tratamiento definitivo al herido.
- Realizar una adecuada clasificación de los pacientes, de acuerdo a su necesidad de atención médica.
- Optimización de los recursos tecnológicos, humanos, físicos y de suministros.

6.2.1.1 Clasificación del Triage

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), los heridos pueden clasificarse en cuatro grupos según su prioridad, para lo cual se utiliza un sistema de tarjetas (las que son colgadas generalmente en el cuello del paciente). Luego de que el soldado herido es categorizado en uno de los cuatro grupos y debe ser “etiquetado” con uno de los colores expuestos a continuación.

- **Rojo:** Heridos que dada su gravedad y riesgo vital, necesitan asistencia médica de forma inmediata.
- **Amarillo:** Aquellos heridos que han sufrido alguna lesión grave pero que están estables y no presentan riesgo vital. La atención de éstos, puede diferirse hasta en 6 horas, sin que entre en riesgo vital.
- **Verde:** Son aquellos heridos que no presentan heridas de gravedad, por lo tanto su atención médica puede esperar hasta que existan recursos disponibles para realizar su tratamiento o traslado en caso de ser necesario.
- **Negro:** Son los heridos que debido a su alto nivel de gravedad, no tienen mayores esperanzas de vida, con lo cual, dentro del triage convencional, están en tercera posición de atención luego de los grupos rojo y amarillo. También, dentro de distintas bibliografías se agrupan en esta categoría los ya fallecidos.



Con motivos de ejemplificar los distintos tipos de etiquetas que recibirán los soldados heridos, se muestran algunas de las lesiones que caracterizan cada uno de los grupos visto.

- **Rojo:** Traumatismo penetrante de tronco, fracturas expuestas de huesos mayores, hemorragias extremas, obstrucción de vías aéreas, quemaduras graves.
- **Amarillo:** Fracturas de miembros, traumatismo de pelvis, columna y maxilofaciales.
- **Verde:** Quemaduras pequeñas, fracturas de miembros superiores, lesiones menores.
- **Negro:** Hundimientos cerebrales, quemaduras extensas o profundas de cráneo, exposición radioactiva, traumatismo medular con pérdida de movilidad, víctimas de más de 60 años con lesiones severas (la mortalidad en pacientes ancianos es 5 veces mayor que en jóvenes).²²

De acuerdo a cifras históricas encontradas en las estadísticas de distintas batallas ocurridas, aproximadamente un 20% de los heridos pertenece al grupo rojo, un 20% al grupo amarillo, 40% al grupo verde y el resto al negro.²³

El concepto de triage, forma parte del llamado grupo de las “3 T”, en el que se complementa con las funciones de “tratamiento” y “transporte”. De nada sirve cada una de estas por separado, por lo cual deberá existir gran coordinación entre ellas, y así, lograr que la cadena de procesos de la atención médica se realice de forma eficaz y eficiente.



²² Triage of War-Injure Troops in the Iran – Iraq War. Journal of Research in Medical Sciences. Ene-Feb 2008. 13(1):8 – 11.

²³ Field Manual US Army. FM 4-02.6. THE MEDICAL COMPANY

6.2.2 Mortalidad de Soldados Heridos

El índice de mortalidad de soldados heridos en combate, indica cuál es el porcentaje de los soldados heridos que fallecieron esperando por atención médica o luego de haber sido atendido. Este indicador, tendrá directa relación con la cantidad y nivel de recursos que estén disponibles, y además, de la planificación de logística médica.

Como ya se vio en la sección anterior, el triage es el primer paso para reducir el índice de mortalidad de pacientes, las siguientes etapas son recibir un tratamiento de estabilización oportuno, un traslado eficiente y contar con los recursos necesarios para dar un tratamiento definitivo a los heridos lo más pronto posible.

La mortalidad, va a depender en gran forma de la rapidez con que el equipo médico pueda prestar su apoyo al paciente herido, en este sentido, se ve que el tiempo total de espera de un paciente, desde que es herido hasta recibir un tratamiento definitivo es la suma de todos sus tiempos de espera, los cuales están compuestos por el tiempo que espera a la ambulancia en el campo de batalla, más el tiempo de traslado desde el campo de batalla hacia el campamento hospitalario, más el posible tiempo de espera en caso de no haber recursos disponibles en el momento de su arribo.

La directa relación entre la mortalidad de los pacientes y el tiempo de espera de éste, hasta recibir un tratamiento definitivo, puede verse claramente representado en datos estadísticos encontrados tras el análisis de distintas guerras o conflictos ocurridos. A continuación se muestra en la tabla 6.7 los datos históricos sobre tasas de mortalidad recopilados.

Tabla 6.7 Tasa de mortalidad histórica

Conflicto	Tiempo Espera	Tasa Mortalidad
1ª Guerra Mundial	12 – 18 horas	8,5%
2ª Guerra Mundial	6 – 12 horas	5,8%
Korea	2 – 4 horas	2,4%
Vietnam	65 minutos	1,7%

Fuente: Elaboración Propia

Para trabajar de forma más cómoda esta tabla y ajustarle una curva de regresión a los datos, la tabla 6.7 se modificó, generándose la nueva tabla 6.8.

Tabla 6.8 Tasa de mortalidad histórica modificada

Conflicto	Tiempo Espera	Tasa Mortalidad
1ª Guerra Mundial	15 horas	8,5%
2ª Guerra Mundial	9 horas	5,8%
Korea	3 horas	2,4%
Vietnam	1 hora	1,7%

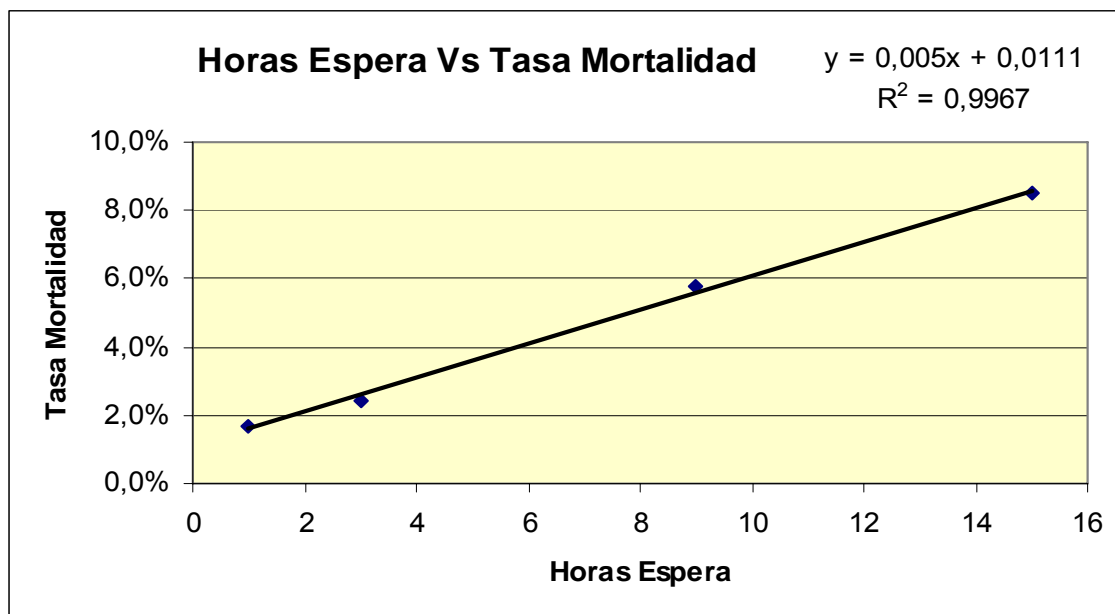
Fuente: Elaboración Propia

De esta forma, se puede ver que existe una clara relación entre ambos elementos, es decir, como la lógica indica, a mayor tiempo de espera del paciente para recibir su tratamiento final, mayor será el índice de mortalidad.

Al realizar el ajuste de una curva de regresión, la que presentó mejor ajuste fue la lineal, presentando un índice de correlación de 99,67%. En el gráfico 6.1 se muestra la curva ajustada.

Gráfico 6.1 Ajuste tasa de mortalidad

Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

Como se aprecia del gráfico 6.1, la línea se ajusta de muy buena forma a los datos recopilados, siendo explicada la variable dependiente (Tasa de mortalidad) en un 99,67% por la variable independiente (horas de espera). De esta forma, la ecuación encontrada es $y = 0,005x + 0,0111$ (6.1), siendo:

y : Tasa de mortalidad

x : Horas de espera

Asociando el concepto de mortalidad con el de triage, se puede decir que los fallecidos, están compuestos en su gran mayoría (en caso de haber realizado un buen proceso de triage), por los soldados heridos etiquetados con rojo.

La relación analizada, ha sido internalizada en los equipos médicos de los ejércitos de los países, por lo que se ha trabajado en distintos planteamientos de logística médica para disminuir los tiempos de espera de los soldados heridos, y así, ser capaces de salvar el mayor número de vidas posibles, viéndose esto reflejado en la rápida atención recibida por los soldados heridos en el conflicto de Vietnam, en el cual se tiene un tiempo promedio de

espera de atención médica de 65 minutos, lo que si se compara con el tiempo de espera en la Segunda Guerra Mundial (entre 12 y 18 horas), representa una reducción aproximada del 93%.

Para la disminución del tiempo de espera de atención del soldado, en algunos ejércitos se han creado Unidades Médicas Móviles (UMM), que permiten reducir enormemente el tiempo de traslado de los soldados heridos. Por dar un ejemplo concreto, el Ejército Estadounidense está actualmente trabajando en Irak con los llamados FST (Forward Surgical Team), quienes se mueven conjuntamente con las tropas y llevan consigo un hospital móvil con 4 camillas para ir realizando las asistencias casi en el mismo campo de batalla. En caso de ser necesario, se realiza una cirugía in situ con un tiempo de no más de 2 horas, lapso luego del cual, se envía el soldado al campamento hospitalario en donde recibirá los cuidados necesarios.²⁴

6.2.3 Modelo de Logística Militar Médica

Objetivos del Modelo

Ver el comportamiento del tiempo de espera de los heridos en el campo de batalla y además la mortalidad dada la demora, de acuerdo a:

- Variación en el número de ambulancias asignadas.
- Variación de la capacidad de las ambulancias.

6.2.4 Descripción del Modelo

En el siguiente modelo, se intenta analizar el comportamiento del sistema de evacuación de los soldados heridos desde el campo de batalla hacia el campamento hospitalario, para lo cual, el intervalo de tiempo a considerar para el sistema propuesto, va desde que el soldado es herido hasta que la ambulancia llega al campamento hospitalario.

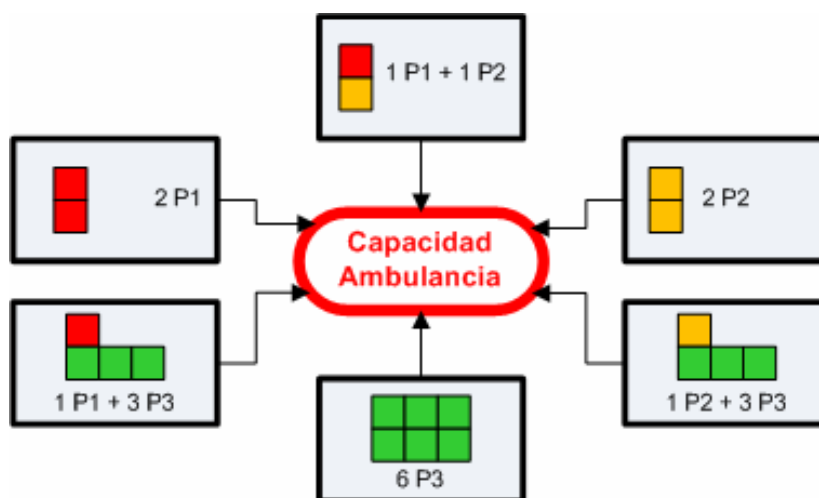
²⁴ Datos entregados por Atul Gawande, cirujano y profesor de la Universidad de Harvard

Los antecedentes de entrada del modelo, fueron recopilados tras una serie de simulaciones realizadas mediante el software ABACUS, en donde participaron tres unidades militares, 40th Comandos, 12th Armoured Brigade y The Kings Royal Hussars²⁵. El ejercicio ya mencionado, fue guiado por el Teniente Coronel Terrel, proveniente del “Higher Formations Trainer” perteneciente al “Command And Staff Trainer” del Ejército Británico.



De acuerdo a los reglamentos de doctrina existentes, se asignan dos ambulancias por cada compañía. Para esta modelación, se trabajó con cuatro compañías, por lo cual se tienen ocho ambulancias asignadas para estas cuatro unidades militares.

Además, se debe dar la restricción de capacidad a la ambulancia, para lo cual se tomó como supuesto que cada ambulancia es capaz de transportar a las siguientes combinaciones de heridos:



²⁵ Datos extraídos desde la tesis magistral “Simulation-based Assessment of the Ambulance Support for a Battlegroup in Action. Cranfield University”

El análisis de la capacidad de la ambulancia, se hace en base a que los soldados heridos con prioridad 1 (Rojos) y los heridos con prioridad 2 (Amarillos) deben ser trasladados haciendo el uso completo de una camilla cada uno, mientras que los heridos con prioridad 3 (Verdes) pueden trasladarse sentados, por lo cual la camilla tendría capacidad para tres pacientes.

