



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

*Análisis de los factores determinantes que mejoran
la productividad de un almacén multicliente,
simulación y optimización de procesos*

*Analysis of determining factors that improve the productivity of a multiclient warehouse,
simulation and processes optimization*

Autor:

Jaime Aróstegui Bracht

Directores:

Emilio Larrodé Pellicer

Carlos Millán Ibor

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

2018



**DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. JAIME ARÓSTEGUI BRACHT

con nº de DNI 26058364P en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
GRADO, (Título del Trabajo)

ANÁLISIS DE LOS FACTORES DETERMINANTES QUE MEJORAN LA
PRODUCTIVIDAD DE UN ALMACÉN MULTICLIENTE, SIMULACIÓN Y
OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 18 de abril de 2018


Fdo: _____

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han hecho posible este proyecto, y querría dedicarles al menos este pequeño apartado para agradecer su apoyo e inestimable ayuda.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis padres. Sus continuos sacrificios personales son lo que me ha permitido llegar a donde estoy. No sé dónde habría acabado sin ellos.

Es imprescindible incluir también a Emilio Larrodé. Fue a él a quien fui a ver por primera vez con un ligero interés en la logística y ninguna idea de por dónde seguir, y él ha sido quien me ha guiado desde entonces. Hizo por mí mucho más de lo que le correspondía como profesor, y por ello tiene mi más sincera gratitud.

Querría agradecer a Jesús Esteban el haber sido un excelente primer jefe de logística. Aunque no haya participado en este proyecto, ha sido un ejemplo para mí y me ha ayudado a profundizar todavía más mi creciente pasión por la cadena de suministro.

Y por último, no puede quedar fuera de este apartado el equipo de logística de ITAINNOVA, especialmente Carlos Millán. Ellos me mostraron por primera vez lo que era una simulación, y sus sugerencias han servido para terminar de darle forma a este trabajo.

Análisis de los factores determinantes que mejoran la productividad de un almacén multicliente, simulación y optimización de procesos

RESUMEN

Los almacenes son un elemento inherente de la cadena de suministro; su utilidad, ya sea para disminución de costes o mejora del servicio al cliente, los convierte en componentes imprescindibles. Sin embargo, a pesar de que su importancia se mantenga, con los años se han visto sometidos a numerosas transformaciones en un esfuerzo por adaptarse a un mercado en constante cambio y que exige una velocidad de respuesta cada vez mayor. El elevado coste de estas transformaciones, no obstante, exige un estudio previo exhaustivo que las justifique.

Este Trabajo de Fin de Grado va unido a uno de estos proyectos de transformación. El objetivo es simular el comportamiento de un almacén multicliente y analizar diversos factores que permitan mejorar el diseño y reducir los recursos necesarios para su funcionamiento antes de su puesta en marcha.

El proceso de análisis comienza con un estudio de los clientes que atenderá el almacén una vez adaptado para ello. Se obtienen horarios habituales, variaciones de stock y composición de inventarios de cada uno de ellos.

Con la información de los clientes se procede a crear el *layout* del almacén. Se asignan muelles y zonas del almacén a los clientes, contemplando también varias estrategias de almacenaje y su conveniencia, utilizando de apoyo dos aplicaciones desarrolladas en Excel para este trabajo.

Una vez planificada la disposición de los elementos en el almacén y las pautas de comportamiento que se seguirán en él, se construye un modelo de simulación con el programa Anylogic. El modelo permite, a través de la variación de parámetros como el número de carretillas, las horas de preparación de órdenes, el porcentaje de llenado del almacén o la utilización de un sistema de gestión de almacenes (SGA), estudiar en detalle el funcionamiento del almacén. De los parámetros de salida que se obtienen, se da especial importancia al tiempo de espera de los camiones desde que llegan al almacén hasta que se les asigna un muelle libre, aplicando la metodología de diseño de experimentos (DoE) para obtener la influencia que sobre él tienen los demás factores.

Con los resultados de la metodología DoE se procede a realizar un análisis en profundidad y finalmente se ofrecen proposiciones de mejora que reducen considerablemente los recursos necesarios a la vez que incrementan el nivel de servicio a los clientes. Además, se extraen varias conclusiones sobre los elementos que afectan a la efectividad de un SGA, y bajo qué condiciones resulta más conveniente instalarlo.

Este trabajo utiliza un vocabulario específico de almacenes, por lo que se recomienda a aquellos lectores sin experiencia en el sector realizar un repaso rápido del Anexo 1.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	12
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Objetivo del proyecto	13
1.2. Justificación del proyecto	13
1.3. Alcance del proyecto.....	13
2. DEFINICIÓN DEL CASO.....	14
3. METODOLOGÍA	15
4. ANTECEDENTES.....	17
5. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	18
6. ANÁLISIS PREVIO.....	19
6.1. Análisis de clientes	19
6.1.1. Análisis de inventarios.....	19
6.1.2. Análisis de viajes.....	19
6.1.3. Cliente 1 (C1)	20
6.1.4. Cliente 2 (C2)	21
6.1.5. Cliente 3 (C3)	22
6.1.6. Cliente 4 (C4)	23
6.1.7. Cliente 5 (C5)	25
6.1.8. Cliente 6 (C6)	26
6.1.9. Cliente 7 (C7)	27
6.1.10. Cliente 8 (C8)	27
6.1.11. Cliente 9 (C9)	28
6.1.12. Inventario combinado de clientes.....	28
6.1.13. Cálculo de espacio necesario	29
6.2. Asignación de muelles	30
6.3. Asignación de zonas.....	33
6.4. Comparación de estrategias	38
6.4.1. Distribución caótica.....	38
6.4.2. Distribución por clientes	38

6.4.3. Distribución por clientes y ABC	39
6.4.4. Distancias medias recorridas por hora.....	41
7. MODELO DE SIMULACIÓN	42
7.1. Desarrollo del modelo de simulación	42
7.1.1. Adaptación del layout	42
7.1.2. Entradas y salidas del almacén.....	42
7.1.3. Creación de órdenes	43
7.1.4. Carretillas	43
7.1.5. Cálculo en alturas	43
7.1.6. Playas.....	44
7.1.7. Entrada y salida de camiones.....	44
7.1.8. Congestión.....	44
7.1.9. Ocupación de muelles	44
7.1.10. Ocupación inicial del almacén.....	44
7.1.11. Tiempo de aviso para preparación de órdenes.....	45
7.1.12. Diseño del SGA. Comportamiento de carretillas.....	45
7.2. Metodología DoE	47
7.2.1. Sin SGA	47
7.2.2. Con SGA.....	48
7.3. Estudio de la variable principal	50
7.4. Análisis en detalle (sin SGA. 11 carretillas)	52
8. PROPUESTA DE MEJORA	56
8.1. Estudio de la influencia de las carretillas	56
8.2 Análisis en detalle (con SGA. 8 carretillas).....	58
9. ANÁLISIS DEL SGA	63
10. CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66
Anexo 1. Vocabulario	69
Anexo 2. Excel Warehouse Coordinates	72
Anexo 3. Excel Heat Map	81
Anexo 4. Programas utilizados.....	82
Anexo 5. Análisis del almacén en alturas.....	83
Anexo 6. Cálculo de distancias por hora para clientes con ABC	91
Anexo 7. Validación de la simulación.....	92
Anexo 8. Aplicación del DOE	94

Anexo 9. Resultados del análisis sin SGA, horarios cambiados, 11 carretillas.....	100
Anexo 10. Modelo de simulación. Imagen general.....	103
Anexo 10.1. Modelo de simulación sin SGA	103
Anexo 10.2. Modelo de simulación con SGA	105
Anexo 10.3. Elementos comunes a ambos modelos	107
Anexo 10.3.1. Elementos de Main	107
Anexo 10.3.2. Elementos de los agentes	108
Anexo 11. Funciones principales del modelo de simulación	109
Anexo 11.1. Congestión	109
Anexo 11.2. Sistema de gestión de almacenes.....	110
Anexo 11.3. Añadir pallets a órdenes de entrada.....	112
Anexo 11.4. Añadir pallets a órdenes de salida.....	115
Anexo 11.5. Iniciar stock.....	118

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Pasos en el análisis previo para el diseño del almacén.....	15
Ilustración 2. Pasos en el estudio con simulación del funcionamiento del almacén.....	16
Ilustración 3. Layout del almacén objeto del estudio.....	18
Ilustración 4. Análisis de inventario del cliente 1. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.	20
Ilustración 5. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 1 en la franja horaria estudiada.....	20
Ilustración 6. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 1 entre enero y junio de 2017.	20
Ilustración 7. Análisis de inventario del cliente 2. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.	21
Ilustración 8. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 2 en la franja horaria estudiada.....	21
Ilustración 9. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 2 entre enero y junio de 2017.	21
Ilustración 10. Análisis de inventario del cliente 3. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.	22
Ilustración 12. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 3 entre enero y junio de 2017.	22
Ilustración 11. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 3 en la franja horaria estudiada.....	22
Ilustración 13. Análisis de inventario del cliente 4. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.	23
Ilustración 14. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 4 en la franja horaria estudiada.	23
Ilustración 15. Número de camiones que entran los días que hay entradas al almacén del cliente 4, con su frecuencia en porcentaje.....	24
Ilustración 16. Número de camiones que salen del almacén los días que hay expediciones del cliente 4, con su frecuencia en porcentaje.....	24
Ilustración 17. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 4 entre enero y junio de 2017.	24
Ilustración 18. Análisis de inventario del cliente 5. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.	25
Ilustración 19. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 5 en la franja horaria estudiada.	25
Ilustración 20. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 5 entre enero y junio de 2017.	25
Ilustración 21. Análisis de inventario del cliente 6. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.	26
Ilustración 22. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 6 en la franja horaria estudiada.	26
Ilustración 23. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 6 entre enero y junio de 2017.	26

Ilustración 24. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 7 en la franja horaria estudiada.....	27
Ilustración 25. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 8 en la franja horaria estudiada.....	27
Ilustración 26. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 9 en la franja horaria estudiada.....	28
Ilustración 27. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 9 entre enero y junio de 2017	28
Ilustración 28. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) de los clientes 5 a 9 entre enero y junio de 2017	28
Ilustración 29. Movimiento de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora en cada muelle.	31
Ilustración 30. Movimiento total de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora.	32
Ilustración 31. Plano del almacén. Cada ubicación incluye su identificación y coordenadas.....	33
Ilustración 32. Mapa del almacén con la conveniencia de cada ubicación en base a la distancia ponderada a los muelles. Escala de verde (más conveniente) a rojo (poco conveniente).....	34
Ilustración 33. División del almacén en grupos según las preferencias en el uso de muelles.....	34
Ilustración 35. División generada automáticamente por distancias de los clientes y tipos de cargas (ABC).	35
Ilustración 34. Ubicaciones necesarias (rojo) para el porcentaje de llenado previsto del almacén (81%)......	35
Ilustración 36. División adaptada del almacén por clientes y tipo de carga (ABC). La C indica cliente. El primer número es el número de cliente y el segundo el tipo de carga (A es 1, B es 2 y C es 3)....	36
Ilustración 37. Utilización del almacén teniendo en cuenta alturas. Escala de verde (se utilizan todas las alturas) a rojo (se utilizan únicamente las 3 primeras alturas).	37
Ilustración 38. Distancia media recorrida desde un muelle hasta una carga con una distribución caótica y en función del porcentaje de llenado del almacén.	38
Ilustración 39. Distancias aproximadas (metros) a recorrer por las carretillas para completar las órdenes de cada hora.	41
Ilustración 40. Layout del almacén adaptada para el modelo de simulación.....	42
Ilustración 41. Factor de compensación (eje Y) en función de los pallets totales presentes en las playas (eje X).	45
Ilustración 42. Factor de compensación (eje Y) en función del tiempo restante en segundos para que deba estar lista la orden (eje X).	46
Ilustración 43. Modelo en 3D del almacén utilizado por la simulación.....	46
Ilustración 44. Resultado de los efectos principales por la metodología DoE para el caso sin SGA... <td>47</td>	47
Ilustración 45. Resultado de las interacciones por la metodología DoE para el caso sin SGA.....	47
Ilustración 46. Resultado de los efectos principales por la metodología DoE para el caso con SGA. 48	
Ilustración 47. Resultado de las interacciones por la metodología DoE para el caso con SGA.	48
Ilustración 48. Relación entre la espera máxima media de los camiones hasta que se les asigna un muelle (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.	50
Ilustración 49. Relación entre la utilización media de las carretillas y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.....	50
Ilustración 50. Relación entre el tiempo diario perdido por congestión (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.	51
Ilustración 51. Relación entre la espera total media de los camiones hasta que se les asigna un muelle y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.....	51
Ilustración 52. Utilización, por horas, de las carretillas (rojo) y los muelles (violeta).	52

Ilustración 53. Distribución de tareas de las carretillas a lo largo de la simulación.	52
Ilustración 54. Distancia recorrida por las carretillas en el periodo de tiempo simulado.	52
Ilustración 55. Espera de cada camión (eje Y, minutos) en relación con la hora asignada de llegada al almacén (eje X, hora).	53
Ilustración 56. Utilización individual de los muelles (primeras 5 imágenes) y del conjunto de muelles del lado Norte (muelles 1, 2 y 3) y del lado Sur (muelles 4 y 5).....	53
Ilustración 59. Utilización de todas las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.	54
Ilustración 58. Utilización de las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.	54
Ilustración 59. Utilización de las playas en número de órdenes presentes de manera simultánea...54	54
Ilustración 60. Tiempo perdido por problemas de congestión (minutos, eje Y) por hora (eje X).	54
Ilustración 61. Puntos en los que se produjeron cruces de carretillas (utilizado para el cálculo de congestión).	55
Ilustración 62. Relación entre la espera máxima media de los camiones hasta que se les asigna un muelle (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.	56
Ilustración 63. Relación entre la espera total media de los camiones hasta que se les asigna un muelle y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.	57
Ilustración 64. Relación entre el tiempo diario perdido por congestión (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.....	57
Ilustración 65. Relación entre la utilización media de las carretillas y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.....	57
Ilustración 66. Utilización, por horas, de las carretillas (rojo) y los muelles (violeta).	58
Ilustración 67. Distribución de tareas de las carretillas a lo largo de la simulación.	58
Ilustración 68. Distancia recorrida por las carretillas en el periodo de tiempo simulado.	58
Ilustración 69. Espera de cada camión (eje Y, minutos) en relación con la hora asignada de llegada al almacén (eje X, hora).	59
Ilustración 70. Utilización de las playas en número de órdenes presentes de manera simultánea...59	59
Ilustración 71. Utilización de las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.	59
Ilustración 72. Utilización de todas las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.	60
Ilustración 73. Utilización individual de los muelles (primeras 5 imágenes) y del conjunto de muelles del lado Norte (muelles 1, 2 y 3) y del lado Sur (muelles 4 y 5).....	60
Ilustración 74. Tiempo perdido por problemas de congestión (minutos, eje Y) por hora (eje X).	61
Ilustración 75. Puntos en los que se produjeron cruces de carretillas (utilizado para el cálculo de congestión).	61
Ilustración 76. Diferencia de recorridos con vuelta en vacío (izquierda) y con ciclo dual (derecha). En rojo se ven los trayectos en vacío. (Bartholdi & Hackman, 2017).	63
Ilustración 77. Pantalla principal de la aplicación Excel Warehouse Coordinates.....	73
Ilustración 78. Ejes X e Y del programa, con las medidas de las celdas.....	74
Ilustración 79. Mensaje avisando de un error en las dimensiones de las celdas o la carga.	74
Ilustración 80. Ventana para insertar fila de pallets horizontales.	75
Ilustración 81. Ventanas para insertar muelles.	76
Ilustración 82. Ventanas para asignar identificaciones a las ubicaciones.	76
Ilustración 83. Mensaje de error ante falta de correspondencia entre identificaciones y número de ubicaciones.	76

Ilustración 84. Ventanas para insertar un bloque de estanterías.....	77
Ilustración 85. Ejemplo de inserción masiva de identificaciones.	78
Ilustración 86. Ventana para insertar pasillos (arriba) y resultado del pasillo (abajo).	78
Ilustración 87. Resultado final del diseño de un almacén.	79
Ilustración 88. Pestaña para la extracción de las coordenadas.	79
Ilustración 89. Ejemplo de mapa de calor creado por la aplicación.	81
Ilustración 90. Logo de la empresa Minitab.....	82
Ilustración 91. Logo de Anylogic.	82
Ilustración 92. Mapa de calor del nivel 1 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	83
Ilustración 93. Mapa de calor del nivel 2 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	84
Ilustración 94. Mapa de calor del nivel 3 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	84
Ilustración 95. Mapa de calor del nivel 4 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	85
Ilustración 96. Mapa de calor del nivel 5 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	85
Ilustración 97. Mapa de calor del nivel 6 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	86
Ilustración 98. Mapa de calor del nivel 7 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).	86
Ilustración 99. Uso de ubicaciones del nivel 1 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.	87
Ilustración 100. Uso de ubicaciones del nivel 2 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81% ..	87
Ilustración 101. Uso de ubicaciones del nivel 3 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%..	88
Ilustración 102. Uso de ubicaciones del nivel 4 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%..	88
Ilustración 103. Uso de ubicaciones del nivel 5 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81% ..	89
Ilustración 104. Uso de ubicaciones del nivel 6 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%..	89
Ilustración 105. Uso de ubicaciones del nivel 7 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%..	90
Ilustración 106. Utilización del almacén teniendo en cuenta alturas. Escala de verde (se utilizan las 7 alturas) a rojo (se utilizan únicamente las 3 primeras alturas).	90
Ilustración 107. Relación entre el coste de la confianza en un modelo (a través de la validación) y el valor que aporta (G. Sargent, 2011).	92
Ilustración 108. Análisis de la varianza para el modelo sin SGA.	98
Ilustración 109. Análisis de la varianza para el modelo con SGA.....	99
Ilustración 110. Utilización, por horas, de las carretillas (rojo) y los muelles (violeta).	100
Ilustración 111. Distribución de tareas de las carretillas a lo largo de la simulación.	100
Ilustración 112. Espera de cada camión (eje Y, minutos) en relación con la hora asignada de llegada al almacén (eje X, hora).	100
Ilustración 113. Utilización de las playas en número de órdenes presentes de manera simultánea.	100
Ilustración 114. Utilización de las playas en número de pallets presentes de manera simultánea. 101	101
Ilustración 115. Utilización de todas las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.	101
Ilustración 116. Utilización individual de los muelles (primeras 5 imágenes) y del conjunto de muelles del lado Norte (muelles 1, 2 y 3) y del lado Sur (muelles 4 y 5).	101
Ilustración 117. Tiempo perdido por problemas de congestión (minutos, eje Y) por hora (eje X). .102	102

Ilustración 118. Puntos en los que se produjeron cruces de carretillas (utilizado para el cálculo de congestión)	102
Ilustración 119. Modelo de simulación, en Anylogic, sin el uso de un SGA.....	103
Ilustración 120. Esquema del modelo de simulación sin SGA.	104
Ilustración 121. Modelo de simulación, en Anylogic, con el uso de un SGA.	105
Ilustración 122. Esquema del modelo de simulación con SGA	106
Ilustración 123. Elementos presentes en el agente Main.....	107
Ilustración 124. Estados del agente Forklift.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de entrada y salida de la simulación que se utilizarán para la mejora de procesos del almacén.	14
Tabla 2. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 1.	20
Tabla 3. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 2.	21
Tabla 4. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 3.	22
Tabla 5. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 4.	23
Tabla 6. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 5.	25
Tabla 7. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 6.	26
Tabla 8. Cálculo de inventarios por cliente y de espacio que requerirán en el almacén (considerado como posiciones a nivel suelo).	29
Tabla 9. Movimientos de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora de cada cliente.	30
Tabla 10. Asignación de clientes a muelles.	30
Tabla 11. Movimiento de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora en cada muelle.	31
Tabla 12. Ponderaciones de uso de muelles de cada grupo de clientes.	34
Tabla 13. Distancias medias por cliente desde los muelles preferentes hasta la carga. Distribución por clientes del almacén.	39
Tabla 14. Distancias medias por cliente desde los muelles preferentes hasta la carga. Distribución por clientes y tipo de carga (ABC) del almacén. Ubicaciones óptimas.	39
Tabla 15. Distancias medias por cliente desde los muelles preferentes hasta la carga. Distribución por clientes y tipo de carga (ABC) del almacén. Ubicaciones adaptadas.	40
Tabla 16. Velocidad media de una carretilla. Datos provistos por ITAINNOVA.	43
Tabla 17. Tiempos medios para colocar o extraer cargas de una estantería o playa. Datos provistos por ITAINNOVA.	44
Tabla 18. Horario propuesto de entrada de camiones de los clientes 1, 2 y 3.	56
Tabla 19. Transformación del tiempo en elevar o bajar pallets desde diferentes alturas a metros.	83
Tabla 20. Distancias medias a cada zona del almacén, dividido por clientes y ABC.	91
Tabla 21. Metros medios a recorrer por hora para preparar los pedidos de cada hora.	91
Tabla 22. Resultados de las 322 repeticiones para realizar el DoE con y sin SGA.	97
Tabla 23. Elementos (parámetros, variables y arrays) de los diversos agentes del modelo de simulación.	108

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: MOVIMIENTO RELATIVO_n = MOVIMIENTO_n STOCK MEDIO_n	19
Ecuación 2: MOVIMIENTO ABSOLUTO_n = MOVIMIENTO_n	19
Ecuación 3: MOVIMIENTO ABSOLUTO ACUMULADO_n = i = 1nMOVIMIENTO ABSOLUTO_i	19
Ecuación 4: STOCK ACUMULADO_n = i = 1nSTOCK_i	19

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo del proyecto

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es obtener una imagen de los recursos necesarios y las limitaciones futuras de un almacén multicliente, y con esta información realizar combinaciones de factores para obtener mejores resultados en su funcionamiento, medido como el tiempo de retraso en la carga o descarga de los camiones de clientes.

Este objetivo se consigue a través de un análisis de los datos existentes de la empresa y la aplicación de un modelo de simulación capaz de reproducir el comportamiento futuro del almacén estudiado. A los resultados de la simulación se aplica la metodología DoE (diseño de experimentos) para analizar los efectos que la variación de diversos factores ejerce sobre el sistema, así como la interacción entre ellos.

1.2. Justificación del proyecto

Este trabajo se enmarca en un proyecto más grande y de coste elevado. Ante esta inversión, resulta imprescindible un estudio previo que sirva de base para la toma de decisiones. Además, se presenta una metodología para el análisis de almacenes combinando elementos de diferentes campos (análisis de datos, estadística y simulaciones) que puede servir de guía para futuros proyectos de características similares.

1.3. Alcance del proyecto

Este proyecto presenta diversos límites en su desarrollo. El primero es el periodo de simulación, restringido a las 18 horas de mayor actividad de un solo día debido a las restricciones presentes en la licencia de uso del software de simulación. Se trata de una limitación con efectos mínimos, ya que se varían los parámetros iniciales de la simulación para generar múltiples escenarios.

En la simulación se consideran únicamente las actividades de movimiento de pallets, ignorando cualquier tipo de manipulaciones. Esto se debe a que las manipulaciones realizadas son muy escasas y ni requerirán el uso de carretillas ni afectarán los tiempos de preparación de órdenes (se realizan mayoritariamente en franjas horarias distintas del día).

A la hora de considerar los tiempos de los procesos del almacén, las alturas de las estanterías son tenidas en cuenta sólo a partir de la aplicación del modelo de simulación.

2. DEFINICIÓN DEL CASO

El aumento en el volumen de negocio suele ser algo positivo, pero llegado cierto punto puede implicar la necesidad de un cambio, mejora o ampliación de instalaciones para ser capaz de absorber dicho incremento. El problema es que estas acciones conllevan importantes inversiones que, mal realizadas, pueden arrastrar a una empresa a la ruina. En el caso de un almacén, donde las inversiones son grandes (estanterías, muelles, carretillas...), las decisiones de este tipo deben tomarse con cuidado extremo para rentabilizar al máximo el dinero aportado.

Este trabajo forma parte de un proyecto de ampliación con un nuevo almacén. El análisis que se presenta a continuación estudia el futuro funcionamiento del almacén en base a las previsiones de comportamiento y volúmenes de los clientes, aportando una imagen previa de los recursos que serán necesarios, así como de posibles configuraciones y estrategias operativas que permitan minimizar dichos recursos y mejorar el servicio al cliente.

El estudio comenzará con la configuración del *layout*, asignando muelles y zonas a clientes en función de sus movimientos e inventarios, considerando la idoneidad de cada ubicación por su distancia ponderada a cada muelle y los clientes adyacentes. Sobre este *layout* se desarrollará una simulación con el programa Anylogic, introduciendo comportamientos adecuados para cada cliente y tipo de carga/pallet, así como factores de aleatoriedad que ofrezcan múltiples escenarios. A partir de diversos parámetros se observará cómo varían diferentes factores:

PARÁMETROS DE ENTRADA	PARÁMETROS MEDIDOS
Número de carretillas	Distancias recorridas por carretillas
Porcentaje llenado del almacén	Utilización de muelles
Tiempo previo para preparar órdenes	Distribución de tareas de carretillas
Sistema de Gestión de Almacenes (SGA)	Tiempos de espera de camiones
	Tiempo y puntos de congestión
	Uso de playas (número de pallets y órdenes)

Tabla 1. Parámetros de entrada y salida de la simulación que se utilizarán para la mejora de procesos del almacén.

De este modo, se podrán combinar los parámetros de entrada para estudiar su efecto y ofrecer así a la empresa una visión general previa a cualquier tipo de inversión. Se considera como principal resultado a valorar el tiempo de espera de los camiones para la asignación de muelles debido a su gran impacto en el servicio al cliente.

Entre los principales elementos a resolver se encuentra el desarrollo de algoritmos que permitan un mejor diseño del almacén, así como otro para simular la instalación de un SGA que distribuya correctamente las labores de los carretilleros. A ello se han de sumar dos modelos de simulación (con y sin SGA) capaces de imitar con precisión el comportamiento normal del almacén, y formas de calcular elementos tales como la congestión, para los que el software no está especialmente preparado.

3. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este trabajo sigue una línea de análisis propia basada en los datos y herramientas disponibles para su aplicación y puede dividirse en dos grandes bloques: análisis previo de datos y simulación.

El análisis previo tiene como función definir características y comportamientos de clientes, así como buscar una configuración adecuada del *layout* del almacén y establecer una estrategia de almacenado. Los pasos señalados son aplicados en orden, utilizando la información del paso anterior para llevar a cabo el siguiente.

Se comienza por un análisis de los clientes, estudiando sus stocks, horarios, frecuencias y peculiaridades. Esta información es utilizada para realizar una división de los muelles en base al volumen de movimientos de pallets y las horas de actividad. A su vez, la división de muelles permite, junto con los stocks individuales, establecer grupos de clientes que sirvan de criterio para valorar la conveniencia de las diferentes zonas del almacén. Estas zonas son asignadas a los clientes y se utilizan como base para estudiar las distintas estrategias de almacenado.

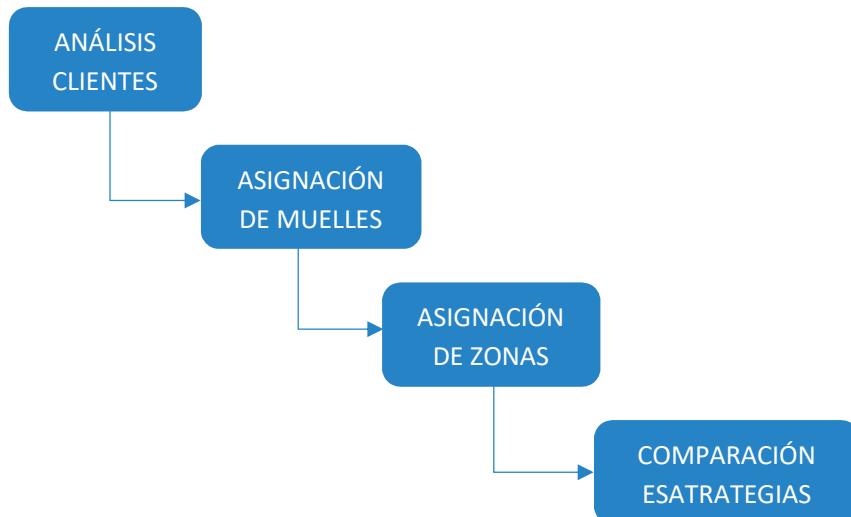


Ilustración 1. Pasos en el análisis previo para el diseño del almacén.

En esta primera etapa se utiliza Microsoft Excel para realizar los cálculos, un software suficiente para el volumen de datos provisto por la empresa colaboradora, así como dos aplicaciones desarrolladas con VBA en el mismo programa, *Excel Warehouse Coordinates* (Anexo 2) y *Excel Heat Map* (Anexo 3), creadas como apoyo para este trabajo.

La segunda parte del trabajo se centra en un modelo de simulación. Para ello se usa el programa Anylogic (Anexo 4), que presenta la ventaja de ser altamente flexible para el diseño de escenarios, si bien es necesario tener conocimientos de Java para poder utilizarlo correctamente (todo comportamiento relativamente complejo ha de ser programado en Java). Este modelo de simulación conseguirá, una vez validado¹, realizar un análisis detallado del almacén, permitiendo variar distintos factores para estudiar su influencia.

Para el examen de los parámetros de la simulación se aplicará la metodología de diseño de experimentos (DoE), más efectiva en general que la estrategia de un-factor-por-vez (OFAT), asignando como valor a medir el tiempo de espera de los camiones hasta entrar al muelle. Se utiliza para ello el programa Minitab (Anexo 4) (el motivo de elección de este programa es su disponibilidad en el Instituto Tecnológico de Aragón, ya que este tipo de software es de pago). Con la información del DoE y el resto de resultados de la simulación, podrá proponerse una organización del almacén y dar un adelanto de los recursos que serán necesarios para su funcionamiento.

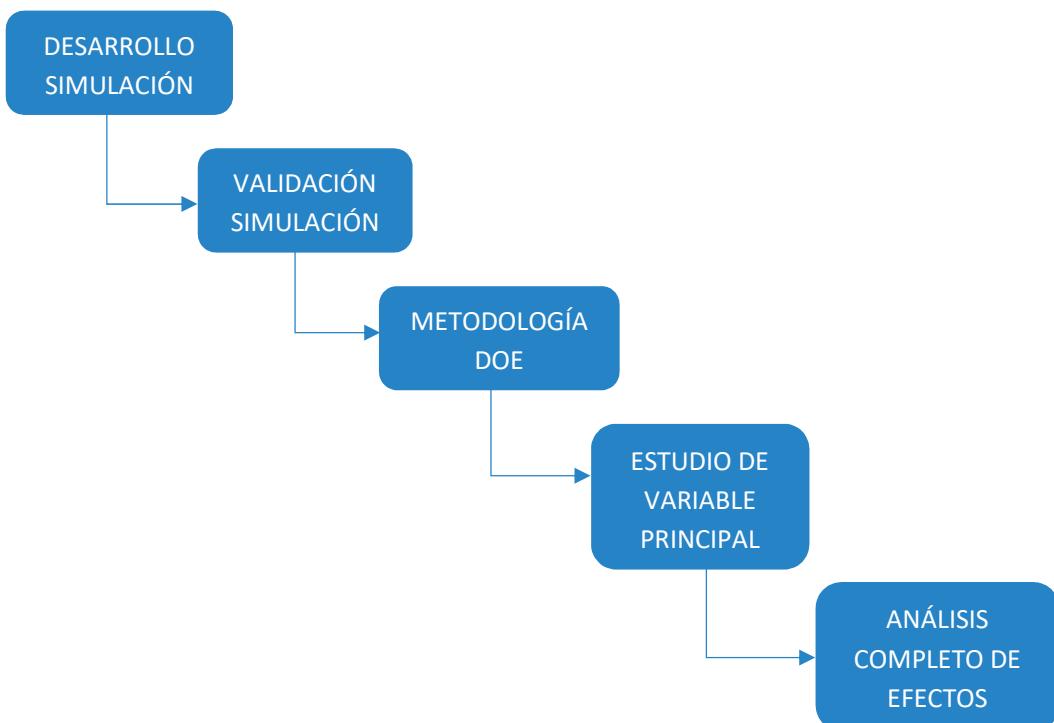


Ilustración 2. Pasos en el estudio con simulación del funcionamiento del almacén.

¹ Los criterios para la validación se encuentran en un anexo debido a la limitación impuesta en la extensión del trabajo.

4. ANTECEDENTES

Los almacenes y sus procesos son un elemento clave en las cadenas de suministro, con un coste aproximado del 26% del capital logístico en Europa (Vonck & Notteboom, 2011), superado sólo por el transporte. No es de extrañar entonces que se trate de un tema muy desarrollado, ya sea a nivel general dentro del suministro (Ballou, 2004), en diseño de instalaciones (Tompkins, White, Bozer, & Tanchoco, 2010), estrategias de almacenaje (Errasti, 2011), manejo de materiales (Frazelle, 2002) o análisis varios basados en desarrollos matemáticos (Bartholdi & Hackman, 2017).

Sin embargo, la rápida evolución de la tecnología, con la enorme influencia que está generando en el diseño y funcionamiento de almacenes, hace que queden muchos campos poco explorados desde un punto de vista académico. Estudios tan necesarios como las rutas optimizadas de los carretilleros, desarrollados con anterioridad para *picking* en almacenes rectangulares (Ratliff & Rosenthal, 1982) y mejorados para incluir pasillos centrales (Roodbergen & Koster, 1999), resultan escasos cuando se trata de viajes con pallet completo aplicando un sistema de gestión de almacenes que permita evitar la vuelta en vacío. La idoneidad de las ubicaciones es otro campo que, si bien es fácil de encontrar cuando se reducen muelles de carga y descarga a puntos concretos, no aparece en casos de múltiples muelles en diferentes posiciones con variedad de clientes.

Otras nuevas tecnologías que ya están siendo aplicadas, como el uso de drones y vehículos de guiado automático, o la simulación de procesos, sólo se suelen desarrollar en profundidad dentro del marco de proyectos concretos.

Este trabajo busca aplicar varios de los conceptos creados para almacenes tradicionales y llevarlos a la práctica a través de elementos más modernos, como lo es el modelado por simulación. Conceptos como la configuración caótica o fija, vuelta en vacío frente a ciclos duales, idoneidad de ubicaciones por distancia o configuración de zonas son estudiados como posibilidades y luego en ciertos casos recreados para analizar su influencia sobre un escenario más detallado. Estos datos son tratados mediante la metodología de desarrollo de experimentos, ampliamente estudiada desde su creación por Ronald Fisher en los años 1920 (Tanco Rainusso, 2008).

Además, se incluye un estudio de la congestión por flujo de carretillas, un campo observado principalmente desde estrategias probabilísticas (AlHalawani & Mitra, 2016), pero que varía en gran medida de un *layout* a otro y que resulta altamente dependiente del resto de factores.

5. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

El almacén por analizar, actualmente vacío, cuenta con 10.000m² de superficie. En él se instalarán estanterías a siete alturas con un pasillo transversal que tendrá sólo las tres alturas superiores. En total contará con cerca de 17.000 ubicaciones para pallets, accesibles desde 18 pasillos de 3m de anchura y otros tres principales de 4,55m, 4,6m y 5m respectivamente.

Todas las ubicaciones tendrán sólo un pallet de profundidad. Esta decisión se basa en el hecho de que existe un gran número de referencias que en muchos casos cuentan con sólo 1 pallet en stock, convirtiendo en inconveniente la opción de doble profundidad en las estanterías.

El almacén dispone de 5 muelles para carga y descarga de camiones situados en lados opuestos del almacén (3 de un lado y 2 del otro).

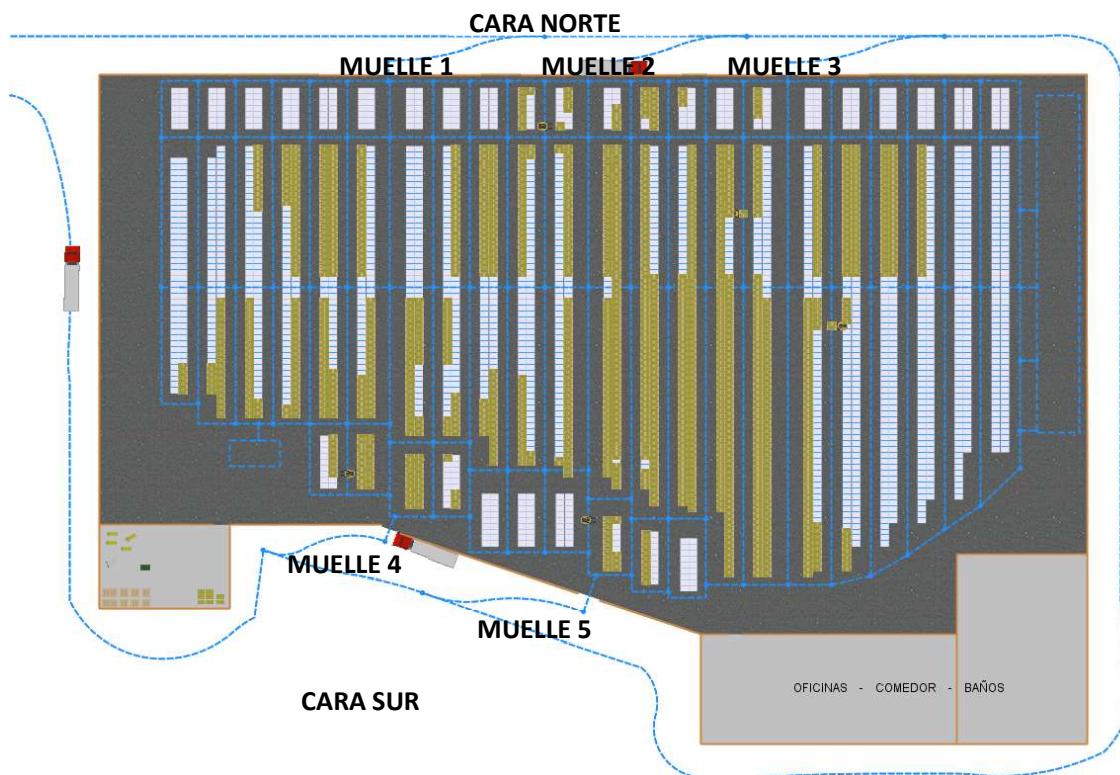


Ilustración 3. *Layout* del almacén objeto del estudio.