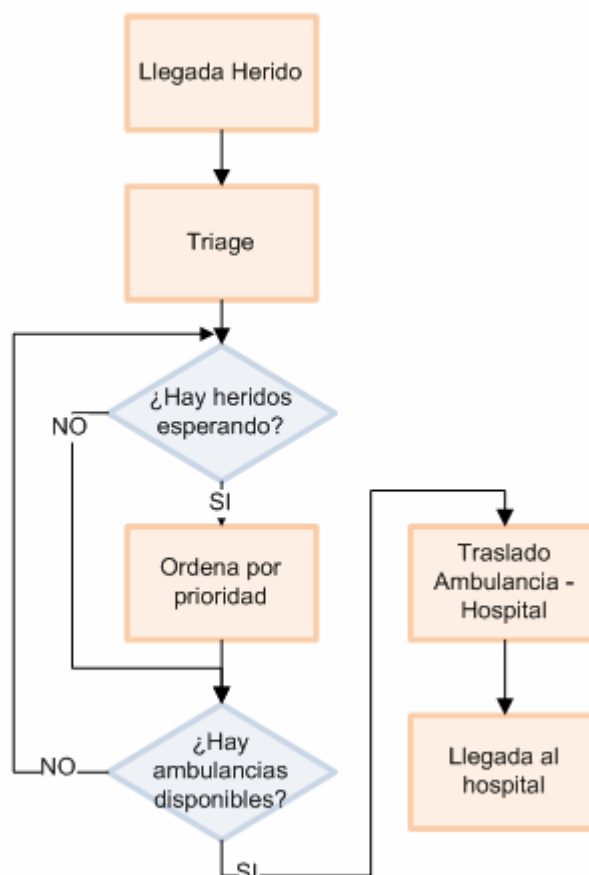
6.2.5 Resumen de Supuestos y Limitaciones del Modelo

- Los datos de entrada del modelo, fueron obtenidos de una investigación de tesis de la Universidad de Cranfield, Inglaterra. Dicho trabajo investigativo, se fundamenta en datos obtenidos tras un simulacro realizado para cuatro compañías.
- El porcentaje de cada uno de los grupos de heridos se hizo en base a las cifras de triage mostradas anteriormente en el marco teórico.
- El tiempo promedio que demora la ambulancia entre el campamento hospitalario y el campo de batalla es de 30 minutos, con una desviación estándar de 8 minutos, siguiendo una distribución normal.
- Las réplicas tendrán una duración de 24 horas.
- La ambulancia sólo hará el traslado de los heridos cuando su capacidad esté copada.
- Los soldados heridos con prioridad 3 (Verdes) no podrán subir a la ambulancia sin antes conformar un grupo de tres.

6.2.6 Modelo Conceptual y Computacional

En las figuras 6.12 y 6.13, se muestran el modelo conceptual y computacional respectivamente.

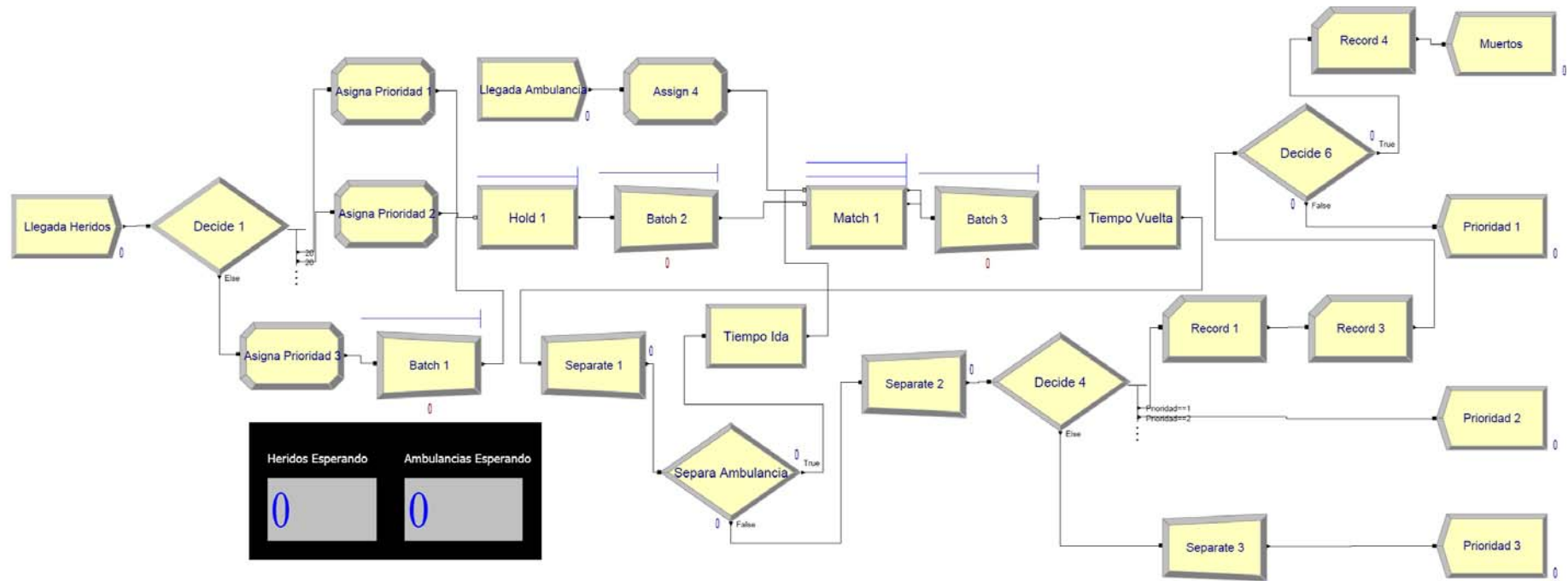
Figura 6.12 Mapa conceptual del modelo de logística médica



Fuente: Elaboración Propia

Del diagrama se puede apreciar que llega el herido, luego es clasificado por algún sistema de triage. Seguido a esto, se chequea si es que existen más heridos esperando por su traslado, en caso de ser esto verdadero, el herido será ordenado según su prioridad, siendo aquellos más graves, los que tendrán preferencia para subir a la ambulancia. Luego de ordenar a los heridos, se revisa si es que existen ambulancias disponibles, en caso real, el herido subirá a la ambulancia para comenzar su traslado al hospital. Finalmente el herido es dejado en el hospital y la ambulancia regresa para el rescate de más heridos.

Figura 6.13 Modelo Computacional de Logística Militar Médica


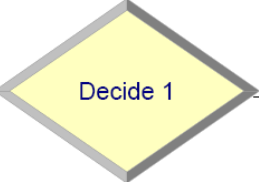
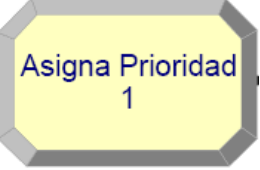
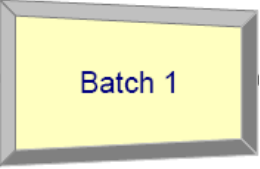

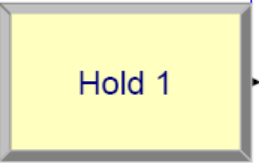


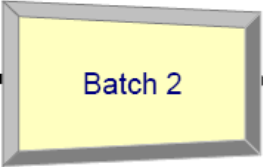
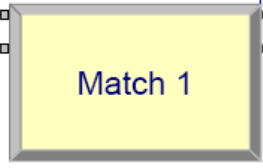
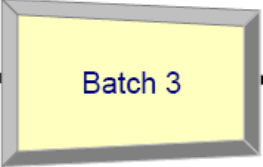
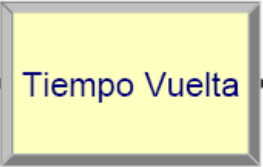
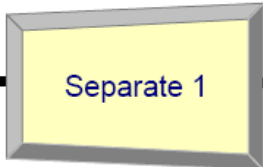
Fuente: Elaboración Propia



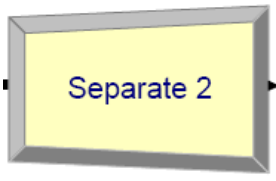
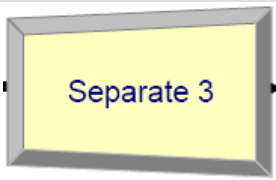

6.2.7 Descripción de Módulos

En la tabla 6.9 se muestra la descripción de los módulos utilizados para el modelo computacional de logística médica.

Tabla 6.9 Descripción de módulos del modelo médico

Módulo	Descripción
	<p>En este módulo, se asigna el tiempo entre llegadas de los soldados heridos, es decir, representa cada cuanto se hiere un soldado en combate. La llegada será del tipo $Expo(2)$</p>
	<p>Envía de acuerdo al porcentaje para cada tipo de prioridad del soldado herido, según datos históricos obtenidos de triage.</p>
	<p>Crea el atributo <i>prioridad</i> para diferenciar a los distintos tipos de urgencia de los soldados.</p>
	<p>Para trabajar de forma más cómoda el manejo de los soldados heridos tipo 3, el módulo <i>Batch 1</i>, realiza un “lote”, correspondiente a tres soldados tipo 3.</p>
	<p>Se ingresa el tiempo entre llegadas de ambulancias al campo de batalla. Además debido a las restricciones de ambulancias, limita el número de llegadas al número máximo de ambulancias posibles asignadas a cada unidad militar. Para el caso analizado, serán ocho ambulancias.</p>
	<p>Este módulo actúa como semáforo, el cual deja pasar a las entidades sólo cuando se cumplan las condiciones dadas. Para este caso, las condiciones para que las entidades “soldados heridos” suban a la ambulancia, es</p>

	<p>que haya alguna ambulancia disponible en el campo de batalla para realizar el transporte de heridos y además que el número de heridos en cola sea de 2 soldados (recordando que el lote de tres soldados tipo 3, se considera como una entidad, ya que dentro de la ambulancia, este lote, ocuparía el mismo espacio que un soldado herido con prioridad 1 o 2). Además, en este módulo, se ordena a los soldados de acuerdo a su prioridad, con lo cual los más graves tienen preferencia para subir a la ambulancia. La instrucción de ordenamiento se hace a través del atributo "prioridad".</p>
	<p>Agrupar de a 2 soldados, para luego ser subidos a la ambulancia.</p>
	<p>Da la instrucción de dejar pasar una ambulancia y el grupo de soldados (lote) realizado por el módulo Batch 2.</p>
	<p>Genera un lote que representa a la ambulancia con los heridos ya dentro. Dicho de otra forma, a la entrada del módulo se agrupan la ambulancia y grupo de soldados dejados pasar por Match 1. La entidad de salida del módulo, representa la ambulancia lista para iniciar el transporte de heridos.</p>
	<p>Se ingresa el tiempo que demora la ambulancia con heridos en ir desde el campo de batalla, hasta el campamento hospitalario.</p>
	<p>Separa la ambulancia, del grupo de heridos. Representa cuando los soldados son bajados de la ambulancia y llevados hacia el hospital.</p>

	<p>Da la instrucción a la ambulancia de realizar nuevamente su viaje hacia el campo de batalla, y al grupo de heridos a ingresar al hospital para ser atendidos.</p>
	<p>Asigna el tiempo que demora la ambulancia en recorrer la distancia correspondiente entre el campamento hospitalario y el campo de batalla.</p>
	<p>Se separan los pacientes de acuerdo a su nivel de gravedad.</p>
	<p>Separa al grupo de entidades en caso de pertenecer a un lote de soldados heridos con prioridad 3.</p>
	<p>Designa el “camino” que debe seguir cada soldado herido dependiendo de su prioridad. Esta etapa servirá para un trabajo futuro en que se modele la atención dentro del hospital.</p>

6.2.8 Análisis de Resultados

Luego de ingresar los datos de entrada al modelo construido, realizar las corridas necesarias al modelo y recopilar los resultados entregados por Arena, se procede al análisis de estos resultados y a la experimentación.

Para tal efecto, se analizaron tres indicadores de desempeño:

- Tiempo total entre que es herido un soldado con prioridad P1 y es dejado en el hospital, es decir el tiempo de espera de la ambulancia, más el tiempo de traslado.

- Máxima cantidad de soldados esperando por una ambulancia disponible, independiente del tipo de prioridad que el paciente posea.
- Tiempo promedio que esperan los heridos por una ambulancia, independiente de la prioridad del herido.

Para realizar este análisis, se consideró un nivel de confianza de un 90% y se realizaron 10 corridas pilotos al modelo construido.

De los resultados obtenidos, es posible obtener las siguientes estadísticas descriptivas, las que servirán para calcular el número de réplicas necesarias para el modelo. Las estadísticas se muestran en la tabla 6.10

Tabla 6.10 Estadísticas descriptivas de corridas piloto del modelo médico

	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
Media	56,2	62,681808	37,487646
Error típico	6,98060806	3,65323894	0,259957587
Mediana	51	67,01589	37,60521
Desviación estándar	22,0746209	11,5525559	0,822058069
Varianza	487,288889	133,461548	0,675779468
Curtosis	-0,58690111	-0,52600074	-0,16834382
Mínimo	29	42,01698	36,26634
Máximo	95	78,3951	38,9319

Fuente: Elaboración Propia

Para calcular el número de réplicas necesarias, se calcula individualmente el número de réplicas que se requerirían para cada uno de los tres indicadores analizados, finalmente el mayor de estos números se considerará para el análisis final.

Luego del análisis, con un 90% de confianza, diez réplicas piloto, y suponiendo un nivel de precisión de aproximadamente un 8% de la media del máximo promedio de heridos esperando por una ambulancia, el número de corridas que se le debe realizar al modelo es de 26.

Los resultados entregados por Arena, tanto para el modelo real, como para los escenarios propuestos mostrados más adelante, pueden verse en el Anexo B

Las estadísticas descriptivas obtenidas, tras las réplicas obtenidas a partir de las corridas pilotos, se muestra en la tabla 6.11.

Tabla 6.11 Estadísticas descriptivas reales del modelo médico

	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
Media	28,1538462	35,5142954	36,2102608
Error típico	2,61044783	4,44039499	0,28036371
Desviación estándar	13,3107244	22,6416607	1,42958
Varianza de la muestra	177,175385	512,644799	2,04369898
Curtosis	4,03245918	-0,5874086	-1,04507323
Mínimo	11	8,79858	34,06038
Máximo	73	83,7951	38,9493

Fuente: Elaboración Propia

Luego de conocer las estadísticas vistas en la tabla 6.11, se procede a la construcción de los intervalos de confianza para los tres indicadores de desempeño analizados. Los intervalos de confianza se construyeron con un 90% de certeza.

- La cantidad máxima de heridos esperando por una ambulancia en el campo de batalla, tras 24 horas de combate, está entre 49 y 63 soldados.
- El tiempo promedio que deben esperar los heridos antes de empezar a ser trasladados por la ambulancia, se encuentra entre 59 y 72 minutos.
- El tiempo promedio que demora un herido con prioridad tipo 1, desde que es herido hasta que llega al hospital, se encuentra entre 37 y 38 minutos.

6.2.9 Propuesta de Escenarios y Experimentación

Para la experimentación del modelo, se propusieron dos escenarios distintos, con esto, se pudo ver como variaron los indicadores ya mencionados, tras 24 horas de combate.

Los escenarios propuestos son:

- Una camilla más por cada ambulancia, con lo cual se podría trasladar a 3 personas a la vez (siguiendo supuesto de lote para los heridos con prioridad 3).
- Asignación de una ambulancia más para las cuatro compañías, quedando en nueve.

Otras modificaciones que pudieron haberse realizado en el sistema, son las que responden a ¿Qué pasaría si el hospital se encontrara más cerca del campo de batalla?, ¿Qué pasaría si aumenta la velocidad de traslado de la ambulancia?, ¿Qué pasaría si se agrega una unidad médica móvil?, entre otros muchos escenarios que pudieron proponerse.

6.2.9.1 Aumento de capacidad de las ambulancias

La primera experimentación, se realizó en base a la pregunta ¿Qué pasaría si aumenta la capacidad de la ambulancia?, con la que se busca responder a las preguntas: ¿Disminuirá el tiempo de espera promedio de los soldados por una ambulancia?, ¿Cuál será el nuevo tiempo entre que es herido con prioridad 1 y es bajado de la ambulancia?, ¿Disminuirán las colas de soldados heridos?

Tras realizar las 26 corridas del modelo, las estadísticas obtenidas son las mostradas en la tabla 6.12. Además, en el anexo B pueden verse los resultados para cada una de las réplicas realizadas

Tabla 6.12 Estadísticas descriptivas del modelo médico escenario 1

	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
Media	8,57692308	1,37289692	33,5480331
Error típico	0,61562495	0,20750019	0,18384515
Mediana	8	0,89526	33,73248
Desviación estándar	3,13908365	1,05804751	0,93742998
Varianza de la muestra	9,85384615	1,11946454	0,87877497
Curtosis	1,50359253	1,1402461	0,11765168
Mínimo	4	0,22716	32,07246
Máximo	17	4,06548	35,88216

Fuente: Elaboración Propia

De esta manera, se puede concluir que con un 90% de confianza, tras 26 réplicas:

- La cantidad máxima de heridos esperando por una ambulancia, está entre 8 y 10 soldados.
- El tiempo promedio que deben esperar los heridos antes de empezar a ser trasladados por la ambulancia, se encuentra entre 1 y 2 minutos.
- El tiempo promedio que espera un herido con prioridad tipo 1 desde que es herido hasta que llega al hospital, se encuentra entre 33 y 34 minutos.

Los intervalos de confianza obtenidos para las medias, luego de la modificación del modelo, no se intersectan con los intervalos construidos para el modelo original, por lo cual, se puede afirmar que existe diferencia estadística significativa entre un modelo y otro. Por lo tanto, al aumentar la capacidad de una ambulancia a tres camillas, existe una mejoría en cuanto a los indicadores de desempeño analizados.

La mejoría del modelo propuesto, puede verse claramente, en el tiempo promedio desde que es herido, hasta que llega al hospital de un herido con

prioridad 1, la cual queda casi completamente explicada por el tiempo de traslado del soldado, es decir, el tiempo que debe esperar por una ambulancia es casi nulo, lo mismo ocurre, en general con el tiempo de espera en el campo de batalla de un herido cualquiera sea su condición de gravedad

6.2.9.2 Aumento en la cantidad de ambulancias

Este experimento se realizó en base a un escenario en el cual se asigna una ambulancia más para las cuatro compañías, con lo cual, el número total de ambulancias asignadas para las compañías asciende a nueve.

Los resultados entregados por Arena, para cada una de las 26 réplicas realizadas al modelo, puede verse en el Anexo B. Las estadísticas descriptivas obtenidas se muestran a continuación en la tabla 6.13

Tabla 6.13 Estadísticas descriptivas del modelo médico escenario 2

	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
Media	28,1538462	35,5142954	36,2102608
Error típico	2,61044783	4,44039499	0,28036371
Mediana	25	31,75719	35,8392
Desviación estándar	13,3107244	22,6416607	1,42958
Varianza de la muestra	177,175385	512,644799	2,04369898
Curtosis	4,03245918	-0,5874086	-1,04507323
Mínimo	11	8,79858	34,06038
Máximo	73	83,7951	38,9493

Fuente: Elaboración Propia

Luego de la construcción de los intervalos de confianza para las medias de los indicadores analizados, con un nivel de confianza del 90%, se puede concluir que:

- La cantidad máxima de heridos esperando por una ambulancia, esta entre los 23 y 33 soldados.

- El tiempo promedio que deben esperar los soldados heridos antes del comienzo de su traslado, esta entre 27 y 43 minutos.
- El verdadero tiempo que espera un soldado herido P1 antes de recibir la atención médica definitiva, se encuentra entre 35 y 37 minutos.

Por lo tanto, al observar los intervalos de confianza construidos para el escenario inicial y compararlos con los construidos para el escenario recién analizado, se concluye que existe diferencia estadística entre uno y otro, es decir, se puede afirmar que al aumentar en una ambulancia, los indicadores analizados serán mejores, esto dado que para un nivel de confianza del 90% los intervalos no se intersectan.

6.2.10 Conclusión

Tras el análisis de los resultados, entregados por el modelo computacional construido en Arena, se puede concluir que para ambos escenarios propuestos, existe una mejora con respecto al modelo inicial. Esto dado que, no existe intersección entre los intervalos de confianza construidos para cada caso con un 90% de confianza. Además, también puede observarse que el mejor escenario propuesto fue tras el aumento en la capacidad de la ambulancia.

Además apoyados en el análisis realizado en el software STATGRAPHICS Plus, el que mediante la descomposición de la tabla ANOVA, calcula el valor F, y chequea las diferencias entre las medias. Se puede reafirmar que si existe diferencia significativa entre las medias de los tres escenarios para un nivel de confianza del 90%. Las estadísticas y gráficos entregados por STATGRAPHICS Plus, se pueden ver en el ANEXO B.

Queda demostrado luego de observar este modelo, que la logística médica militar en sus distintas fases, puede ser abordada de buena forma con el uso de la simulación discreta. En cuanto a la fase de tratamiento definitivo

recibido en el hospital, existen muchos modelos creados para el plano civil, que podrían ser adaptados al militar.

El estudio de un modelo como el propuesto, puede ser de gran ayuda en situaciones de catástrofes tales como: terremoto, tsunami, maremoto, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra y huracanes. Los procesos en estos casos requieren una gran coordinación entre las unidades médicas para realizar un eficaz procedimiento de selección y posterior evacuación de los heridos.

De acuerdo a los sistemas de triage, y basados en los tiempos que demoraría el traslado desde un lugar en condiciones de desastre y los hospitales, podría realizarse un modelo que interrelacione la prioridad del herido, con el tiempo de traslado hacia un hospital y su probabilidad de sobrevivencia bajo la condición de tiempo en que demora en recibir atención médica definitiva.

La simulación de este tipo de modelos, permite la experimentación de distintas formas de realizar las actividades operacionales, que pueden ser aplicadas a las distintas fases del desastre. Pudiendo ser utilizada a modo de prevención, tratamiento y luego evacuación del lugar en riesgo.

Un modelo como el propuesto de asignación de ambulancias para ciertas unidades militares, sirve de gran ayuda para encontrar alguna asignación cercana a la óptima que permita disminuir la cantidad de fallecidos en combate. Por lo tanto, puede ser utilizado para disminuir la mortalidad en operaciones de paz y en catástrofes.

Las unidades responsables de prestar el apoyo logístico médico, están consientes de que a mayor tiempo de espera del soldado en recibir un tratamiento definitivo, mayor será la probabilidad de muerte que este tenga o el grado de invalidez con el que puede quedar. Por este motivo, las tendencias de procedimiento de apoyo médico, buscan disminuir el tiempo de espera de los pacientes, para lo cual se han desarrollado distintas herramientas. Una de las

técnicas que ha tenido buenos resultados, es la creación de unidades y equipos médicos móviles, los que prestan apoyo de estabilización e incluso se encuentran equipados para realizar operaciones en el mismo lugar en donde se encuentra el conflicto o desastre.

Desde 1990, el Ejército de Estados Unidos ha implementado los llamados equipos de cirugía de avanzada (Forward Surgical Team), los que tal como su nombre lo indica, se conjuntamente con las tropas. Los FST han sido de gran ayuda en Irak, logrando reducir considerablemente el índice de mortalidad de los heridos.

Tal como pudo observarse, los simuladores pueden resultar muy útiles en la recopilación de datos de importancia, con los cuales se pueden crear modelos computacionales y realizar la experimentación que permita dar el apoyo a la toma de decisiones bajo distintos escenarios y en concordancia con las distintas políticas adoptadas.

6.3 LOGÍSTICA DE MANTENCIÓN y RECUPERACIÓN

El rol de la mantención y recuperación de vehículos cumplió un papel principal dentro de la Segunda Guerra Mundial, los talleres encargados de la reparación y mantención de cada ejército debían competir para así poder poner en lucha la mayor cantidad de vehículos posibles. En este sentido, el Ejército Soviético tuvo grandes problemas con la reparación de sus blindados, ya que su doctrina siempre ha privilegiado la cantidad y no la calidad como lo hacían los alemanes, quienes recuperaban la mayoría de sus vehículos caídos en combate.

La doctrina alemana, además de preocuparse de la gran calidad de sus vehículos, los ha diseñado de forma que estos sean fáciles de reparar para poder reincorporarlos lo más rápido posible al combate. Para lograr una eficaz y eficiente reparación, el Ejército Alemán destina gran parte de sus fondos a la capacitación de las patrullas encargadas de esta tarea, y mantiene sus talleres con alto nivel tecnológico.

Claramente, dependiendo del tamaño de la unidad militar, será el número de secciones y personal trabajando en áreas de mantención y recuperación. Para generalizar, de acuerdo a la doctrina alemana, cada regimiento de tanques de seis compañías, tendrá a su cargo dos secciones de reparación, una de recuperación, una de armería, talleres para el equipamiento de comunicación y una compañía de abastecimiento.

“Los servicios de mantención deben estar tan cerca como sea posible del campo de batalla, para así poder realizar la reparación de los vehículos. Transportar los vehículos hacia otro lugar puede resultar muy difícil. La tarea de mantención es más efectiva cuando se encuentra cerca del área de combate”

Capitán Lawrence Pugh, 1943, 6ª Infantería Blindada,
Ejército de Estados Unidos

Unidades de Mantenición y Recuperación

Patrullas y Sección de reparación

Las patrullas de reparación son las encargadas de la mantención general de los vehículos, su armamento y equipos de radio.