El almacén permanecerá abierto las 24 horas, aunque sólo se analizarán las 18 horas de mayor actividad (desde las 5h de la mañana hasta las 23h), y atenderá a 9 clientes, cada uno con sus características particulares, lo que hace que requieran tratamientos diferenciados.

6. ANÁLISIS PREVIO

6.1. Análisis de clientes

Los clientes se analizan inicialmente desde dos perspectivas principales: inventarios y viajes.

6.1.1. Análisis de inventarios

Se desarrollan los siguientes puntos y conceptos:

-Movimiento relativo: número de movimientos de entrada y salida de una referencia del almacén dividido entre el stock medio del cliente presente en el almacén.

$$\text{Ecuación 1: } \text{MOVIMIENTO RELATIVO}_n = \frac{\sum \text{MOVIMIENTO}_n}{\text{STOCK MEDIO}_n}$$

-Movimiento absoluto: número de movimientos de entrada y salida de una referencia del almacén.

$$\text{Ecuación 2: } \text{MOVIMIENTO ABSOLUTO}_n = \sum \text{MOVIMIENTO}_n$$

-Movimiento absoluto acumulado: suma de los movimientos absolutos de la referencia a analizar y todas aquellas anteriores (ordenadas por movimiento relativo) del mismo cliente.

$$\text{Ecuación 3: } \text{MOVIMIENTO ABSOLUTO ACUMULADO}_n = \sum_{i=1}^n \text{MOVIMIENTO ABSOLUTO}_i$$

-Stock acumulado: suma del stock medio de la referencia a analizar y todas aquellas anteriores (ordenadas por movimiento relativo) del mismo cliente.

$$\text{Ecuación 4: } \text{STOCK ACUMULADO}_n = \sum_{i=1}^n \text{STOCK}_i$$

-Caracterización del inventario con análisis ABC para cada cliente, basado en el movimiento absoluto acumulado y el stock acumulado.

-Cálculo y análisis del histórico de inventario para, con su variación, obtener el stock de seguridad a tener en cuenta (se asume distribución normal). Se observan los cambios de stock en un periodo de seis meses y se obtiene la desviación típica.

6.1.2. Análisis de viajes

Se estudian los horarios habituales de los clientes. Se analizan también la frecuencia de llegada y, en los casos que corresponda, el número de camiones habitual de llegada (especialmente importante para clientes con comportamientos más irregulares).

6.1.3. Cliente 1 (C1)

El cliente 1 es el más influyente de todos en el funcionamiento del almacén debido no sólo a su alto volumen tanto de stock como de referencias, sino también al hecho de que acumula más de la mitad de los movimientos totales de entrada y salida del almacén.

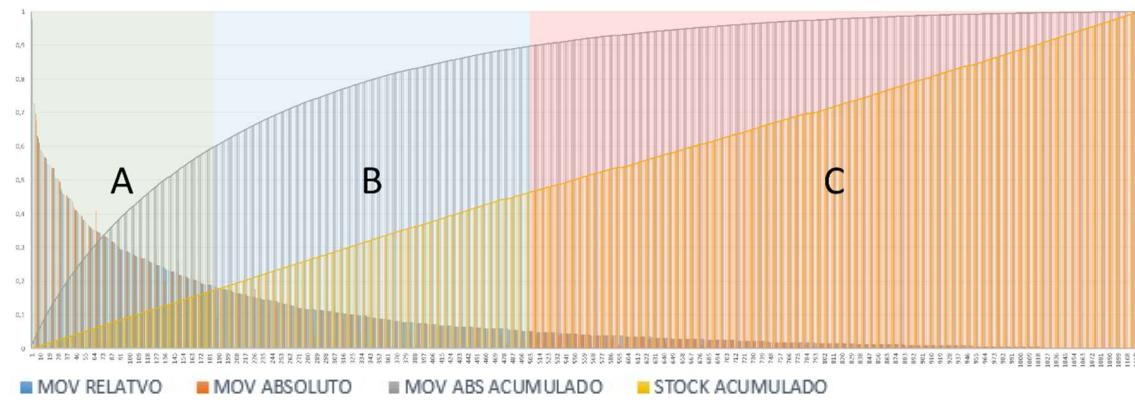


Ilustración 4. Análisis de inventario del cliente 1. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.

	MOV ABS	INVENTARIO
A	60%	16%
B	30%	41%
C	10%	43%

Tabla 2. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 1.

Sus horas de salida vienen marcadas por un horario fijo que penaliza gravemente los retrasos; las de entrada de camiones son más flexibles para su asignación, aunque siguen sujetas a indicaciones puntuales del cliente y condicionadas por la variedad de orígenes del viaje, en su mayoría internacionales.

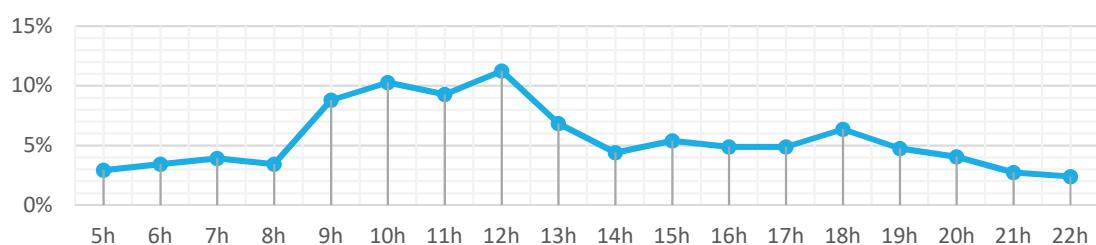


Ilustración 5. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 1 en la franja horaria estudiada.

El inventario se mantiene muy estable a lo largo del año, con una media de 5625 pallets y una desviación estándar de 90,8 pallets.

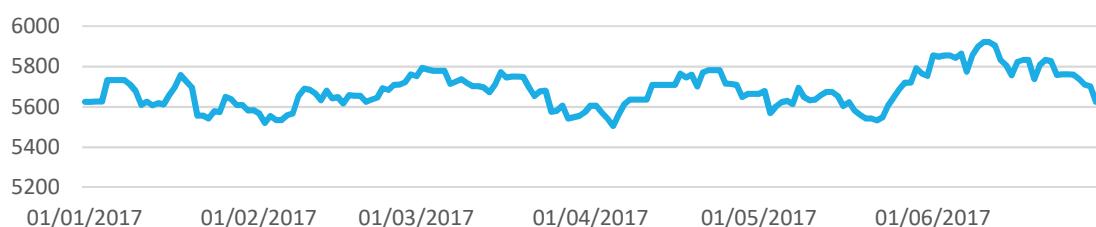


Ilustración 6. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 1 entre enero y junio de 2017.

6.1.4. Cliente 2 (C2)

El cliente 2 es el segundo que más movimientos genera (muy por debajo de las cantidades del cliente 1), y tercero en cuanto a volumen de stock. Se caracteriza por su marcado horario de viajes, concentrados en las horas centrales del día.

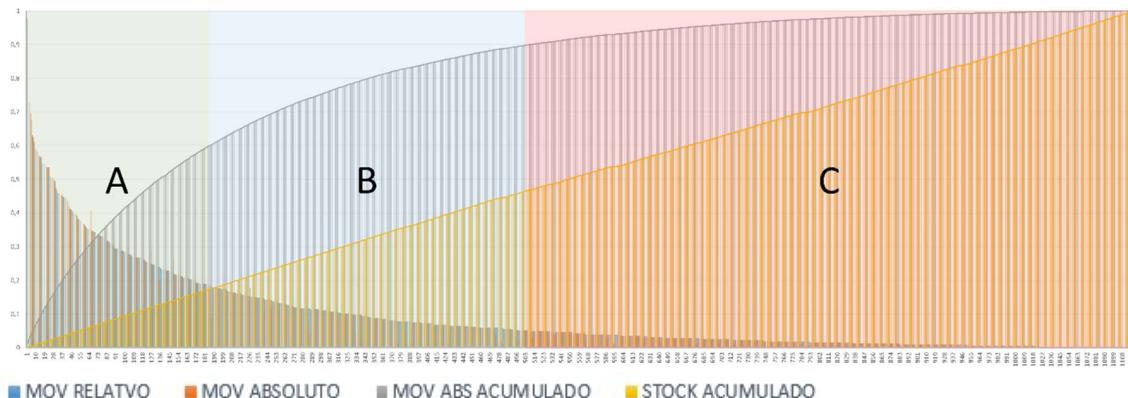


Ilustración 7. Análisis de inventario del cliente 2. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.

	MOV ABS	INVENTARIO
A	67%	30%
B	27%	33%
C	6%	37%

Tabla 3. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 2.

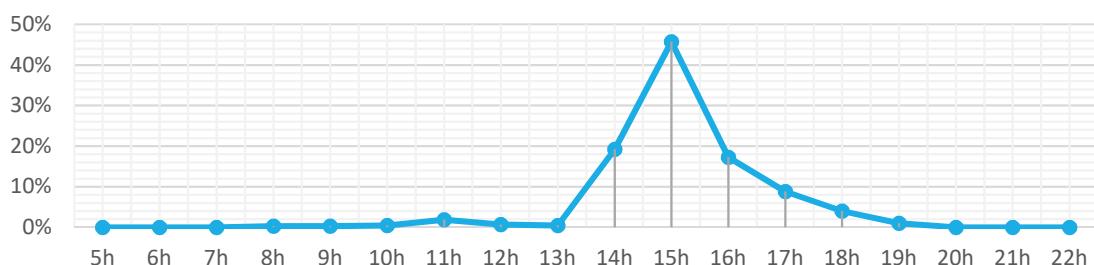


Ilustración 8. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 2 en la franja horaria estudiada.

Al igual que el cliente 1, tiene horarios impuestos para las salidas, pero bastante flexibles para las entradas. Su nivel de stock varía también relativamente poco, con una desviación típica de 22,81 pallets y una media de 1588.



Ilustración 9. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 2 entre enero y junio de 2017.

6.1.5. Cliente 3 (C3)

El cliente 3 tiene números similares a los del cliente 2, pero con un horario más distribuido a lo largo del día y una variación mayor en el volumen de stock. Sus entradas y salidas siguen las mismas limitaciones que los clientes 1 y 2.

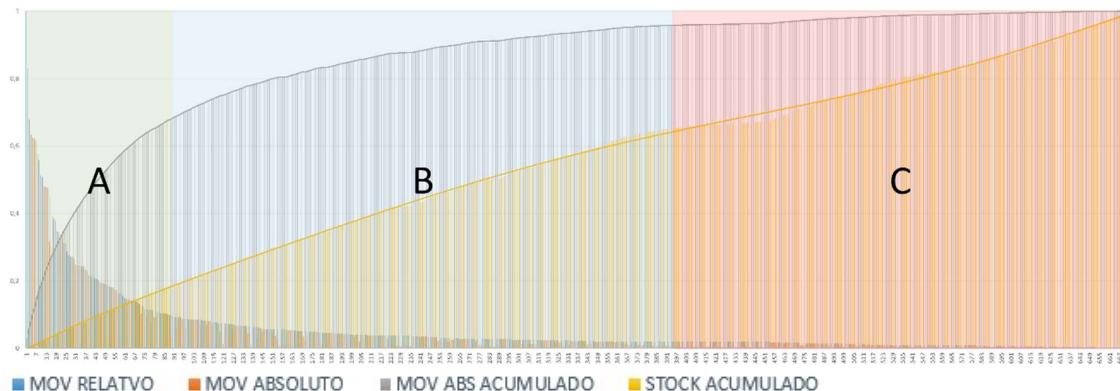


Ilustración 10. Análisis de inventario del cliente 3. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.

	MOV ABS	INVENTARIO
A	68%	18%
B	28%	46%
C	4%	36%

Tabla 4. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 3.

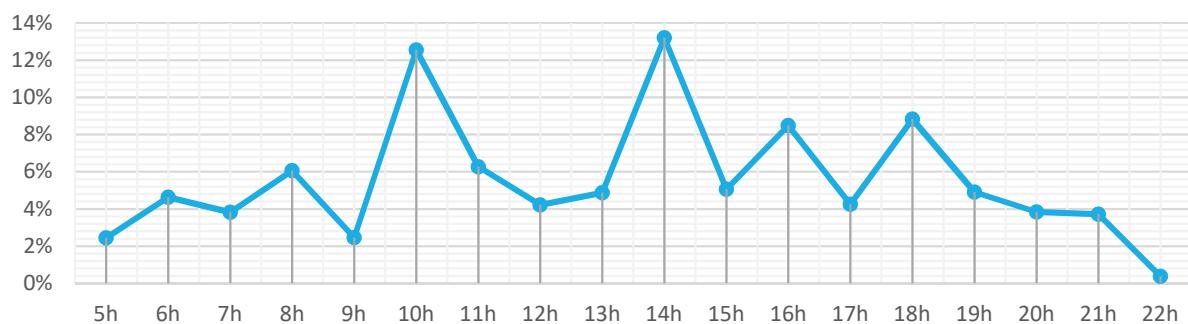


Ilustración 11. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 3 en la franja horaria estudiada.



Ilustración 12. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 3 entre enero y junio de 2017.

El stock tiene mayores variaciones que los clientes anteriores, con una media de 959 pallets y una desviación típica de 208,38 pallets.

6.1.6. Cliente 4 (C4)

El cliente 4 se caracteriza por su alto stock de baja rotación y la elevada desviación típica que presenta su inventario.

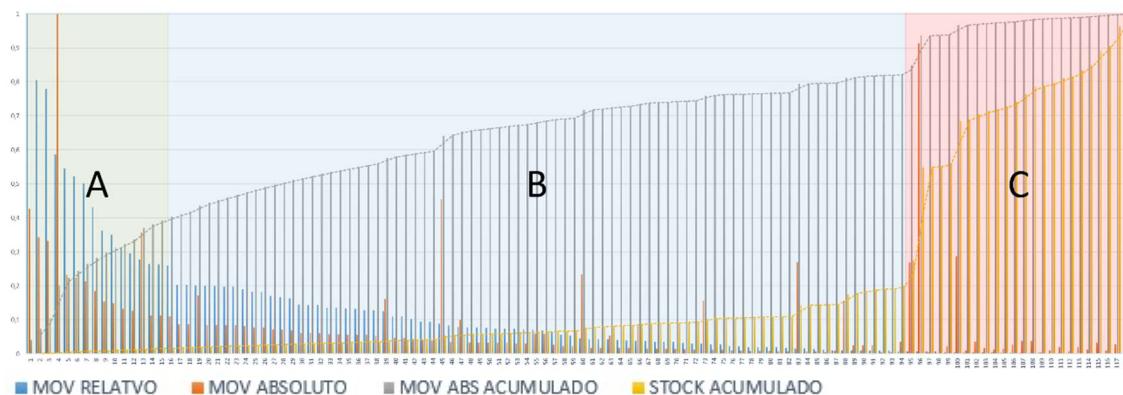


Ilustración 13. Análisis de inventario del cliente 4. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.

	MOV ABS	INVENTARIO
A	40%	2%
B	45%	25%
C	15%	73%

Tabla 5. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 4.

Los horarios vienen establecidos por el cliente en función de la previsión de llegadas. La carga llega paletizada en contenedor, y el número de contenedores es muy variable dependiendo de cuántos viajen en un mismo barco, haciendo que la media de contenedores al día resulte poco representativa. En su lugar se calcula el número de días en los que llegaron viajes y se extrae la frecuencia en número de contenedores de cada uno de dichos días.

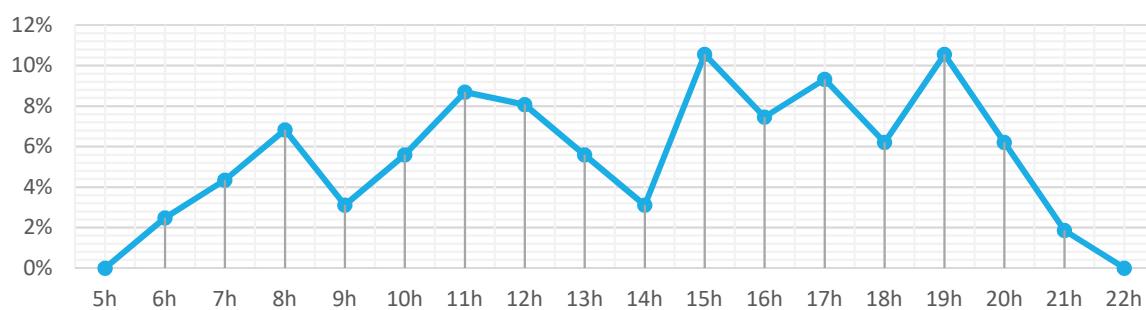


Ilustración 14. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 4 en la franja horaria estudiada.

Número de camiones de entrada en días con viajes:

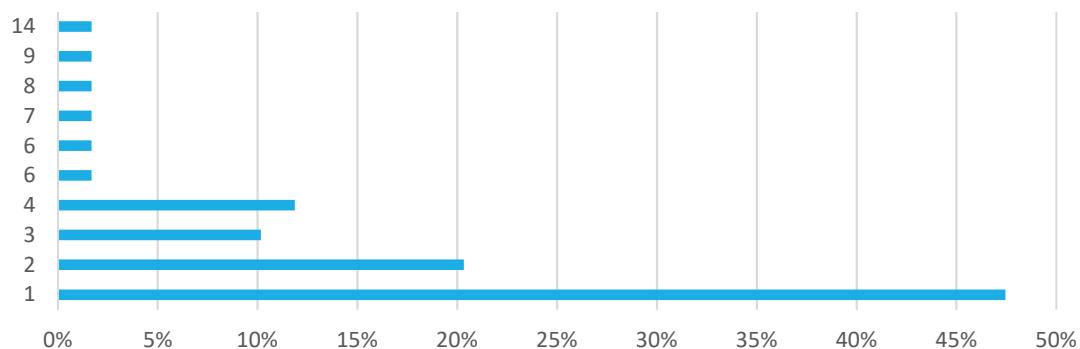


Ilustración 15. Número de camiones que entran los días que hay entradas al almacén del cliente 4, con su frecuencia en porcentaje.

Número de camiones de salida en días con viajes:

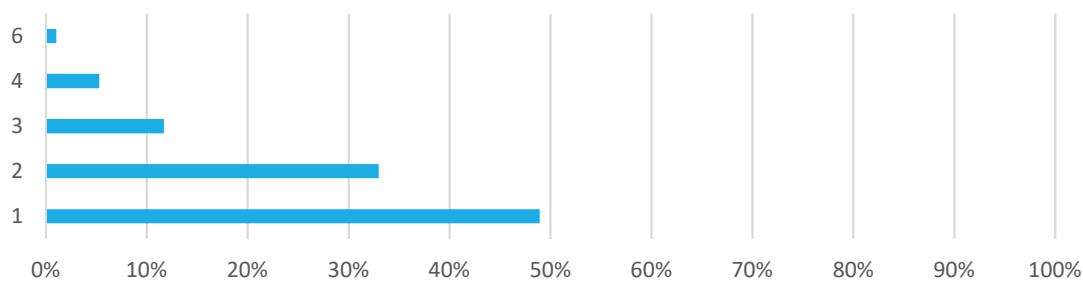


Ilustración 16. Número de camiones que salen del almacén los días que hay expediciones del cliente 4, con su frecuencia en porcentaje.



Ilustración 17. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 4 entre enero y junio de 2017.

La desviación típica en el stock del cliente 4 es de 562,71 pallets, la mayor de todos los clientes, con una media de 3630 pallets.

6.1.7. Cliente 5 (C5)

El cliente 5 tiene pocas referencias, pero un volumen considerablemente alto de cada una de ellas si se compara con el resto de clientes.

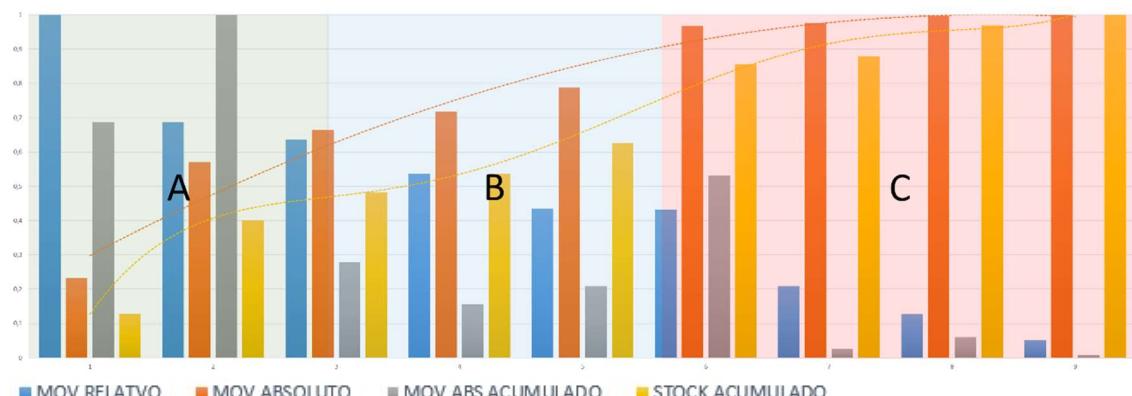


Ilustración 18. Análisis de inventario del cliente 5. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.

	MOV ABS	INVENTARIO
A	64%	48%
B	26%	27%
C	10%	25%

Tabla 6. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 5.

Este cliente tiene horarios concentrados principalmente en una franja de las 8h a las 13h. Estas horas vienen marcadas por el cliente, con ligeras variaciones diarias entre los límites mencionados en función de las necesidades del momento.

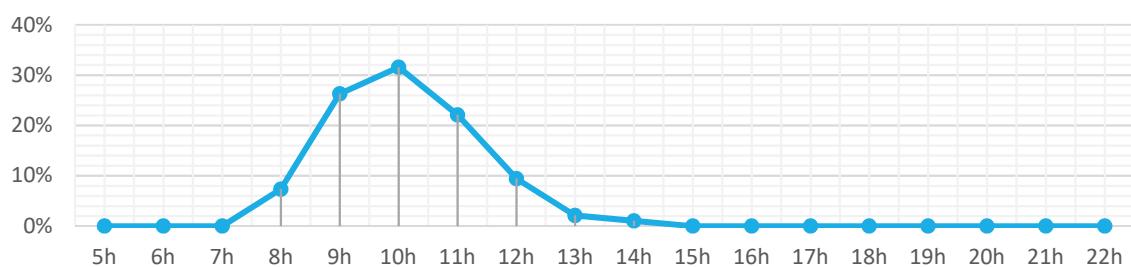


Ilustración 19. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 5 en la franja horaria estudiada.



Ilustración 20. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 5 entre enero y junio de 2017.

La media es de 472 pallets, con una desviación estándar de 51,92 pallets.

6.1.8. Cliente 6 (C6)

El cliente 6 tiene un stock relativamente pequeño comparado con los clientes 1 a 5, pero una desviación típica alta en relación con dicho stock. Sus horarios presentan un pico al mediodía muy similar al del cliente 5.

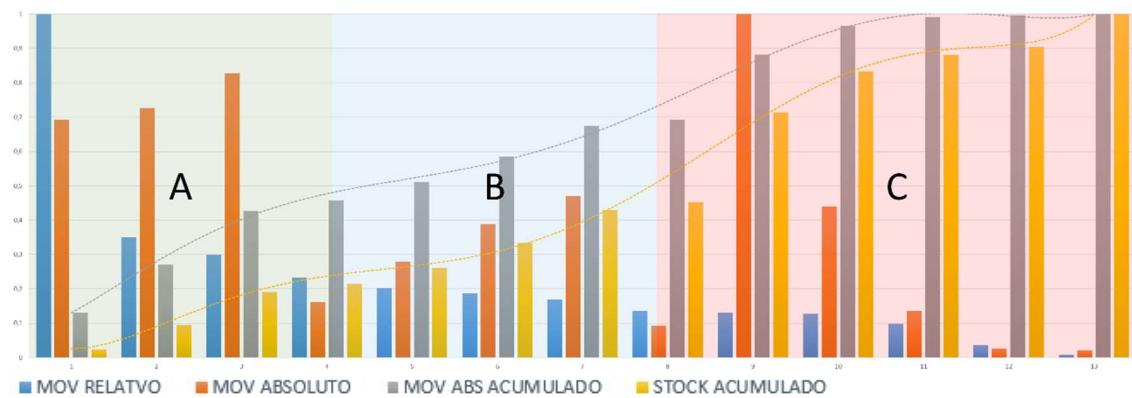


Ilustración 21. Análisis de inventario del cliente 6. Valores de 0 a 1, siendo 1 el mayor de cada característica. División por ABC.

	MOV ABS	INVENTARIO	
	A	B	C
A	48%	24%	
B	28%	28%	
C	24%	48%	

Tabla 7. División de movimientos absolutos e inventario en cada grupo ABC del cliente 6.

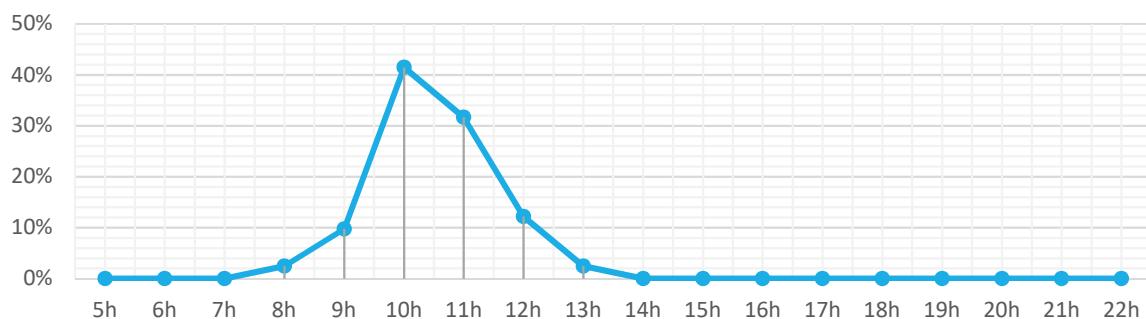


Ilustración 22. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 6 en la franja horaria estudiada.

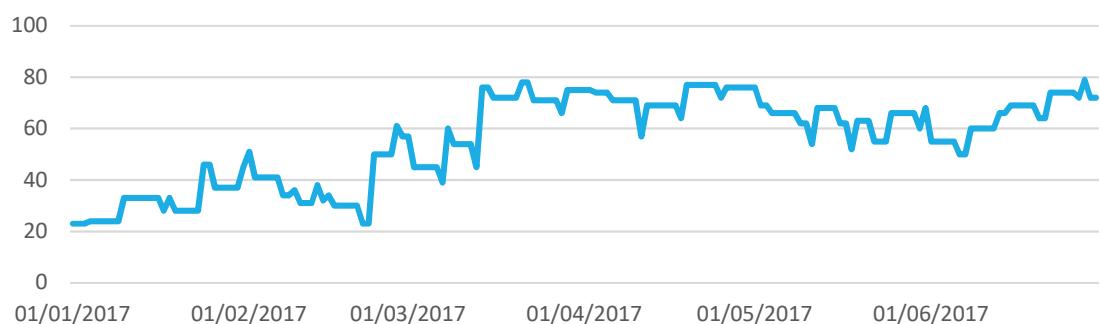


Ilustración 23. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 6 entre enero y junio de 2017.

Este cliente tiene una media de 72 pallets y una desviación estándar de 17,35 pallets.

6.1.9. Cliente 7 (C7)

Este cliente presenta un único tipo de referencia, con un horario más o menos uniforme entre las 8h y las 18h.

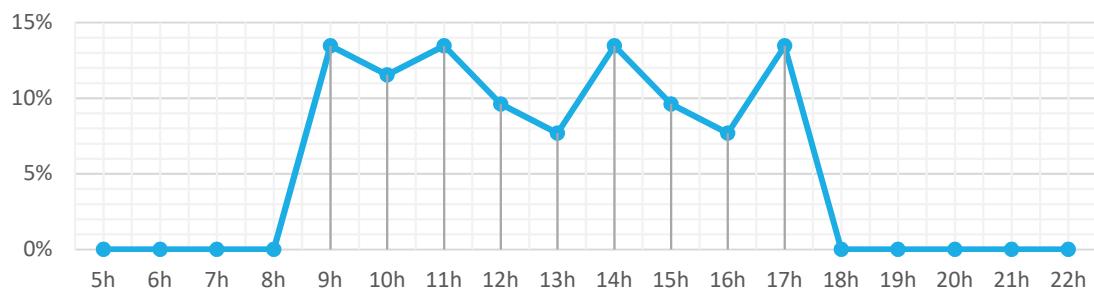


Ilustración 24. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 7 en la franja horaria estudiada.

No hay datos sobre movimientos de pallets para reconstruir el histórico del inventario, pero tiene un stock medio de 150 pallets. Se le asigna una desviación típica de 30 pallets por consulta con la empresa que gestiona el almacén.

6.1.10. Cliente 8 (C8)

Este cliente presenta un único tipo de referencia con dos horarios fijos a las 12h y 16h.

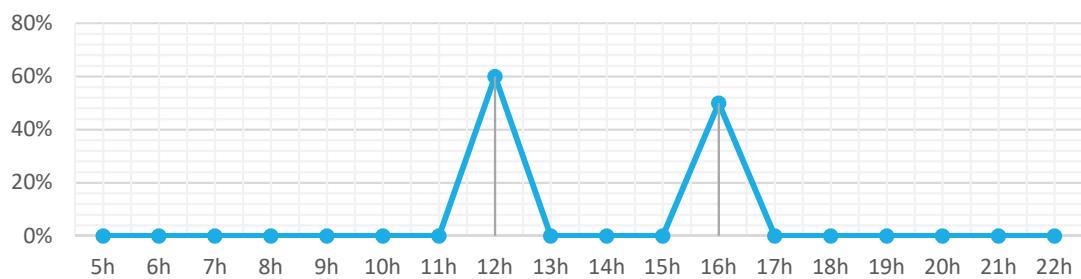


Ilustración 25. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 8 en la franja horaria estudiada.

No hay datos sobre movimientos de pallets para reconstruir el histórico del inventario, pero tiene un stock medio de 14 pallets. Se le asigna una desviación típica de 2,8 pallets por consulta con la empresa que gestiona el almacén.

6.1.11. Cliente 9 (C9)

Este cliente presenta un único tipo de referencia, con un horario más o menos uniforme entre las 6h y las 18h.

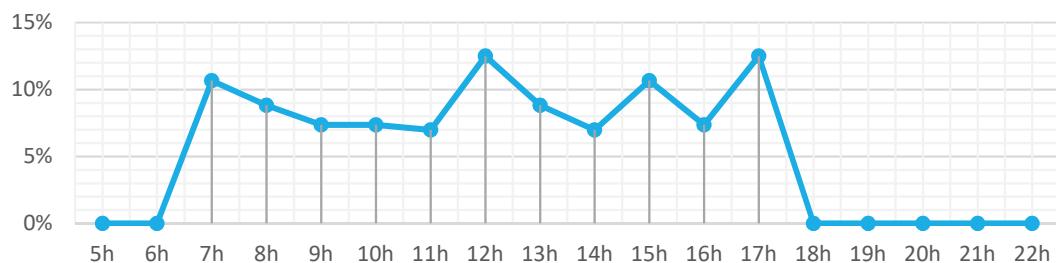


Ilustración 26. Distribución porcentual conjunta de las llegadas y salidas de los camiones del cliente 9 en la franja horaria estudiada.

El cliente 9 tiene la peculiaridad de que la gran mayoría de los pallets descargados son cargados para salir el mismo día. La desviación típica del stock es de 17,15 pallets, con una media de 25 pallets.

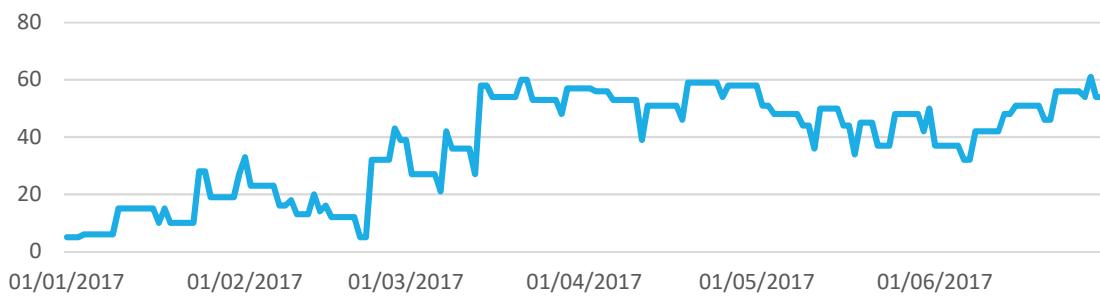


Ilustración 27. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) del cliente 9 entre enero y junio de 2017.

6.1.12. Inventario combinado de clientes

Los clientes 5 a 9, los más pequeños en stock medio, pueden colocarse en la misma zona del almacén. Esto presenta una ventaja clara en el espacio necesario para almacenarlos, ya que la desviación típica (la de aquellos clientes con los que fue posible calcularla) se reduce notablemente al compensarse sus variaciones. En concreto, la desviación típica pasa de 86,63 (cuando se suman por separado) a tan solo 9,62 pallets.

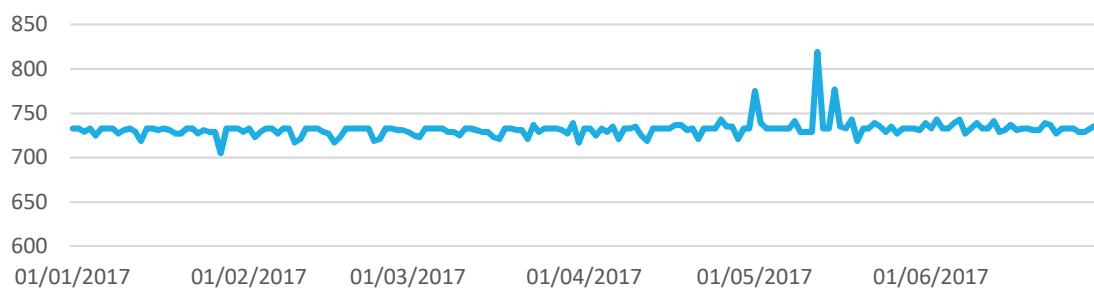


Ilustración 28. Análisis del inventario en almacén (en número de pallets) de los clientes 5 a 9 entre enero y junio de 2017.

6.1.13. Cálculo de espacio necesario

El espacio necesario para el almacén se calcula en función de los inventarios medios de los clientes y sus desviaciones típicas siguiendo dos criterios diferentes:

-Para los clientes 1, 2 y 3 se considera un nivel de servicio del 95% debido a la alta importancia de mantener el suministro sin imprevistos.

-Para los clientes 4 a 9 se considera un nivel de servicio individual del 90% debido a dos motivos: en primer lugar, al juntarse el espacio de los clientes 5 a 9, este coeficiente individual pasa a significar un nivel de servicio superior al 99,98% para el grupo; en segundo lugar, el cliente 4 puede situarse en un costado del almacén para aprovechar así el espacio libre cuando sufra variaciones grandes de stock.

	STOCK MEDIO (pallets)	DESVIACIÓN TÍPICA (pallets)	COEFICIENTE NIVEL SERVICIO	STOCK FINAL (pallets)	MEDIA POSICIONES NIVEL SUELO	POSICIONES CON COEFICIENTE SEGURIDAD
C1	5625	90,80	1,64	5774	804	825
C2	1588	22,81	1,64	1625	227	232
C3	959	208,38	1,64	1301	137	186
C4	3630	562,72	1,28	4350	519	621
C5	472	51,93	1,28	538	67	77
C6	72	17,35	1,28	94	10	13
C7	150	30,00	1,00	180	21	26
C8	14	2,80	1,00	17	2	2
C9	25	17,35	1,28	47	4	7

Tabla 8. Cálculo de inventarios por cliente y de espacio que requerirán en el almacén (considerado como posiciones a nivel suelo).

Las ubicaciones medias se calculan como espacios a nivel suelo, de modo que cada ubicación cuenta con espacio para 7 pallets.

6.2. Asignación de muelles

La asignación de los 5 muelles del almacén se realiza en función de los volúmenes de entrada y salida de pallets de cada cliente, intentando compensar los picos de actividad entre clientes para no generar una saturación tanto de los propios muelles como de las playas necesarias para su correcto funcionamiento.

Con estos criterios en mente, se obtienen los movimientos de pallets por cada cliente repartidos en la franja horaria a estudiar y se asignan los 5 muelles:

CLIENTE / HORA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
5h a 6h	68,18			5,22					
6h a 7h	68,18			9,13					
7h a 8h	68,18			14,35					
8h a 9h	68,18	27,14	24,31	6,52	0,88	0,29			11,54
9h a 10h	136,36	27,14		11,74	3,16	1,17	1,56		11,54
10h a 11h	136,36	27,14	48,62	18,26	3,79	4,98	1,56		11,54
11h a 12 h	136,36	27,14	24,31	16,96	2,65	3,80	1,56		11,54
12h a 13h	136,36	27,14	24,31	11,74	1,14	1,46	1,56	0,50	11,54
13h a 14h	68,18	27,14	24,31	6,52	0,25	0,29	1,56		11,54
14h a 15h	68,18	54,29	48,62	22,17	0,13		1,56		11,54
15h a 16h	68,18	54,29	24,31	15,65			1,56		11,54
16h a 17h	68,18	27,14	24,31	19,57			1,56	0,50	11,54
17h a 18h	68,18	27,14	24,31	13,04			1,56		11,54
18h a 18h	68,18	27,14	24,31	22,17					11,54
19h a 20h	68,18	27,14	24,31	13,04					11,54
20h a 21h	68,18			3,91					
21h a 22h	68,18								
22h a 23h	68,18								

Tabla 9. Movimientos de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora de cada cliente.