Estas patrullas, deben viajar junto con las unidades de vehículos, de esta forma, los talleres debieran ser capaces de reparar los vehículos y armamento dañado en no más de 4 horas²⁶. En caso de darse de baja un vehículo, el encargado de la patrulla debe hacer una inspección de éste, y verificar cuál es el nivel y naturaleza del daño. Si el daño es muy grande, el vehículo u oruga deberá ser remolcado por una patrulla de recuperación hacia el taller de la Compañía a la cual pertenece la patrulla

La sección de mantenimiento deberá cumplir las actividades de mantenimiento, inspección, evaluación, revisión, recuperación y evacuación de vehículos inhabilitados.

Talleres de la Compañía

Dichos talleres están normalmente a una distancia que oscila entre 24 y 32²⁷ kilómetros detrás los vehículos que se encuentran en combate. La patrulla de recuperación es la encargada de remolcar a los vehículos u orugas dañadas hacia los talleres. De acuerdo al nivel de especialización, un taller de compañía repara todos aquellos vehículos que su reparación no necesite más de 12 horas²⁸. Aquellos vehículos dañados que requieran de más de 24 horas de reparación, son enviados directamente a las bases de reparación.

La tarea de remolque, para sacar al vehículo dañado de la línea de combate principal puede durar hasta 20 minutos (según cuentan prisioneros de

²⁶, ²⁷, ²⁸ Intelligence Bulletin. 1943. German Tank Maintenance and Recovery.

guerra en campañas del desierto de África). Los vehículos u orugas dañadas son remolcados principalmente por vehículos de recuperación (ARV). Dentro de la doctrina alemana, en caso de retirada, eran los mismos vehículos de combate, los que remolcaban a los vehículos dañados. En la tabla 6.14 se muestra algunos ejemplos de los vehiculos recuperadores y reparadores utilizados por diversos ejércitos.

Tabla 6.14 Vehículos de Recuperación

<i>M – 88 ARV</i>	<i>TAMI 35244</i>	<i>M – 32 ARV</i>
		
<i>M -113 ARV</i>	<i>Centurión ARV</i>	<i>Leopard 2 ARV</i>
		

Fuentes: www.armyrecognition.com
www.armyvehicles.dk
www.globalsecurity.org

6.3.1 Descripción del Modelo

El siguiente modelo analiza la cantidad de vehículos que permanecen en combate, dadas ciertas condiciones en el número de talleres de reparación y bajo un determinado rendimiento.

Los datos de entrada del modelo fueron obtenidas principalmente desde la batalla del Kursk.

6.3.1.1 Batalla del Kursk

La Batalla del Kursk, ha sido el mayor enfrentamiento entre carros blindados de la historia, en ella participaron dos millones de soldados 6000 tanques y más de 2000 aviones. El conflicto se desarrolló entre julio y agosto de 1943 y marcó un momento decisivo en el frente oriental. El Ejército Soviético, puso fin a la capacidad ofensiva del Ejército Alemán y abrió su camino a las grandes ofensivas soviéticas de los años 1944 y 1945.

Los primeros planes alemanes consistían en realizar un ataque sorpresa a los soviéticos con una gran cantidad de blindados, confiados en sus planes tácticos y en las cualidades operativas de su Ejército. El inicio de la batalla estaba proyectado en un principio para el 4 de mayo. Dado a que el sistema logístico de traslado de los tanques Panzer V y VI, no rindió los frutos esperados, el ataque tuvo que ser postergado hasta el 4 de julio, lo que dio tiempo a los soviéticos para tomar las medidas que permitieran realizar un contraataque a la ofensiva alemana o realizar un ataque sorpresa contra el Ejército de Hitler.

Los planes soviéticos eran similares a los de los alemanes, preparar su propia ofensiva y no dejar que el Ejército Alemán tomara la iniciativa del combate, dado a que estos eran expertos en operaciones relámpago.

Los soviéticos lograron enterarse de la hora justa en que los alemanes iniciarían su ataque, por lo que diez minutos antes de la ofensiva, comenzó un

masivo ataque de artillería contra las líneas alemanas, seguido por un ataque por parte de la fuerza aérea rusa, contra la Luftwaffe.

Finalmente luego de 49 días de iniciada la Batalla, las bajas alemanas fueron de más de 56.000 muertos y perdió la mayoría de sus tanques. Las pérdidas soviéticas fueron de 70.000 muertos y 110.000 heridos, mientras que perdieron aproximadamente 1.500 carros de combate.

6.3.1.2 Datos de Entrada

Los antecedentes y cifras mostradas a continuación se encuentran en la base de datos del Instituto Dupuys

- Por cada 5,6 tanques alemanes que lograba dañar el ejército soviético, sólo uno era destruido, en cambio por cada tanque soviético dañado, había uno destruido.
- El ratio Soviético/Alemanes del total de tanques dados de baja permanente (Destruídos + Dañados no recuperados) fue de 2,66, mientras que incluyendo solo a los destruidos era de 6.
- La eficiencia alemana fue entre 2 y 2,5 veces superior a la soviética.

En la tabla 6.15 se muestra el resumen de los datos de entrada a utilizar en este modelo.

Tabla 6.15 Datos de entrada del modelo de recuperación

	<i>Ejército A</i>	<i>Ejército B</i>
Tamaño Inicial	2500	1100
Rendimiento c/6 horas	0,036	0,08
Nivel de Recuperación	50%	88%
Tiempo de Reparación	TRIA(4.4 ; 7 ; 9)	TRIA(2 ; 3 ; 4)
Talleres de Reparación	20	20

Fuente: KOSAVE II y otros

6.3.2 Objetivos del Modelo

- Medir cuánto afecta al combate, el tiempo de reparación de vehículos blindados para un enfrentamiento entre unidades militares blindadas.
- Medir el impacto que tiene sobre las condiciones del combate, el nivel de rendimiento de cada Ejército.

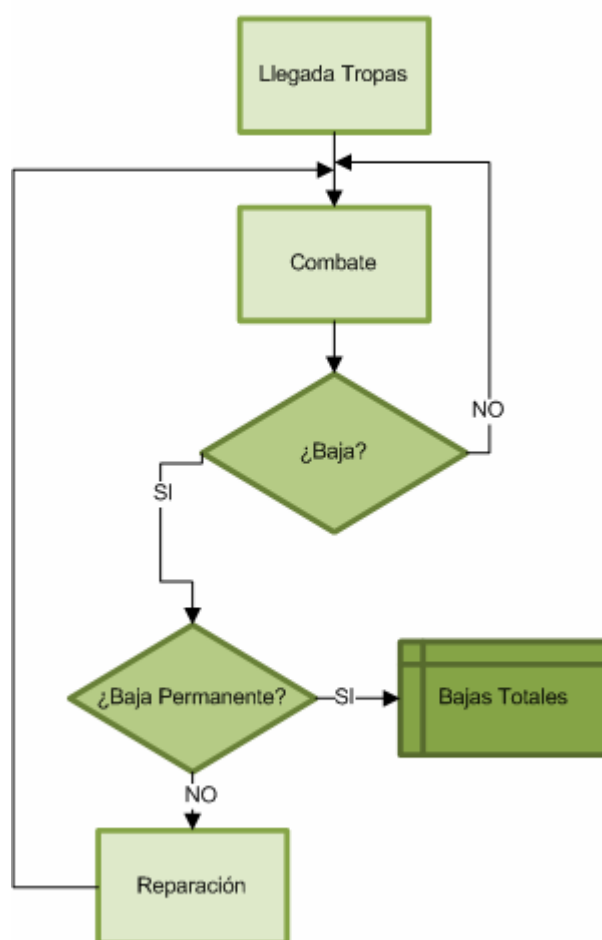
6.3.3 Supuestos y Limitaciones

- El modelamiento se hará en base a las ecuaciones cuadráticas de Lanchester.
- El combate se realiza de forma ininterrumpida.
- Existirá un cierto porcentaje de las bajas que pueden ser recuperados, pudiendo así ingresar nuevamente al combate.
- Al momento del inicio del combate, no se encuentran vehículos en reparación, es decir el 100% de los blindados ingresará al combate.

6.3.4 Modelo Conceptual y Computacional

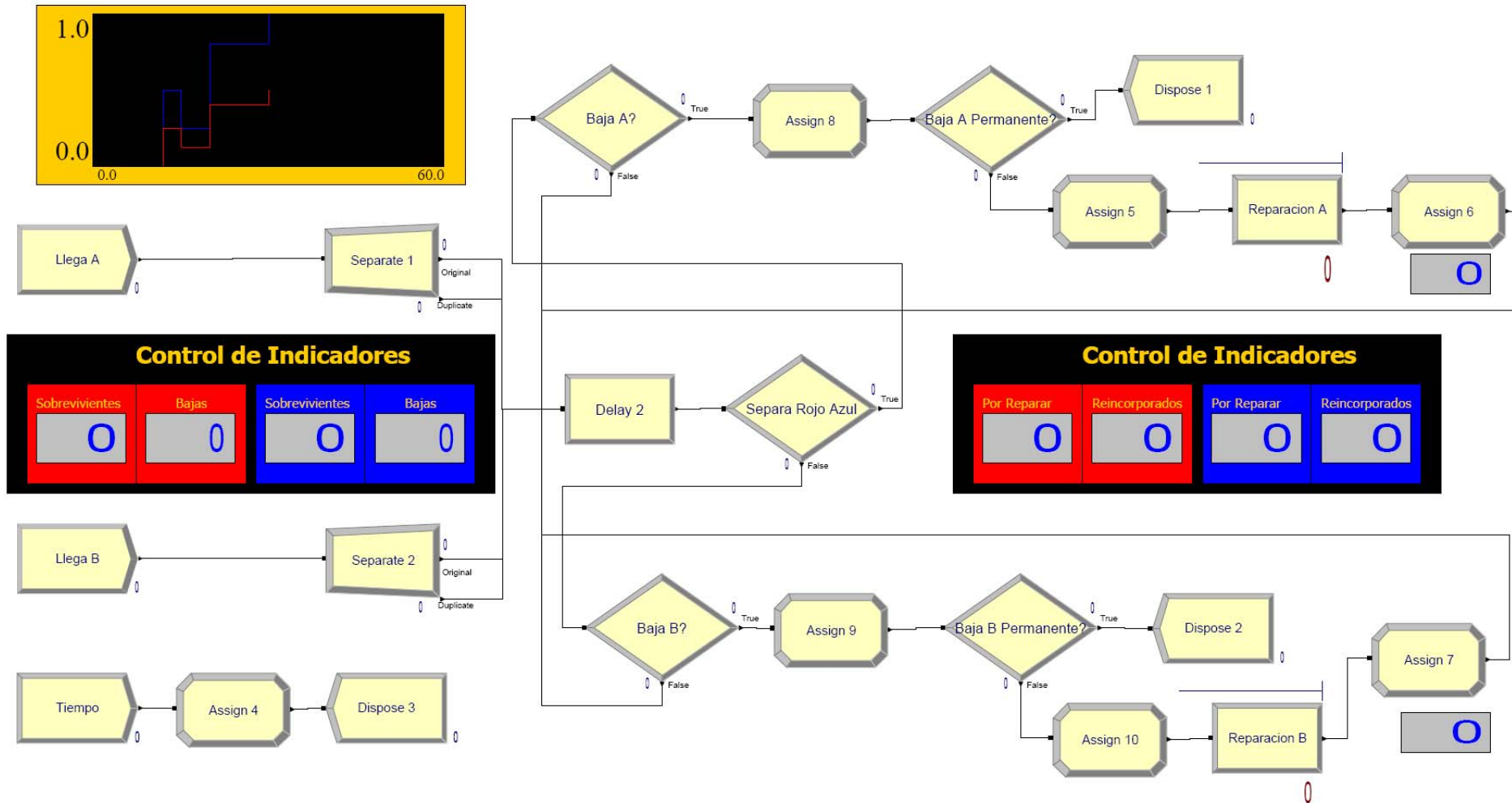
Los modelo conceptual y computacional propuestos, se muestran en las figuras 6.14 y 6.15 respectivamente.

Figura 6.14 Mapa conceptual del modelo de reparación y mantenimiento



Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.15 Modelo Computacional para la logística de reparación y mantención




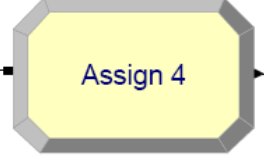


Fuente: Elaboración Propia

6.3.5 Descripción de Módulos

El modelo, describe un combate en donde se considera que las bajas de cada ejército seguirán el comportamiento propuesto por la ecuación de Lanchester cuadrática (modelamiento para guerra moderna). Además, se incluye en el modelo la posibilidad de reparación de los vehículos blindados, para lo cual se verá cómo afectaría al modelo un cambio en los tiempos de reparación de cada vehículo. Los módulos y sus funciones se muestran en la tabla 6.16. Las variables utilizadas se muestran en la tabla 6.17.

Tabla 6.16 Descripción de módulos del modelo de recuperación

Módulo	Descripción
	<p>Los Módulos “Llega A” y “Llega B”, representan la llegada de los Ejércitos A y B respectivamente, para efectos de análisis, se considerará que la llegada de las unidades militares se realiza de forma simultánea. El ejemplo que se mostrará será sobre combate entre unidades de vehículos.</p>
	<p>En <i>Separate 1 y 2</i>, se deberá dar la información del tamaño del ejército, para nuestro ejemplo, el tamaño representa el número de vehículos que poseen dichas fuerzas de combate.</p>
	<p>Dejará pasar una entidad cada un cierto tiempo constante determinado. En el módulo siguiente a éste, se hará el cálculo de las ecuaciones de Lanchester</p>
	<p>Será la encargada de hacer el cálculo de la ecuación de Lanchester, además de resetear el valor de las variables “<i>Bajas.Pasan.B</i>” y “<i>Bajas.Pasan.A</i>” que se describen más adelante.</p>

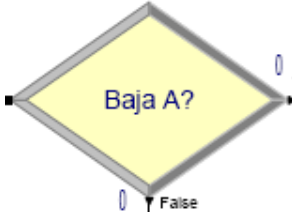



	<p>El módulo Decide <i>Baja A (B)?</i>, dejará pasar la cantidad de bajas que hayan ocurrido en el periodo t, para lo cual se realizará la siguiente expresión condicionante: $Bajas.Pasan.B < ANINT(Rend.A*Sobrevive.A)$. La variable <i>Bajas.Pasan.B</i>, está definida en el siguiente módulo, cada vez que pase una Baja se iniciará un contador, el comando <i>ANINT</i>, aproxima el número obtenido al entero más cercano, mientras que las bajas del Ejército B vendrá dado por $Rend.A*Sobrevive.A$, por lo tanto la “puerta de envío”, estará abierta sólo para el número de bajas del periodo analizado.</p>
	<p>En el módulo <i>Baja A (B) Permanente?</i> Se dará una condición porcentual para decidir cuántas de las bajas del periodo fueron dadas de baja de forma permanente y cuales podrán ser reparadas.</p>
	<p>Para el bloque <i>Reparación A (B)</i> se utilizará un módulo <i>Process</i> en el cual se asignarán los tiempos que deberán permanecer las entidades en reparación, para efectuar dichas reparaciones se contará con un recurso <i>Reparador B (A)</i>, el cual tendrá una capacidad de reparación modificable mediante el bloque <i>Resources</i>.</p>
	<p>En el Panel de Control de Indicadores, se llevará el control de las variables <i>bajas del Ejército A en el periodo t</i>, <i>bajas del Ejército B en el periodo t</i>, <i>sobrevivientes actuales del Ejército A</i>, <i>sobrevivientes actuales del Ejército B</i>. Por otro lado, se llevará control de la cantidad de entidades que están esperando por ser reparadas en cada ejército y el número de entidades reincorporadas al combate en un tiempo t luego de haber sido reparadas.</p>

Tabla 6.17 Variables utilizadas en el modelo de recuperación

Variable	Descripción
Rend.A (B)	Indica el rendimiento de cada ejército
Sobrevive.A (B)	Lleva el registro de la cantidad real de vehículos blindados en combate para cada ejército
Reparados.A (B)	Indica cuántos vehículos blindados fueron reincorporados al combate en el tiempo t
Bajas.Pasan.A (B)	Indica cuántas bajas han pasado por el contador (Pasan hasta que se iguale la cantidad de bajas dadas por la ecuación de Lanchester)

Fuente: Elaboración Propia

6.3.6 Análisis de Resultado

Para el análisis se consideraron 5 réplicas. Los niveles de vehículos en combate al quinto día, se muestran en la tabla 6.18

Tabla 6.18 Vehículos en combate al quinto día

	A	B
1	1737	520
2	1751	503
3	1753	508
4	1749	527
5	1736	536

Fuente: Elaboración Propia

Con un nivel de confianza del 95%, puede afirmarse que:

- Al quinto día de combate, el Ejército B, tenía entre 502 y 536 vehículos en combate
- Al quinto día de combate, el Ejército A, tenía entre 1735 y 1756 vehículos.

- La desviación estándar de la cantidad de vehículos en combate del Ejército B, al quinto día de combate, se encuentra entre 8 y 39 vehículos.
- La desviación estándar de la cantidad de vehículos en combate del Ejército A, al quinto día de combate, se encuentra entre 5 y 23 vehículos.

Los intervalos para las medias encontradas, son representativos de lo ocurrido en la Batalla de Kursk. El Ejército Alemán, al quinto día de combate, tenía 534, mientras que el Ejército Soviético, tenía una fuerza de 1754 tanques²⁹.

Propuesta de Escenarios y Experimentación

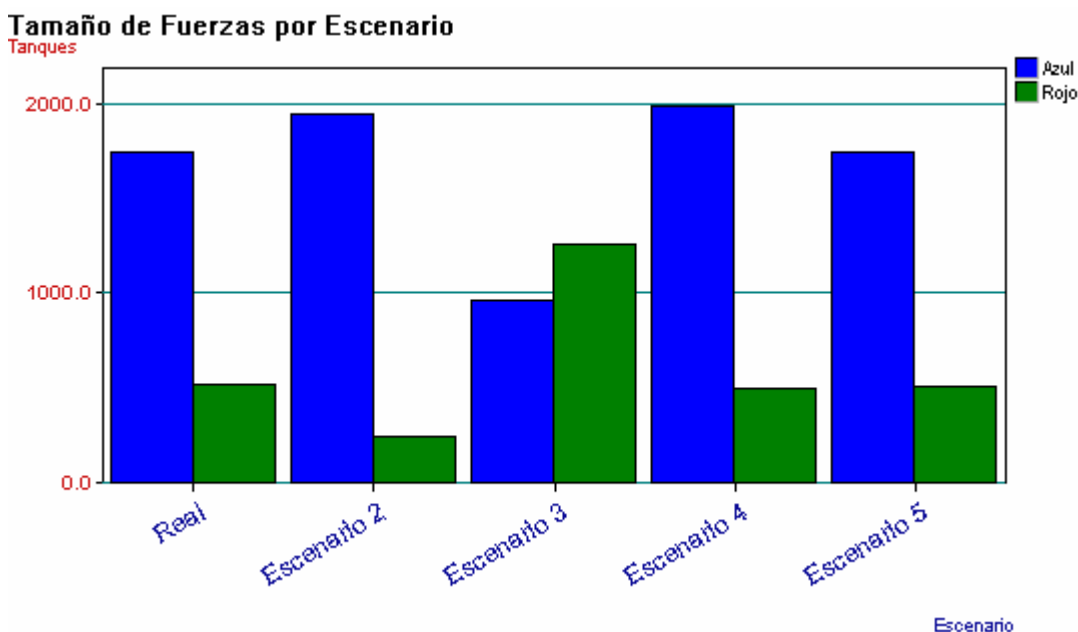
Para este modelo, se propusieron cuatro escenarios alternativos, los que permiten responder a la pregunta ¿Cuáles hubieran sido el tamaño de fuerzas de los ejércitos en caso de?

- Escenario 2 : 25% más de rendimiento del Ejército A
- Escenario 3 : 50% más de fuerzas del Ejército B
- Escenario 4 : Tiempo de reparación reducido a la mitad para el Ejército A
- Escenario 5 : Aumento nivel de recuperación del Ejército a 65%

El gráfico 6.2, muestra el tamaño de fuerzas al quinto día de combate, para los distintos escenarios propuestos.

²⁹ Cifras publicadas en el reporte Kursk Operation Simulation and Validation Exercise - Phase II. Elaborado por el Centro de Evaluación de Fuerzas y Estrategia del Ejército de Estados Unidos

Gráfico 6.2 Tamaño de fuerzas al quinto día para los distintos escenarios



Fuente: Elaboración Propia

Los intervalos de confianza construidos con un nivel de confianza del 95%, para cada uno de los escenarios, se muestran en la tabla 6.19.

Tabla 6.19 Intervalos de confianza por escenario en modelo de recuperación

	Ejército A		Ejército B	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Escenario 2	1937	1945	245	246
Escenario 3	958	966	1248	1257
Escenario 4	1966	2012	492	512
Escenario 5	1739	1750	495	513

Fuente: Elaboración Propia

De los tres primeros escenarios propuestos, se puede afirmar con un 95% de confianza, que si existe diferencia estadística significativa con respecto a las condiciones iniciales. Esto, dado que no existe intersección entre los intervalos de confianza construidos para los escenarios propuestos y el original. Bajo estos escenarios, aquel en que se reducía el tiempo de reparación del Ejército A a la mitad, presenta mejores indicadores en cuanto al tamaño de las fuerzas propias, aun cuando el tamaño del Ejército B mantiene un nivel de fuerzas similares a las del escenario original. Para el escenario 2, se puede

apreciar que el tamaño de fuerzas del Ejército A es apenas más bajo que las del Escenario 4, siendo la gran diferencia en este sentido, el bajo tamaño de fuerzas del Ejército B al quinto día de combate.

Bajo el escenario 3, en el que se aumenta en un 50% el número de vehículos del Ejército B, es decir, tras un aumento de 550 vehículos, el Ejército A ve reducido en aproximadamente un 61,7% su número de vehículos, mientras que el Ejército B, es capaz de mantener aproximadamente un 76% de su tamaño inicial.

Para el escenario 5, tras analizar los intervalos, puede apreciarse que existe intersección entre el escenario propuesto y el original, por lo tanto, con un 95% de confianza, se puede decir que no existe diferencia estadística significativa entre un escenario y otro. Esto se debe principalmente a que aun cuando el nivel de recuperación de vehículos dados de baja fue mayor, no existían los recursos necesarios para dar abasto a la cantidad de vehículos que fueron enviados al proceso de reparación. Esta situación hubiera generado ventajas en caso de la instalación de una mayor cantidad de talleres de reparación, o disminuyendo el tiempo que demoran los talleres en la reparación de los blindados.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES

La generación de modelos que permitan representar sistemas, ha sido una de las principales áreas de investigación de las instituciones, tanto civiles como militares. La finalidad de éstos es dar apoyo a la toma de decisiones, es por este motivo que para los Ejércitos es tan importante la creación de modelos que permitan eliminar el alto grado de incertidumbre ante situaciones de desastre.

Se puede afirmar que la cuna de la creación de modelos, nace a partir de la Segunda Guerra Mundial, en donde queda demostrada la importancia de la modelación para abordar un determinado sistema. Fue en ese entonces que nació la llamada Investigación de Operaciones, la que permitió que tras investigaciones conjuntas entre el Ejército Británico y de Estados Unidos, se pudieran generar modelos que a la larga serían decisivos para el desenlace final de la guerra. Sólo tras estas investigaciones, los Aliados fueron capaces de frenar el imparable poderío táctico alemán.

La sociedad civil ha sabido adecuar las herramientas generadas en ámbitos militares, tanto así que luego de tres años de terminada la Segunda Guerra Mundial, el MIT comenzó a impartir el primer curso de Investigación de Operaciones, luego de que Dantzig desarrollara los primeros modelos de programación lineal.

El avance que ha tenido el ámbito civil en algunas áreas de la logística debe ser aprovechado por las instituciones militares, estas deben adaptar las herramientas civiles a planos militares para así desarrollar sistemas de logística militar más eficaces y eficientes. En este sentido, dentro de las áreas de estudio más avanzadas que presentan las organizaciones civiles es la gestión de la cadena de suministro, que tal como se vio en esta investigación, presenta marcadas similitudes con la cadena de abastecimiento que poseen las organizaciones militares.

Los modelos matemáticos fundamentales usados en esta investigación, fueron los propuestos por Lanchester, los que han sido un gran aporte para el estudio de las ciencias militares. En algunos casos, los modelos Lanchesterianos han logrado un alto grado de certeza en la predicción de bajas de los Ejércitos, pudiendo ser validados para ciertas batallas históricas, principalmente ocurridas en la Segunda Guerra Mundial.

Los modelos de Lanchester, presentan una idea general del nivel de bajas de los Ejércitos, conocidos su rendimiento y tamaño de fuerzas, por lo cual hace que sólo representen una idea genérica de lo que puede acontecer bajo estos parámetros. Para eliminar la generalización de estos modelos matemáticos de combate, se han propuesto una gran variedad de modelos particulares que permitan hacer el estudio del proceso de batalla, en varios submodelos. Entre los modelos más estudiados se encuentran los de vulnerabilidad, detectores, de precisión de disparo, entre otros.

Aun cuando los modelos de combate propuestos por Lanchester han resultado de gran ayuda para el entendimiento de la guerra, sus principales detractores argumentan la clara abstracción que tienen estas ecuaciones sobre los factores humanos, tales como la moral, cohesión y confianza en los altos mandos. Es por esto que para muchas batallas, los resultados entregados por estos modelos matemáticos resultan completamente alejados de los resultados reales.

Resulta imposible decir con certeza que un modelo matemático, uno conceptual, o uno computacional, es mejor predictor que otro. El nivel de precisión que pueda establecerse en el modelo propuesto dependerá de la naturaleza del problema que se este llevando a cabo.

La simulación es la herramienta que actualmente se encuentra liderando el mundo de las técnicas de modelación dada su alta flexibilidad.