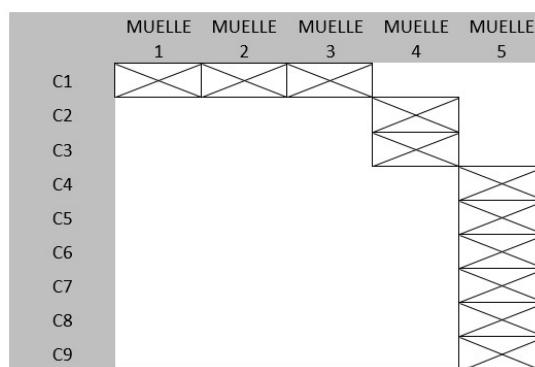


Tabla 10. Asignación de clientes a muelles.

Los muelles 1, 2 y 3 serían utilizados principalmente por el cliente 1 debido a la gran cantidad de movimientos que conllevan sus actividades, con un horario más o menos uniforme.

El muelle 4 sería utilizado por los clientes 2 y 3. Esta decisión está basada no sólo en los movimientos (que podrían haber llevado a la decisión de sustituir al cliente 3 por el 4) sino también en la similitud de comportamiento de ambos clientes y el hecho de que el cliente 4 cuenta con la mayor desviación en volumen de inventario, haciendo conveniente situarlo a la derecha del muelle 5, donde cuenta con espacio suficiente para absorber dichos cambios. Además, el cliente 4 realiza un escaso uso de las playas, por lo que se equilibra bien con el cliente 9. Para compensar el pico de volumen que los clientes 2 y 3 generarán en las horas centrales del día, podrán utilizar de apoyo los muelles 1 y 5 para descargas (y para cargas si se prevé con suficiente antelación como para preparar los pallets en la playa correspondiente).

El muelle 5 se encargará del resto de clientes, ya que a pesar de contar con 6 clientes no se verá saturado en ninguna hora del día.

CLIENTE / HORA	MUELLE 1	MUELLE 2	MUELLE 3	MUELLE 4	MUELLE 5	TOTAL
5h a 6h	22,73	22,73	22,73	0,00	5,22	73,40
6h a 7h	22,73	22,73	22,73	0,00	9,13	77,31
7h a 8h	22,73	22,73	22,73	0,00	25,89	94,07
8h a 9h	22,73	22,73	22,73	51,45	19,24	138,87
9h a 10h	45,45	45,45	45,45	27,14	29,16	192,67
10h a 11h	45,45	45,45	45,45	75,76	40,12	252,24
11h a 12 h	45,45	45,45	45,45	51,45	36,51	224,32
12h a 13h	45,45	45,45	45,45	51,45	27,93	215,75
13h a 14h	22,73	22,73	22,73	51,45	20,16	139,79
14h a 15h	22,73	22,73	22,73	102,90	35,39	206,48
15h a 16h	22,73	22,73	22,73	78,59	28,75	175,52
16h a 17h	22,73	22,73	22,73	51,45	33,16	152,79
17h a 18h	22,73	22,73	22,73	51,45	26,14	145,77
18h a 18h	22,73	22,73	22,73	51,45	33,71	153,34
19h a 20h	22,73	22,73	22,73	51,45	24,58	144,21
20h a 21h	22,73	22,73	22,73	0,00	3,91	72,09
21h a 22h	22,73	22,73	22,73	0,00	0,00	68,18
22h a 23h	22,73	22,73	22,73	0,00	0,00	68,18

Tabla 11. Movimiento de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora en cada muelle.

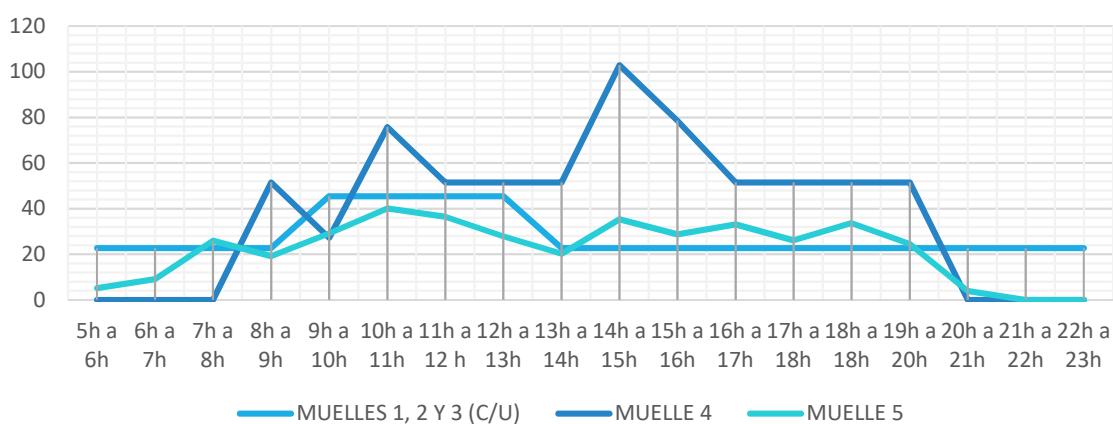


Ilustración 29. Movimiento de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora en cada muelle.

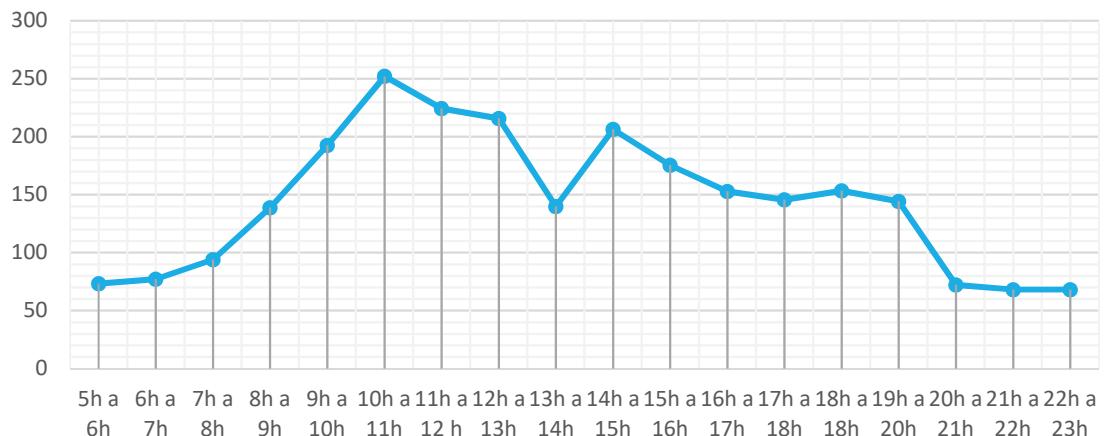


Ilustración 30. Movimiento total de pallets (entradas y salidas del almacén) por hora.

6.3. Asignación de zonas

En base a la distribución de muelles se realiza la zonificación por clientes del almacén. Se analizarán diferentes estrategias: distribución caótica, distribución por clientes y distribución aplicando separación por clientes y ABC individual de cada cliente. La distribución por ubicaciones fijas por referencia no se tiene en cuenta debido a que éstas tienen stocks muy variables, haciendo impráctica la asignación de un número de ubicaciones concreto, y a que las referencias cambian constantemente, lo que haría necesarias continuas reasignaciones.

En primer lugar, se realiza un diseño del almacén aprovechando una aplicación desarrollada para este trabajo con dicho propósito (Anexo 2) y que permite extraer las coordenadas de todas las ubicaciones de las estanterías.

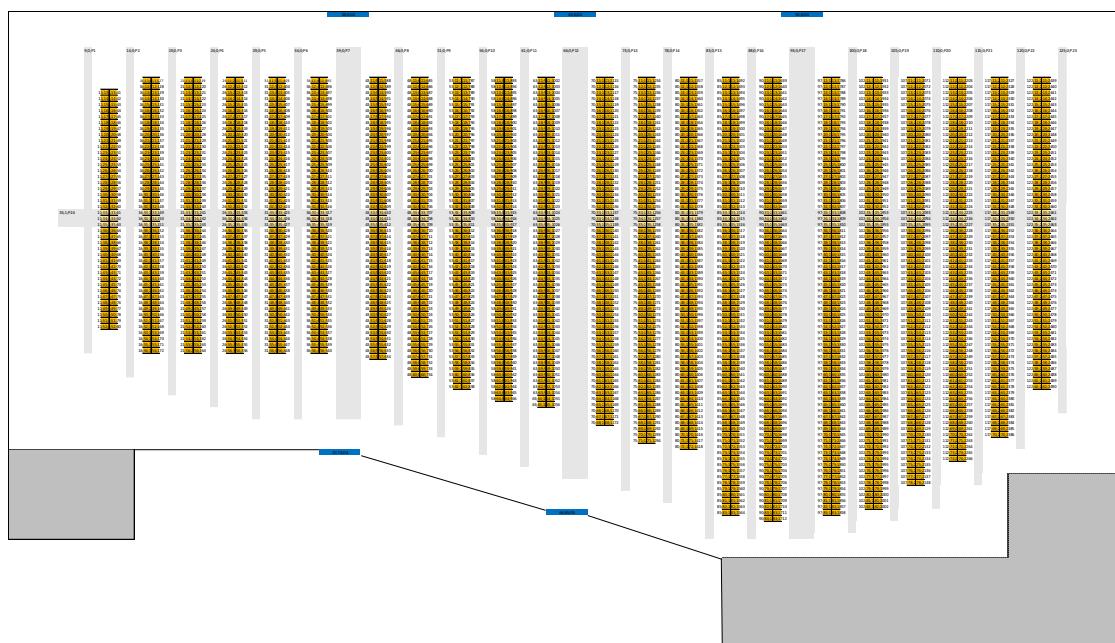


Ilustración 31. Plano del almacén. Cada ubicación incluye su identificación y coordenadas.

Con este diseño se procede a realizar una distribución de las ubicaciones en 4 grupos en función de los muelles asignados a cada cliente.

- Grupo 1: incluye al cliente 1. Utilaría los muelles 1 a 3, dando prioridad al 2 (el central) debido a su mayor cercanía media a las playas de los 3 muelles.
- Grupo 2: incluye al cliente 2. Usaría preferentemente el muelle 4 y ocasionalmente el 1 para ayudar en los picos de actividad.
- Grupo 3: incluye al cliente 3. Tendría también como preferente al muelle 4, pero como secundario al 5.
- Grupo 4: incluye a los clientes 4 a 9. Utilizan el muelle 5.

Esta distribución se realiza con el objetivo principal de compensar el pico de actividad del muelle 4 en las horas centrales.

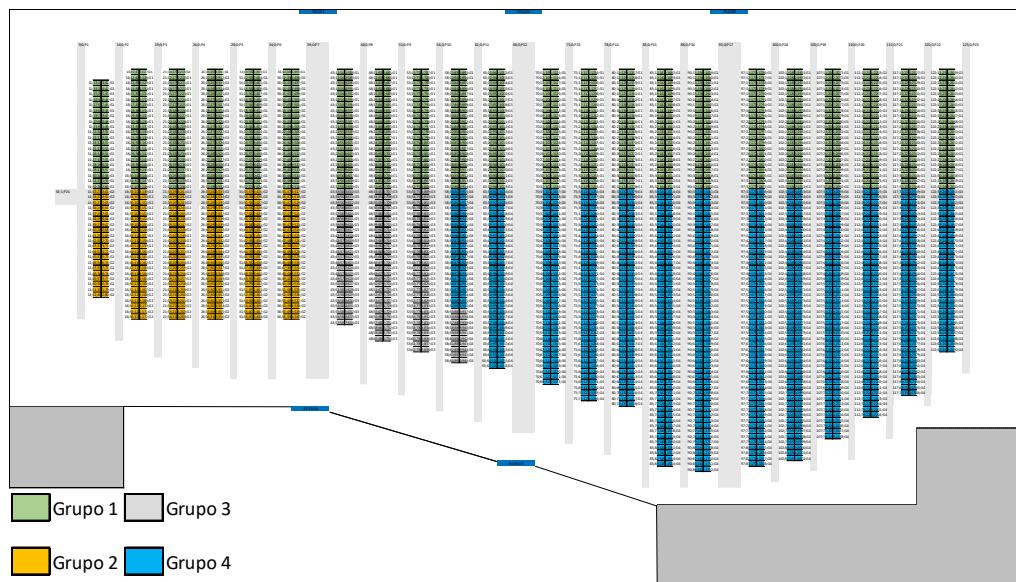


Ilustración 33. División del almacén en grupos según las preferencias en el uso de muelles.

GRUPO / PONDERACIÓN MUELLES	M1	M2	M3	M4	M5
GRUPO 1	0,25	0,4	0,35	0	0
GRUPO 2	0,2	0	0	0,8	0
GRUPO 3	0	0	0	0,8	0,2
GRUPO 4	0	0	0	0	1

Tabla 12. Ponderaciones de uso de muelles de cada grupo de clientes.

Sobre estos 4 grupos se construye un mapa de calor del almacén, asignando a cada uno una zona proporcional al volumen de inventario de sus clientes. El mapa de calor se realiza sobre las distancias ponderadas de cada ubicación a sus correspondientes muelles preferentes, utilizando otra aplicación en Excel desarrollada para ello (Anexo 3).

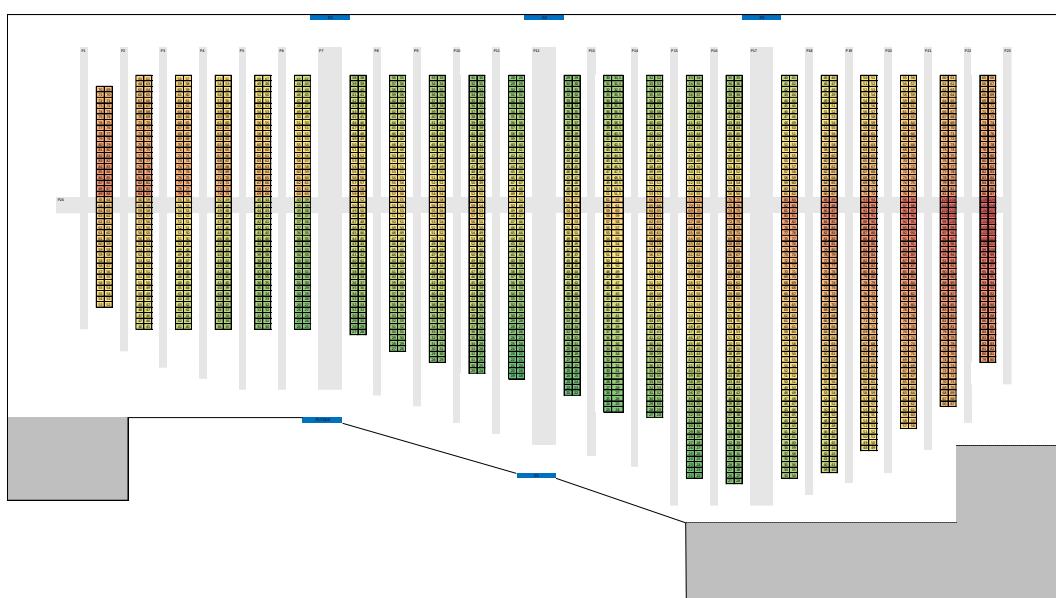


Ilustración 32. Mapa del almacén con la conveniencia de cada ubicación en base a la distancia ponderada a los muelles.
Escala de verde (más conveniente) a rojo (poco conveniente).

En base a este mapa de calor, y respetando las zonas de cada cliente, se realiza un análisis a nivel suelo de las ubicaciones a utilizar, y sobre cada grupo de clientes se aplica un algoritmo² que seleccione una configuración óptima por distancias en función a las distribuciones por ABC de cada cliente presentadas anteriormente.

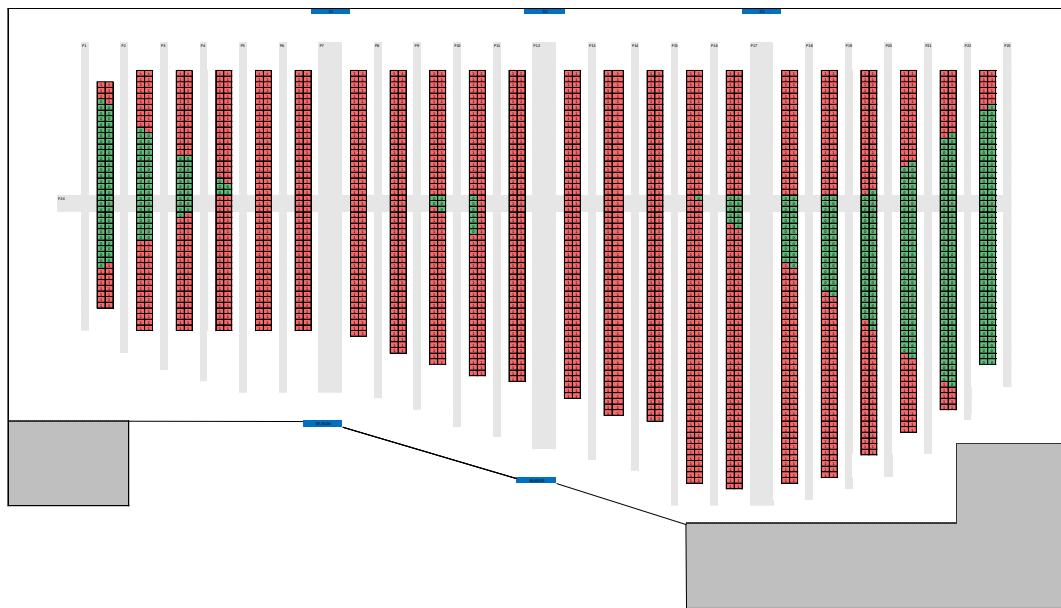


Ilustración 35. Ubicaciones necesarias (rojo) para el porcentaje de llenado previsto del almacén (81%).

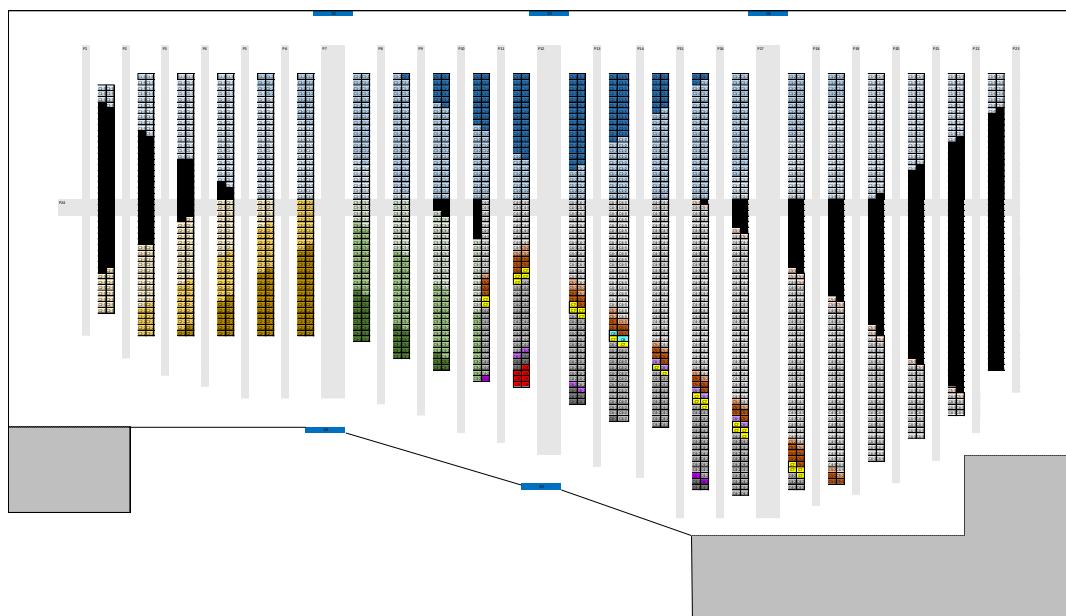
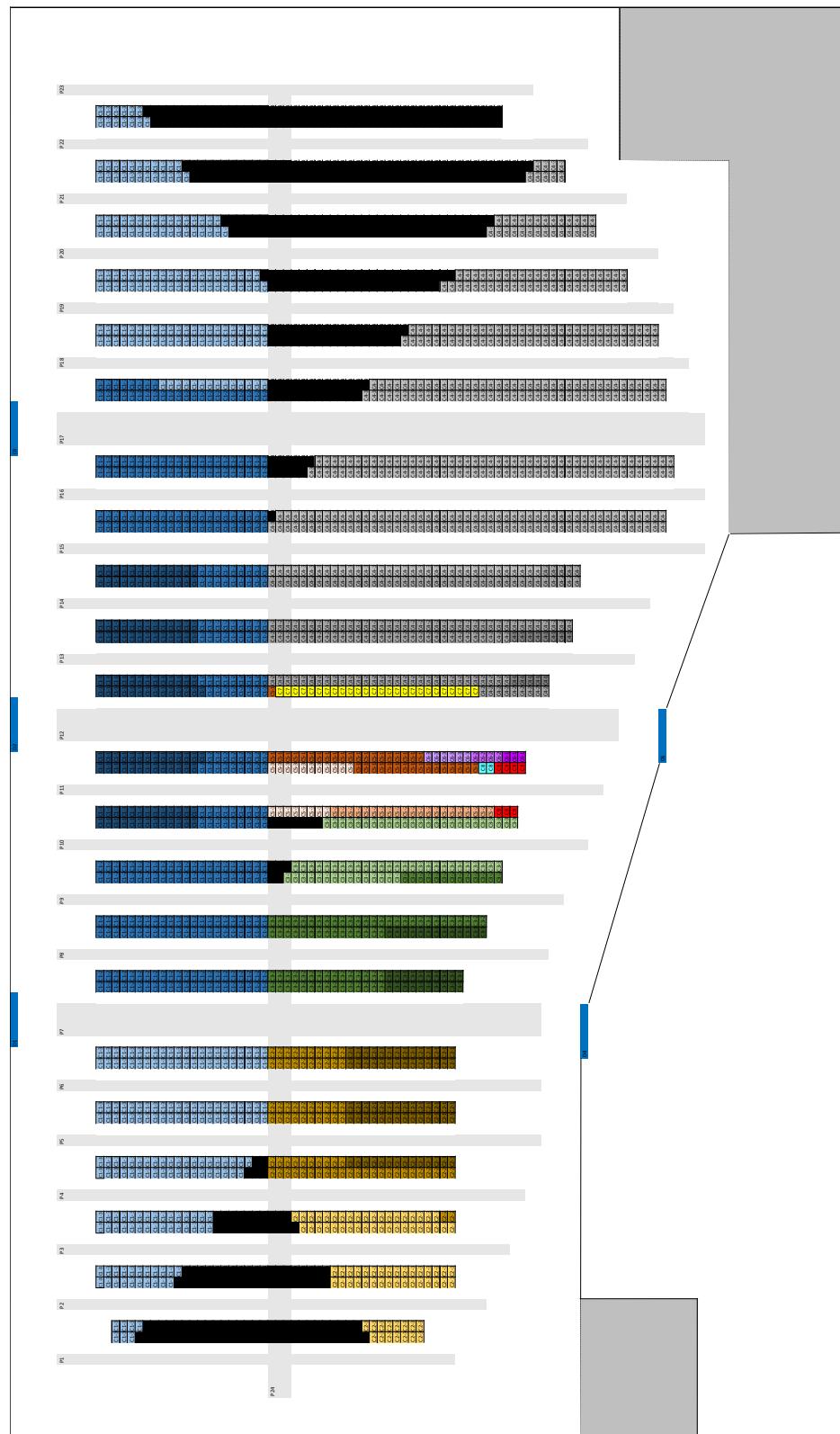


Ilustración 34. División generada automáticamente por distancias de los clientes y tipos de cargas (ABC).

El algoritmo presenta la limitación de que busca las mejores ubicaciones para cada subgrupo ABC de cada cliente en su zona, pero esta distribución debe ser adaptada para compensar la dispersión que genera entre los pallets de un mismo cliente, lo que en condiciones reales complicaría su colocación o extracción (excepto en casos en los que se cuente con un sistema de gestión de almacenes capaz de indicar las ubicaciones más convenientes a los carretilleros).

² Variación del código para el mapa de calor, utilizando distancias y popularidad.



C1-1	C1-2	C1-3	C2-1	C2-2	C2-3	C3-1	C3-2	C3-3	C4-1	C4-2	
C4-3	C5-1	C5-2	C5-3	C6-1	C6-2	C6-3	C7	C8	C9	LIBRES	

Ilustración 36. División adaptada del almacén por clientes y tipo de carga (ABC). La C indica cliente. El primer número es el número de cliente y el segundo el tipo de carga (A es 1, B es 2 y C es 3).

Esta distribución, basada en el inventario medio previsto para cada cliente (más el de seguridad calculado anteriormente) deja las zonas libres a los costados (por su mayor recorrido necesario), ocupando un 81% del espacio. La distribución del grupo 4 se realiza dejando al cliente 4 cerca de la zona libre para compensar sus fluctuaciones de inventario y juntando al resto de clientes (5 a 9) para equilibrar estas mismas fluctuaciones y asegurar las ubicaciones necesarias con el mínimo espacio posible.

La distribución de uso del almacén variaría ligeramente en caso de considerarse las alturas (Anexo 5), quedando un mapa de utilización como el siguiente³:

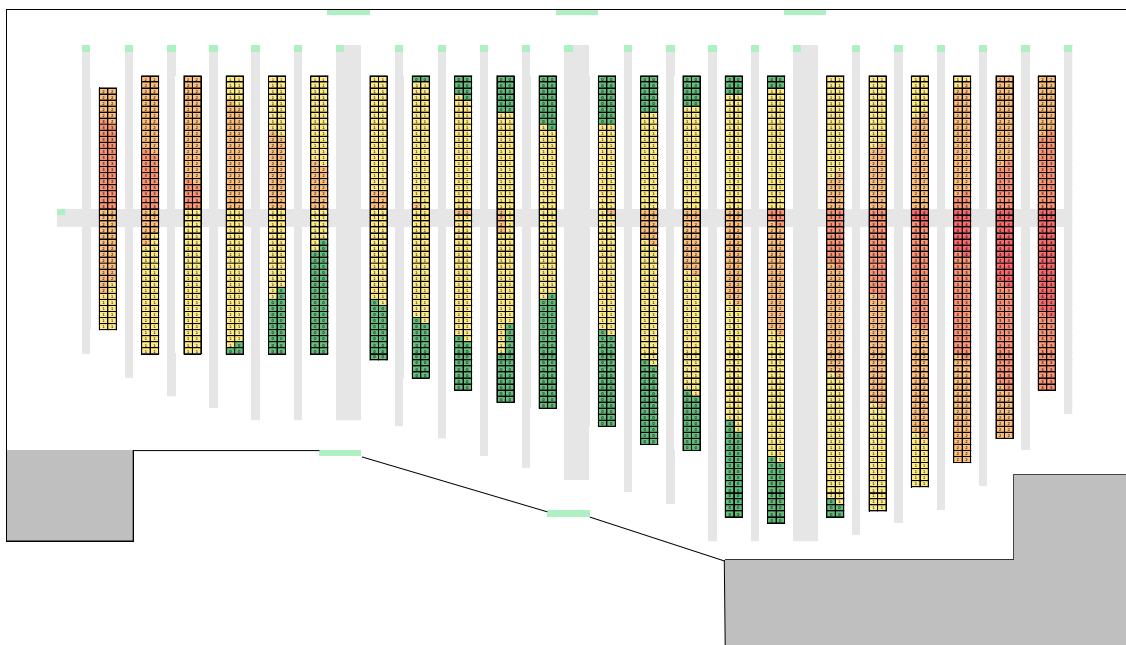


Ilustración 37. Utilización del almacén teniendo en cuenta alturas. Escala de verde (se utilizan todas las alturas) a rojo (se utilizan únicamente las 3 primeras alturas).

³ Se realiza una conversión de los tiempos a distancias en base a la velocidad media de las carretillas y luego se añaden los tiempos de ubicación y extracción en función de la altura. Con ello se obtiene un mapa de calor y tiempos en función del cual se consigue la Ilustración 37.

6.4. Comparación de estrategias

Con la división por zonas del almacén para los clientes puede procederse a calcular distancias en función de las diferentes estrategias de almacenado para poder escoger la más conveniente.

6.4.1. Distribución caótica

Se considera que las cargas contenidas en cualquier ubicación tienen la misma probabilidad de dirigirse a cualquiera de los muelles. Esto genera una distancia media variable en función del porcentaje de llenado del almacén, dado que los carretilleros tenderán a usar las ubicaciones más cercanas a los muelles, dejando libres las más lejanas cuando no sean necesarias. Con estos criterios se obtienen las siguientes distancias medias:

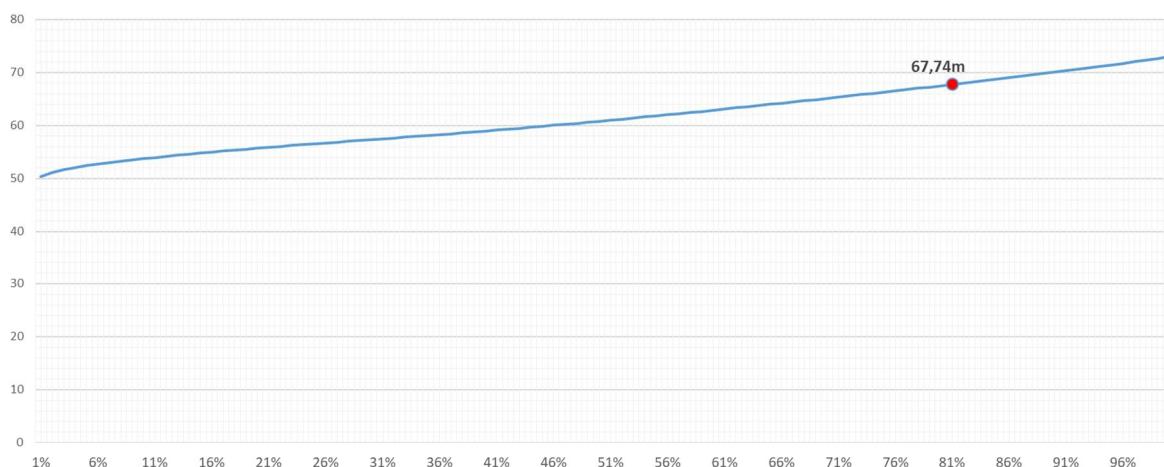


Ilustración 38. Distancia media recorrida desde un muelle hasta una carga con una distribución caótica y en función del porcentaje de llenado del almacén.

Para el porcentaje de uso previsto del almacén (81%) se obtiene un valor de distancia media a una ubicación de 67,74m. A pesar de que la distancia media recorrida disminuye con un menor aprovechamiento del almacén, la no asignación específica de muelles hace que en ningún punto alcance la eficiencia de las demás estrategias en este aspecto.

6.4.2. Distribución por clientes

Se aplica la zonificación del almacén por clientes, señalando para cada cliente los muelles a utilizar con su correspondiente ponderación. Esto genera una nueva serie de distancias que, para el porcentaje previsto de utilización, genera una distancia media de 46m. Se trata de un ahorro de distancias de un 32% gracias principalmente a la asignación de muelles preferentes, evitando así que los pallets se vean obligados a recorrer en ocasiones la totalidad de la longitud del almacén para llegar a la playa correcta.

	DIST MEDIA CLIENTE (m)	MOVIMIENTOS CLIENTE	DIST TOTAL CLIENTE (m)
C1	50,69	1500	76037,27
C2	41,84	380	15901,03
C3	40,65	316	12843,87
C4	48,37	210	10156,76
C5	47,64	12	571,64
C6	30,31	12	363,69
C7	36,96	14	517,46
C8	38,00	1	38,00
C9	19,71	150	2957,14
DIST MEDIA ALMACÉN (81%)			46,01

Tabla 13. Distancias medias por cliente desde los muelles preferentes hasta la carga. Distribución por clientes del almacén.

6.4.3. Distribución por clientes y ABC

Se utiliza la misma lógica que en la distribución simple por clientes, pero afinando más los cálculos para incluir subgrupos por popularidad. Se realiza el cálculo tanto para el ABC óptimo en las zonas de grupos como utilizando la adaptación mostrada anteriormente.

Caso óptimo:

CLIENTE	DIST MEDIA CLIENTE (m)	MOVIMIENTOS CLIENTE	DIST TOTAL CLIENTE (m)
C1-1	35,35	900	31810,91
C1-2	45,50	450	20474,33
C1-3	61,34	150	9201,30
C2-1	32,90	254,6	8375,61
C2-2	41,28	102,6	4235,22
C2-3	49,63	22,8	1131,52
C3-1	30,24	214,88	6498,49
C3-2	38,20	88,48	3379,94
C3-3	48,91	12,64	618,19
C4-1	22,23	84	1867,38
C4-2	30,52	94,5	2884,38
C4-3	55,22	31,5	1739,45
C5-1	39,51	7,68	303,46
C5-2	41,29	3,12	128,81
C5-3	70,47	1,2	84,57
C6-1	23,33	5,76	134,40
C6-2	24,00	3,36	80,64
C6-3	38,00	2,88	109,44
C7	38,00	14	532,00
C8	36,96	1	36,96
C9	19,71	150	2957,14
DIST MEDIA ALMACÉN (81%)			37,22

Tabla 14. Distancias medias por cliente desde los muelles preferentes hasta la carga. Distribución por clientes y tipo de carga (ABC) del almacén. Ubicaciones óptimas.

El caso óptimo de ABC por grupos supone un ahorro de casi 9 metros por cada ubicación respecto a la distribución simple por clientes, que multiplicado por los 2595 movimientos diarios previstos supone un ahorro total de 22,81 km entre todos los carretilleros.

Caso adaptado:

Se considera la distribución final (Ilustración 36), que por su similitud con la óptima da unos resultados similares.

CLIENTE	DIST MEDIA CLIENTE (m)	MOVIMIENTOS CLIENTE	DIST TOTAL CLIENTE (m)
C1-1	35,97	900	32373,41
C1-2	46,17	450	20774,42
C1-3	60,47	150	9071,20
C2-1	33,30	254,6	8478,18
C2-2	41,25	102,6	4232,52
C2-3	49,32	22,8	1124,57
C3-1	32,27	214,88	6934,76
C3-2	42,17	88,48	3731,39
C3-3	42,81	12,64	541,11
C4-1	25,54	84	2145,23
C4-2	42,84	94,5	4048,26
C4-3	52,09	31,5	1640,92
C5-1	37,46	7,68	287,69
C5-2	37,00	3,12	115,44
C5-3	48,32	1,2	57,98
C6-1	19,00	5,76	109,44
C6-2	22,50	3,36	75,60
C6-3	27,50	2,88	79,20
C7	42,50	14	595,00
C8	23,50	1	23,50
C9	22,43	150	3364,29
DIST MEDIA ALMACÉN (81%)		38,46	

Tabla 15. Distancias medias por cliente desde los muelles preferentes hasta la carga.
Distribución por clientes y tipo de carga (ABC) del almacén. Ubicaciones adaptadas.

En este caso se obtiene una distancia media 1,24m superior a la del caso óptimo, generando aun así un ahorro diario de 19,59km diarios respecto a la distribución simple por clientes.

Con el análisis anterior se puede concluir que la opción más conveniente para el almacén será la de aplicar distribución por ABC. Además de la ventaja por distancias, se sumaría en este caso la reducción del área de búsqueda en caso de pérdida de pallet (una ocurrencia común en un almacén de estas dimensiones y con tanto movimiento).

6.4.4. Distancias medias recorridas por hora

Utilizando la distribución en ABC de cada cliente y la distancia media a cada uno de estos grupos, y cruzando estos datos con los horarios de llegada y salida de los camiones, pueden obtenerse los metros que se prevé tendrán que recorrer las carretillas para completar los pedidos de cada hora, lo que deja en evidencia el problema que surgirá entre las 9h y las 13h (Anexo 6).

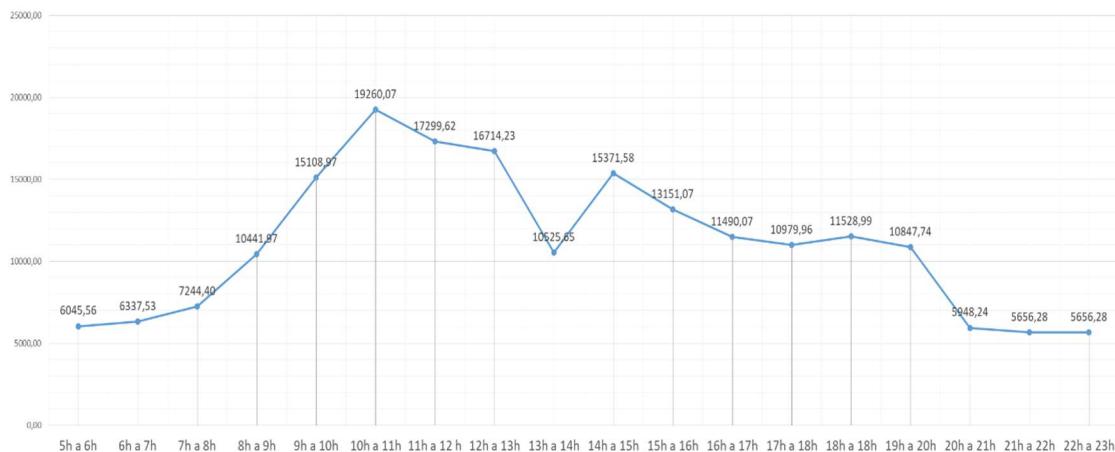


Ilustración 39. Distancias aproximadas (metros) a recorrer por las carretillas para completar las órdenes de cada hora.