La simulación discreta es una potente herramienta que tiene aplicaciones prácticamente en todas las áreas, incluyendo obviamente, el área

militar, dando apoyo a operaciones humanitarias, catástrofes y operaciones de paz. El uso de la simulación puede ayudar a probar la eficiencia de las distintas políticas impuestas por la doctrina militar existente, y además, proponer cambios en ella que permitan establecer mejoras o ver el comportamiento de los indicadores de desempeño tras las modificaciones.

Al comenzar este trabajo de investigación, la visión iba enfocada a generar un gran modelo computacional que permitiera abarcar todas las áreas de la logística militar. Finalmente se optó por proponer submodelos que representaran áreas particulares, debido a que actualmente no existe un nivel adecuado de datos que permita representar a través de un modelo computacional único, la logística militar en su integridad.

Para realizar un estudio de simulación creíble, es necesario contar con datos de entrada creíbles. En este aspecto es donde se presenta hoy en día el punto débil de la simulación discreta enfocada a ámbitos militares. Por este motivo el proceso de validación no fue llevado a cabo.

Para analizar la veracidad de las respuestas entregadas por modelos propuestos, se hace necesaria la comparación de los resultados entregados por el modelo computacional, con los ocurridos durante los entrenamientos en vivo. Sólo así, podrá ser ajustado el modelo para una posterior experimentación y evaluación de distintas políticas o procedimientos a seguir. Como propuesta futura para recopilar datos desde los entrenamientos en vivo, pueden incorporarse cámaras, sensores y GPS, que permitan la generación de indicadores de importancia. El costo marginal de instalación de estos artefactos, es relativamente bajo comparado con los costos en los que se incurre para realizar un entrenamiento en vivo.

Otra alternativa para generar datos de calidad, es aprovechando el alto avance que tienen los simuladores o entrenadores, de los cuales se puede obtener información valiosa que serviría para comprobar el nivel de certeza de futuros estudios de simulación.

Dentro del desarrollo de este trabajo de investigación, se generó la simulación de la Batalla de El Alamein, en base a esto, es necesario recordar que la simulación de batallas ocurridas, es únicamente en base a hipótesis, y nunca podrá saberse con certeza que hubiera pasado bajo otras condiciones de combate, ya que estas distintas condiciones, conllevarían distintas estrategias y tácticas adoptadas por los bandos en conflicto.

Se hace recomendable la utilización de diversos métodos para la medición de resultados de un combate. En este trabajo de investigación sólo se utilizó la simulación discreta basada fundamentalmente en modelos matemáticos, por lo que representa sólo una visión de un problema que puede abordarse de muchas maneras.

A futuro podrían hacerse análisis de convergencia entre distintas herramientas, tales como inteligencia artificial, simulación de agentes, simulacros, simuladores, ejercicios en vivo y otros. Mediante el análisis comparativo puede concluirse en qué ocasiones se hará recomendable el uso de una u otra herramienta de predicción.

Una importante área de investigación futura que actualmente no se encuentra muy desarrollada, y que sería de vital importancia para las operaciones militares, es la integración de softwares como Arena, con aplicaciones de sistema de información geográfica, más conocidos como programas GIS (Geographic Information System).

En cuanto a los modelos desarrollados se puede concluir que:

El modelo de logística de abastecimiento de combustible, permitió demostrar que la simulación discreta puede ser ampliamente utilizada en este tipo de sistemas, pudiendo proyectarse modelos de carguío de municiones, abastecimiento de agua, alimento, vestimenta, repuestos y otros. Dado a que en la actualidad los conflictos son cada vez más rápidos, si se desea salir victorioso, se necesita un sistema logístico de abastecimiento que permita

mover altas toneladas en cortos tiempos, para lo cual se requiere una gran coordinación entre todas las unidades participantes del proceso.

Un modelo como éste, también puede ser adaptado para prestar ayuda en operaciones de paz, proporcionando apoyo tanto a las tropas, como a los habitantes del territorio en conflicto. En otro tipo de desastres, ya sean naturales o causados por el hombre, se puede dar el apoyo logístico realizando el transporte de alimentos, medicamentos y artículos básicos de subsistencia, que permitan mantener controlada la hambruna, la salud y posteriormente el apoyo para la reconstrucción en caso de ser necesario.

Por lo tanto, la herramienta de la simulación, permitirá que la capacidad operativa de los Ejércitos sea la adecuada para cada escenario de catástrofe o desastre.

En cuanto a las nuevas tendencias de abastecimiento se puede afirmar que el abastecimiento aéreo ha marcado la diferencia durante los conflictos ocurridos en las últimas décadas, debido a que el transporte aéreo presenta una mayor seguridad, mejor tiempo de respuesta y alta flexibilidad. En este sentido, la desventaja que puede presentar el abastecimiento aéreo, es su costo y el alto consumo de combustible. De todas formas, tal como se mostró en el capítulo II, el nivel de costos no es un factor preponderante para la logística militar, sobre todo bajo las actuales condiciones de combate.

El abastecimiento de combustible, ha sido la primera preocupación de los ejércitos, ya que el 70% de los suministros consumidos por las tropas en condiciones de guerra, corresponden a los suministros clase 3. En este sentido, la experiencia del Ejército de Estados Unidos en Irak, ha entregado buenos resultados en cuanto a su rendimiento. Su eficiencia ha mejorado principalmente por el uso de sus estanques flexibles de combustible, los cuales están confeccionados para todo tipo de misión gracias a su diversidad de tamaños, los que pueden ser usados para abastecer unidades pequeñas o para almacenaje de combustible.

En base a estas nuevas tendencias, sería de gran ayuda la realización de un estudio de simulación que permita medir el rendimiento y las ventajas cuantitativas que representa la puesta en marcha de estas nuevas formas de abastecimiento.

Los resultados del modelo médico, mostraron que la variación en los recursos asignados a las unidades militares, realmente podrían modificar los indicadores de desempeño del sistema. Un modelo como éste, toma vital importancia en caso de catástrofe, ya que por lo general, se origina una gran cantidad de heridos en poco tiempo, por lo que es imprescindible la adecuada utilización de los recursos disponibles, que para este tipo de escenarios siempre serán escasos.

Además, las fases de la logística médica pueden abordarse en su totalidad mediante la simulación discreta, es decir, se puede modelar la clasificación del herido, su traslado, su tratamiento dentro del hospital y finalmente el proceso de evacuación del herido. En la actualidad, los modelos hospitalarios en el plano civil, se encuentran altamente desarrollados y validados, por lo que pueden ser adaptados para usos militares y así realizar una mejor gestión de los recursos médicos en caso de desastre o misiones de paz.

Conocido el importante factor que representa la rapidez de acción con que actúen los equipos encargados de los servicios médicos, mundialmente se están estudiando técnicas que permitan reducir el tiempo en que el herido espera por atención médica, ejemplo de esto, son los FST utilizados actualmente por el Ejército de Estados Unidos en Irak.

Del modelo médico puede verse que es factible la recopilación de datos a partir de simuladores, para luego hacer el análisis y realizar la experimentación computacional para ver la incidencia de la puesta en marcha de las distintas políticas o planes de acción seguidos.

En el modelo de mantenimiento y recuperación, se vio la clara importancia que representa para el conflicto, la capacidad de cada ejército de reparar en el menor tiempo posible a sus vehículos y armamento en general. Es por esto que se hace necesario un cierto grado de estandarización de los instrumentos y armas utilizadas, para así reducir el tiempo de atención al mínimo posible.

Dentro del modelo de mantenimiento es posible desarrollar un submodelo, que separe por categoría el tipo de mantención o reparación que requiere un vehículo, el tiempo de recuperación y el tiempo en que es trasladado desde el taller hasta su lugar de destino.

Además, es posible la creación de un modelo que ayude a la mantención y reparación preventiva del armamento, para así, mantener el óptimo rendimiento del equipamiento en todo momento, de tal forma de prestar la ayuda adecuada ante algún escenario complejo.

Finalmente queda demostrado con este estudio, que la logística militar, puede ser tratada prácticamente en su integridad utilizando la simulación, lo que ayudaría al proceso de toma de decisiones en casos de desastre natural o causado por el hombre, ayuda humanitaria y en operaciones de mantención de paz y seguridad.

Para lograr un mayor avance en los modelos de simulación discreta aplicados a operaciones militares, es necesario que los Ejércitos comiencen un proceso de recolección de datos, ya que es en esta fase que se encuentra la gran limitación que impide el avance hacia la construcción de modelos más certeros.

BIBLIOGRAFÍA

- Arena Simulation Software 10.0, Rockwell Software Inc.
- Avances En Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones para la seguridad y la Defensa. Centro Superior de estudios de la Defensa Nacional. Julio 2006
- Banks, Jerry. Carson, John. Nelson, Nelson Barry. 2004. Discrete - Event System Simulation. 4ª ed. Editorial Pearson. 608p.
- Bowman, T. y Little, R. 2003. Protection of resupply lines in Iraq troublesome. [en línea] <http://redeye.chicagotribune.com/bal-te.military25mar25,0,7659465.story> [consulta: 05 marzo 2009]
- Bracken, J. 1995. Lanchester Models of the Ardennes Campaign, Naval Research Logistics 42: 559-577.
- Brea, Elbert. ¿Optimización por Simulación u Optimización para la Simulación?. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela
- Centro de Evaluación de Fuerzas y Estrategia del Ejército de Estados Unidos. 1998. Kursk Operation Simulation and Validation Exercise – Phase II. Maryland, EEUU. 332p
- Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional. 2006. Avances en Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones para la Seguridad y la Defensa. España. 146p
- Chen, P. S, P. Chu. 2000. Applying Lanchester's Linear Law to Model the Ardennes Campaign. Naval Research Logistics 48: 653-661.
- Deitchman, S. J. 1962. A Lanchester Model of Guerrilla Warfare. Operations Research 10: 818-827.

- Hogan, D. E. y Burstein J.L. 2007. Disaster Medicine. 2ª Edición. Lippincott Williams & Wilkins. 512p
- Gandil, A. 1999. Carros de combate. Evolución, presente y futuro. 208p
- Gioitia, A. Millán, J. y Zurita, A. 1999. Clasificación de heridos en catástrofes. Revista Emergencias 11: 132-140.
- Gobierno de Chile. 2002. Libro de Defensa Nacional. [en línea] <http://www.defensa.cl/libro-defensa/index.php> [consulta: 05 marzo 2009]
- H.G. von Eisebeck. 1955. Rommel y el Afrika Korps. Buenos Aires. Circulo Militar
- Hartley, D.S. 2001. Predicting Combat Effects, INFORMS Military Applications Society, Linthicum, MD.
- Hartley, D.S. y R.L. Helmbold. 1995. Validating Lanchester's Square Law and Other Attrition Models, Naval Research Logistics 42: 609-633.
- Headquarters Department of the Army. April 1998. Field Manual Us Army. FM 10-67-1: Concepts and Equipment of Petroleum Operations. 571p.
- Headquarters Department of the Army. August 2002. Field Manual US Army. FM 4-02.6: The Medical Company. 263p
- Headquarters Department of the Army. 2006. Field Manual Us Army. FM 4-02.51: Combat and Operational stress Control. 115p
- Helmbold, R. L. 1965. A Modification of Lanchester's Equations. Operations Research 65: 857-859.

- Intelligence Bulletin. 1942. Developments in Desert Warfare. [en línea] <http://www.lonesentry.com/articles/devdesert/index.html> [consulta: 05 marzo 2009]
- Intelligence Bulletin. 1942. Notes from the North African Theater. [en línea] <http://www.lonesentry.com/articles/notesna/index.html> [consulta: 05 marzo 2009]
- Intelligence Bulletin. 1943. German Tank Maintenance and Recovery. [en línea] <http://www.lonesentry.com/articles/tankmaint/index.html> [consulta: 05 marzo 2009]
- Jones. D. 2002. Simulation-based Assessment of the Ambulance Support for a Battlegroup in Action. Magister en Investigación Operativa Militar. Inglaterra. Cranfield University.
- Kauer, H. análisis y lecciones de la participación chilena en Haití. Revista Marina 2. 2006: 109-127
- Lanchester models and the Battle of Britain. Ian R. Johnson and Niall J. MacKay. Department of Mathematics, University of York, UK, 8th January 2008, revised 31st July 2008
- Lanchester models for mixed forces with semi-dynamical target allocation. N. J. MacKay. Department of Mathematics, University of York, UK, June 2008
- Lanchester, F.W. 1916. Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm. Londres, Inglaterra. 222p.
- Law, Averill M.y Kelton, W. David. 1997. Simulation Modeling Analysis. 2ª ed. Editorial Mc Graw Hill International. 544p.

- Leggieri, J y Perdue, W. Sept – Oct 2000. Collapsible Petroleum Tanks: Past, Present, and Future. *Army Logistician Review* 40 (2): 40 – 44.
- Lenzino, J. Sept – Oct 2002. Anticipatory Logistics: The Army's Answer to Supply Chain Management. *Army Logistician Review* 34 (5): 11 – 13
- Lucas, T. W., y T. Turkes. 2004. Fitting Lanchester Equations to the Battles of Kursk and Ardennes. *Naval Research Logistics* 51: 95-115.
- Major General sir F. De Guingand. 1948. Operación Victoria. Tomo I. Buenos Aires. Circulo Militar
- Mariscal de Campo Vizconde B. L. Montgomery. 1949. De El Alamein al Rio Sangro. Buenos Aires. Circulo Militar
- Mass-Casualty Triage: Time for an Evidence-Based Approach. Jenkins. Jennifer
- Military Operations Research Society (MORS). 1995. Warfare Modeling. 594p.
- Military Operations Research Society (MORS). Military Modeling for Decision Making. 3ª ed. 375p.
- MIT. 2003. An Analysis of the Department of Defense Supply Chain: Potential Applications of the Auto-ID Center Technology to Improve Effectiveness
- Modeling the Lanchester Laws with System Dynamics. Michael J. Artelli (Headquarters Air Combat Command) Y Richard F. Deckro (Air Force Institute of Technology)

- Modelos dinámicos de guerra. José Fernando Isaza (Fundacion Mazda) y Diogenes Campos (Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá)
- Natkiel, R. 2000. Atlas of World War II. Barnes & Noble. 191p
- Osipov, M. 1915. The influence of the Numerical Strength of Engaged Sides on Their Casualties. Voennyi Sbornik, Vol. 6-10, pp. 59-74, 25-36, 31-40, 25-37, 93-96.
- OTAN. 2007. NATO Logistics Handbook. 188p
- Revista del Suboficial. N°662. Triage. Sargento Hector Ricardo Medina. 2006
- Ruiz, J. 2007. Llegar: Manual de Transportes en Operaciones de Proyección. Jaen, España. 204p.
- Simulación Con Arena. 2008. Por Kelton, W. David "et al". 4ª ed. Mexico. Mc Graw Hill International. 631p.
- Simulación y Análisis de Sistemas con Promodel. 2006. Por Eduardo García "et al". Monterrey, México. Pearson- Prentice Hall. 270p
- Soldier Performance in Continuous Operations. Research Institute for the Behavioral and Social Sciences. 1985. 82p.
- Stewart Robinson. 2004. Simulation: The Practice of Model Development and Use. John Wiley & Sons, Ltd. 328p
- Teniente Coronel (R)Sievers, K. 2008. Batallas de la Segunda Guerra Mundial. [diapositivas] Santiago, Chile.

- The Effect of Battle Circumstances on Fitting Lanchester Equations to the Battle of Kursk. Thomas W. Lucas Operations Research Department, Naval Postgraduate School y John A. Dinges United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth
- Triage of war-injured troops in the Iran-Irak War. Masoud Saghafi-Nia, Seyed Masoud Khatami, Nahid Nadissi, Yadollah Rezaei. Journal of Research in Medical Sciences. January & February 2008 Vol 13(1): 8 – 11
- Una explicación matemática al triunfo militar de Anibal en la batalla de Cannas. Maria A. H. Maestre Yenes
- United States General Accounting Office. 2003. Aerial Refueling Tankers. 8p
- Vargas, F. 2006. El conflicto Estado-Insurgencia: Modelando el Crecimiento Organizacional de una Insurgencia. CESNAV 3.1 – 15.
- Verification and Validation of the Fractal Attrition Equation. Nigel Perry. Defence Systems Analysis Division. Defence Science and Technology Organisation. 2006
- Warfare Modeling. MORS. 1996. Por Bracken, J. "et al". Alexandria, VA. Estados Unidos. 600p.
- Wilbeck, C. 2002. Swinging the Sledgehammer: The Combat Effectiveness of German Heavy Tank Battalions in World War II. Memoria Master de Ciencia y Arte Militar. Kansas, USA. Command And General Staff College. 143p
- Winter Simulation Conference, www.wintersim.org








GLOSARIO

(R)	: Retirado
ABFDS	: Aerial Bulk Fuel Delivery System (Sistema Aéreo de Entrega de Combustible)
CAD	: Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computador)
CLO	: Chase-Lanchester-Osipov
CSCMP	: Council of Supply Chain Management Professionals (Consejo de Profesionales de la Gestión de la Cadena de Suministro)
DAF	: Desert Air Force
DOD	: Department of Defence (Departamento de Defensa de Estados Unidos)
ERP	: Enterprise Resource Planning (Planificación de Recursos de la Empresa)
FARC	: Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia
JIT	: Just In Time (Justo a Tiempo)
KIA	: Killed In Action (Muertos en Acción)
KPI	: Key Performance Indicators (Indicadores Clave de Desempeño)
MRP	: Material Requirements Planning (Planificación de Requerimientos de Material)
MRP II	: Manufacturing Resource Planning (Planificación de Recursos de Manufactura)
OMS	: Organización Mundial de la Salud
ONU	: Organización de las Naciones Unidas
OPT	: Optimized Production Technology (Tecnologías de Optimización de la Producción)
OTAN (NATO)	: Organización del Tratado Atlántico Norte
PERT	: Program Evaluation and Review Technique
Pz Div	: División de Panzer
RAF	: Royal Air Force
SAP	: Systeme, Anwendungen und Produkte (Sistemas, Aplicaciones y Productos)
SCE	: Suma del Cuadrado de los Errores
SCT	: Suma de los Cuadrados Totales

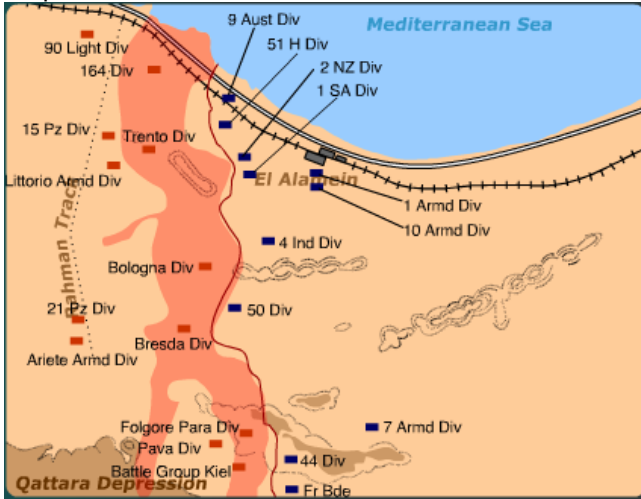
TCIA	: Total Casualties In Action (Total Bajas en Acción)
TICS	: Tecnologías de Información y Comunicación
TOC	: Theory Of Constraints (Teoría de Restricciones)
UMM	: Unidad Médica Móvil
USAF	: United States Air Force
WIA	: Wounded In Action (Dañados o Heridos en Acción)

ANEXO A: Mapas de Movimientos de los Ejércitos en El Alamein

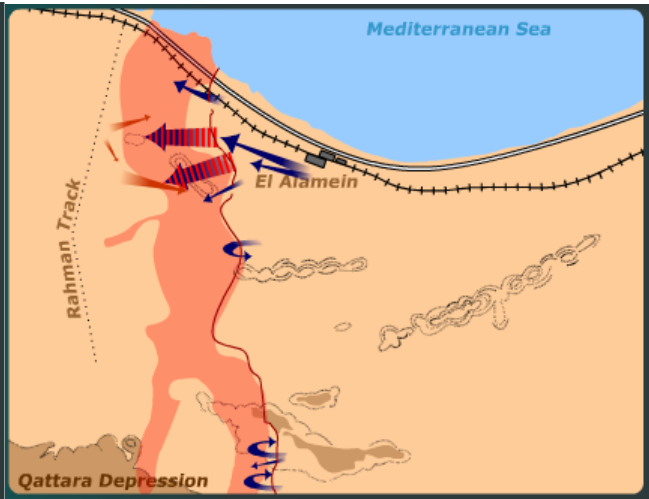
Simbología

	Allied moves		Front line
	Axis moves		Minefield
	Axis units		Minefield pathways
	Allied units	<input type="checkbox"/>	Close