7. MODELO DE SIMULACIÓN

7.1. Desarrollo del modelo de simulación

La simulación se lleva a cabo con el programa Anylogic y utilizando como base los cálculos anteriores. Se realizan dos modelos de simulación considerando el uso o no de un sistema de gestión de almacenes que evite la vuelta en vacío de los carretilleros. A continuación, se presentan los elementos y reglas comunes a ambos, para luego comentar las diferencias particulares que se generan en el comportamiento programado de los carretilleros.

7.1.1. Adaptación del *layout*

Se realizan ligeras modificaciones al *layout* seleccionado anteriormente para adecuarlo al programa de simulación⁴.

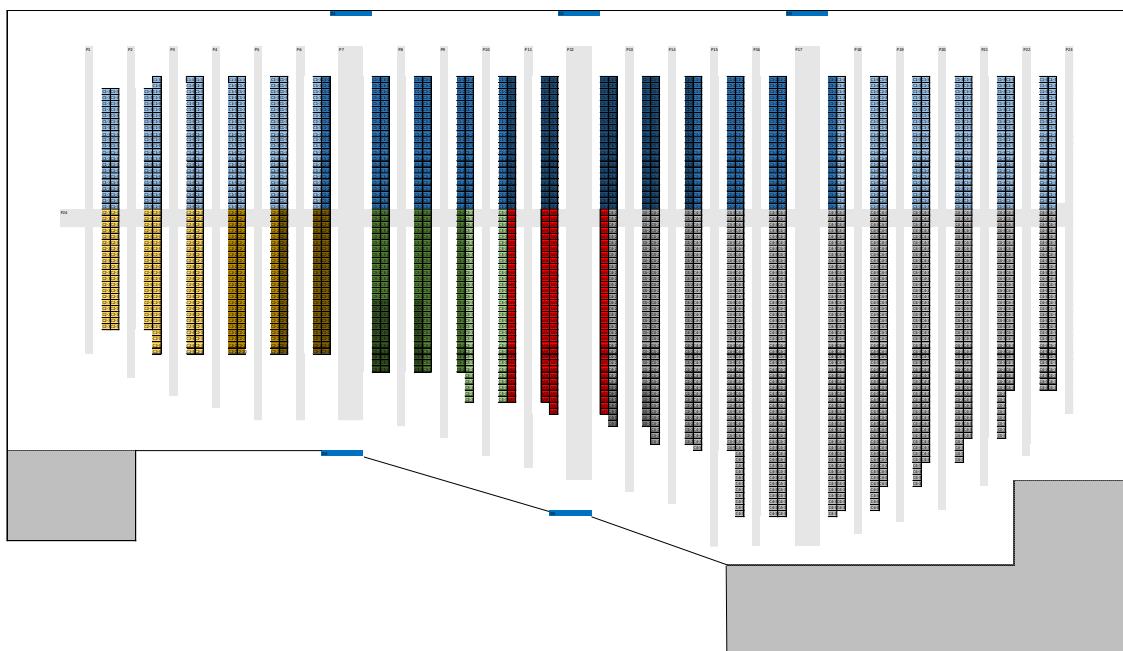


Ilustración 40. *Layout* del almacén adaptada para el modelo de simulación

7.1.2. Entradas y salidas del almacén

La entrada y salida de pallets del almacén sigue las distribuciones estudiadas de los clientes, respetando tanto horarios como variabilidad en el número de camiones diarios (caso del cliente 4, en el que la media de viajes diarios no es un fiel reflejo de la realidad). La única diferencia notable se da en el cliente 9, que en la mayoría de las ocasiones descarga y carga los pallets en el mismo día. En la simulación se le ha asignado un comportamiento único para que al descargar sus pallets estos no sean almacenados en estanterías, sino que permanezcan en la playa a la espera de ser cargados. Se

⁴ Podría mantenerse la forma original, pero incrementaría considerablemente el número de elementos necesarios en el modelo. La forma adaptada mantiene una similitud suficiente con la original para no generar cambios significativos en los resultados y reduce alrededor de un 30% el número de elementos "estantería" necesarios.

asigna este comportamiento para ahorrar una distancia extra a los carretilleros y poder calcular el espacio de playas que será necesario para esta estrategia de actuación.

Todas las entradas presentan variaciones en función de factores probabilísticos para considerar posibles retrasos o variaciones imprevistas.

7.1.3. Creación de órdenes

Las órdenes, tanto de entrada como de salida, se generan siguiendo la distribución de inventario estudiada. En el caso de las órdenes de salida, los pallets son seleccionados aleatoriamente entre los disponibles por cada cliente (incluyendo aquellos que puedan haber llegado a lo largo del día) en las proporciones de cada tipo ABC adecuadas hasta llegar al tamaño correcto de la orden (o hasta que se acabe el stock si se diese el caso).

7.1.4. Carretillas

Se considera un número variable, con comportamientos dependientes del uso o no de SGA. No se tienen en cuenta aceleraciones, sólo velocidad media.

CARRETILLA	VELOCIDAD
Con Carga	2,1 m/s
Sin Carga	2,5 m/s
PROMEDIO	2,3 m/s

Tabla 16. Velocidad media de una carretilla.
Datos provistos por ITAINNOVA.

Se calcula para las carretillas el tiempo dedicado a cada actividad:

- Idle*: la carretilla no tiene labor asignada.
- Unloading*: descargando un camión a la playa.
- Storing*: guardando pallets desde la playa a las estanterías.
- Picking*: extrayendo cargas de las estanterías a la playa.
- Loading*: cargando los pallets desde la playa al camión.

7.1.5. Cálculo en alturas

Las alturas no se han tenido en cuenta en el cálculo del *layout* utilizado, pero sí se aplican en la simulación utilizando una media ponderada de tiempos para extracción o colocación de cargas.

ALTURA	TIEMPO NECESARIO (min)	PONDERACIÓN EN ALMACÉN	PONDERACIÓN EN PLAYA	TIEMPO EN ALMACÉN (min)	TIEMPO EN PLAYA (min)
Altura Suelo	0,300	0,300	0,700	0,090	0,210
Altura 2	0,350	0,250	0,300	0,088	0,105
Altura 3	0,500	0,200	0,000	0,100	0,000
Altura 4	0,650	0,100	0,000	0,065	0,000
Altura 5	0,770	0,070	0,000	0,054	0,000
Altura 6	0,900	0,050	0,000	0,045	0,000
Altura 7	1,050	0,030	0,000	0,032	0,000
TIEMPO MEDIO (min)				0,473	0,315
TIEMPO MEDIO (seg)				28,374	18,900

Tabla 17. Tiempos medios para colocar o extraer cargas de una estantería o playa. Datos provistos por ITAINNOVA.

Quedan unos tiempos medios de ubicación/extracción de estantería del almacén de 28,37s, y de 18,90s para colocación/recogida de pallets de una playa.

7.1.6. Playas

No se limita el número de ubicaciones en las playas, de modo que pueda estudiarse el espacio necesario en función de la combinación de factores a aplicar. Se establece en función del muelle más cercano una jerarquía de uso para que se escoja siempre primero la playa más conveniente.

Para la medición del uso de playas, ésta se realiza tanto por pallets presentes como por órdenes.

7.1.7. Entrada y salida de camiones

El tiempo que se tarda en cambiar de camión en un muelle es el que conlleve maniobrar desde el punto de entrada a la simulación hasta el muelle, más un tiempo extra para avisar al conductor.

7.1.8. Congestión

Anylogic no posee ninguna herramienta para medir la congestión, de modo que se desarrolla un algoritmo que compare continuamente la distancia entre todas las carretillas. Los tiempos perdidos por congestión se calculan en base a los cruces entre carretillas durante la simulación, y se añaden a la acción de colocar o extraer pallets. Este tiempo que se incluye se obtiene en función de los tiempos medios de colocación/extracción de pallets y las pérdidas por cruces en pasillos, obteniendo una media por cruce de 1,91s (Anexo 11.1).

7.1.9. Ocupación de muelles

Se tiene en cuenta como ocupación no sólo el tiempo en que hay un camión en el muelle, sino también el tiempo durante el cual un camión maniobra para colocarse o salir del muelle (el muelle ya ha sido asignado y no puede utilizarse para otra acción, así que no puede considerarse como libre).

7.1.10. Ocupación inicial del almacén

La ocupación inicial se realiza con las mismas distribuciones de ubicaciones que tendría si las cargas hubiesen sido descargadas de un camión durante la simulación. La limitación del modelo a un solo día hace que el estado final de ocupación no se tenga en cuenta para la siguiente simulación.

7.1.11. Tiempo de aviso para preparación de órdenes

Se utiliza como variable, asignando dos tiempos diferentes, uno para los clientes 1, 2 y 3, y otro para el resto (basados en los tiempos reales).

7.1.12. Diseño del SGA. Comportamiento de carretillas

-Sin SGA: se corresponde con el comportamiento actual de la empresa en la que están basados los datos. Un mismo carretillero se encarga de descargar un camión y luego guardar los pallets en las estanterías. La misma lógica se sigue para las salidas del almacén. Se asigna una orden a la vez por carretillero, y no se cambia hasta que se ha completado. Esto implica que las vueltas se realizan en vacío (sin cargar ningún pallet) dado que las órdenes sólo mueven pallets en una dirección.

-Con SGA: las cargas y descargas de camiones a la playa se siguen asignando a un solo carretillero (por motivos obvios de congestión) y no se pueden interrumpir. Para guardar o extraer pallets de estanterías se asigna a cada carretillero la carga más conveniente en función de la distancia a cada pallet, el tiempo restante para completar cada orden y la saturación de las playas.

La lógica a seguir para la asignación consiste en multiplicar la distancia a cada pallet (calculada como pixeles del modelo de simulación) por un coeficiente que depende de si el pallet está entrando o saliendo del almacén.

$$DISTANCIA_i = (DISTANCIA REAL) \times (FACTO COMPENSACIÓN)$$

Entradas: se considera para el factor la saturación de las playas (no hay urgencia por tiempo dado que no se tiene que preparar una orden, pero debe tenerse en cuenta que al dejar los pallets en las playas se puede acabar creando un problema de espacio).

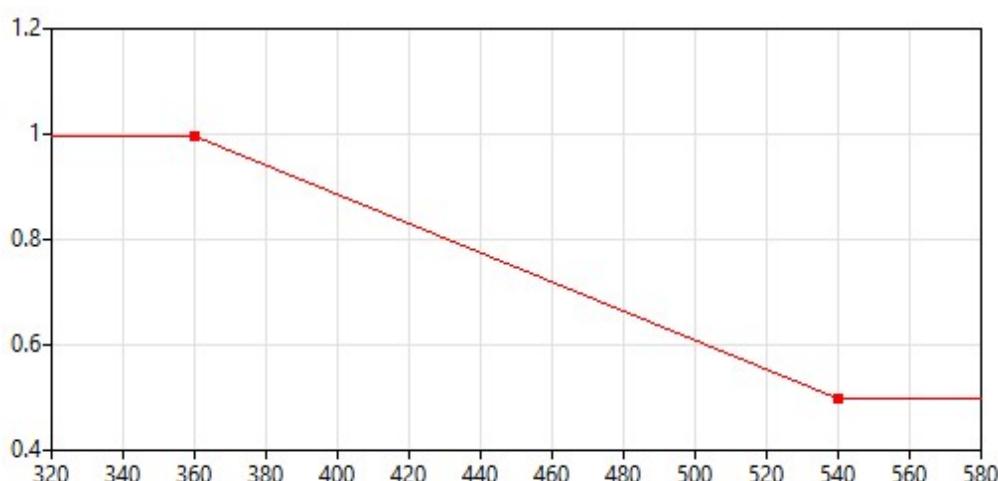


Ilustración 41. Factor de compensación (eje Y) en función de los pallets totales presentes en las playas (eje X).

Salidas: se tiene en cuenta para el factor de compensación el tiempo restante para completar la orden a partir de que falten 30 minutos y en función del tamaño del almacén (es un factor lineal, de tal modo que al llegar a 1 minuto restante convierte DISTANCIAi en un número cercano a cero).

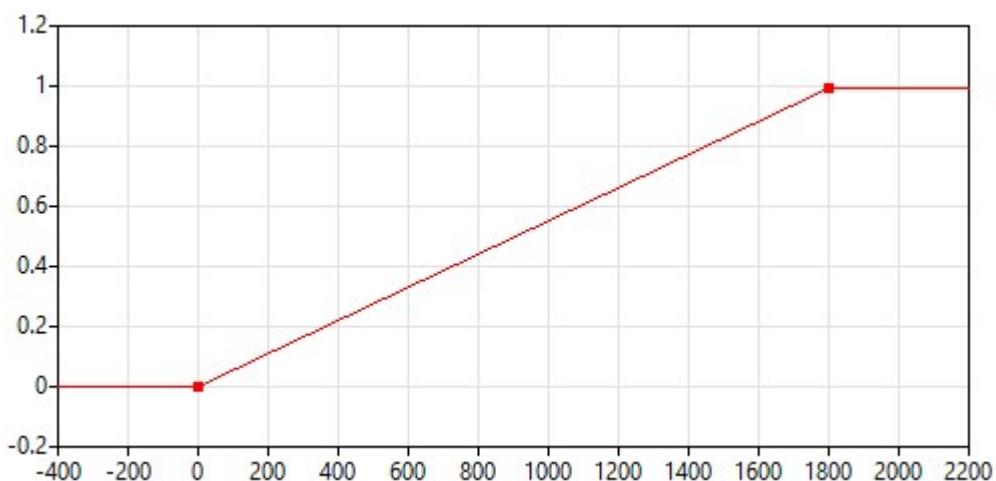


Ilustración 42. Factor de compensación (eje Y) en función del tiempo restante en segundos para que deba estar lista la orden (eje X).

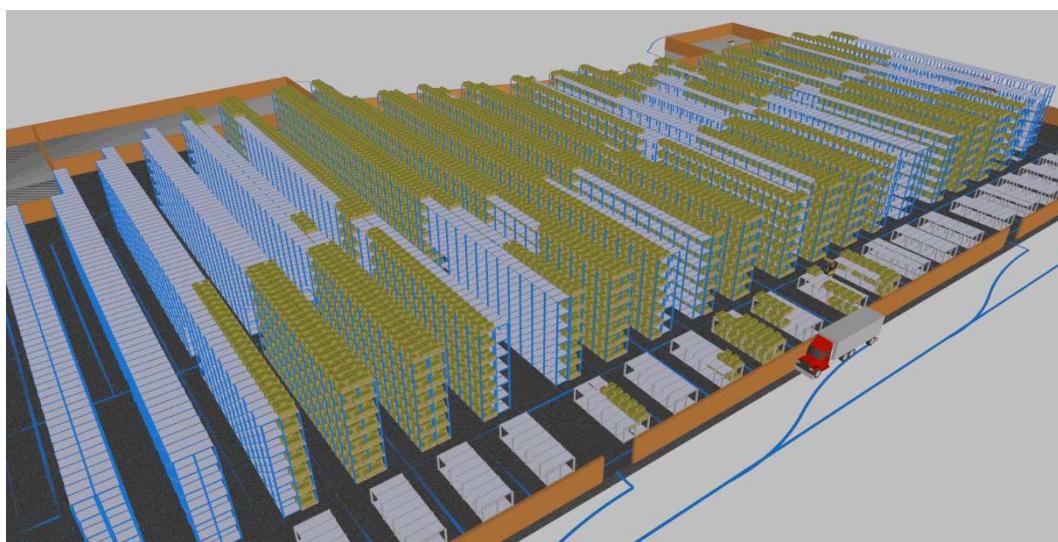


Ilustración 43. Modelo en 3D del almacén utilizado por la simulación.

7.2. Metodología DoE

Una vez completado y validado el modelo de simulación (Anexo 7), se aplica la metodología DoE utilizando el programa Minitab. Se estudian 4 factores completos con 10 repeticiones para abarcar la aleatoriedad, utilizando como elemento a medir el tiempo de espera entre que un camión llega al almacén hasta que se le asigna un muelle libre, con pesos distintos en función del cliente (Anexo 8). Con estas condiciones, Minitab requiere 166 repeticiones por cada modelo (332 repeticiones en total).

7.2.1. Sin SGA

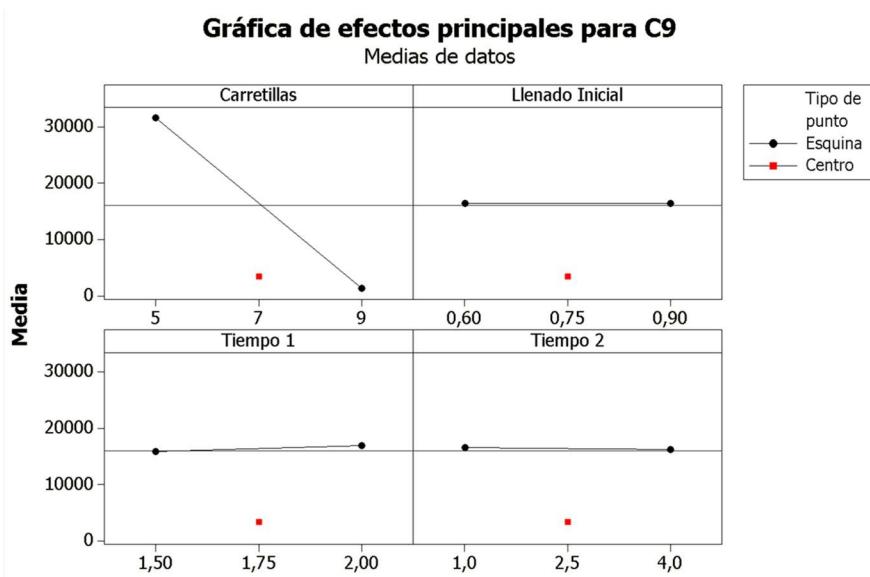


Ilustración 44. Resultado de los efectos principales por la metodología DoE para el caso sin SGA.

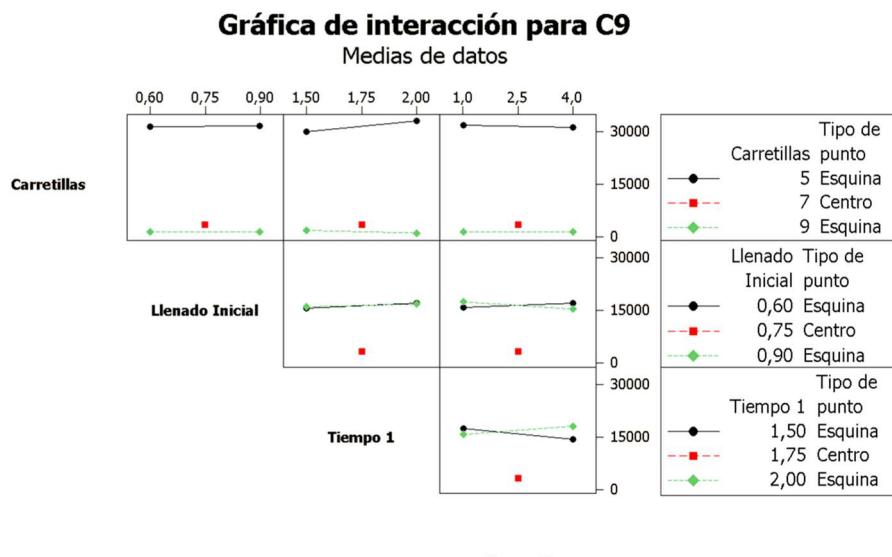


Ilustración 45. Resultado de las interacciones por la metodología DoE para el caso sin SGA.

7.2.2. Con SGA

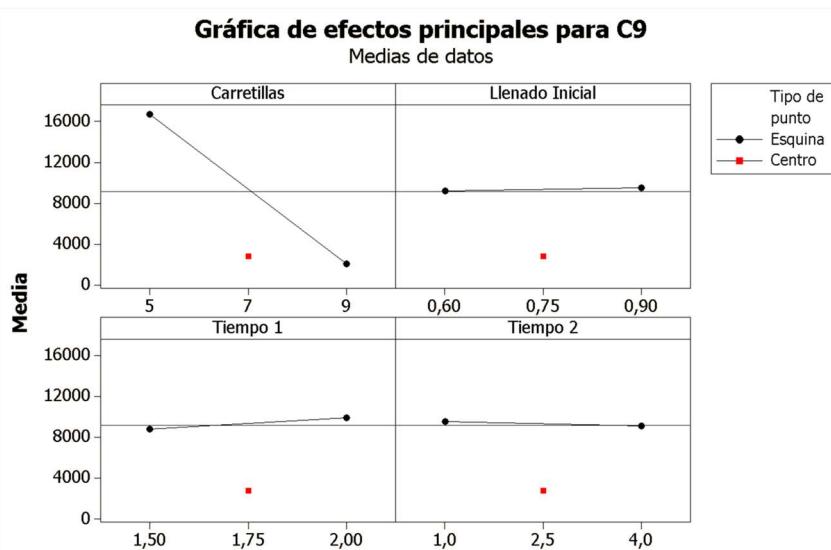


Ilustración 46. Resultado de los efectos principales por la metodología DoE para el caso con SGA.

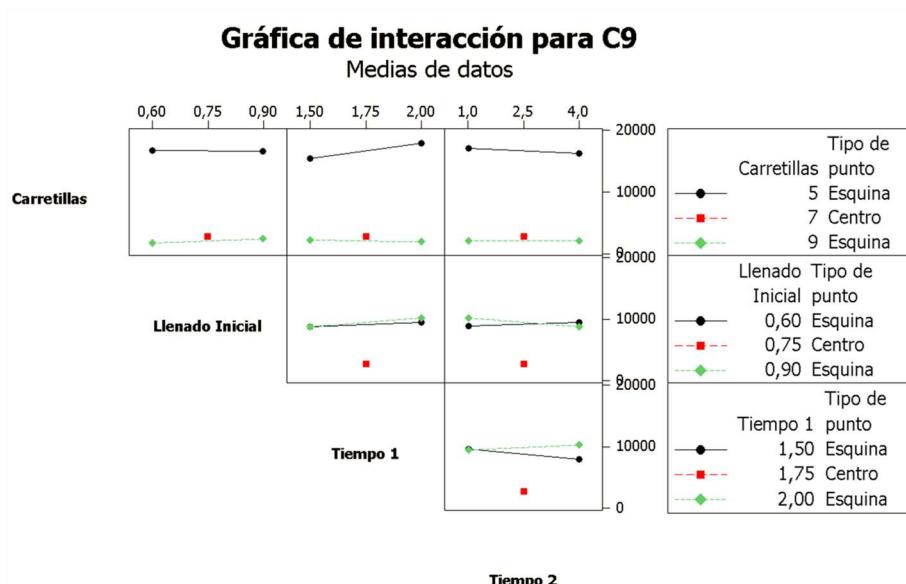


Ilustración 47. Resultado de las interacciones por la metodología DoE para el caso con SGA.

Con las gráficas y los resultados del análisis de varianza (Anexo 8) se puede extraer la conclusión de que la influencia de las carretillas supera por mucho la de cualquier otro elemento (explica un 94,61% de la variabilidad en el caso sin SGA y un 89,78% en el caso con SGA). El resto de elementos, además de tener una influencia muy baja, presentan p-valores elevados, de modo que no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

Estos resultados pueden explicarse en gran medida debido a la priorización de viajes, que mal realizada puede llevar a un uso indebido de los recursos, y a la distribución de los horarios. Por un lado, adelantar el tiempo de preparación de un viaje puede hacer que se acabe realizando uno no prioritario antes que otro más urgente, ya que sin SGA se sigue el orden FIFO para su realización. Por otro lado, con el SGA ha de tenerse en cuenta que el carretillero buscará el pallet más conveniente desde su posición, pero un adelanto de preparaciones puede hacer que no siempre coincida con el

mejor a largo plazo, ya que el algoritmo desarrollado no tiene en cuenta futuras saturaciones de recursos y congestiones en zonas, y por favorecer la recolección de un pallet no urgente pero cercano puede acabar convirtiendo otra orden en una urgencia, enviando más carretillas a la zona y empeorando los problemas de congestión.

Dada la gran dominancia del efecto de las carretillas en los tiempos de espera de los camiones, se dejan valores fijos en el resto de parámetros, seleccionando los más comunes (llenado inicial del 81%, tiempo de preparación para clientes 1, 2 y 3 de 1,5h y tiempo de preparación para los clientes 4 a 9 de 3h).

7.3. Estudio de la variable principal

Se estudia en mayor detalle el efecto del número de carretillas para elegir una cantidad adecuada. Se establece como límite para ser tenido en cuenta un tiempo máximo de espera de los camiones de media hora. Entre los valores considerados, se analizan además el aprovechamiento de las carretillas, las pérdidas de tiempo por congestión y la espera total de todos los camiones al día para tomar una decisión.

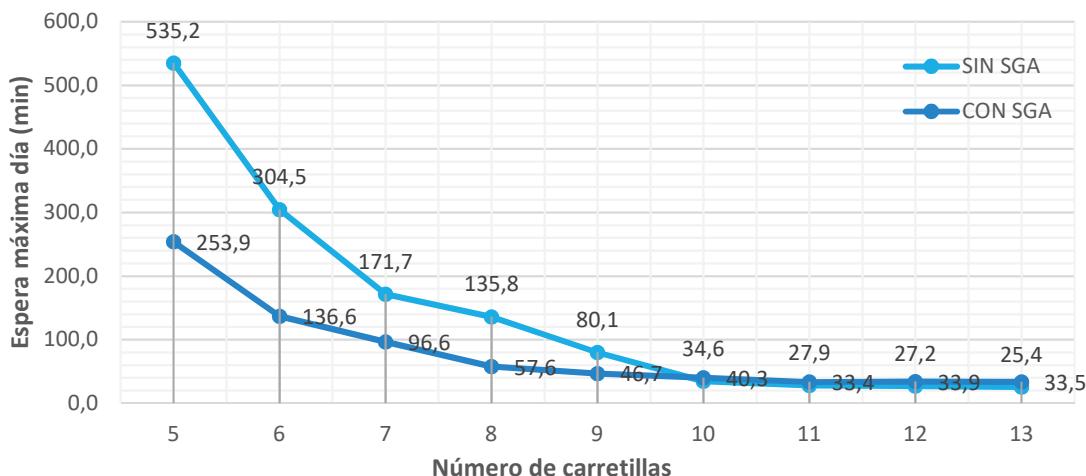


Ilustración 48. Relación entre la espera máxima media de los camiones hasta que se les asigna un muelle (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.

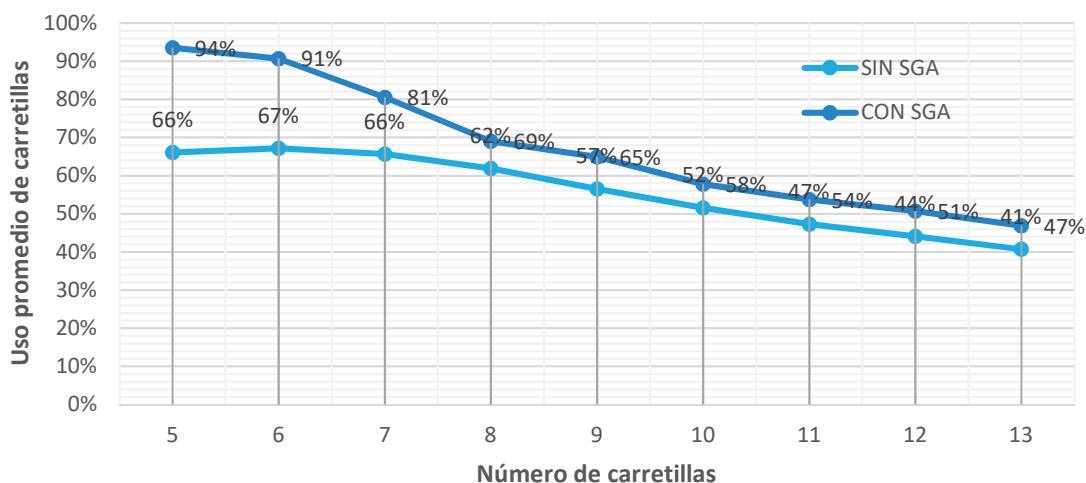


Ilustración 49. Relación entre la utilización media de las carretillas y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.

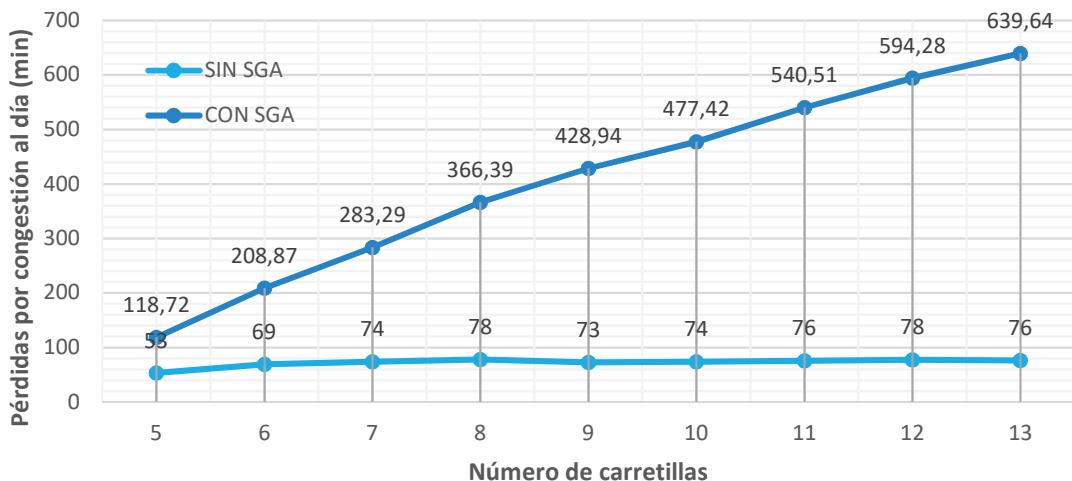


Ilustración 50. Relación entre el tiempo diario perdido por congestión (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.

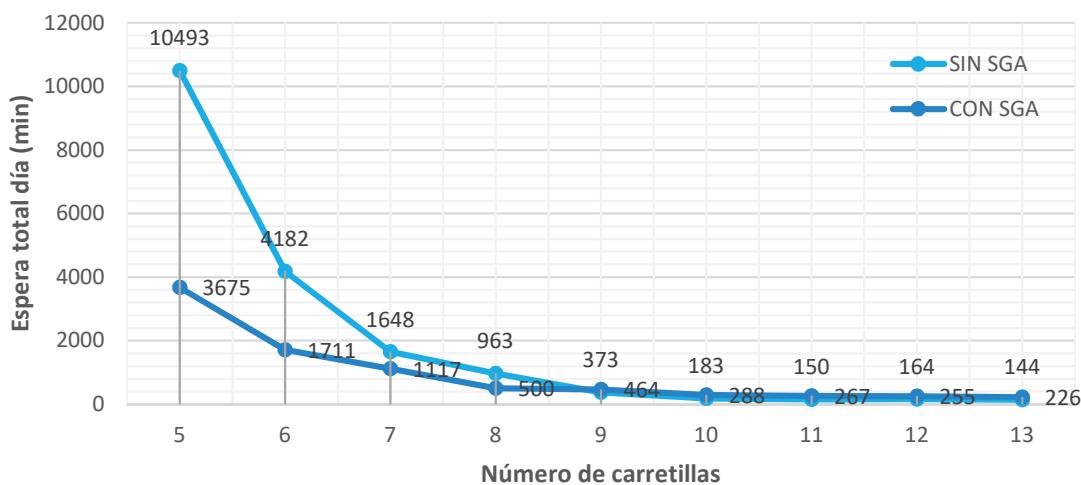


Ilustración 51. Relación entre la espera total media de los camiones hasta que se les asigna un muelle y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA.

El uso de un SGA produce grandes cambios en el funcionamiento del almacén, aunque no siempre positivos. En este caso, el SGA hace que, si bien ante un número bajo de carretillas los tiempos mejoren, al final la congestión generada provoca que en ningún momento la espera máxima baje del umbral de 30 minutos. Por ello se elige en este caso utilizar 11 carretillas sin SGA, el menor número posible capaz de absorber el pico de actividad de las horas centrales del día.

En el apartado 9 (Análisis del SGA) se explican los motivos detrás de este fenómeno y se presentan varias conclusiones sobre los factores que afectan la efectividad del SGA.

7.4. Análisis en detalle (sin SGA. 11 carretillas)

Con el número de carretillas decidido se puede pasar al último punto: el análisis completo del funcionamiento del almacén. Para ello se analizan la ocupación de los carretilleros y sus actividades, el uso de muelles y playas, las esperas de los camiones y la congestión.

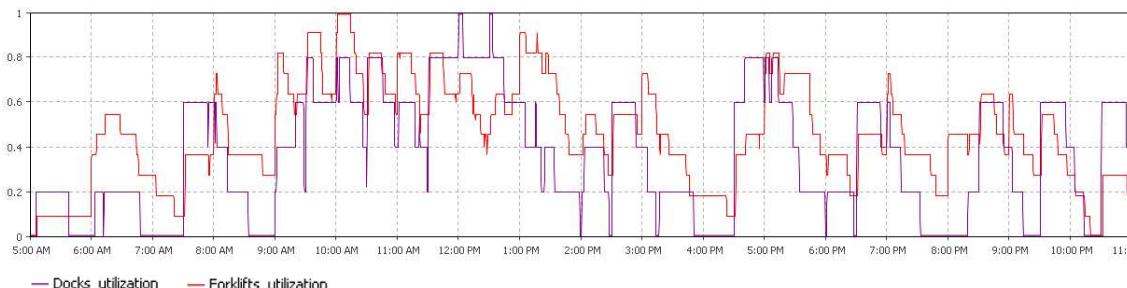


Ilustración 52. Utilización, por horas, de las carretillas (rojo) y los muelles (violeta).

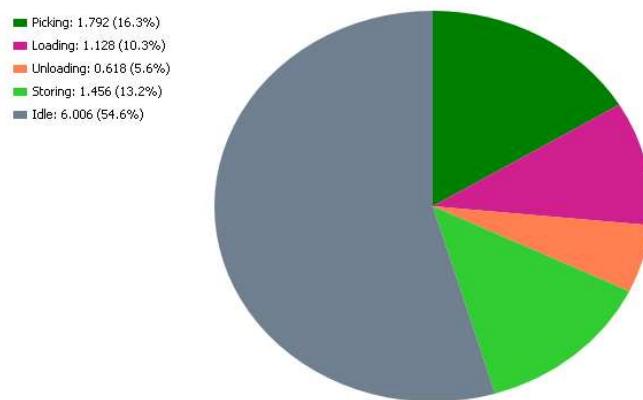


Ilustración 53. Distribución de tareas de las carretillas a lo largo de la simulación.

Como se puede ver en la ilustración 52, las carretillas en escasas ocasiones se utilizan plenamente, sólo para el pico de las 10 de la mañana. Un menor número de ellas, sin embargo, generaría retrasos demasiado grandes en esta franja.

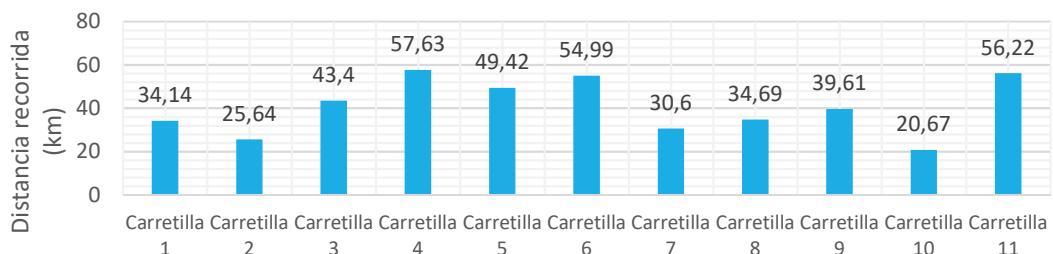


Ilustración 54. Distancia recorrida por las carretillas en el periodo de tiempo simulado.

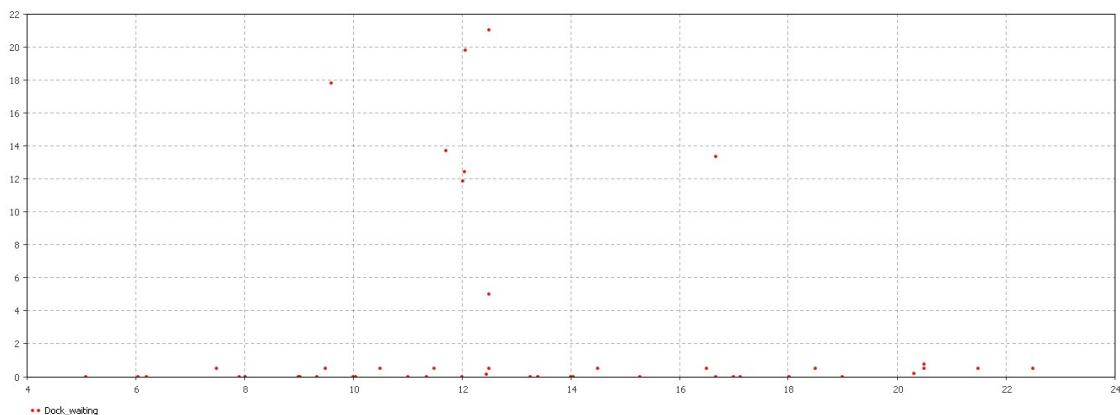


Ilustración 55. Espera de cada camión (eje Y, minutos) en relación con la hora asignada de llegada al almacén (eje X, hora).

Las esperas de los camiones se producen cerca de los picos de actividad, a las 10 y 12 de la mañana. Es importante señalar que los retrasos de las 12 son provocados no tanto por las carretillas como por la saturación de los muelles, llegando a estar los 5 ocupados a la vez y generando así las esperas mencionadas.

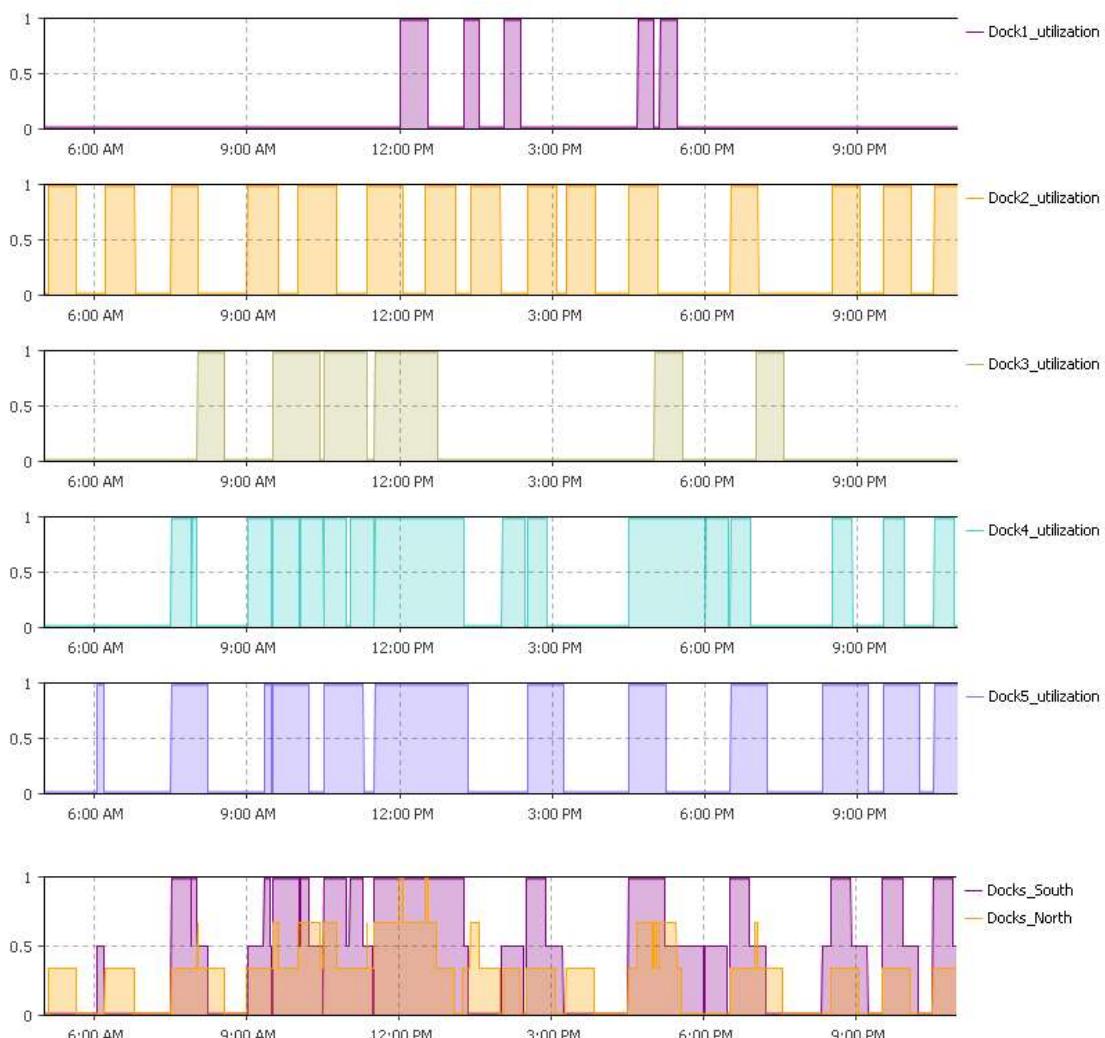


Ilustración 56. Utilización individual de los muelles (primeras 5 imágenes) y del conjunto de muelles del lado Norte (muelles 1, 2 y 3) y del lado Sur (muelles 4 y 5).

Los muelles más utilizados son el 2, 4 y 5. No es necesaria una distribución distinta de clientes asignados a ellos ya que el único momento en el que provocan esperas es cuando los cinco se encuentran ocupados al mediodía.

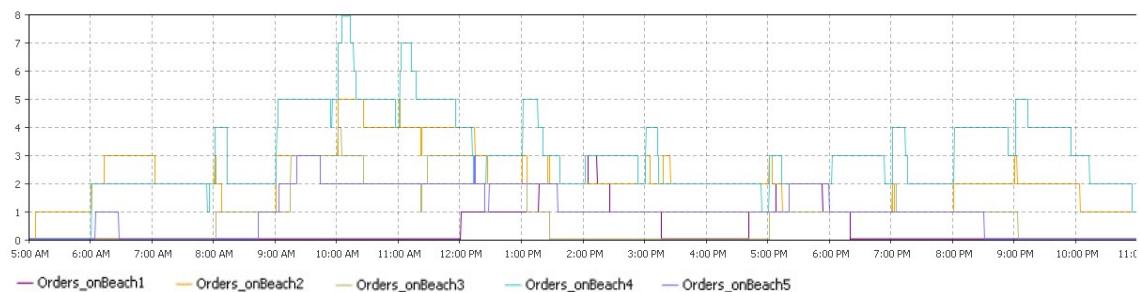


Ilustración 59. Utilización de las playas en número de órdenes presentes de manera simultánea.

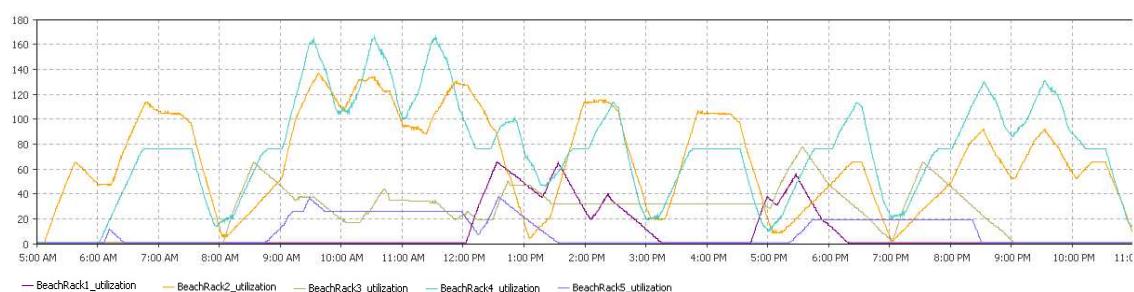


Ilustración 58. Utilización de las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.

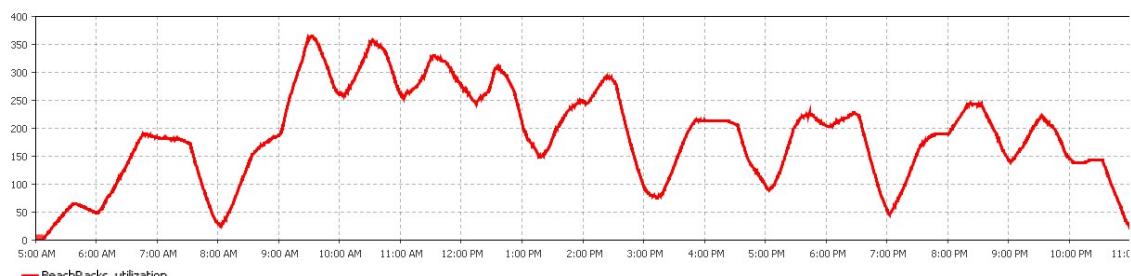


Ilustración 59. Utilización de todas las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.

El alto número de carretilleros hace que las órdenes puedan comenzarse con gran antelación, lo que lleva a una utilización elevada de las playas, tanto en número de pallets como en órdenes simultáneas. No son de todos modos cantidades no manejables gracias a que muchas de las órdenes son pequeñas, pero sí debería considerarse una mayor previsión para liberar ligeramente las playas de los muelles 2 y 4, desviando entradas a otros muelles.

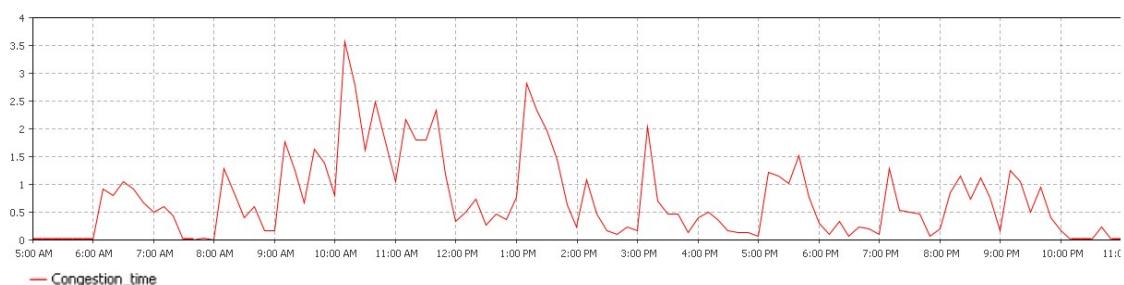


Ilustración 60. Tiempo perdido por problemas de congestión (minutos, eje Y) por hora (eje X).



Ilustración 61. Puntos en los que se produjeron cruces de carretillas (utilizado para el cálculo de congestión).

La congestión no llega a ser un factor determinante sin el SGA, alcanzando su pico de actividad a las 10 de la mañana. Este problema se concentra en los muelles 2 y 4, de modo que se refuerza la sugerencia anterior de desviar algunos viajes a otros muelles.

En general, se trata de una configuración del almacén muy limitada por los horarios de las entradas y salidas, que provocan una mala utilización de las carretillas debido a un exceso de capacidad para el resto de horas. Sería recomendable negociar cambios en los horarios con los clientes, especialmente en las entradas, que son más flexibles, de modo que puedan reducirse los picos y conseguir así un uso más uniforme de los recursos.

8. PROPUESTA DE MEJORA

En el estudio del almacén, tanto con como sin SGA, uno de los mayores problemas presentes surgía a consecuencia de la mala distribución de horarios. Por ello se propone una versión del funcionamiento del almacén desplazando entradas de pallets de los clientes 1, 2 y 3 a franjas de menor actividad. Se eligen estos clientes porque eran sus muelles asignados los que sufrían mayor saturación, y se modifican sólo las entradas debido a que, por necesidades de los clientes, las salidas tienen horario fijo inamovible.

La propuesta siguiente es una de tantas posibles y en todo caso debería ser aprobada por cada uno de los clientes involucrados. Ofrece sin embargo una idea de las posibilidades de mejora presentes, y de los cambios que genera en los efectos del SGA.

	5:00	5:30	7:00	7:30	8:00	9:00	12:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	22:00
■ Cliente 1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
■ Cliente 2	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
■ Cliente 3	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

Tabla 18. Horario propuesto de entrada de camiones de los clientes 1, 2 y 3.

Estos horarios permiten repartir mejor la carga a lo largo del día, consiguiendo un uso más extendido de los recursos, como puede comprobarse más adelante en los datos extraídos de la simulación.

8.1. Estudio de la influencia de las carretillas

Debido a estos cambios se vuelve a realizar un análisis de la influencia de las carretillas con y sin SGA, para estudiar posibles cambios producidos. Se puede comprobar que la influencia del SGA es muy distinta a la producida en el caso anterior.

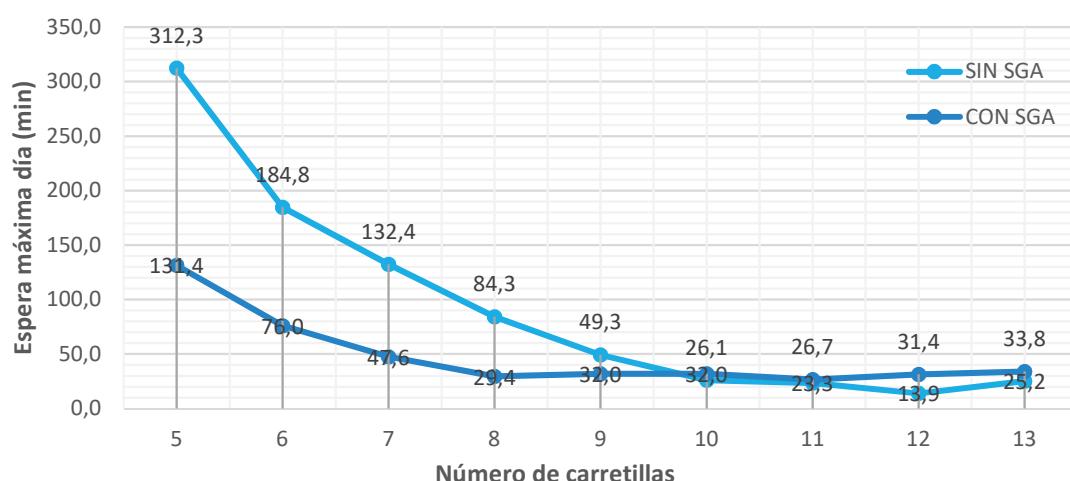


Ilustración 62. Relación entre la espera máxima media de los camiones hasta que se les asigna un muelle (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.

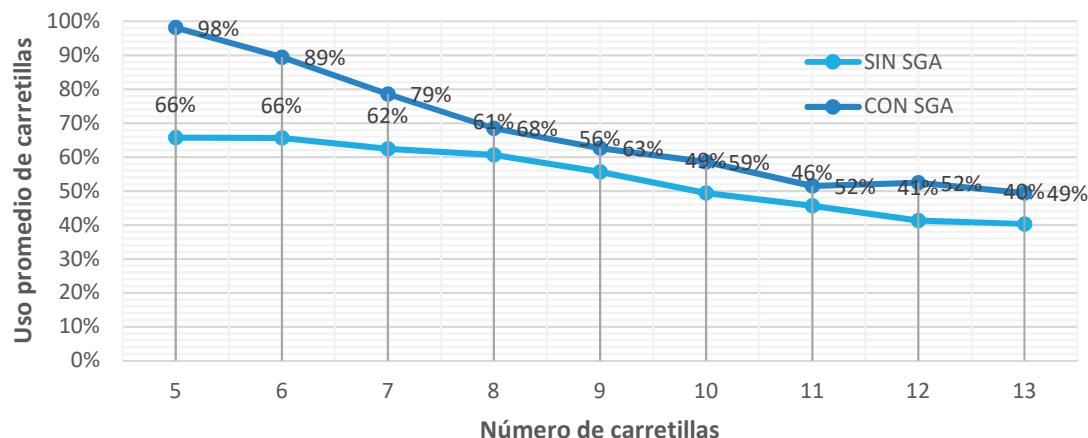


Ilustración 65. Relación entre la utilización media de las carretillas y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.



Ilustración 64. Relación entre el tiempo diario perdido por congestión (minutos) y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.

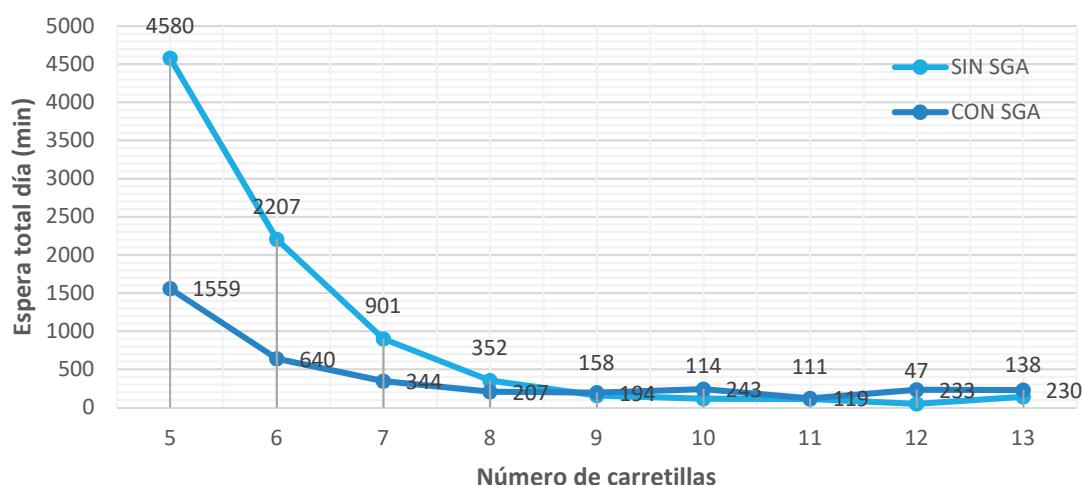


Ilustración 63. Relación entre la espera total media de los camiones hasta que se les asigna un muelle y el número de carretillas utilizadas por el almacén, con y sin SGA. Se utiliza el cambio de horario propuesto.

La mejor distribución de los horarios ayuda a que disminuya el efecto del pico de actividad, permitiendo que el SGA realice un mejor trabajo. La diferencia hace que pase de no ser viable en absoluto a dar mejores resultados que sin SGA, consiguiendo esperas máximas admisibles con menos carretillas. Se ve limitado sin embargo en los tiempos que puede alcanzar, ya que al incrementar el número de carretilleros la congestión acaba provocando que no se consigan mejoras.

Se procede a realizar un análisis completo del almacén utilizando un SGA y 8 carretilleros. La otra opción viable, sin SGA y con 10 carretillas, puede encontrarse en el Anexo 9.

8.2 Análisis en detalle (con SGA. 8 carretillas)

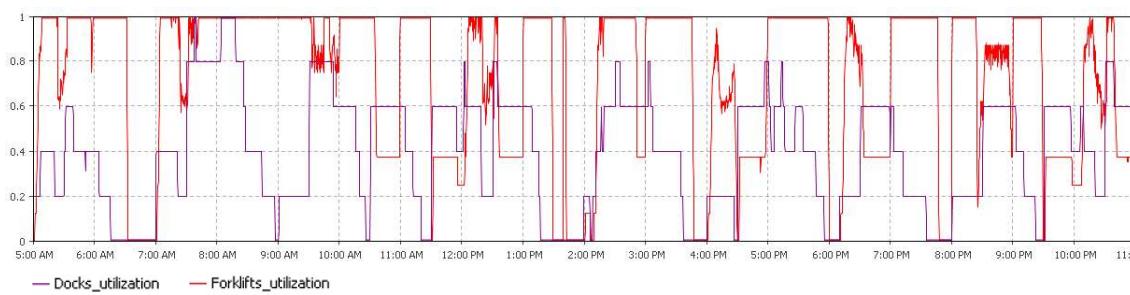


Ilustración 66. Utilización, por horas, de las carretillas (rojo) y los muelles (violeta).

- Picking: 1.915 (23.9%)
- Loading: 1.117 (14.0%)
- Unloading: 0.624 (7.8%)
- Storing: 1.786 (22.3%)
- Idle: 2.558 (32.0%)

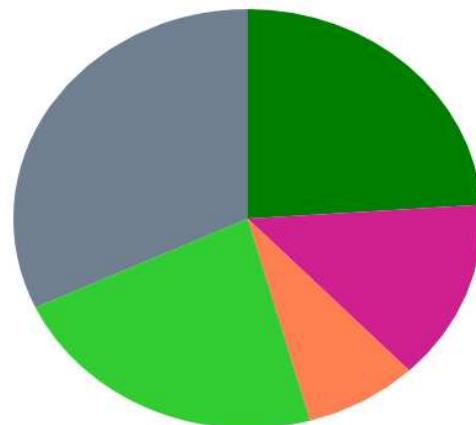


Ilustración 67. Distribución de tareas de las carretillas a lo largo de la simulación.

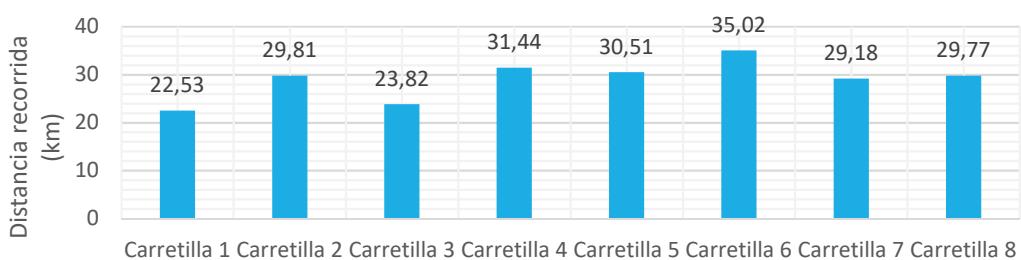


Ilustración 68. Distancia recorrida por las carretillas en el periodo de tiempo simulado.

Se realiza un uso mayor y más distribuido de las carretillas, como puede verse en la Ilustración 66. Es interesante destacar que, aunque el tiempo de extracción de pallets es equivalente al que pasan las carretillas guardándolos, no sucede lo mismo con las cargas y descargas. El motivo es que los camiones que van a cargar no siempre pueden entrar al muelle más conveniente con relación a la playa en donde se encuentran sus pallets, algo que en las descargas no supone un problema.

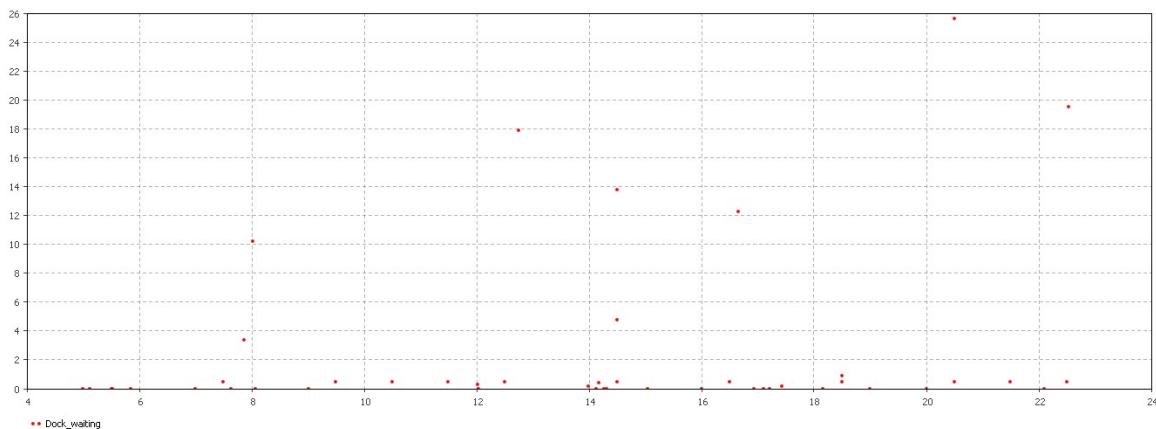


Ilustración 69. Espera de cada camión (eje Y, minutos) en relación con la hora asignada de llegada al almacén (eje X, hora).

Los tiempos de espera son razonables, con la mayor parte de los viajes entrando al muelle sin esperar. Si se compara la Ilustración 69 con la ocupación de los muelles, se puede ver que estos retrasos coinciden con momentos en los que los muelles 4 y 5 (muelles sur) están ocupados. Por ello se recomienda, como antes, desviar más entradas a los muelles 1, 2 y 3.

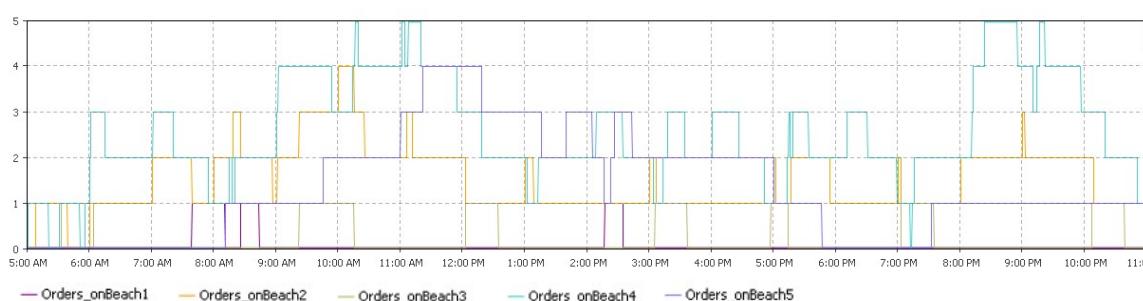


Ilustración 70. Utilización de las playas en número de órdenes presentes de manera simultánea.

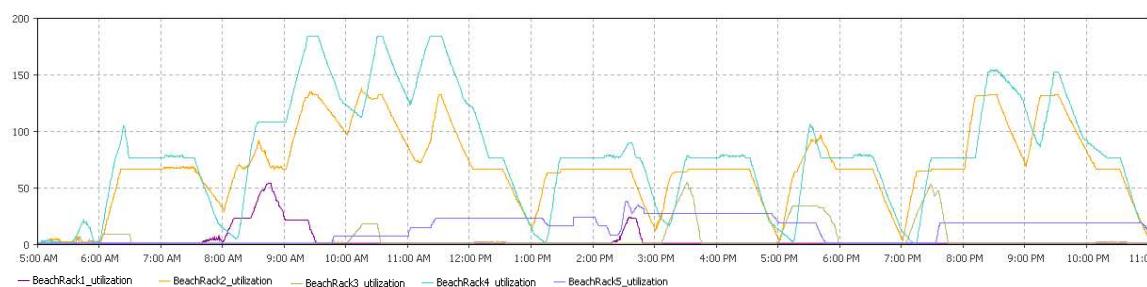


Ilustración 71. Utilización de las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.

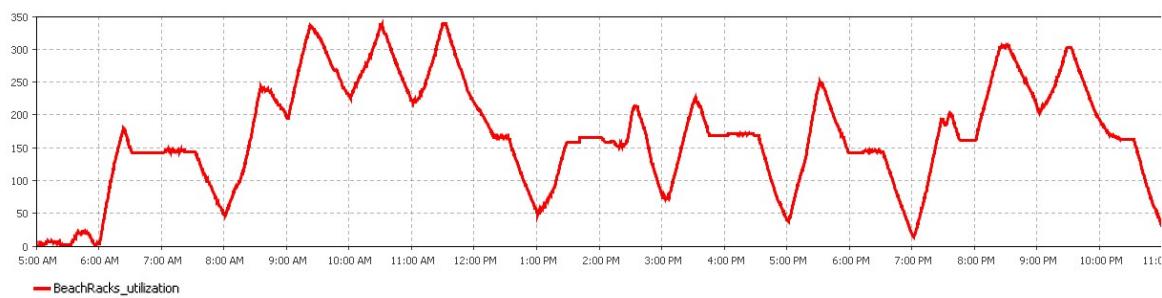


Ilustración 72. Utilización de todas las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.

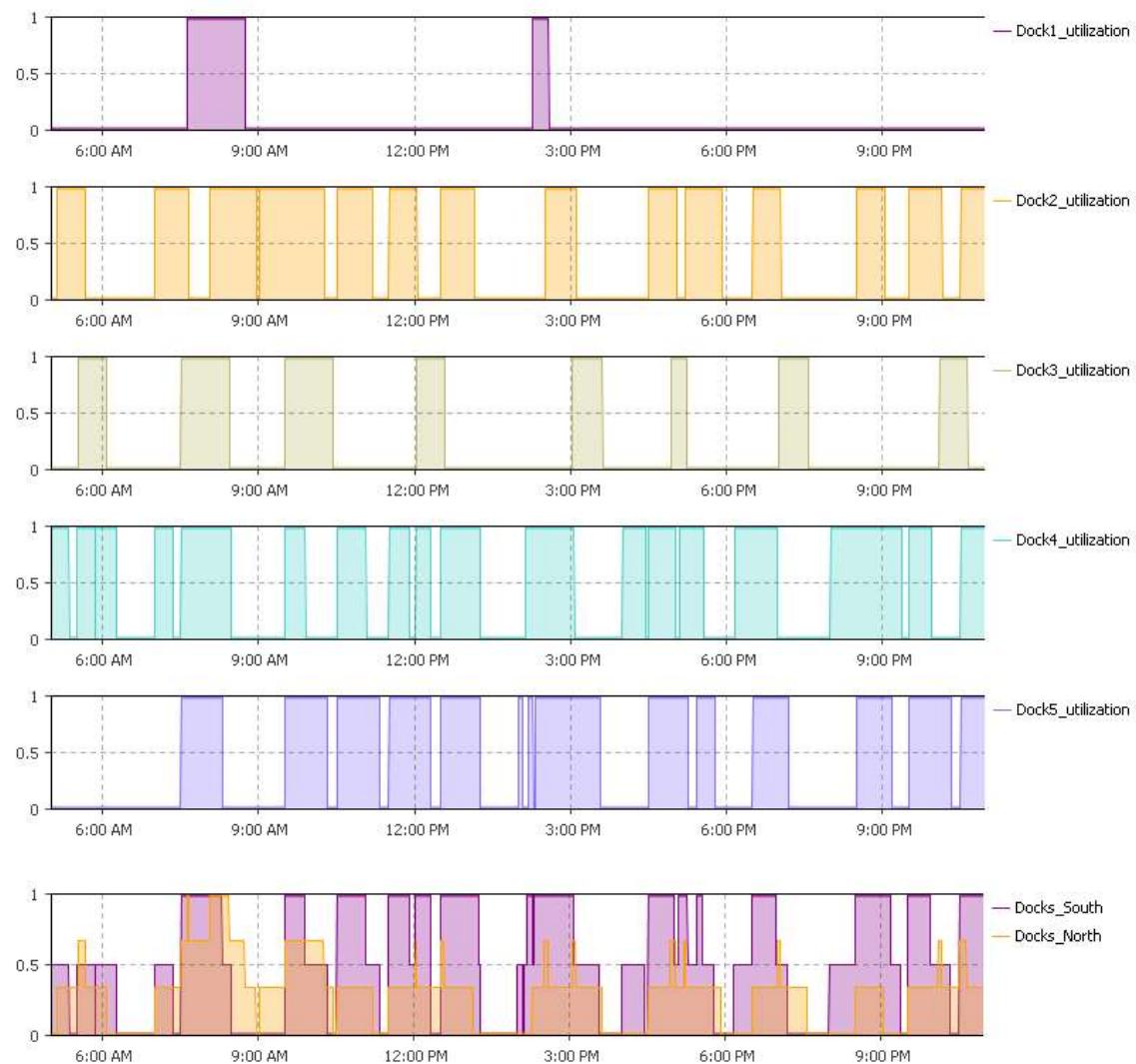


Ilustración 73. Utilización individual de los muelles (primeras 5 imágenes) y del conjunto de muelles del lado Norte (muelles 1, 2 y 3) y del lado Sur (muelles 4 y 5).

La ocupación de las playas es ligeramente menor que con las 11 carretillas sin SGA, lo cual es positivo, aunque en ninguno de los casos se superaba la capacidad existente.

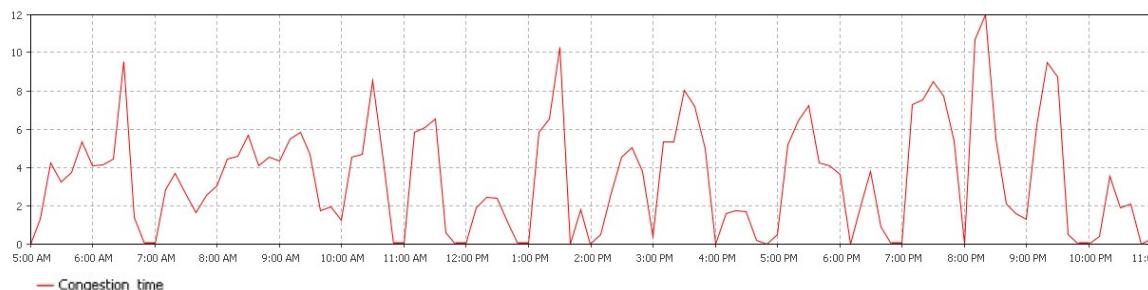


Ilustración 74. Tiempo perdido por problemas de congestión (minutos, eje Y) por hora (eje X).



Ilustración 75. Puntos en los que se produjeron cruces de carretillas (utilizado para el cálculo de congestión).

La congestión es el punto más interesante para comparar entre los casos sin y con SGA. Desde los primeros análisis se podía comprobar que este problema sería mucho mayor con SGA, pero ahora puede estudiarse en mayor detalle. En primer lugar, los picos de congestión son más marcados con el SGA, pasando continuamente de grandes pérdidas de tiempo a efectos nulos (Ilustración 74). Es otra consecuencia del SGA, que al intentar usar siempre el 100% de los recursos disponibles, pone a todos a trabajar en cuanto llega una orden (picos), para luego dejarlos inactivos cuando ésta se termina. Puede corroborarse esto con la Ilustración 66, donde se ve que no hay apenas puntos medios de uso de carretillas. Es o todas o ninguna. Los únicos casos donde se producen usos intermedios se dan cuando no hay órdenes de salida para preparar, sólo cargas y descargas de camiones.

Esta opción es más eficiente en número de carretillas que sin el SGA, pero deberían tenerse en cuenta dos cosas para tomar una decisión:

- El coste de instalar un SGA debe ser inferior al que implica tener dos carretillas más.
- El SGA reaccionará peor si se incrementa la actividad del almacén. Sin el SGA es posible seguir incrementando el número de carretillas sin que ello dispare la congestión y genere resultados todavía peores.

9. ANÁLISIS DEL SGA

Estudiando el comportamiento de las carretillas con y sin el uso de un SGA ha sido posible extraer una serie de conclusiones sobre las ventajas y desventajas de este sistema, así como un análisis de los factores que incrementan su efectividad. Para poder entenderlo correctamente, sin embargo, es necesario primero dejar claras las dos principales ventajas que presenta este sistema cuando guía a las carretillas:

-Ayuda a establecer prioridades: responde instantáneamente a las necesidades del almacén, enviando recursos allí a donde son más necesarios. Sin este sistema, la respuesta ante urgencias es mucho más lenta.

-Reduce los viajes en vacío: al guardar o buscar un pallet, la carretilla suele realizar el viaje de vuelta sin ninguna carga. El SGA ayuda a localizar los pallets que es necesario recoger de forma que pueda guiar al carretillero hasta uno cercano y así aprovechar mejor el recorrido. Evitar las vueltas en vacío resulta muy complicado sin un SGA (podría realizarse haciendo *batch* de las órdenes, pero esto no siempre es posible y requeriría formar previamente y de modo manual parejas de pallets para los viajes).

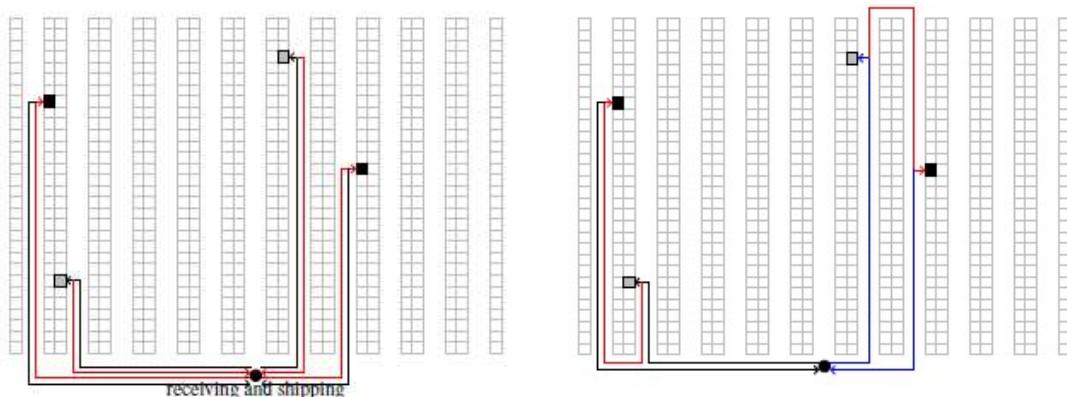


Ilustración 76. Diferencia de recorridos con vuelta en vacío (izquierda) y con ciclo dual (derecha). En rojo se ven los trayectos en vacío. (Bartholdi & Hackman, 2017).

Con los principios más básicos comentados, se puede explicar por qué en algunas ocasiones un SGA no es tan efectivo y por qué en otras sí lo es:

-La eficiencia de un SGA se incrementa si en un mismo muelle se trabaja con órdenes de entrada y salida. Si no fuese éste el caso, se tendría que añadir un viaje en vacío entre ambos muelles por cada ciclo. Por lo tanto, el SGA se ve favorecido por los almacenes diseñados con flujo en U.

-La eficiencia del SGA aumenta cuanto menor sea la distancia entre las ubicaciones de los pallets a recoger en la vuelta y aquellas donde se almacenan en la ida. Así se reduce la distancia en vacío entre ambos. Es una conclusión obvia, pero quizás no lo son tanto las que se pueden deducir a partir de ella:

-Se complica el uso efectivo de un SGA con el aumento de clientes en un almacén. El motivo es que un almacén multicliente suele situar a los clientes en zonas diferentes, y en general lo más cerca posible de muelles concretos, lo que genera que surjan distancias grandes entre uno y otro cliente. Si no se compaginan horarios de entrada y salida de cada cliente para que coincidan, al dejar el pallet de un cliente no habrá ninguna carga para recoger en su zona

(porque todas las salidas del momento son de clientes diferentes), lo que hace que o bien tenga que recorrer una gran distancia en vacío hasta otra carga, o que resulte más rentable en tiempo volver directamente al muelle a buscar el siguiente pallet y asumir como inevitable la vuelta en vacío. El punto óptimo se daría con un almacén monocliente.

-Se ahorran mayores distancias mientras más similares sean las órdenes de salida y entrada. Si una orden de entrada tiene únicamente pallets de tipo A, cualquier pallet de tipo C (que estará más lejos) para una salida implicará recorrer una distancia considerable en vacío.

-Los SGA ofrecen mayores mejoras en almacenes con cargas de popularidad similares. El hecho de que se eviten las vueltas en vacío significa que, mientras más lejos estén los pallets, más recorrido se ahorra. Con un almacén con un producto tipo A muy marcado, la distancia evitada será menor que en otro, por ejemplo, completamente caótico (aun así, suele ser conveniente, como se vio en el cálculo de distancias del trabajo, realizar una separación por ABC).