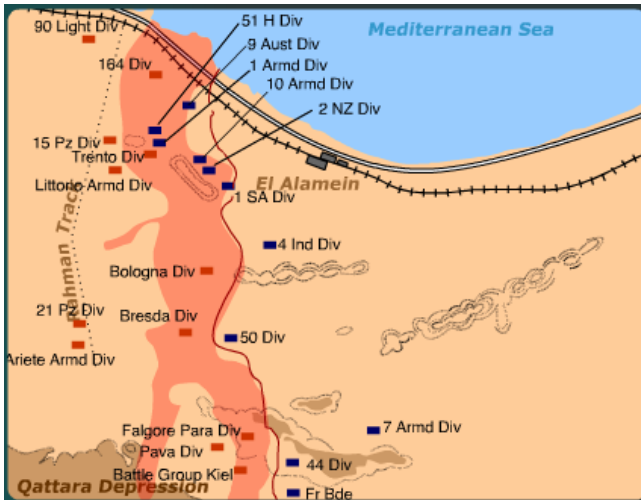
Disposición Inicial



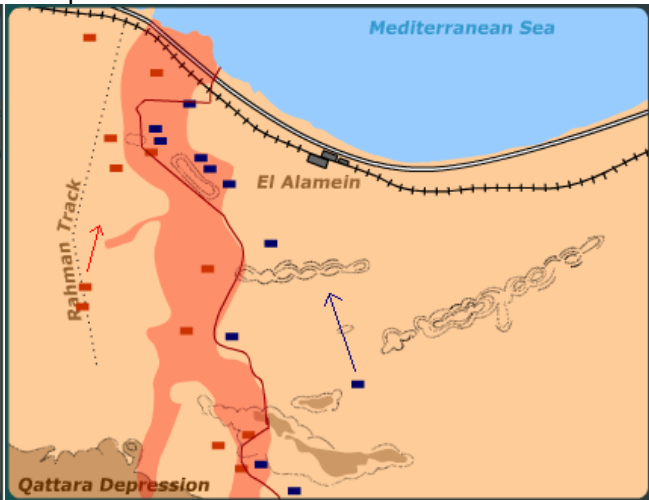
Noche 23/24 de Octubre



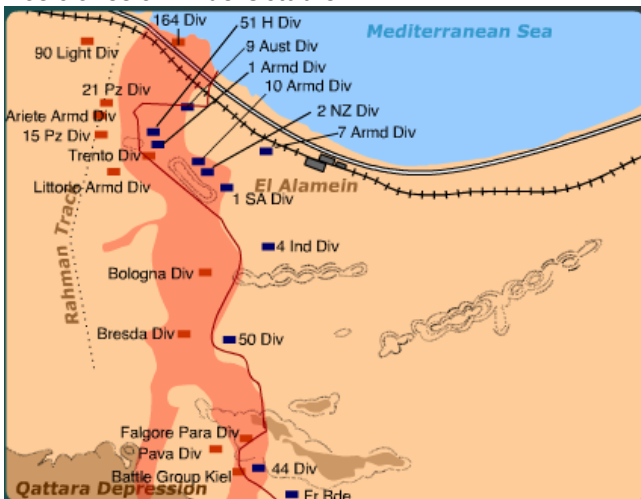
Posiciones al 25 de Octubre



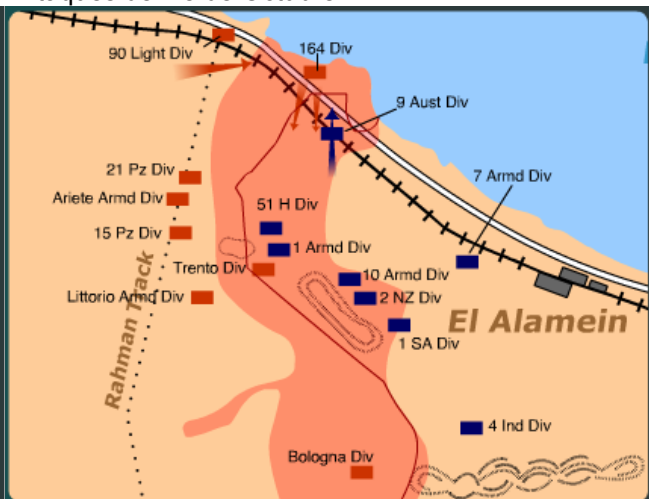
Ataques del 26 de Octubre



Posiciones al 27 de Octubre



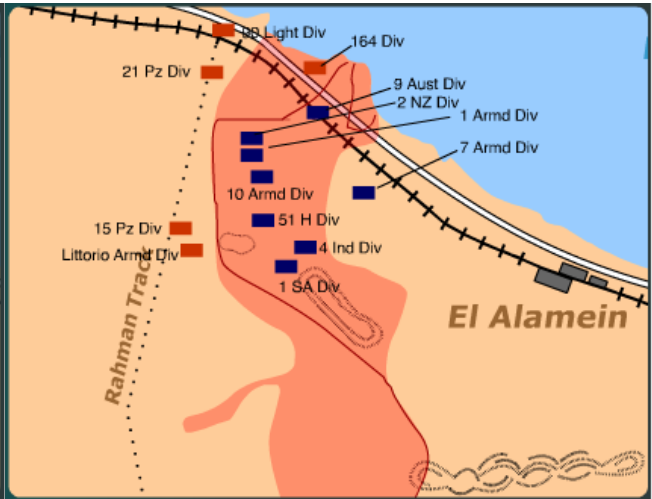
Ataques del 28 de Octubre



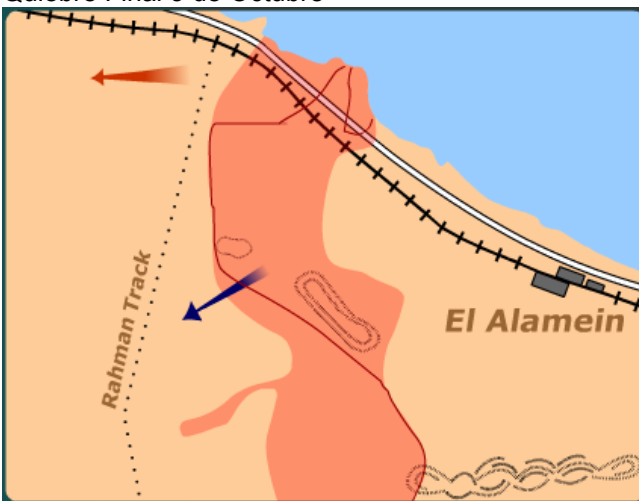
Inicio Supercharge 1 / 2 de Octubre



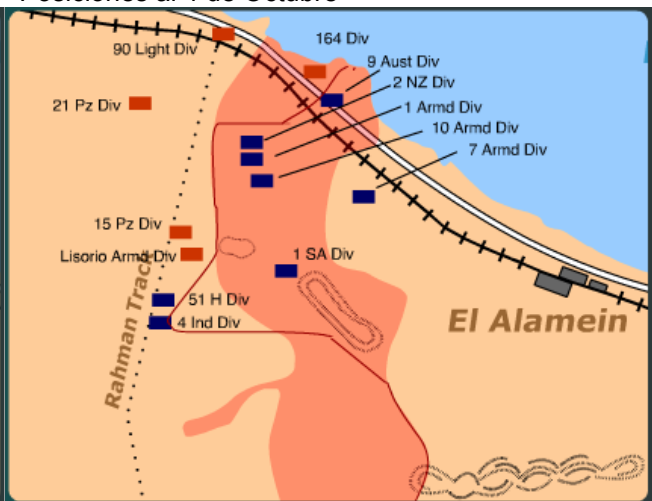
Posiciones al 3 de Octubre



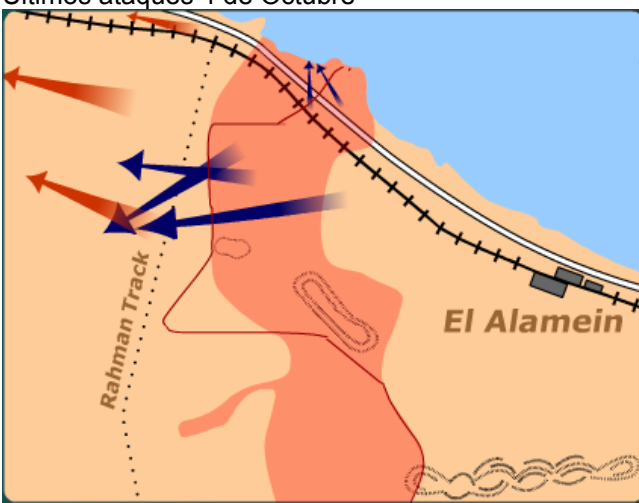
Quiebre Final 3 de Octubre



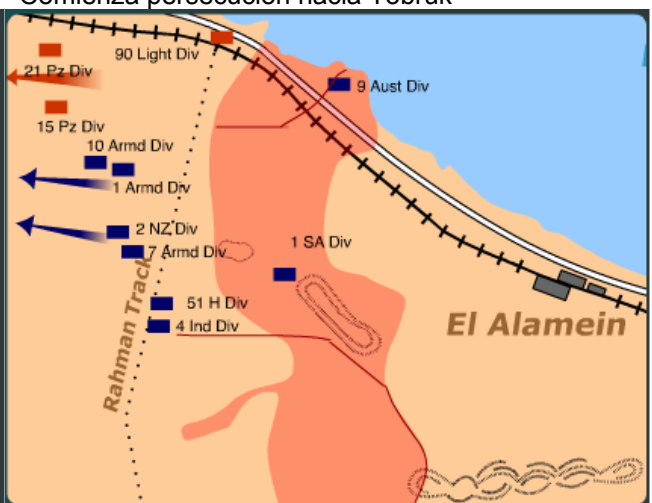
Posiciones al 4 de Octubre



Últimos ataques 4 de Octubre



Comienza persecución hacia Tobruk



ANEXO B: Resultados Del Modelo de Logística Médica

Resultados Obtenidos para el Escenario Inicial

Réplica	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
1	54	60,36	36,33
2	29	47,99	38,09
3	61	78,40	37,79
4	87	68,81	36,90
5	35	53,29	37,32
6	95	67,69	36,27
7	38	66,34	37,66
8	48	42,02	38,93
9	70	72,47	37,55
10	45	69,46	38,04
11	41	65,38	38,50
12	81	71,38	37,08
13	43	87,48	37,19
14	31	66,20	40,32
15	61	91,65	38,30
16	70	77,36	37,60
17	19	27,82	38,30
18	63	101,44	37,07
19	60	91,11	37,80
20	53	46,06	37,58
21	39	40,38	37,47
22	87	76,19	38,14
23	25	29,84	37,48
24	52	59,26	39,14
25	110	85,02	37,40
26	64	66,74	38,89

Resultados Obtenidos para el Escenario 2

Réplica	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
1	7	0,68	32,07
2	8	0,62	33,00
3	7	0,88	33,86
4	10	2,13	33,03
5	7	0,78	34,43
6	9	1,77	32,18
7	16	4,07	35,88
8	9	0,95	34,09
9	9	1,06	32,27
10	6	0,67	32,93
11	12	2,26	34,05

12	9	1,44	33,80
13	6	0,59	33,96
14	7	0,91	33,42
15	6	0,66	33,09
16	7	0,81	35,02
17	5	0,80	33,66
18	17	3,82	33,90
19	7	0,97	34,28
20	8	0,74	34,37
21	4	0,23	33,57
22	11	1,22	34,20
23	5	0,65	32,18
24	8	0,78	32,35
25	11	3,13	32,77
26	12	3,10	33,92

Resultados Obtenidos para el Escenario 3

Réplica	Máximo promedio cola	Tiempo espera ambulancia	Tiempo espera y traslado P1
1	22	30,10	35,75
2	17	18,50	34,06
3	22	28,31	35,54
4	47	61,23	37,39
5	26	24,93	36,79
6	48	74,45	35,17
7	24	29,53	37,03
8	22	10,72	35,59
9	27	15,08	34,77
10	24	45,75	38,66
11	16	13,00	34,37
12	38	54,14	37,27
13	38	69,23	38,03
14	28	33,42	36,54
15	24	38,77	35,30
16	19	21,24	35,93
17	18	9,95	36,01
18	26	39,80	37,85
19	41	73,33	37,81
20	13	10,00	34,52
21	11	8,80	34,69
22	27	52,03	38,95
23	18	9,09	35,66
24	35	34,50	34,43
25	73	83,80	37,93
26	28	33,70	35,41

Resultados estadísticos entregados por StatGraphics

❖ **Máximo Promedio de Soldados Esperando por una Ambulancia**

Gráfico de Cajas y Bigotes Máximo Promedio Cola

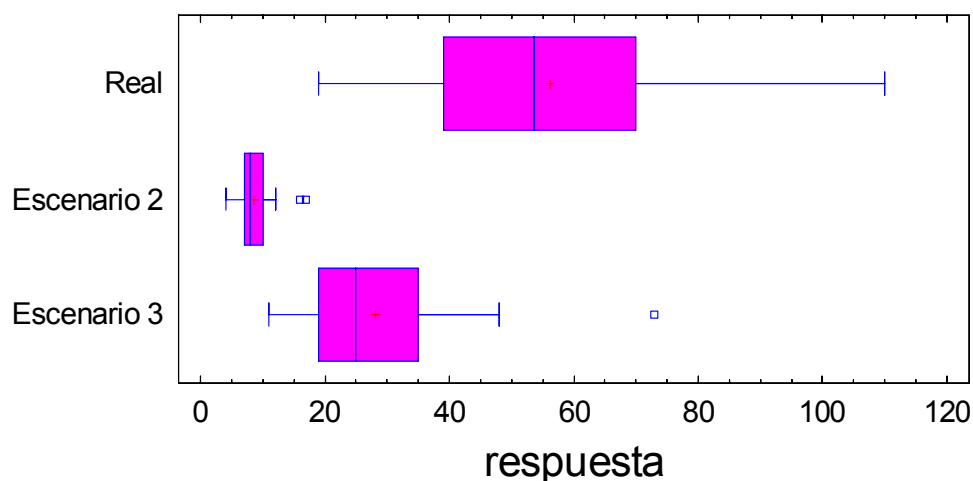


Tabla ANOVA

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	29784,2	2	14892,1	63,55	0,0000
Intra grupos	17575,8	75	234,344		
Total (Corr.)	47359,9	77			

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de cada grupo. El F-ratio, que en este caso es igual a 63,5481, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables a un nivel de confianza del 95,0%.

❖ **Tiempo promedio de espera por una Ambulancia**

Gráfico de Cajas y Bigotes Espera Ambulancia

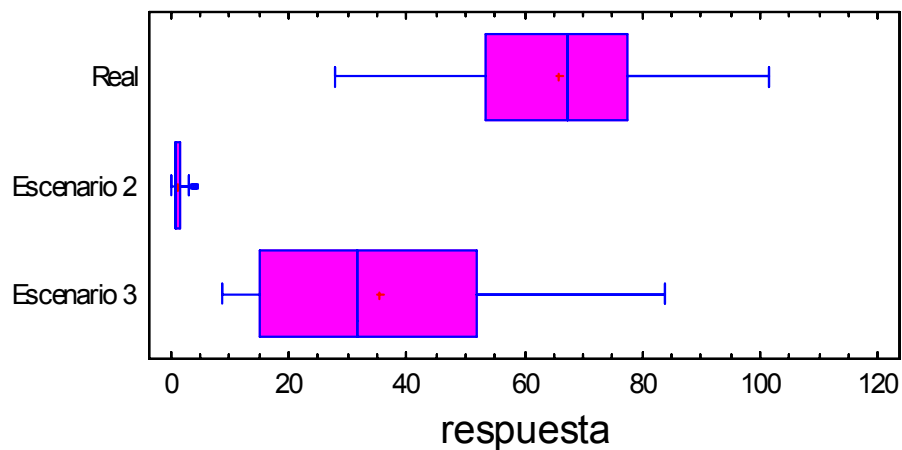


Tabla ANOVA

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	53982,3	2	26991,1	93,51	0,0000
Intra grupos	21648,6	75	288,648		
Total (Corr.)	75630,9	77			

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de cada grupo. El F-ratio, que en este caso es igual a 93,5089, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables a un nivel de confianza del 95,0%.

❖ **Tiempo de Espera y Traslado de un Herido Prioridad 1**

Gráfico de Cajas y Bigotes Espera + Traslado Herido P1

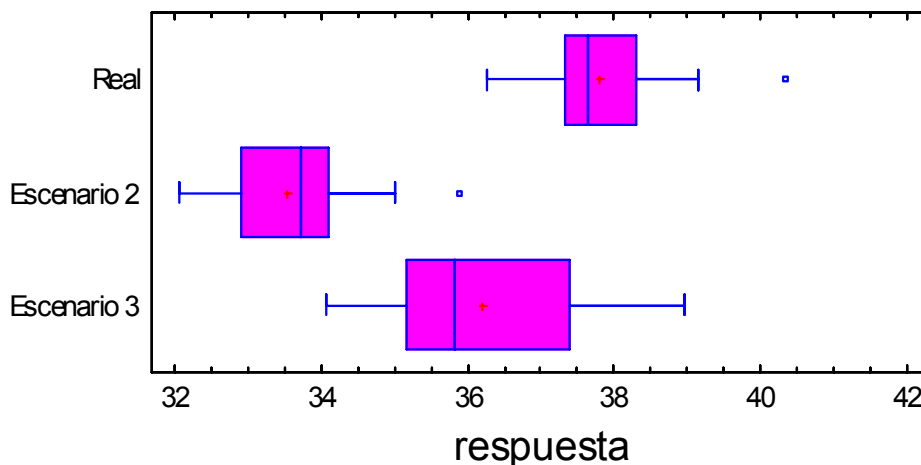


Tabla ANOVA

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	241,186	2	120,593	97,88	0,0000
Intra grupos	92,4066	75	1,23209		
Total (Corr.)	333,592	77			

El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de cada grupo. El F-ratio, que en este caso es igual a 97,8768, es el cociente de la estimación entre grupos y la estimación dentro de los grupos. Puesto que el p-valor del test F es inferior a 0,05, hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables a un nivel de confianza del 95,0%. Para determinar las