-Aunque las órdenes urgentes (entendidas como aquellas que han de ser completadas rápido para llegar al horario pactado) suelen empeorar el funcionamiento de cualquier almacén, un SGA que no esté suficientemente bien diseñado podría incrementar la sensibilidad ante este factor, especialmente si se producen varias en sucesión como consecuencia de una falta de capacidad para atender las órdenes. La razón es que las urgencias modifican el comportamiento de las carretillas, priorizando el movimiento de cargas que no tienen por qué ser las óptimas en cuanto a distancia. Cuando el número de urgencias es bajo y el almacén puede absorberlas, el SGA puede resultar positivo al incrementar la velocidad de respuesta y reducir el tiempo de preparación de dicha orden en concreto. El problema es que se trata de un arma de doble filo, ya que lo consigue en detrimento de la productividad general del almacén, y este efecto negativo es más marcado con el SGA que sin él.

El efecto comentado se debe a que las urgencias hacen que el SGA destine un mayor número de recursos a una misma zona, pudiendo generar grandes pérdidas por congestión (especialmente si no se ha considerado este factor cuidadosamente en el diseño del SGA). Al elevarse el número de carretillas del almacén, incrementa linealmente la capacidad de provocar congestión del SGA. Si se encadenan varias urgencias, aunque la primera se complete más rápido, la menor productividad general hace que empeoren las demás, y el efecto se va acumulando mientras más tiempo se prolongue la situación. Sin un SGA este problema no sería tan grave gracias, curiosamente, a que la capacidad de respuesta es menor, por lo que resulta más complicado dedicar un gran número de carretillas repentinamente a una misma labor.

Este problema puede disminuirse con un diseño más complejo del SGA, limitando por ejemplo el número de carretillas presentes simultáneamente en una misma zona del almacén. Se ha de tener en cuenta que esto puede a su vez perjudicar a la productividad general o provocar incluso problemas mayores si surge una situación no contemplada debidamente.

10. CONCLUSIONES

Este trabajo tenía como objetivo analizar un almacén y mostrar tanto los recursos que serían necesarios para su correcto funcionamiento como estudiar alternativas de mejora. Para ello se definió una línea de actuación en base a las herramientas e información disponibles, lo que ha permitido obtener los resultados buscados, ofreciendo una imagen detallada del comportamiento del almacén ante múltiples situaciones. En el camino se ha estudiado el efecto de diversos factores, un análisis que en muchos aspectos puede extrapolarse a otros almacenes.

Se han cumplido los objetivos e incluso ha sido posible observar interacciones entre elementos que no se habían previsto y que han servido para mejorar en gran medida mi conocimiento del funcionamiento de los almacenes. Además, gracias al modelo de simulación con SGA, se han podido obtener ventajas e inconvenientes que sistemas de este tipo pueden presentar.

Además de lo mencionado, este trabajo puede servir de base para futuras líneas de investigación:

- Sería interesante estudiar la influencia de los sistemas de gestión de almacenes con otro tipo de factores, como el número de clientes, configuraciones caóticas y fijas, posiciones de los muelles (*U-flow* y *flow-through*), valores del factor de compensación a aplicar a las distancias y tiempo previo a partir del cual se aplica la compensación del SGA.
- Resultaría de gran utilidad mejorar las normas que rigen el SGA propuesto, manteniendo su universalidad para cualquier tipo de almacén (o al menos una gran variedad de ellos). Se trata de un tema complicado, ya que el desarrollo correcto de un SGA requeriría muy probablemente conocimientos de programación, teoría de grafos, estadística, probabilidad y logística (y quizás algún otro campo más), y sería más propio de una tesis doctoral.
- Dentro del campo de la simulación, sería productivo buscar posibles mejoras para el algoritmo responsable de la congestión.

Las conclusiones presentadas cierran este TFG. Ha sido un proyecto de gran interés personal y por el que siento una profunda satisfacción ante el resultado, y espero que quien lo haya leído haya encontrado entre sus páginas al menos parte de la utilidad que he descubierto yo al escribirlo.

BIBLIOGRAFÍA

- AlHalawani, S., & Mitra, N. J. (2016). *Congestion-Aware Warehouse Flow Analysis and Optimization*. Londres, Inglaterra.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística, Administración de la cadena de suministro*. Naucalpan de Juarez: Pearson, Prencitce Hall.
- Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2017). *Warehouse & Distribution Science*. Atlanta: Gerogia Institute of Technology.
- Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6*. Anylogic.
- Errasti, A. (2011). *Logística de almacenaje*. Navarra: Pirámide.
- Frazelle, E. H. (2002). *World-Class Warehousing and material Handling*. New York: McGraw Hill.
- G. León, O., & Montero, I. (2001). Cómo explicar el concepto de interacción sin estadística: análisis gráfico de todos los casos posibles en un diseño 2 x 2. *Psicothema*, 159-165.
- G. Sargent, R. (2011). Verification and validation of simulation models. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. Estados Unidos: L.C. Smith College of Engineering and Computer Science.
- Help One. (2019, 30 3). *Help One*. Retrieved from
<https://help.one.com/hc/es/articles/115005585169--Qu%C3%A9-es-un-SKU-Referencia-de-Almac%C3%A9n>
- Hernandez, E. O. (2018, 03 30). *Conceptos, Clasificación y Tipos de Inventario y Almacenes*. . Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/114689752/4-2-Conceptos-Clasificacion-y-Tipos-de-Inventario-y-Almacenes>
- Mecalux. (n.d.). *Manual Técnico del Almacenaje*. Mecalux.
- Minitab, Inc. (2018, 03 22). *Wikipedia*. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Minitab>
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2011). *Definición*. Retrieved from <https://definicion.de/layout/>
- Ramaa, A., Subramanya, K., & Rangaswamy, T. (2012). Impact of a Warehouse Management System in a Supply Chain. *International Journal of Computer Applications*.
- Ratliff, H. D., & Rosenthal, A. S. (1982). Order-Picking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. Sudbury, Massachusetts, USA: STOR.
- Real Academia Española. (2018, 3 30). *rae*. Retrieved from
<http://dle.rae.es/srv/fetch?id=AUbUSdv|AUd0X6x>
- Roodbergen, K. J., & Koster, R. (1999, June 28). Routing orders pickers in a warehouse with a middle aisle. Rotterdam, Netherlands: Elsevier.
- Schwartz, B., Zaitsev, P., & Tkachenko, V. (2012). *High Performance MySQL*. Sebastopol: O'Reilly.

- Sierra, K., & Bates, B. (2005). *Head First Java*. Sebastopol: O'Reilly.
- Tahaghoghi, S., & Williams, H. (2007). *Learning MySQL*. Sebastopol: O'Reilly.
- Tanco Rainusso, P. M. (2008). Metodología para la aplicación del Diseño de Experimentos (DoE) en la industria. San Sebastián, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.
- Tanco, M., Viles, E., & Pozueta, L. (2009). Diferentes enfoques del diseño de experimentos (DOE). *Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, 29-37.
- Terrádez, M., & Juan, Á. A. (n.d.). *Universitat Oberta de Catalunya*. Retrieved from Análisis de la varianza (ANOVA): <https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/ANOVA.pdf>
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. (2010). *Facilities Planning*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. (2018, 3 30). *UTADEO*. Retrieved from <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Vonck, I., & Notteboom, T. (2011). *Economic Analysis of the Warehousing & Distribution Market in Northwest Europe*. Antwerp: ING Studies.
- Walkenbach, J. (2013). *Excel VBA Programming for Dummies*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Wikipedia. (2018, 3 30). *Wikipedia*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Estanter%C3%ADa_de_paletizaci%C3%B3n
- Wikipedia. (2018, 3 30). *Wikipedia*. Retrieved from <https://es.wikipedia.org/wiki/Picking>



ANEXOS

Anexo 1. Vocabulario

ABC: método de clasificación del inventario basado en el principio de Pareto. Los artículos se dividen en tres grupos: A (mayor importancia en valor o número de movimientos), B (importancia media) y C (importancia baja).

Almacén multicliente: almacén que maneja el inventario de varios clientes distintos.

Alturas: se refiere al nivel o piso en una estantería, siendo 1 el nivel del suelo.

Batch: Lote. Se refiere a la acción de juntar varias órdenes para poder aumentar la eficiencia al completarlas (en este trabajo se menciona principalmente como medio para planificar mejor el movimiento de las carretillas).

Carga paletizada: carga o producto que se encuentra encima de un pallet.

Carga: dependiendo del contexto, en este trabajo puede referirse a la acción de cargar un camión o a la mercancía situada encima del pallet (también se hace referencia a ella simplemente como pallet, refiriéndose al objeto por el elemento utilizado para facilitar su movimiento).

Carretilla: elementos de manutención fundamentales en el almacén que permiten mover pallets entre diferentes espacios (Mecalux).

Ciclo dual: método para reducir viajes en vacío de las carretillas por el cual se combinan el guardado de pallets y su recogida.

Colocación: en este trabajo se utiliza para señalar la acción de guardar un pallet en una estantería o situarlo en una playa.

Configuración caótica del almacén: se asignan los espacios a medida que se van recepcionando las mercancías, sin atender a ningún orden predeterminado (Hernandez, 2018).

Configuración fija del almacén: sistema de organización del almacén según el cual cada referencia tiene una o varias ubicaciones asignadas, y ningún otro tipo de carga puede ocuparlas.

Contenedor: embalaje metálico grande y recuperable, de tipos y dimensiones normalizados internacionalmente y con dispositivos para facilitar su manejo (Real Academia Española, 2018).

Descarga: acción de extraer la carga de un camión.

Estanterías (de paletización): estructura metálica diseñada para almacenar mercancía paletizada, esto es, colocada sobre un palé. Están compuestas por puntales fijados al suelo y arriostrados entre sí formando escalas y por largueros horizontales que conforman niveles de carga (Wikipedia, 2018).

Extracción: en este trabajo se refiere a la acción de sacar un pallet de una estantería.

FIFO (First In First Out): método de inventario que se traduce por “primero en entrar, primero en salir”.

Flow-through: forma de configurar el *layout* en la que los muelles de carga y descarga se encuentran en lados opuestos del almacén.

Layout: esquema de distribución de los elementos dentro de un diseño (Pérez Porto & Gardey, 2011).

Manipulaciones: se utiliza en este trabajo para referirse a cualquier acción que vaya más allá del movimiento, almacenaje o extracción de los pallets.

Mapa de calor: representación gráfica que muestra sobre el plano la variación de un parámetro. En este trabajo se utiliza para representar la conveniencia de las ubicaciones dentro del almacén.

Modelo de simulación: un modelo puede ser entendido como una representación, bien sea abstracta, análoga, fenomenológica o idealizada, de un objeto que puede ser real o ficticio. En este caso y por su naturaleza, el programa de maestría propuesto se ocupará de modelos fenomenológicos y/o modelos de procesos que requieren el uso formal de herramientas matemáticas y/o computacionales para representar algún sistema y su comportamiento (Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2018).

Muelle: la definición literal sería andén alto, cubierto o descubierto, que en las estaciones de ferrocarriles sirve para la carga y descarga de mercancías (Real Academia Española, 2018). En los almacenes se utiliza para señalar su equivalente con camiones en lugar de ferrocarriles.

Órdenes: en este trabajo una orden es una lista de pallets que han de ser cargados o descargados de un camión. La orden incluye una hora prevista de llegada del camión (en las salidas se utiliza para que la lista de pallets solicitados esté preparada para ser cargada y en las entradas para planificar el uso de los muelles).

Pallet (o palé): plataforma de tablas para almacenar y transportar mercancías (Real Academia Española, 2018). En este trabajo se utiliza también para referirse a la mercancía que transporta.

Picking: *picking* o preparación de pedidos es el proceso de recogida de material extrayendo unidades o conjuntos empaquetados de una unidad de empaquetado superior que contiene más unidades que las extraídas (Wikipedia, 2018).

Playa: Espacio plano, ancho y despejado, destinado a usos determinados en los poblados y en las industrias de mucha superficie (Real Academia Española, 2018). En los almacenes se utiliza para designar el espacio junto a los muelles en el que se van preparando las órdenes de salida.

Popularidad de una referencia: término utilizado para medir la frecuencia con la que se mueve una referencia.

Recorrido en vacío: movimiento realizado por una carretilla sin llevar ninguna carga.

Referencia (o SKU): código único que se asigna a un producto para identificarlo. Sirve para hacer un seguimiento de su inventario (Help One, 2018).

Rotación del stock/inventario: la rotación del inventario o rotación de existencias es uno de los parámetros utilizados para el control de gestión de la función logística o del departamento comercial de una empresa. La rotación, en este contexto, expresa el número de veces que se han renovado las existencias (de un artículo, de una materia prima...) durante un período, normalmente un año (Wikipedia, 2018).

Sistema de gestión de almacenes: Sistema de gestión de almacenes (SGA) es la denominación atribuida a programas informáticos destinados a gestionar la operativa de un almacén. Proviene de la traducción del término inglés "WMS" (*Warehouse Management System*). En este trabajo se utiliza

para referirse a un sistema capaz de indicar a los carretilleros las labores a realizar (el siguiente pallet que ha de buscar, por ejemplo).

Stock: voz inglesa que se usa con cierta frecuencia en español con los sentidos de ‘cantidad de mercancías que se tienen en depósito’ y, en general, ‘cantidad de algo disponible para uso futuro’ (Real Academia Española, 2018).

Tamaño de una orden: número de pallets incluidos en la orden.

Ubicación: localización dentro del almacén, ya sea considerada sólo a nivel del suelo o incluyendo alturas de las estanterías.

U-flow: forma de configurar el *layout* en la que los muelles de carga y descarga se encuentran en el mismo lado del almacén (los muelles pueden ser para carga y descarga, no sólo una de las dos opciones).

Viaje: en este trabajo puede referirse al trayecto recorrido por un camión o como sinónimo de orden para referirse a los pallets que ésta incluye.

Vuelta en vacío: se refiere al trayecto realizado sin carga por una carretilla como consecuencia de estar únicamente guardando o sacando pallets, y no ambas acciones de forma alternada.

Anexo 2. Excel Warehouse Coordinates

Parámetros necesarios: no.

INPUT: Plano del almacén.

Procedimientos de apoyo: no.

OUTPUT: Coordenadas (X, Y) de todas las ubicaciones, pasillos y muelles.

Motivos: Para cualquier cálculo de distancias recorridas es necesario contar con un dato que las empresas no suelen utilizar: las coordenadas de todas las ubicaciones del almacén.

Es imposible, aunque se conozca al detalle la ubicación que ocupa cada SKU, calcular distancias si luego no se conoce dónde se encuentran dichas ubicaciones. Las empresas muy rara vez disponen de este dato (carece en general de cualquier tipo de utilidad para sus operaciones). Llegados a este punto, no queda otra opción que medirlo, pero ¿cómo hacerlo para que el proceso conlleve el menor tiempo posible? Lo primero es buscar un elemento que las empresas sí pueden proveer: un plano del almacén.

Un plano del almacén permite obtener las medidas exactas del edificio y, si dispone de ello, también las posiciones de las estanterías (de no ser así, no quedaría más opción que realizar esta parte a mano, visitando el almacén y anotando los puntos de comienzo y fin de cada estantería). Lo que no suele tener el plano son las coordenadas de las ubicaciones, aunque es posible extraerlas (una coordenada se mantiene constante en toda la estantería y la otra se consigue dividiendo la longitud de la estantería entre las ubicaciones que contiene). Se trata, sin embargo, de un proceso largo para ser realizado a mano, ya que, a pesar de que se logra saber dónde está todo, todavía es necesario introducir esta información en una base de datos para poder operar con ella.

Función: se trata de una aplicación diseñada para facilitar el dibujo del almacén por ordenador y que automáticamente se extraigan las coordenadas individuales de cada uno de los elementos que lo componen y las presente en un formato exportable a MySQL (en el caso de este trabajo el volumen de datos hizo que no fuera necesario utilizar MySQL, pero el formato es útil también para Excel). La aplicación está creada usando como base Microsoft Excel, aprovechando la propia composición de la hoja de cálculo como un conjunto de celdas indivisibles.

Las herramientas son desarrolladas mayoritariamente a través de VBA⁵ (la utilización de fórmulas en las celdas conllevaría un consumo creciente de los recursos del ordenador a medida que aumenta el tamaño del almacén, dando como resultado archivos pesados y lentos) y aprovechan varias características y funciones intrínsecas de Excel que reducen en gran medida el código necesario (y facilitan cualquier modificación de las funciones).

⁵ Visual Basic Advanced.

EWC. LAYOUT

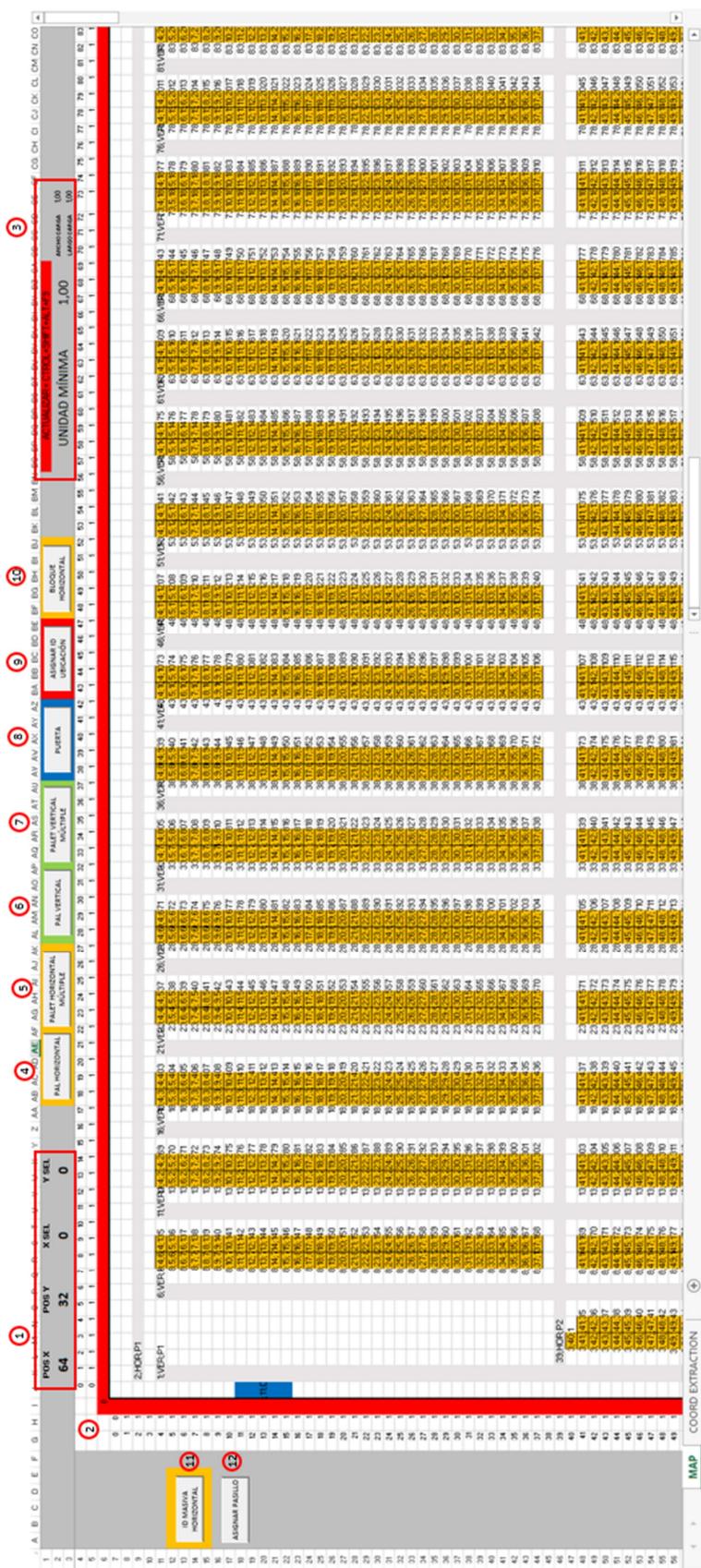


Ilustración 77. Pantalla principal de la aplicación *Excel Warehouse Coordinates*.

- 1- Coordenadas seleccionadas dentro del plano.
 - POS X: marca la coordenada X de la celda seleccionada.
 - POS Y: marca la coordenada Y de la celda seleccionada.
 - X SEL: muestra la longitud en el eje X de las celdas seleccionadas.
 - Y SEL: muestra la longitud en el eje Y de las celdas seleccionadas.

Estas medidas no se actualizan automáticamente con cada selección (incrementaría en gran medida y de un modo innecesario el procesamiento requerido). Para que muestren los valores hay que presionar CTROL+SHIFT+ALT+F9 (combinación por defecto de Excel, aunque podría cambiarse a otra más cómoda).

- 2- Ejes de coordenadas X e Y.

Muestran la posición de cada celda dentro del plano. Las líneas interiores señalan las dimensiones de cada celda, mientras que las exteriores indican las coordenadas.



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0									
1	1									
2	1									
3	1									
4	1									
5	1									
6	1									
7	1									
8	1									
9	1									
10	1									

Ilustración 78. Ejes X e Y del programa, con las medidas de las celdas.

- 3- Selección de escala y medidas de ubicaciones.

-UNIDAD MÍNIMA: indica las dimensiones de las celdas (se aceptan decimales). Se asumen metros, aunque no es obligatorio siempre que todas las medidas se escalen en consonancia.

Atención: Este parámetro debe seleccionarse al comienzo del diseño del almacén y permanecer constante hasta su finalización, dado que un cambio de escala afectaría a cualquier ubicación insertada a posterior, pero no a las anteriores.

-ANCHO CARGA y LARGO CARGA: indica el tamaño que tendrá cada ubicación al insertarlas (no cambian aquellas que se hayan introducido previamente, de modo que es posible combinar ubicaciones de distinto tamaño para cargas diferentes).

Atención: ambas deben ser múltiplos de la unidad mínima (debido a la indivisibilidad de las celdas). En caso de que no lo sean, al intentar insertar una ubicación el programa reconocerá el problema y avisará con el siguiente mensaje:

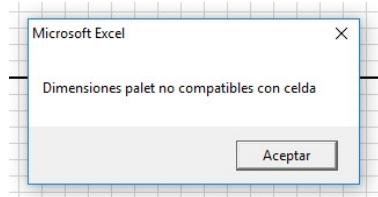


Ilustración 79. Mensaje avisando de un error en las dimensiones de las celdas o la carga.

Debido al problema anterior, la unidad mínima ha de ser como máximo el mayor común divisor de las ubicaciones a colocar⁶. Unidades mínimas menores aportan mayor exactitud en las coordenadas que se obtendrán sin que ello suponga un problema importante para el procesamiento, aunque pueden incomodar en el dibujo del almacén.

4- PAL HORIZONTAL.

Inserta una ubicación para palet horizontal (largo de la carga en el eje X, ancho en el eje Y).

Las dimensiones de la ubicación serán las especificadas con el ancho y largo del punto 3, extendiéndose tantas celdas como sea necesario para alcanzar las medidas pedidas.

La ubicación insertada (llamada pallet en la aplicación debido a que ése es el uso inicial que tuvo la aplicación) consta de dos números separados por un “;”. El número de la izquierda es la coordenada X de la ubicación, mientras que el de la derecha muestra la coordenada Y.

Por defecto se selecciona como coordenada la de la esquina superior izquierda (si bien el cambio a cualquier otro punto, como el centro, no supondría un cambio demasiado grande en el código de la aplicación).

5- PAL HORIZONTAL MÚLTIPLE.

La inserción individual de ubicaciones puede acelerarse indicando cuántas se requiere insertar. Este botón permite generar una estantería entera de ubicaciones horizontales. Al pulsar el botón aparecerá un cartel pidiendo el número de ubicaciones que se desea añadir.

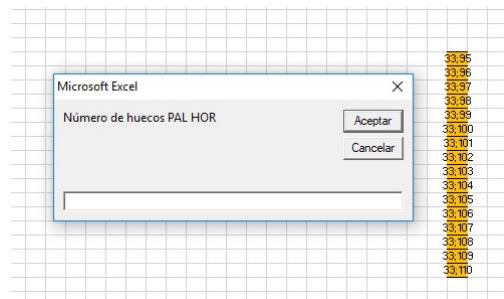


Ilustración 80. Ventana para insertar fila de pallets horizontales.

Una vez especificada la cantidad, las ubicaciones se insertarán automáticamente en una línea vertical (el ancho queda apuntando al pasillo, una decisión extendida por todos los almacenes para reducir la cantidad de pasillos necesarios, de modo que el pasillo será vertical).

6- PAL VERTICAL.

Tiene el mismo funcionamiento que PAL HORIZONTAL, sólo que cambia las medidas de eje. En esta ocasión será el ancho lo que quedará en el eje X y el color de la ubicación será verde para facilitar su distinción.

⁶ Si se quiere añadir una ubicación para pallets de 1,2 x 0,8 metros, por ejemplo, la unidad mínima ha de ser como máximo 0,4 metros.

7- PAL VERTICAL MÚLTIPLE.

Tiene el mismo funcionamiento que PAL HORIZONTAL MÚLTIPLE, sólo que extiende las ubicaciones en una línea horizontal en lugar de vertical.

8- PUERTA.

Inserta una puerta o muelle en la posición especificada. En este caso será necesario introducir dos datos: IdDock (para poder identificar el muelle en cuestión) y orientación (vertical, 2, u horizontal, 1).

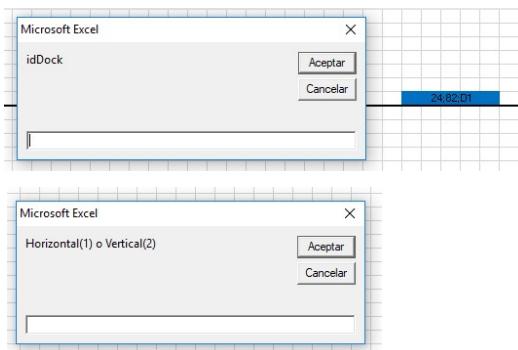


Ilustración 81. Ventanas para insertar muelles.

9- ASIGNAR ID UBICACIÓN.

Aunque ya estén insertadas las ubicaciones con sus coordenadas, carecen de cualquier forma de identificación.

Este botón permite seleccionar una fila o columna de ubicaciones y añadir una identificación a cada una de ellas. Se pedirán dos datos: ID inicial e ID final. La misma herramienta sirve para selecciones de estanterías verticales u horizontales, pero siempre de una estantería en una.

El orden seguido para identificar es de izquierda a derecha y de arriba abajo, de modo que si se desea que la identificación vaya en orden descendente basta con que ID inicial > ID final.

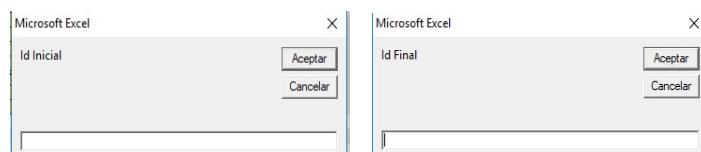


Ilustración 82. Ventanas para asignar identificaciones a las ubicaciones.

En caso de que se produzca un error en la selección (el número de identificaciones a insertar no coincide con la cantidad de ubicaciones seleccionadas) aparecerá un aviso similar al siguiente:

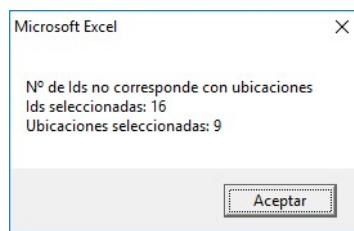


Ilustración 83. Mensaje de error ante falta de correspondencia entre identificaciones y número de ubicaciones.

Esto nos indicaría que se ha cometido uno de los siguientes errores: se han introducido mal las ID inicial o final, o faltó por insertar alguna ubicación.

10- BLOQUE HORIZONTAL.

Este botón permite insertar múltiples estanterías a la vez. Para la mayor parte de los almacenes, que suelen tener diseños similares, implica dibujar casi todo el espacio en cuestión de segundos.

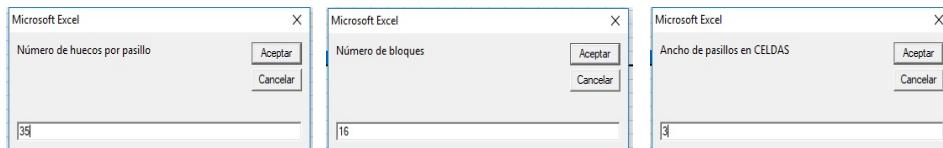
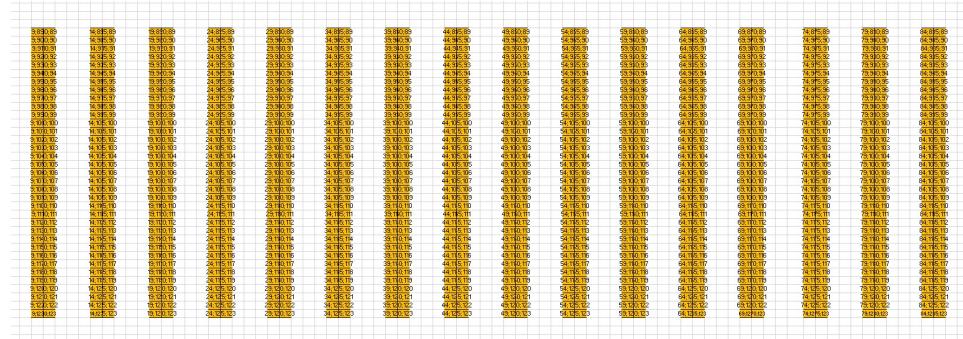


Ilustración 84. Ventanas para insertar un bloque de estanterías.

Se piden 3 parámetros: huecos en cada pasillo, número de bloques a insertar y el ancho (en CELDAS, no metros⁷) de los pasillos. El resultado de los parámetros que muestran las imágenes, por ejemplo, sería:



La mayor parte de los almacenes suelen estar compuestos por uno o varios bloques de este tipo, con lo que, siempre que no haya excesivas singularidades, el dibujo será muy rápido.

11- ID MASIVA HORIZONTAL.

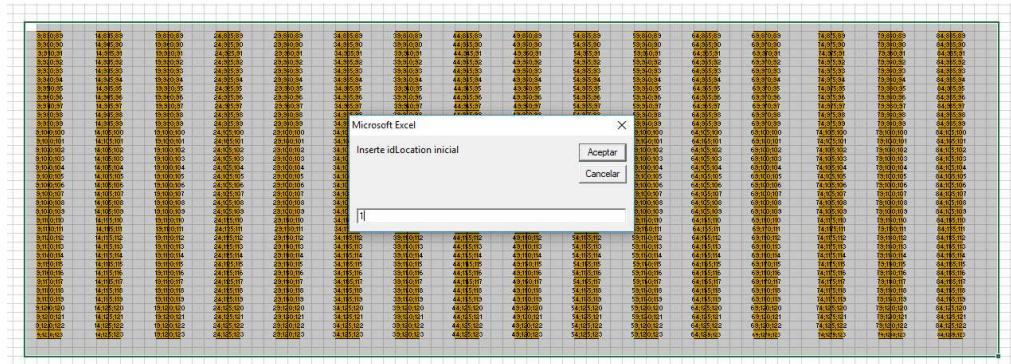
Del mismo modo que es posible insertar bloques enteros de estanterías para acelerar el dibujo del almacén, también es lógico que se desarrolle una forma rápida de asignar a todas las ubicaciones del almacén su identificación.

Esta identificación tiene una restricción, y es que está diseñada para bloques de pallets horizontales⁸. Esto no significa que no pueda identificar bloques verticales, pero las reglas que sigue para nombrar las ubicaciones no están pensadas para ello: coloca las ID empezando desde arriba a la izquierda y bajando, de modo que al llegar a la última del pasillo pasa al siguiente.

Para este botón basta con seleccionar la zona en la que se encuentran las ubicaciones (no es necesario seleccionar sólo ubicaciones dado que el código se encargará de no añadir ID a los espacios en blanco) e insertar la identificación por la que empezará.

⁷ Por comodidad al diseñarlo, aunque es posible hacer que lo pida también en metros.

⁸ Eran los necesarios en el momento de diseñar la aplicación (no hay que olvidar que el propósito inicial de esta aplicación era el de poder diseñar cómodamente el almacén del TFG). Se trata de limitaciones que, de ser necesario, pueden en su mayoría solucionarse con facilidad.



distancias, dado que la longitud del pasillo se puede inferir de las propias ubicaciones que contiene); el segundo valor indica la orientación del pasillo, siendo 1 horizontal y 0 vertical; el último valor, que empieza por "P" (pasillo) es la identificación del mismo.

Una vez dibujado el almacén, queda algo similar a la siguiente imagen. Sin embargo, aunque dispongamos de un mapa con todas las coordenadas, todavía es necesario extraerlas para insertarlas en MySQL. De ello se encarga la segunda pestaña del Excel (COORD EXTRACTION).

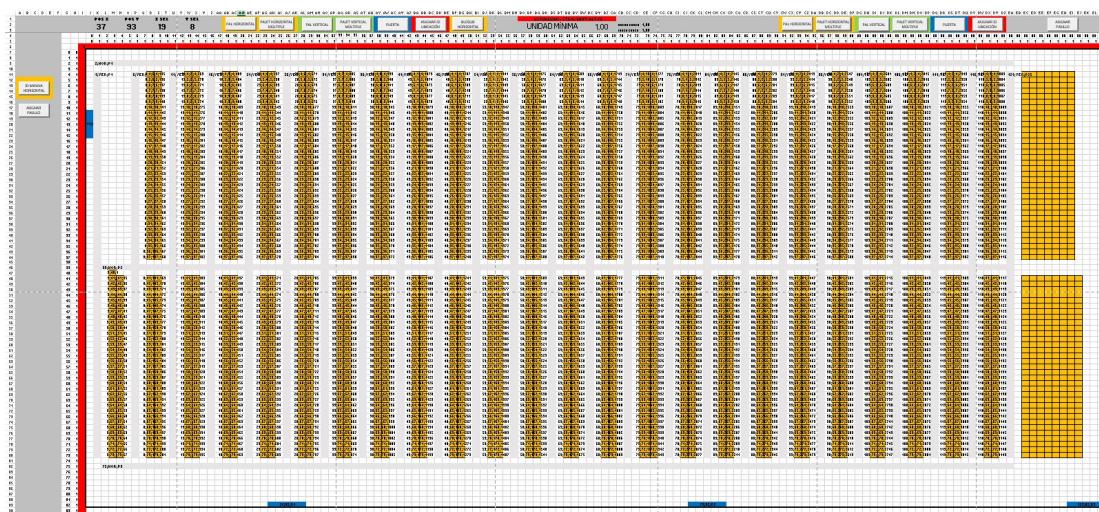
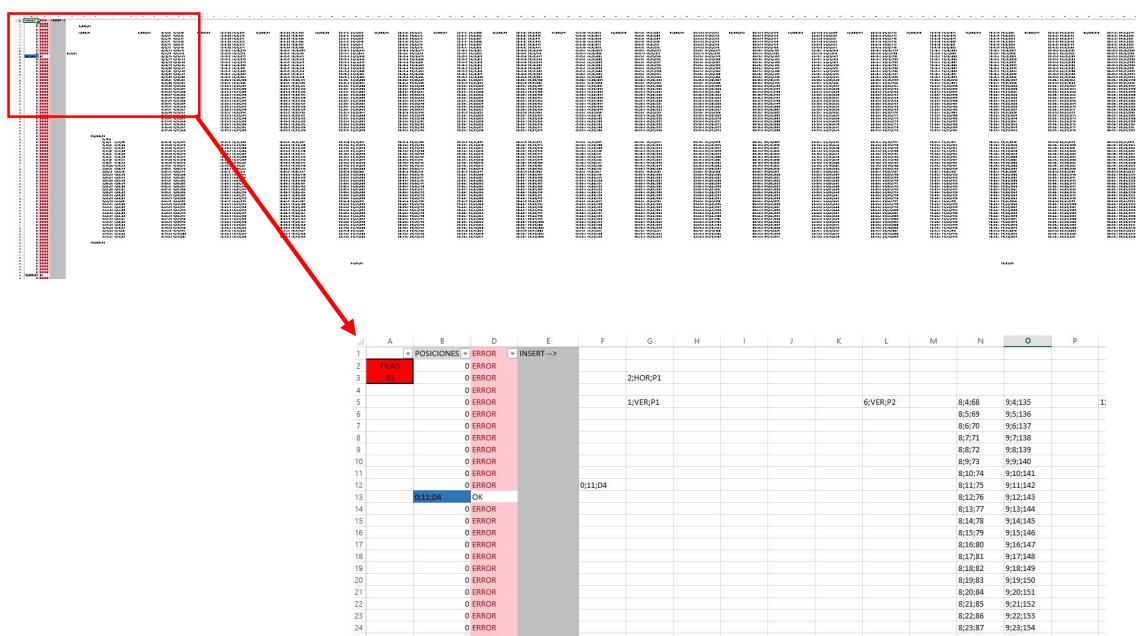


Ilustración 87. Resultado final del diseño de un almacén.

EWC.COORD EXTRACTION

Esta parte del proceso no se basa en código de VBA, sino en una combinación de fórmulas aplicadas en las propias celdas (que se van actualizando automáticamente) y varios filtros.

Nada más entrar en la pestaña COORD EXTRACTION, aparecerá algo así:



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	POSICIONES	-	ERROR	INSERT-->											
2	P11:04	0	ERROR		Z:HOR:P1										
3	00:00	0	ERROR		1:VER:P1										
4		0	ERROR												
5		0	0:00												
6		0	ERROR												
7		0	ERROR												
8		0	ERROR												
9		0	ERROR												
10		0	ERROR												
11		0	ERROR												
12		0	ERROR												
13	0:11:04	OK													
14		0	ERROR												
15		0	ERROR												
16		0	ERROR												
17		0	ERROR												
18		0	ERROR												
19		0	ERROR												
20		0	ERROR												
21		0	ERROR												
22		0	ERROR												
23		0	ERROR												
24		0	ERROR												
25		n	salir												

Ilustración 88. Pestaña para la extracción de las coordenadas.

Las columnas de datos son las mismas de la pestaña del *layout*. Estos datos son recopilados en una única columna, siendo recomendable indicar sólo las filas mínimas que ha de analizar para cubrir todo el almacén (si el dibujo del almacén ocupa por ejemplo 70 celdas verticalmente, es necesario poner un número igual o superior a 70). Este dato indica entre qué márgenes ha de buscar valores la aplicación y, si bien es posible escribir un número muy alto para no tener que cambiarlo nunca entre diseños, a mayor valor más líneas será necesario analizar y mayor será el tiempo necesario (para un almacén como el del ejemplo es casi instantáneo, pero es conveniente evitar cálculos innecesarios cuando se involucran fórmulas en las propias celdas).

Las columnas de datos funcionan de un modo sencillo: la primera reconoce el tipo de coordenadas que contiene la celda (muelles, ubicaciones o pasillos verticales/horizontales) y en función de ello asigna a cada grupo un color, de modo que es suficiente con seleccionar el filtro por color que aparece en la parte superior para ir cogiendo unos u otros datos; la segunda columna (la que incluye un montón de mensajes de “ERROR” en la imagen) se encarga de comprobar que no ha quedado ninguna ubicación sin asignar identificación (para evitar un problema que luego sería más difícil de detectar. Si con el primer filtro quito todas las celdas con valor cero –vacías–, del segundo filtro tiene que desaparecer la opción de quitar el valor “ERROR”; en caso contrario, alguna celda presenta irregularidades).

Una vez tengo los datos comprobados y separados, desde Excel separo los valores en tres columnas usando la opción “Texto en columnas” con el separador “;”. Con esto hecho ya pueden usarse los datos para realizar análisis de las ubicaciones.

Testeo: comprobado con datos de un almacén distinto al del Trabajo de Fin de Grado.

Anexo 3. Excel Heat Map

Parámetros necesarios: no.

INPUT: Layout generado en *Excel Warehouse Coordinates*, tabla de frecuencias de ubicaciones.

Procedimientos de apoyo: no.

OUTPUT: Mapa de calor.

Motivos: aunque se conozca la utilización de cada ubicación, la presencia de miles de ellas hace que el análisis sea lento y molesto. La realización manual de este mapa es costosa, especialmente si se requiere probar diferentes configuraciones de posiciones para cada SKU.

Función: Esta aplicación generada en Microsoft Excel recoge los datos del uso de ubicaciones y, combinándolos con el *layout* del *Excel Warehousing Coordinates*, genera un mapa de calor.



Ilustración 89. Ejemplo de mapa de calor creado por la aplicación.

El Excel cuenta con dos pestañas:

-DATA: se introduce la información sobre el uso de cada ubicación.

-HEAT MAP: en esta pestaña se pega el *layout* generado en EWC. Contiene dos botones:

LIMPIAR A ID: elimina del *layout* todos los datos a excepción de las identificaciones.

MOVEMENTS: sustituye cada ID por su valor correspondiente de movimientos, limpia el plano (para mejorar la presentación de la imagen de cara al cliente) y establece una escala de colores para las ubicaciones en función de su utilización.

Testeo: comprobación con datos de un almacén distinto al del TFG y comparación con el mapa de calor obtenido en un proyecto de dicho almacén.

Anexo 4. Programas utilizados

Minitab

Minitab es un programa para el análisis estadístico de datos desarrollado por la Universidad del Estado de Pensilvania (Minitab, Inc., 2018). Se caracteriza por su facilidad de uso y amplio rango de opciones, si bien carece de algunas funcionalidades presentes en paquetes estadísticos más caros. En este trabajo se ha utilizado la versión Minitab 16.



Ilustración 90. Logo de la empresa Minitab.

Anylogic

Anylogic es una herramienta de simulación desarrollada por The Anylogic Company. Se caracteriza por su gran flexibilidad y sus funcionalidades para clientes, como el uso de Anylogic Cloud para exportar modelos de simulación y permitir que el usuario final pueda reproducirlas y variar los parámetros de entrada. Es utilizado en una gran variedad de industrias por compañías como Vodafone, Google, Airbus, DHL, Pfizer, Ford, Volkswagen o NASA entre otros.



Ilustración 91. Logo de Anylogic.

Anexo 5. Análisis del almacén en alturas

Para el cálculo de la conveniencia de las ubicaciones teniendo en cuenta las alturas es necesario comparar primero el coste de elevar una carga con el de recorrer una distancia determinada, de modo que ambas acciones puedan representarse en las mismas unidades. Por ello se convierte el tiempo necesario para elevar un pallet en metros equivalentes, utilizando una velocidad media de carretilla de 2,1 m/s.

ALTURA	METROS	
	MINUTOS	EQUIVALENTES
1	0,3	0
2	0,35	6,9
3	0,5	27,6
4	0,65	48,3
5	0,77	64,86
6	0,9	82,8
7	1,05	103,5

Tabla 19. Transformación del tiempo en elevar o bajar pallets desde diferentes alturas a metros.

Con esta información ya es posible realizar los mapas de calor.

Mapa de calor en alturas:

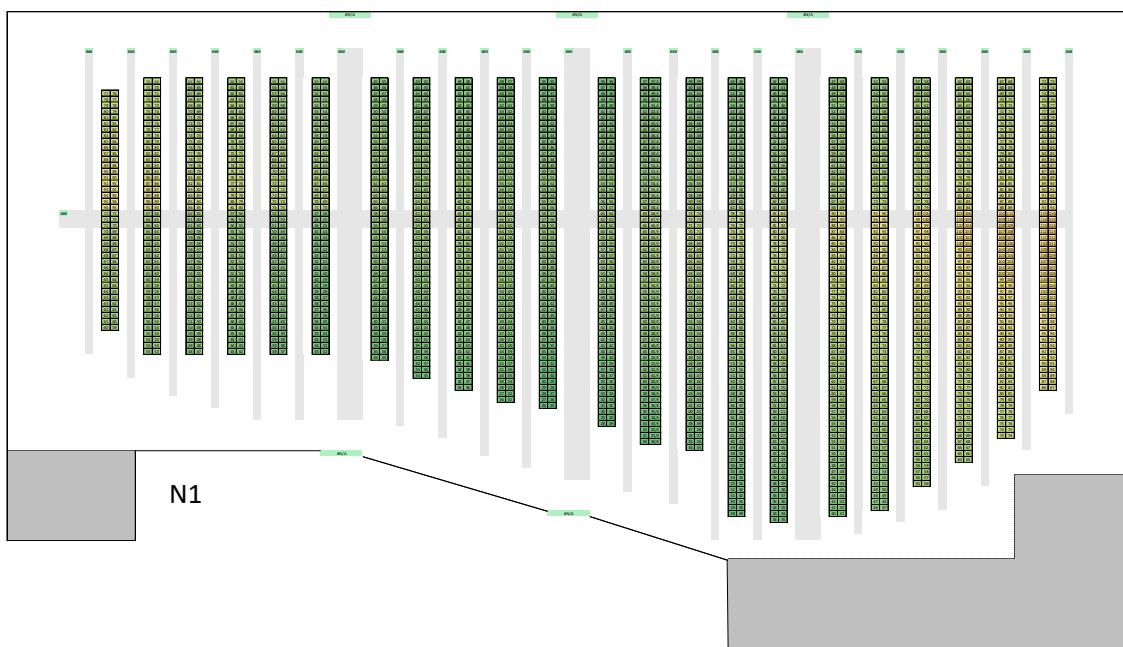


Ilustración 92. Mapa de calor del nivel 1 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

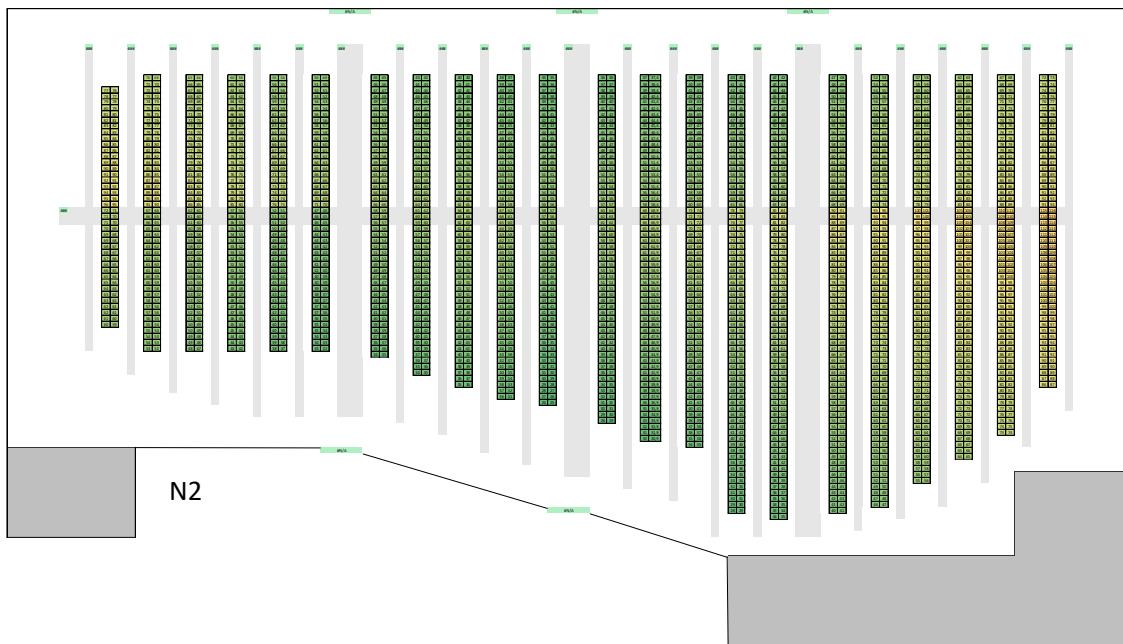


Ilustración 93. Mapa de calor del nivel 2 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

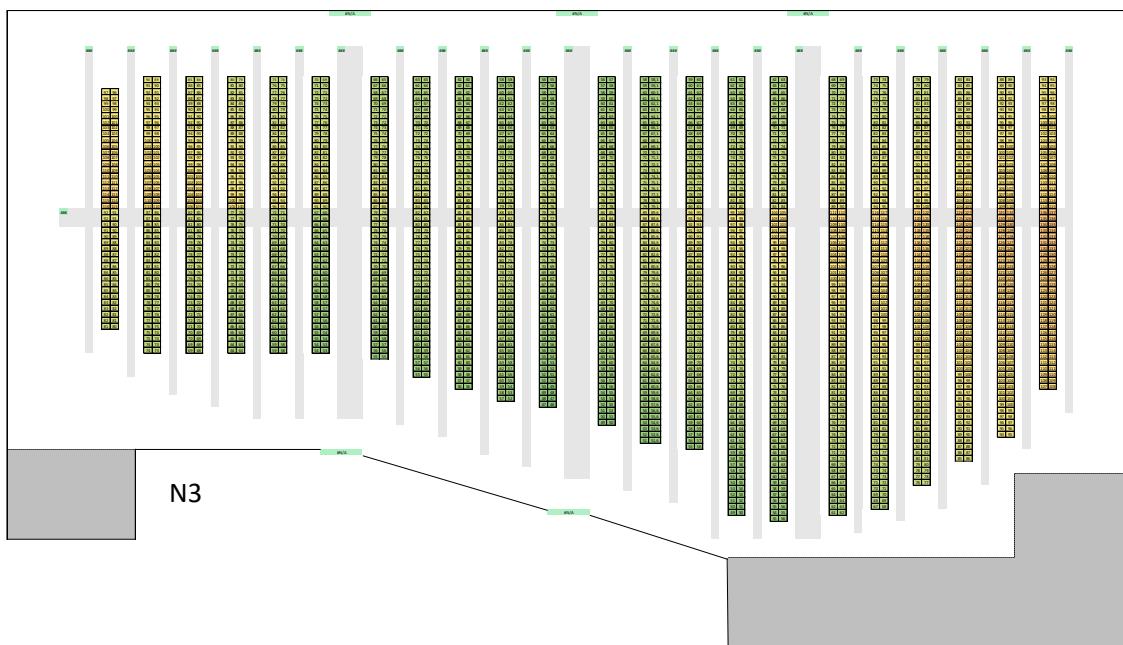


Ilustración 94. Mapa de calor del nivel 3 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

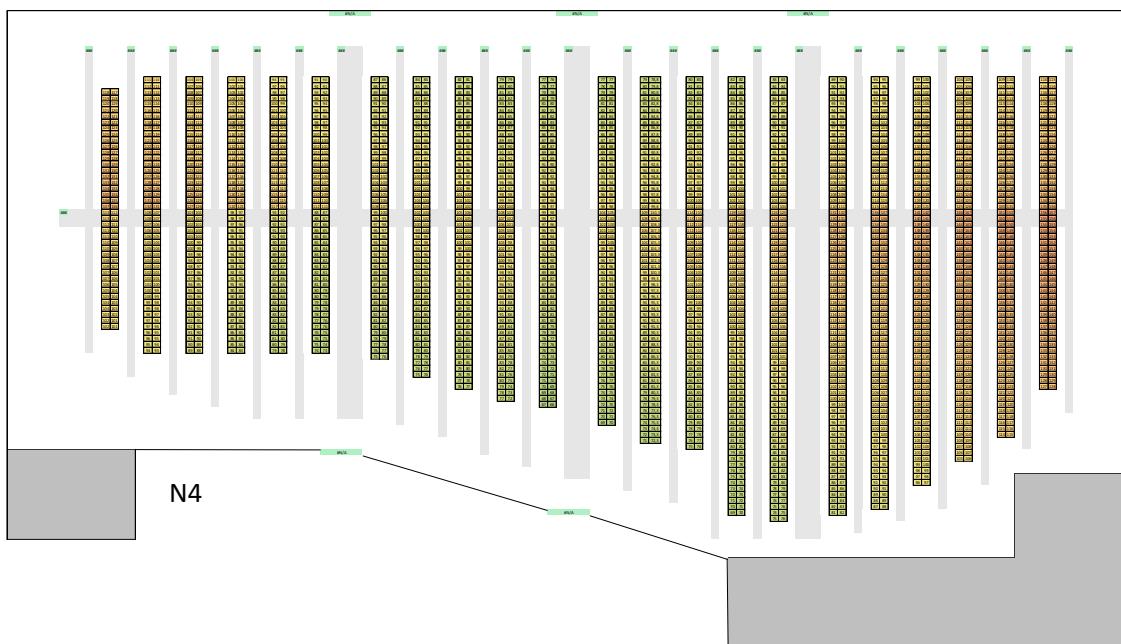


Ilustración 95. Mapa de calor del nivel 4 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

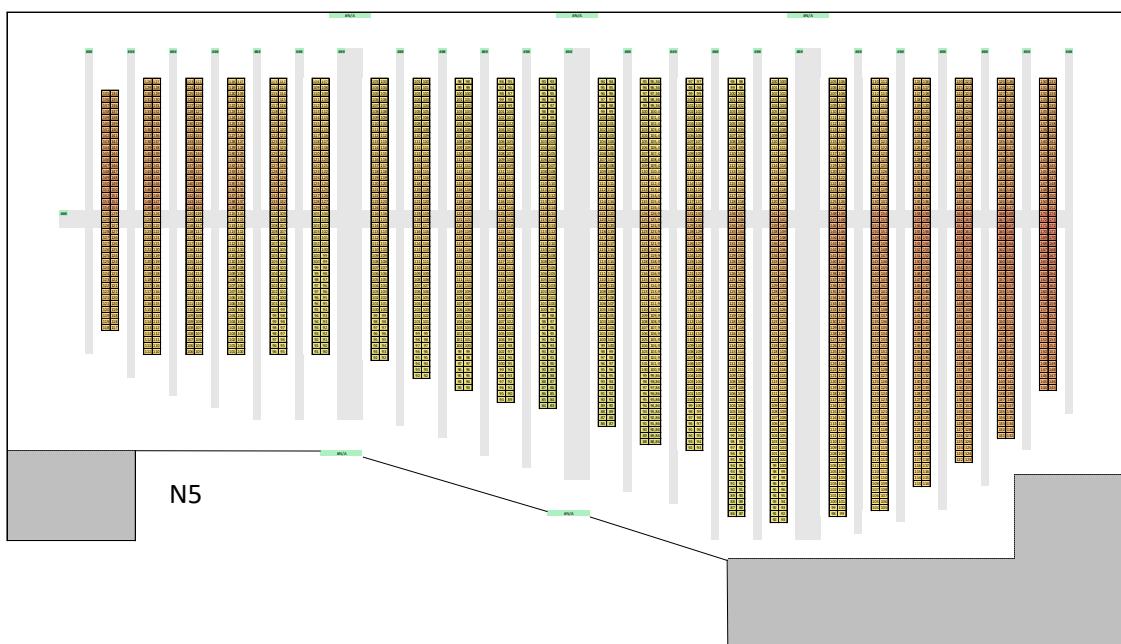


Ilustración 96. Mapa de calor del nivel 5 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

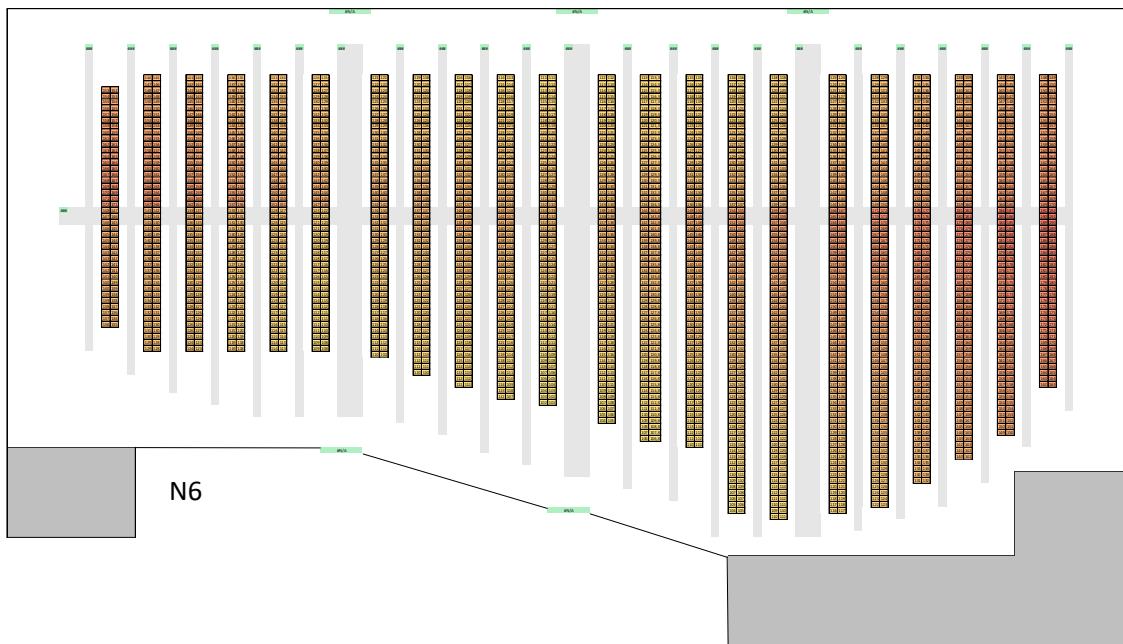


Ilustración 97. Mapa de calor del nivel 6 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

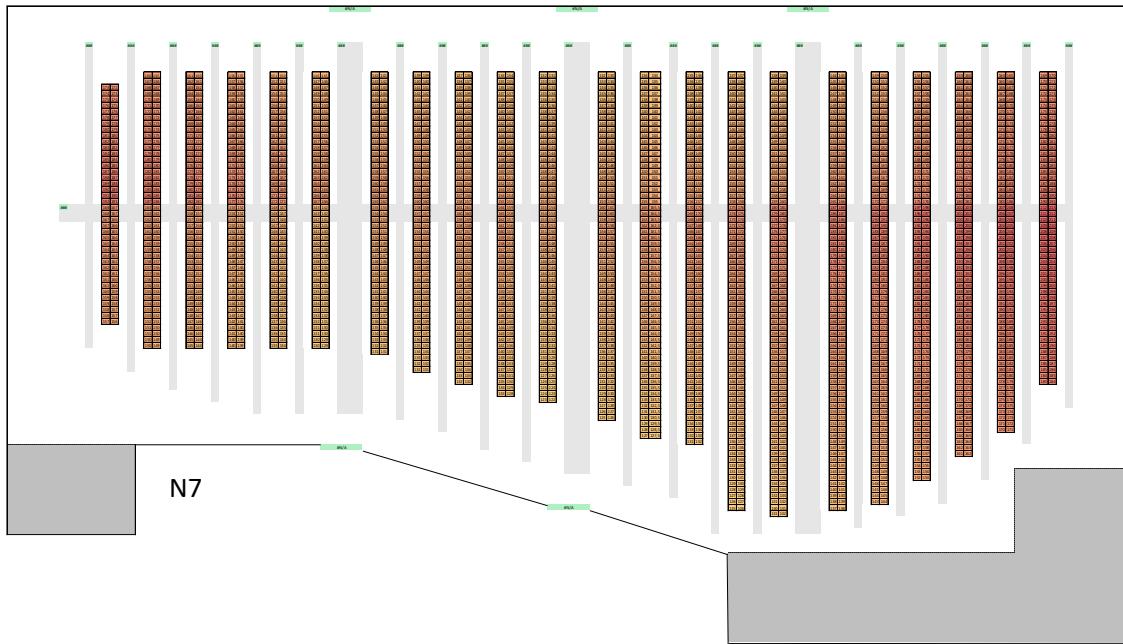


Ilustración 98. Mapa de calor del nivel 7 del almacén. Escala de verde (más conveniente) a rojo (menos conveniente).

Uso de ubicaciones en alturas:

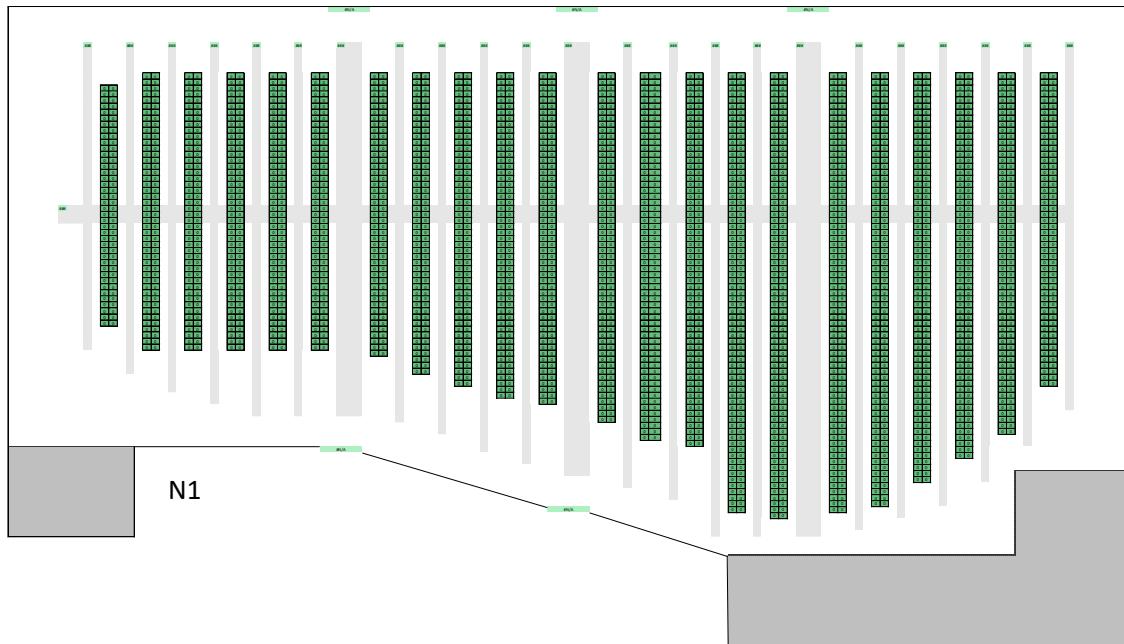


Ilustración 99. Uso de ubicaciones del nivel 1 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.

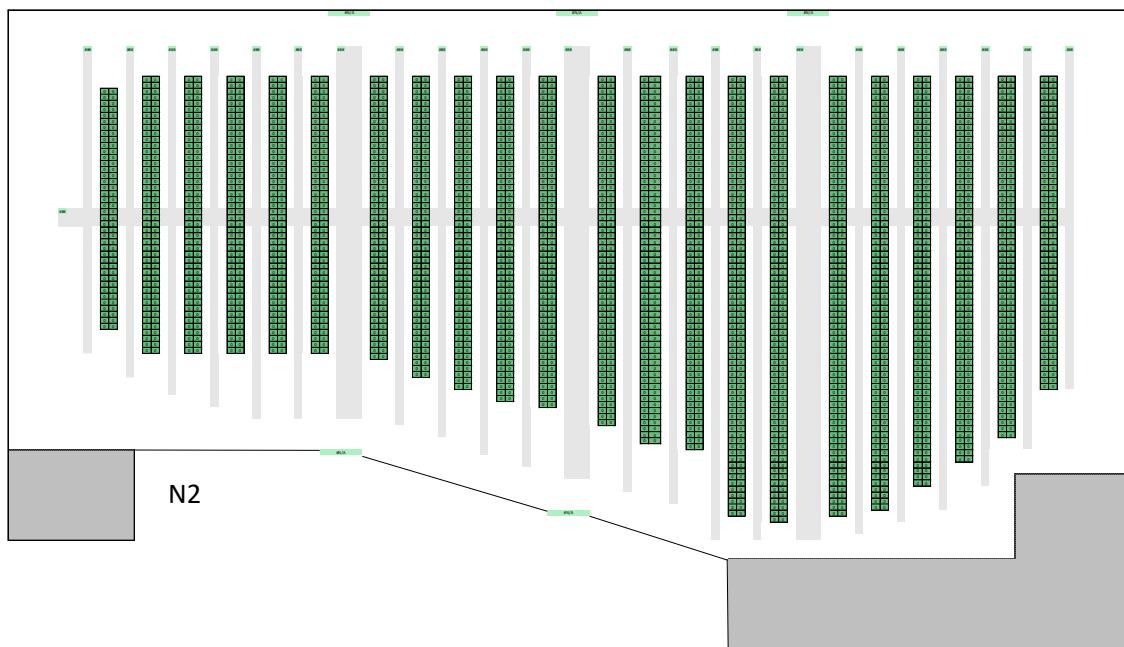


Ilustración 100. Uso de ubicaciones del nivel 2 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.

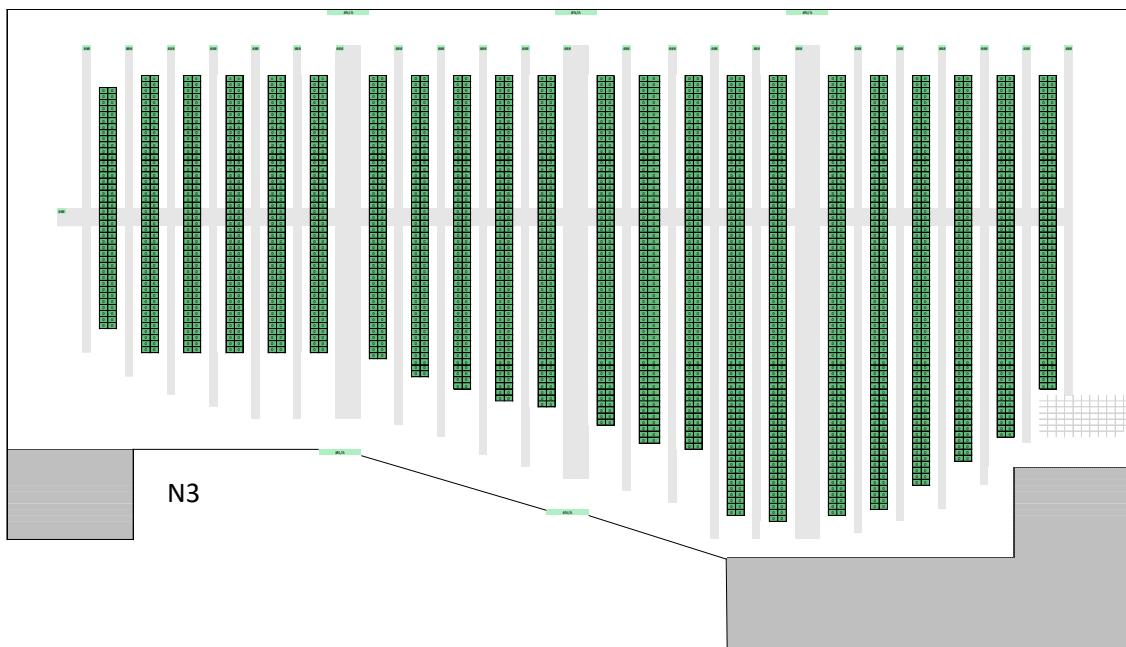


Ilustración 101. Uso de ubicaciones del nivel 3 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.

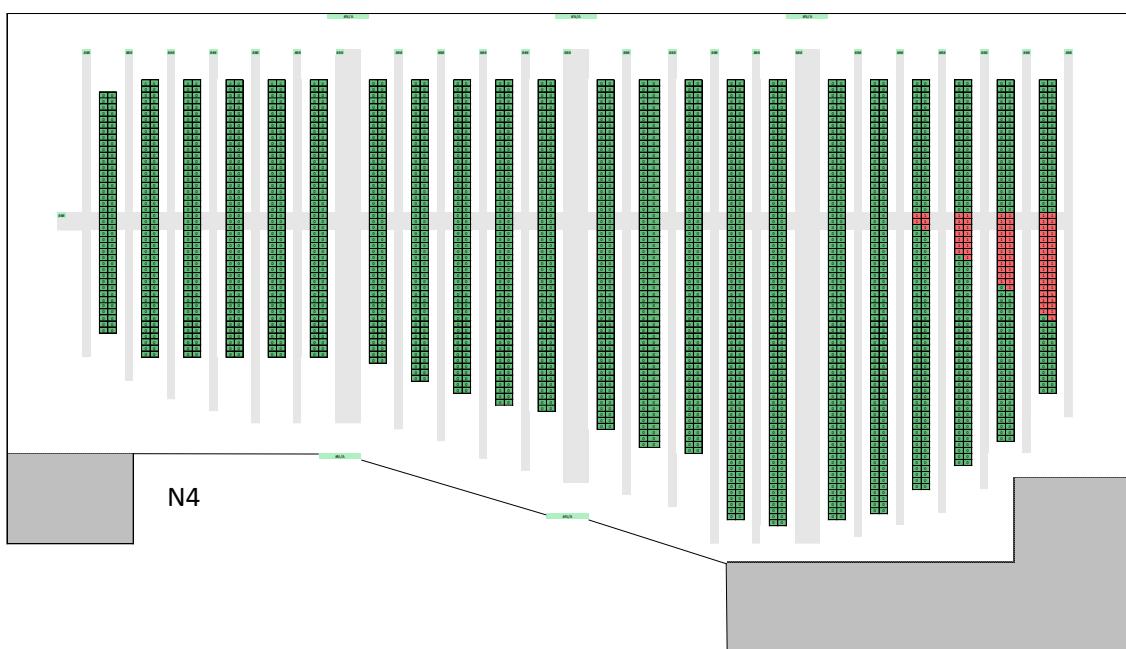


Ilustración 102. Uso de ubicaciones del nivel 4 (en rojo las utilizadas) para un llenado del 81%.

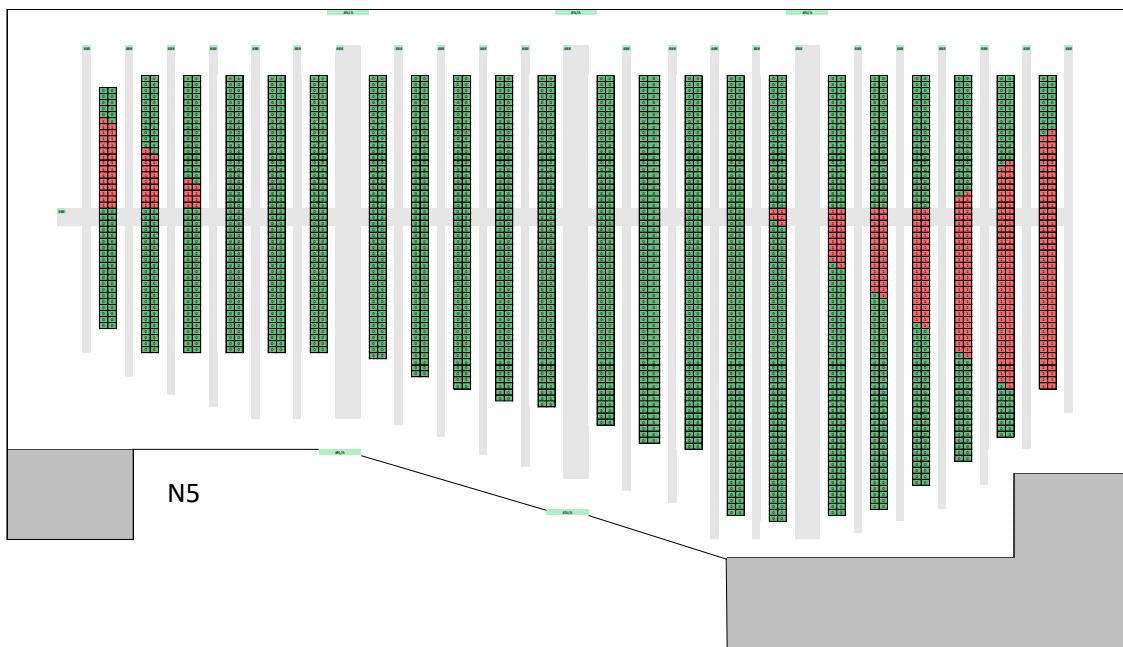


Ilustración 103. Uso de ubicaciones del nivel 5 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.

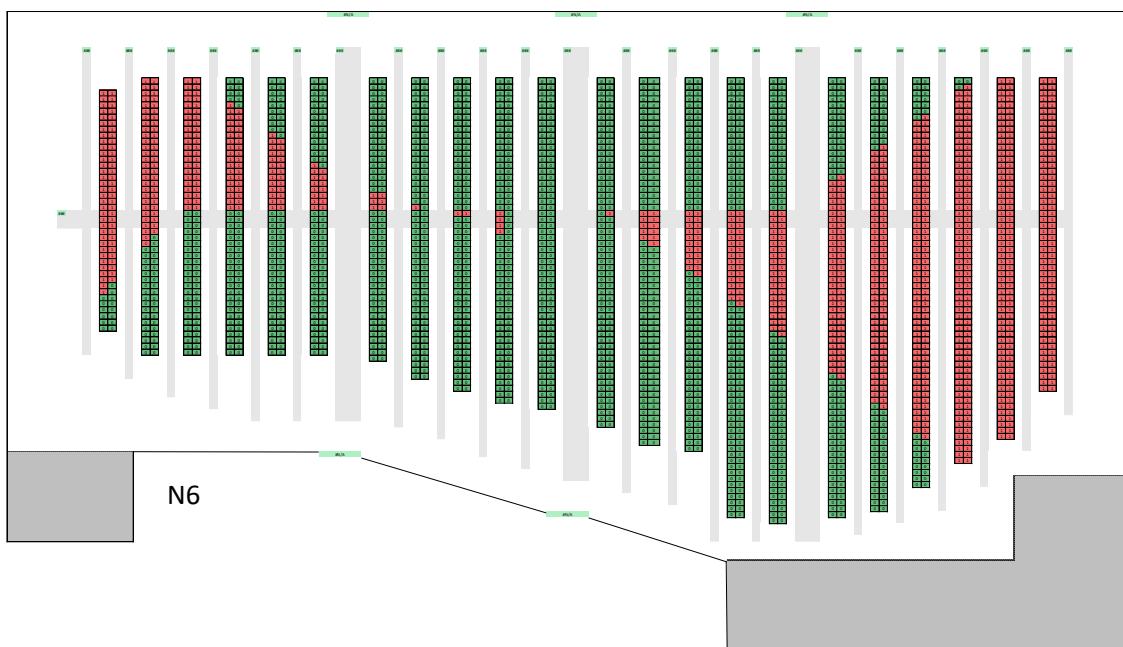


Ilustración 104. Uso de ubicaciones del nivel 6 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.

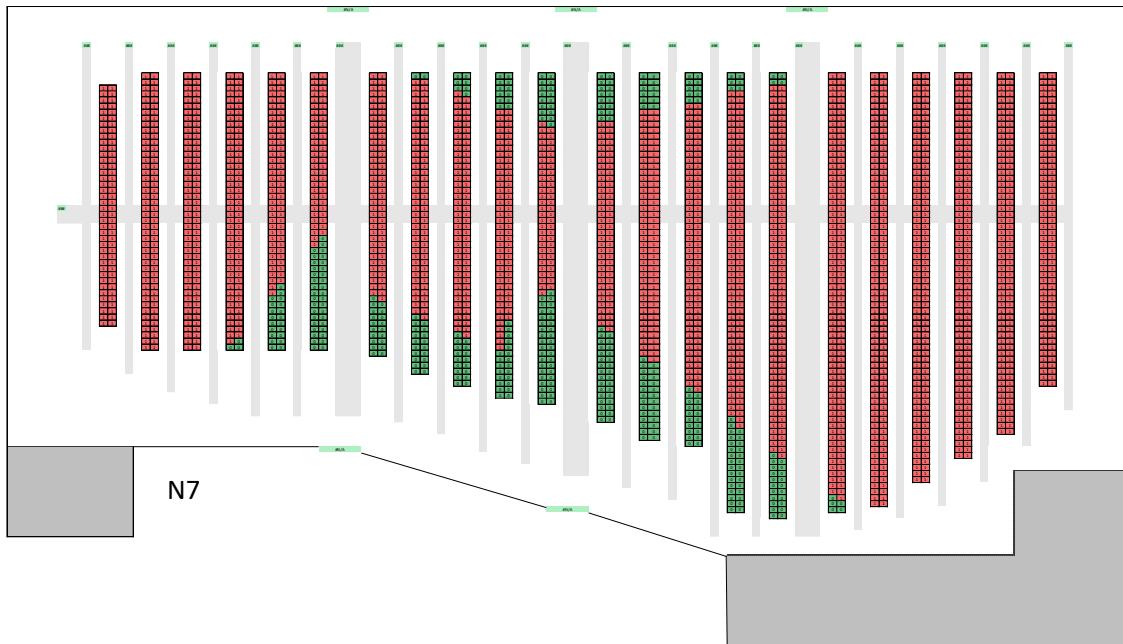


Ilustración 105. Uso de ubicaciones del nivel 7 (en verde las utilizadas) para un llenado del 81%.

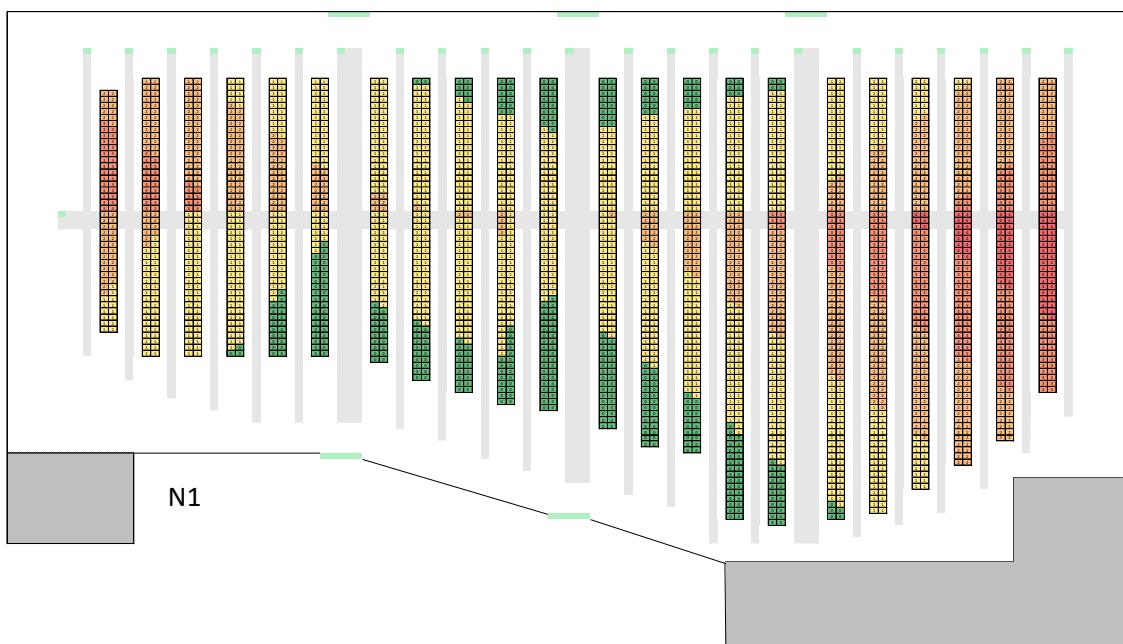


Ilustración 106. Utilización del almacén teniendo en cuenta alturas. Escala de verde (se utilizan las 7 alturas) a rojo (se utilizan únicamente las 3 primeras alturas).

Anexo 6. Cálculo de distancias por hora para clientes con ABC

Para calcular las distancias aproximadas por horas de las carretillas se obtiene una distancia media a cada zona de cada cliente, y luego se multiplica por el número de pallets de dicho grupo que será necesario mover para los viajes de cada hora.

TIPO	PESO MOVS	CLIENTE /HORA	MOVIMIENTOS POR HORAS																				DIST MEDIA
			5h a 6h	6h a 7h	7h a 8h	8h a 9h	9h a 10h	10h a 11h	11h a 12h	12h a 13h	13h a 14h	14h a 15h	15h a 16h	16h a 17h	17h a 18h	18h a 19h	19h a 20h	20h a 21h	21h a 22h	22h a 23h			
A	0,6 C1		81,82	81,82	81,82	81,82	163,64	163,64	163,64	163,64	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	81,82	71,94		
B	0,3 C1		40,91	40,91	40,91	40,91	81,82	81,82	81,82	81,82	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91	40,91	92,33		
C	0,1 C1		13,64	13,64	13,64	13,64	27,27	27,27	27,27	27,27	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	13,64	120,95	
A	0,67 C2		0,00	0,00	0,00	36,37	36,37	36,37	36,37	36,37	72,74	72,74	36,37	36,37	36,37	36,37	36,37	36,37	36,37	36,37	0,00	0,00	66,60
B	0,27 C2		0,00	0,00	0,00	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66	29,31	29,31	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66	0,00	0,00	82,51
C	0,06 C2		0,00	0,00	0,00	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	6,51	6,51	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	3,26	0,00	0,00	98,65
A	0,68 C3		0,00	0,00	0,00	33,06	0,00	66,12	33,06	33,06	66,12	33,06	33,06	33,06	33,06	33,06	33,06	33,06	33,06	33,06	0,00	0,00	64,55
B	0,28 C3		0,00	0,00	0,00	13,61	0,00	27,22	13,61	27,22	13,61	13,61	13,61	13,61	13,61	13,61	13,61	13,61	13,61	13,61	0,00	0,00	84,34
C	0,04 C3		0,00	0,00	0,00	1,94	0,00	3,89	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94	0,00	0,00	85,62
A	0,4 C4		4,17	7,30	11,48	5,22	9,39	14,61	13,57	9,39	5,22	17,74	12,52	15,65	10,43	17,74	10,43	3,13	0,00	0,00	51,08		
B	0,45 C4		4,70	8,22	12,91	5,87	10,57	16,43	15,26	10,57	5,87	19,96	14,09	17,61	11,74	19,96	11,74	3,52	0,00	0,00	85,68		
C	0,15 C4		1,57	2,74	4,30	1,96	3,52	5,48	5,09	3,52	1,96	6,65	4,70	5,87	3,91	6,65	3,91	1,17	0,00	0,00	104,19		
A	0,64 C5		0,00	0,00	0,00	1,13	4,04	4,85	3,40	1,46	0,32	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,92	
B	0,26 C5		0,00	0,00	0,00	0,46	1,64	1,97	1,38	0,59	0,13	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,00	
C	0,1 C5		0,00	0,00	0,00	0,18	0,63	0,76	0,53	0,23	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,63	
A	0,48 C6		0,00	0,00	0,00	0,28	1,12	4,78	3,65	1,40	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,00	
B	0,28 C6		0,00	0,00	0,00	0,16	0,66	2,79	2,13	0,82	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,00	
C	0,24 C6		0,00	0,00	0,00	0,14	0,56	2,39	1,83	0,70	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,00	
UNICO	1 C7		0,00	0,00	0,00	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	3,11	0,00	0,00	0,00	0,00	85,00	
UNICO	1 C8		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,00	
UNICO	1 C9		0,00	0,00	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	23,08	0,00	0,00	44,86	

Tabla 20. Distancias medias a cada zona del almacén, dividido por clientes y ABC.

TIPO	DISTANCIA	5h a 6h	6h a 7h	7h a 8h	8h a 9h	9h a 10h	10h a 11h	11h a 12h	12h a 13h	13h a 14h	14h a 15h	15h a 16h	16h a 17h	17h a 18h	18h a 19h	19h a 20h	20h a 21h	21h a 22h	22h a 23h	DIST TOTAL		
A	C1	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	5886,07	5886,07	5886,07	5886,07	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	2943,04	64746,82		
B	C1	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	3777,17	3777,17	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	1888,58	41548,85		
C	C1	824,65	824,65	824,65	824,65	1649,31	1649,31	1649,31	1649,31	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	824,65	18142,39	
A	C2	0,00	0,00	0,00	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	2422,34	2422,34	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	1211,17	0,00	16956,36	
B	C2	0,00	0,00	0,00	604,65	604,65	604,65	604,65	604,65	604,65	1209,29	1209,29	604,65	604,65	604,65	604,65	604,65	604,65	604,65	0,00	8465,04	
C	C2	0,00	0,00	0,00	160,65	160,65	160,65	160,65	160,65	160,65	321,31	321,31	160,65	160,65	160,65	160,65	160,65	160,65	160,65	0,00	2249,14	
A	C3	0,00	0,00	1066,89	1066,89	0,00	2133,77	1066,89	2133,77	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	1066,89	0,00	13869,53	
B	C3	0,00	0,00	574,06	0,00	1148,12	574,06	574,06	1148,12	574,06	574,06	574,06	574,06	574,06	574,06	574,06	574,06	574,06	574,06	0,00	7462,77	
C	C3	0,00	0,00	0,00	83,25	0,00	166,49	83,25	83,25	166,49	83,25	83,25	83,25	83,25	83,25	83,25	83,25	83,25	83,25	0,00	1082,21	
A	C4	106,60	186,54	293,14	133,24	239,84	373,08	346,43	239,84	133,24	453,03	319,79	399,73	266,49	453,03	266,49	453,03	266,49	453,03	79,95	0,00	4290,46
B	C4	201,16	352,02	553,18	251,44	452,60	704,04	653,76	452,60	251,44	854,91	603,47	754,33	502,89	854,91	502,89	854,91	502,89	854,91	150,87	0,00	8096,52
C	C4	81,54	142,69	224,23	101,92	183,46	285,38	264,99	183,46	101,92	346,53	244,61	305,76	203,84	346,53	203,84	346,53	203,84	346,53	61,15	0,00	3281,84
A	C5	0,00	0,00	0,00	42,40	151,42	181,70	127,19	54,51	12,11	6,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	575,38
B	C5	0,00	0,00	0,00	17,01	60,76	72,91	51,04	21,87	4,86	2,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	230,88
C	C5	0,00	0,00	0,00	8,54	30,52	36,62	25,63	10,99	2,44	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	115,96
A	C6	0,00	0,00	0,00	5,34	21,35	90,76	69,40	26,69	5,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	218,88
B	C6	0,00	0,00	0,00	3,69	14,75	62,69	47,94	18,44	3,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	151,20
C	C6	0,00	0,00	0,00	3,86	15,45	65,68	50,22	19,32	3,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	158,40
UNICO	C7	0,00	0,00	0,00	0,00	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	132,22	0,00	0,00	1190,00
UNICO	C8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,00
UNICO	C9	0,00	0,																			

Anexo 7. Validación de la simulación

Un modelo de simulación es útil en tanto en cuanto sus resultados sean precisos. Mayor precisión, entendida como semejanza entre los resultados del modelo y la realidad, implica también mayores costes y mayor complejidad, de modo que ha de encontrarse un equilibrio entre la precisión necesaria y el valor añadido que ésta aporta. Sin embargo, independientemente de lo acertada o compleja que pueda ser la simulación, debe someterse a un proceso de validación que asegure la precisión de los resultados y provea al usuario final de la confianza necesaria para utilizarlo eficientemente.

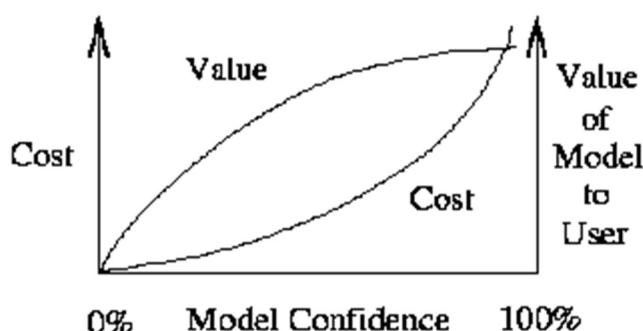


Ilustración 107. Relación entre el coste de la confianza en un modelo (a través de la validación) y el valor que aporta (G. Sargent, 2011).

Hay cuatro aproximaciones básicas para la validación de modelos de simulación (G. Sargent, 2011): validación realizada por el equipo de desarrollo de la simulación, validación realizada por el cliente, validación por medio de una empresa externa (IV&V) o sistema de puntos. De estas cuatro, se escoge para los dos modelos de simulación (con o sin SGA) una validación inicial por el equipo de desarrollo, seguida por una confirmación del cliente de los resultados. La opción de IV&V se descarta como inviable y poco práctica y el sistema de puntos no se elige debido a que, como señala G. Sargent en su análisis de validaciones de simulaciones, tiende a esconder la subjetividad del análisis tras una aproximación aparentemente objetiva.

Dentro de las técnicas de análisis, se desarrollan las siguientes:

Animación: el comportamiento de los agentes de la simulación puede representarse en tiempo real, lo que permite el control visual de las acciones para asegurarse de que siguen el comportamiento predefinido en todo momento. Además del comportamiento general, se comprueban otros factores.

-Distribución de labores de carretilleros: comparación a tiempo real y final entre la base de datos de los recursos⁹ y los programados. Se compara el tiempo de utilización entre las dos mediciones para asegurar que coinciden. Se comprueba que lo hacen, con una diferencia de un 1% en el tiempo “idle” de los carretilleros.

⁹ Anylogic recoge automáticamente información sobre de uso de recursos.

-Tiempo de espera de los camiones: se cuenta manualmente el tiempo desde la llegada de un camión al almacén hasta su entrada una vez asignado un muelle. Se realizan cinco mediciones aleatorias para comprobar que efectivamente los tiempos coinciden.

-Escritura correcta de *ledgers*: se comprueba con dos órdenes de prueba de cada cliente que las entradas de pallets se anotan correctamente en sus respectivos *ledger*, y que son correctamente removidas una vez se produce una salida que las requiere.

-Horarios de entradas y salidas: se comparan los horarios previstos de entradas y salidas, tanto la llegada por programación fija como las distribuciones asignadas para dotar de variabilidad a la simulación (se estudia que los tiempos generados se encuentren dentro del rango previsto y que se asemejen a la distribución deseada).

-Asignación de tareas por SGA: mediante control visual durante *runtime* se estudia la asignación de tareas a carretilleros cuando acaban una labor.

-Cruces y congestión: se asegura el marcado de posiciones ante cruces de carretillas en la simulación, así como la espera tras la colocación de un pallet.

-Acumulación de camiones en espera. Los camiones esperan correctamente para entrar, pasando en orden de llegada como estaba programado.

Test de condiciones extremas: se seleccionan variables en los parámetros de inicio que lleven la simulación a puntos de comportamiento especialmente anormales.

-Modificación del stock inicial: desde 0 pallets hasta completar el almacén al 100%. La simulación genera un error cuando el número de pallets en el almacén supera su capacidad máxima. Se trata de un escenario atípico que, en caso de producirse en la realidad, podría preverse y tomar medidas al respecto. Es por ello que como medida se establece un límite de llenado inicial del 95%, evitando así el error sin dejar de cubrir posibles escenarios.

-Falta de stock para completar una orden. La simulación limita la orden correctamente al stock presente, eliminando por completo la orden si el stock es nulo.

-Saturación de playas: se produce el mismo error que con el stock del almacén. Como en este caso es inviable limitar el número de entradas o salidas para liberar playas dado que se alteraría la precisión del modelo, se añade capacidad prácticamente ilimitada (180 posiciones) a las 5 playas más alejadas de cada muelle. Se comprueba que el modelo funciona correctamente al realizar este cambio evitando que las salidas puedan cargarse en los camiones, de modo que se saturen rápidamente las playas.

Otro tipo de técnicas, como la validación de eventos o la validación predictiva, no es viable aplicarlas debido a que se trata de un proyecto de almacén a futuro, por lo que resulta imposible compararlo con datos reales. Si se asegura en su lugar que los resultados obtenidos son lógicos y similares al de otros almacenes existentes.

Respecto a la validación de la información, imprescindible para un modelo que se pretenda utilizar en la realidad, no se lleva a cabo en este trabajo. Esto se debe a que la información presentada en este proyecto ha sido alterada conscientemente para ocultar posibles relaciones con la empresa o los clientes concretos del futuro almacén. Se puede asegurar, por tanto, que los datos introducidos no serían válidos para el caso real (bastaría con volver a utilizar los datos reales para conseguir resultados válidos).

Anexo 8. Aplicación del DOE

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Carretillas	Llenado Inicial	Tiempo 1	Tiempo 2	SIN SGA	CON SGA
1	45	1	1	5	0,6	1,5	1	31,433.548	11,581.244
113	83	1	1	5	0,6	1,5	1	27,278.493	20,603.623
17	88	1	1	5	0,6	1,5	1	32,086.402	20,607.815
97	93	1	1	5	0,6	1,5	1	40,848.903	18,432.374
33	105	1	1	5	0,6	1,5	1	27,328.897	20,499.633
49	107	1	1	5	0,6	1,5	1	31,199.933	13,940.215
145	132	1	1	5	0,6	1,5	1	35,616.797	18,821.825
65	138	1	1	5	0,6	1,5	1	32,089.205	30,473.752
129	152	1	1	5	0,6	1,5	1	32,869.136	27,151.551
81	153	1	1	5	0,6	1,5	1	25,520.321	7,351.241
105	3	1	1	5	0,6	1,5	4	37,079.62	17,521.421
41	35	1	1	5	0,6	1,5	4	45,536.407	10,296.902
89	98	1	1	5	0,6	1,5	4	25,707.627	6,245.305
153	118	1	1	5	0,6	1,5	4	28,756.149	15,714.5
137	124	1	1	5	0,6	1,5	4	37,330.579	17,845.249
9	129	1	1	5	0,6	1,5	4	45,572.894	6,232.777
121	141	1	1	5	0,6	1,5	4	25,599.325	13,358.234
57	148	1	1	5	0,6	1,5	4	44,510.88	23,404.843
25	150	1	1	5	0,6	1,5	4	56,872.206	11,135.604
73	157	1	1	5	0,6	1,5	4	28,775.555	6,971.676
53	1	1	1	5	0,6	2	1	49,046.715	16,222.578
117	22	1	1	5	0,6	2	1	36,319.323	9,526.183
37	34	1	1	5	0,6	2	1	21,501.167	16,002.489
85	48	1	1	5	0,6	2	1	34,102.506	8,445.139
101	81	1	1	5	0,6	2	1	21,878.216	14,100.198
149	97	1	1	5	0,6	2	1	41,406.734	18,464.923
133	99	1	1	5	0,6	2	1	42,052.331	10,166.991
69	104	1	1	5	0,6	2	1	26,393.418	21,503.682
21	137	1	1	5	0,6	2	1	27,170.957	7,893.332
5	139	1	1	5	0,6	2	1	35,306.565	13,365.784
109	2	1	1	5	0,6	2	4	33,068.237	24,985.956
61	15	1	1	5	0,6	2	4	34,731.541	28,502.166
45	16	1	1	5	0,6	2	4	44,917.779	23,481.974
77	37	1	1	5	0,6	2	4	29,899.03	22,177.842
125	46	1	1	5	0,6	2	4	24,292.782	38,306.541
157	53	1	1	5	0,6	2	4	32,991.587	35,086.931
141	59	1	1	5	0,6	2	4	38,962.74	18,565.376
29	63	1	1	5	0,6	2	4	34,553.69	14,431.172
93	155	1	1	5	0,6	2	4	34,407.101	3,006.656
13	164	1	1	5	0,6	2	4	49,178.259	6,760.737

67	17	1	1	5	0,9	1,5	1	37,104.088	10,987.754
99	19	1	1	5	0,9	1,5	1	30,733.009	8,276.31
83	27	1	1	5	0,9	1,5	1	30,009.039	16,736.985
19	28	1	1	5	0,9	1,5	1	30,632.217	20,594.87
35	87	1	1	5	0,9	1,5	1	41,264.807	22,741.007
115	90	1	1	5	0,9	1,5	1	36,703.203	3,462.204
131	96	1	1	5	0,9	1,5	1	29,685.174	40,479.917
3	115	1	1	5	0,9	1,5	1	47,159.226	14,259.779
147	121	1	1	5	0,9	1,5	1	50,894.014	10,735.144
51	130	1	1	5	0,9	1,5	1	35,424.101	6,103.405
11	8	1	1	5	0,9	1,5	4	35,850.187	7,558.994
59	10	1	1	5	0,9	1,5	4	33,702.995	18,126.901
107	14	1	1	5	0,9	1,5	4	34,220.288	21,695.024
75	29	1	1	5	0,9	1,5	4	38,520.398	24,192.451
155	49	1	1	5	0,9	1,5	4	33,135.444	14,760.155
123	73	1	1	5	0,9	1,5	4	55,880.692	10,467.718
139	108	1	1	5	0,9	1,5	4	35,589.686	15,799.371
43	133	1	1	5	0,9	1,5	4	39,002.738	17,088.551
91	144	1	1	5	0,9	1,5	4	46,223.03	10,227.717
27	146	1	1	5	0,9	1,5	4	35,476.713	6,866.178
7	7	1	1	5	0,9	2	1	31,980.551	15,848.272
71	21	1	1	5	0,9	2	1	28,634.164	31,564.228
87	52	1	1	5	0,9	2	1	40,588.038	42,544.266
135	57	1	1	5	0,9	2	1	31,924.108	3,282.393
119	75	1	1	5	0,9	2	1	33,793.915	4,844.193
39	116	1	1	5	0,9	2	1	45,164.709	20,432.642
55	125	1	1	5	0,9	2	1	30,862.825	12,780.67
23	128	1	1	5	0,9	2	1	32,419.161	21,730.47
151	145	1	1	5	0,9	2	1	30,232.58	43,166.946
103	162	1	1	5	0,9	2	1	27,866.717	11,462.164
95	5	1	1	5	0,9	2	4	37,015.784	13,169.665
47	20	1	1	5	0,9	2	4	30,654.954	12,450.728
127	31	1	1	5	0,9	2	4	26,361.927	18,671.815
159	67	1	1	5	0,9	2	4	28,289.915	19,292.287
79	79	1	1	5	0,9	2	4	34,448.694	12,262.321
31	85	1	1	5	0,9	2	4	29,055.533	26,847.801
15	95	1	1	5	0,9	2	4	36,246.457	15,382.473
111	111	1	1	5	0,9	2	4	50,618.442	11,091.871
143	117	1	1	5	0,9	2	4	50,722.239	15,819.05
63	120	1	1	5	0,9	2	4	27,603.316	13,625.548
165	12	0	1	7	0,75	1,75	2,5	8,020.996	2,859.68
163	47	0	1	7	0,75	1,75	2,5	10,090.786	1,721.322
162	61	0	1	7	0,75	1,75	2,5	4,056.617	3,459.664
164	64	0	1	7	0,75	1,75	2,5	5,251.119	4,421.015

161	66	0	1	7	0,75	1,75	2,5	5,486.796	1,421.065
82	42	1	1	9	0,6	1,5	1	1,940.48	1,803.238
18	69	1	1	9	0,6	1,5	1	1,311.321	902429
50	72	1	1	9	0,6	1,5	1	1,369.943	1,593.29
66	114	1	1	9	0,6	1,5	1	368.631	1,499.243
98	122	1	1	9	0,6	1,5	1	2,054.614	1,653.129
34	123	1	1	9	0,6	1,5	1	755.884	3,202.34
130	134	1	1	9	0,6	1,5	1	1,664.726	665144
114	140	1	1	9	0,6	1,5	1	1,883.415	573834
2	156	1	1	9	0,6	1,5	1	4,898.064	1,896.879
146	158	1	1	9	0,6	1,5	1	583.277	2,064.038
74	4	1	1	9	0,6	1,5	4	3,833.485	1,120.646
42	40	1	1	9	0,6	1,5	4	1,304.698	6,931.938
154	43	1	1	9	0,6	1,5	4	1,827.308	1,588.219
90	55	1	1	9	0,6	1,5	4	823.234	768037
10	58	1	1	9	0,6	1,5	4	1,784.796	2,186.774
26	89	1	1	9	0,6	1,5	4	1,881.537	480443
106	106	1	1	9	0,6	1,5	4	1,241.98	2,719.221
122	126	1	1	9	0,6	1,5	4	371.723	977809
138	131	1	1	9	0,6	1,5	4	2,719.809	2,062.893
58	161	1	1	9	0,6	1,5	4	1,234.048	1,384.733
38	6	1	1	9	0,6	2	1	2,093.304	2,869.029
22	9	1	1	9	0,6	2	1	2,562.048	1,792.36
70	13	1	1	9	0,6	2	1	1,083.623	2,135.539
54	44	1	1	9	0,6	2	1	789.674	1,599.454
102	62	1	1	9	0,6	2	1	564.6	1,873.303
86	68	1	1	9	0,6	2	1	221.607	779698
118	82	1	1	9	0,6	2	1	217.322	650128
134	91	1	1	9	0,6	2	1	826.808	1,795.351
150	101	1	1	9	0,6	2	1	662.838	1,406.762
6	112	1	1	9	0,6	2	1	2,138.655	1,052.782
142	24	1	1	9	0,6	2	4	320.484	905004
126	26	1	1	9	0,6	2	4	1,149.774	1,917.838
62	65	1	1	9	0,6	2	4	732.929	1,258.244
46	70	1	1	9	0,6	2	4	719.98	2,513.403
14	86	1	1	9	0,6	2	4	1,135.272	953982
30	92	1	1	9	0,6	2	4	802.886	1,678.439
94	100	1	1	9	0,6	2	4	1,758.694	1,608.127
110	113	1	1	9	0,6	2	4	294.46	2,114.448
78	127	1	1	9	0,6	2	4	777.874	1,107.536
158	136	1	1	9	0,6	2	4	636.935	1,275.492
132	11	1	1	9	0,9	1,5	1	700.351	2,969.994
100	18	1	1	9	0,9	1,5	1	1,849.422	3,078.613
116	38	1	1	9	0,9	1,5	1	1,375.85	4,109.376

148	41	1	1	9	0,9	1,5	1	2,206.966	1,124.109
20	50	1	1	9	0,9	1,5	1	3,274.458	1,230.421
68	54	1	1	9	0,9	1,5	1	1,165.587	1,176.827
84	80	1	1	9	0,9	1,5	1	4,076.685	1,442.277
52	135	1	1	9	0,9	1,5	1	1,600.66	8,637.018
36	142	1	1	9	0,9	1,5	1	1,883.093	1,427.896
4	163	1	1	9	0,9	1,5	1	2,278.285	1,748.16
108	23	1	1	9	0,9	1,5	4	1,917.995	2,940.384
28	25	1	1	9	0,9	1,5	4	1,833.201	3,885.108
124	30	1	1	9	0,9	1,5	4	2,806.576	504.08
60	51	1	1	9	0,9	1,5	4	488.996	1,929.493
12	60	1	1	9	0,9	1,5	4	1,915.5	1,184.831
76	71	1	1	9	0,9	1,5	4	529.34	822013
44	74	1	1	9	0,9	1,5	4	1,039.394	702802
140	103	1	1	9	0,9	1,5	4	1,116.893	4,935.026
92	149	1	1	9	0,9	1,5	4	1,046.06	1,189.221
156	159	1	1	9	0,9	1,5	4	2,431.7	5,748.936
156	166	1	1	9	0,9	1,5	4	976.317	1,901.268
136	32	1	1	9	0,9	2	1	1,660.343	3,060.072
152	36	1	1	9	0,9	2	1	313.944	1,780.121
56	39	1	1	9	0,9	2	1	1,513.025	3,537.826
120	76	1	1	9	0,9	2	1	607.808	2,152.201
8	77	1	1	9	0,9	2	1	423.841	1,458.875
72	78	1	1	9	0,9	2	1	849.464	2,430.067
88	102	1	1	9	0,9	2	1	642.222	1,874.589
40	110	1	1	9	0,9	2	1	515.48	1,960.0
104	151	1	1	9	0,9	2	1	558.604	1,466.089
24	160	1	1	9	0,9	2	1	356.991	1,294.291
144	33	1	1	9	0,9	2	4	472.021	3,164.15
48	56	1	1	9	0,9	2	4	1,002.24	1,911.162
64	84	1	1	9	0,9	2	4	3,211.594	2,371.316
128	94	1	1	9	0,9	2	4	773.038	2,554.816
96	109	1	1	9	0,9	2	4	799.712	2,068.914
16	119	1	1	9	0,9	2	4	680.069	2,877.715
80	143	1	1	9	0,9	2	4	967.792	1,395.91
112	147	1	1	9	0,9	2	4	1,008.715	2,591.765
160	154	1	1	9	0,9	2	4	468.61	1,484.608
32	165	1	1	9	0,9	2	4	350.12	2,482.718

Tabla 22. Resultados de las 322 repeticiones para realizar el DoE con y sin SGA.

Para la realización del diseño de experimentos se utiliza un tiempo ponderado de retrasos en función del tiempo permitido para cada cliente. Los clientes 1 y 3 no deberían en general superar un retraso de 10 minutos, y el cliente 2 de 30 minutos. El resto de clientes pueden permitirse un margen

de 1 hora. Por ello se añade un multiplicador al tiempo de espera proporcional a estos tiempos (x_6 para los clientes 1 y 3, x_3 para el cliente 2 y x_1 para el resto).

Análisis de varianza para C9 (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.
Efectos principales	4	36861690965	36861690965
Carretillas	1	36807912637	36807912637
Llenado Inicial	1	209	209
Tiempo 1	1	48357110	48357110
Tiempo 2	1	5421009	5421009
2-Interacciones de (No.) factores	6	563071967	563071967
Carretillas*Llenado Inicial	1	87189	87189
Carretillas*Tiempo 1	1	140136051	140136051
Carretillas*Tiempo 2	1	4841724	4841724
Llenado Inicial*Tiempo 1	1	6194084	6194084
Llenado Inicial*Tiempo 2	1	118647525	118647525
Tiempo 1*Tiempo 2	1	293165395	293165395
3-Interacciones de (No.) factores	4	545973716	545973716
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1	1	2544950	2544950
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 2	1	122050663	122050663
Carretillas*Tiempo 1*Tiempo 2	1	278628262	278628262
Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	1	142749842	142749842
4-Interacciones de (No.) factores	1	100183328	100183328
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	1	100183328	100183328
Curvatura	1	833499644	833499644
Error residual	148	10779877524	10779877524
Error puro	148	10779877524	10779877524
Total	164	49684297144	
Fuente	CM Ajust.	F	P
Efectos principales	9215422741	126,52	0,000
Carretillas	36807912637	505,35	0,000
Llenado Inicial	209	0,00	0,999
Tiempo 1	48357110	0,66	0,416
Tiempo 2	5421009	0,07	0,785
2-Interacciones de (No.) factores	93845328	1,29	0,266
Carretillas*Llenado Inicial	87189	0,00	0,972
Carretillas*Tiempo 1	140136051	1,92	0,168
Carretillas*Tiempo 2	4841724	0,07	0,797
Llenado Inicial*Tiempo 1	6194084	0,09	0,771
Llenado Inicial*Tiempo 2	118647525	1,63	0,204
Tiempo 1*Tiempo 2	293165395	4,02	0,047
3-Interacciones de (No.) factores	136493429	1,87	0,118
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1	2544950	0,03	0,852
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 2	122050663	1,68	0,198
Carretillas*Tiempo 1*Tiempo 2	278628262	3,83	0,052
Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	142749842	1,96	0,164
4-Interacciones de (No.) factores	100183328	1,38	0,243
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	100183328	1,38	0,243
Curvatura	833499644	11,44	0,001
Error residual	72837010		
Error puro	72837010		
Total			

Ilustración 108. Análisis de la varianza para el modelo sin SGA.

Análisis de varianza para C9 (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.
Efectos principales	4	8680580464	8680580464
Carretillas	1	8622224731	8622224731
Llenado Inicial	1	4092481	4092481
Tiempo 1	1	46503844	46503844
Tiempo 2	1	7759408	7759408
2-Interacciones de (No.) factores	6	197791885	197791885
Carretillas*Llenado Inicial	1	5291471	5291471
Carretillas*Tiempo 1	1	75039015	75039015
Carretillas*Tiempo 2	1	10145022	10145022
Llenado Inicial*Tiempo 1	1	5708180	5708180
Llenado Inicial*Tiempo 2	1	40474398	40474398
Tiempo 1*Tiempo 2	1	61133799	61133799
3-Interacciones de (No.) factores	4	284158229	284158229
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1	1	7390411	7390411
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 2	1	31112550	31112550
Carretillas*Tiempo 1*Tiempo 2	1	61131326	61131326
Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	1	184523941	184523941
4-Interacciones de (No.) factores	1	229860316	229860316
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	1	229860316	229860316
Curvatura	1	210564878	210564878
Error residual	148	5564134388	5564134388
Error puro	148	5564134388	5564134388
Total	164	15167090160	

Fuente	CM Ajust.	F	P
Efectos principales	2170145116	57,72	0,000
Carretillas	8622224731	229,34	0,000
Llenado Inicial	4092481	0,11	0,742
Tiempo 1	46503844	1,24	0,268
Tiempo 2	7759408	0,21	0,650
2-Interacciones de (No.) factores	32965314	0,88	0,514
Carretillas*Llenado Inicial	5291471	0,14	0,708
Carretillas*Tiempo 1	75039015	2,00	0,160
Carretillas*Tiempo 2	10145022	0,27	0,604
Llenado Inicial*Tiempo 1	5708180	0,15	0,697
Llenado Inicial*Tiempo 2	40474398	1,08	0,301
Tiempo 1*Tiempo 2	61133799	1,63	0,204
3-Interacciones de (No.) factores	71039557	1,89	0,115
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1	7390411	0,20	0,658
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 2	31112550	0,83	0,364
Carretillas*Tiempo 1*Tiempo 2	61131326	1,63	0,204
Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	184523941	4,91	0,028
4-Interacciones de (No.) factores	229860316	6,11	0,015
Carretillas*Llenado Inicial*Tiempo 1*Tiempo 2	229860316	6,11	0,015
Curvatura	210564878	5,60	0,019
Error residual	37595503		
Error puro	37595503		
Total			

Ilustración 109. Análisis de la varianza para el modelo con SGA.

Anexo 9. Resultados del análisis sin SGA, horarios cambiados, 11 carretillas

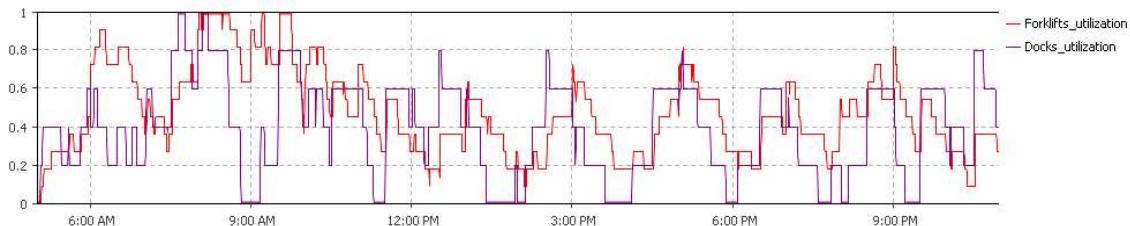


Ilustración 110. Utilización, por horas, de las carretillas (rojo) y los muelles (violeta).

- Picking: 1.838 (16.7%)
- Loading: 1.16 (10.5%)
- Unloading: 0.68 (6.2%)
- Storing: 1.503 (13.7%)
- Idle: 5.818 (52.9%)

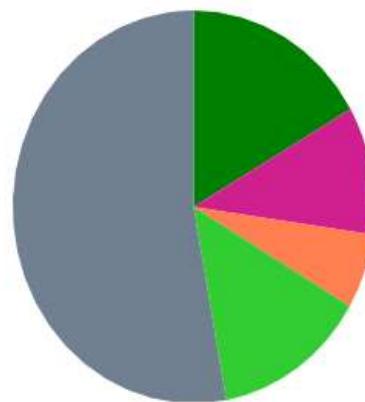


Ilustración 111. Distribución de tareas de las carretillas a lo largo de la simulación.

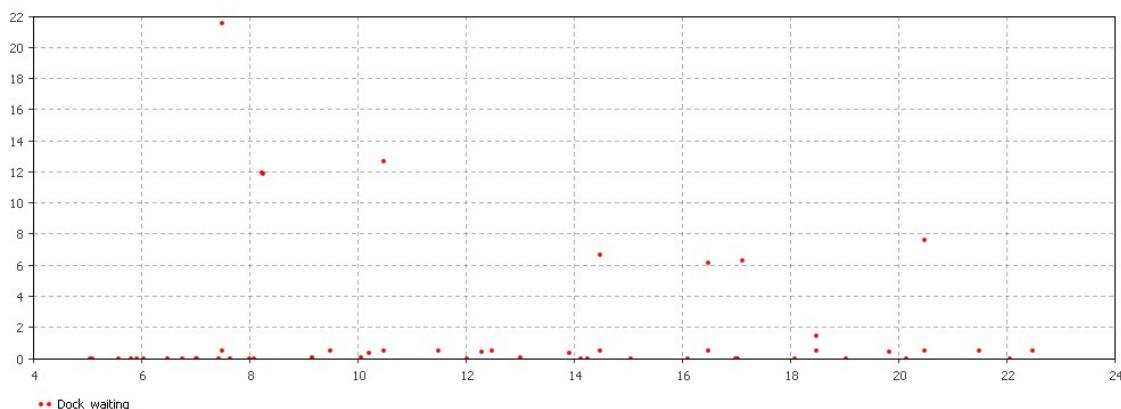


Ilustración 112. Espera de cada camión (eje Y, minutos) en relación con la hora asignada de llegada al almacén (eje X, hora).

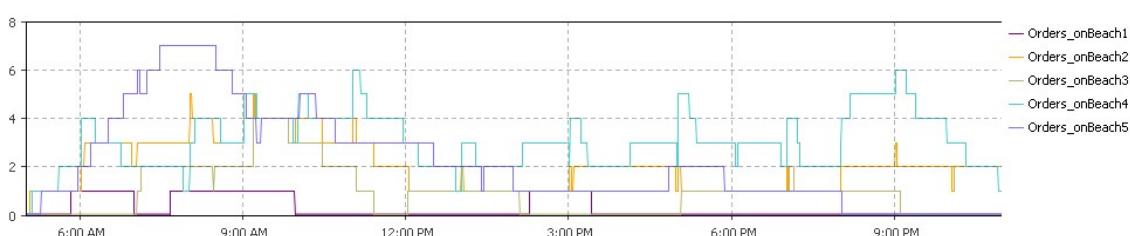


Ilustración 113. Utilización de las playas en número de órdenes presentes de manera simultánea.

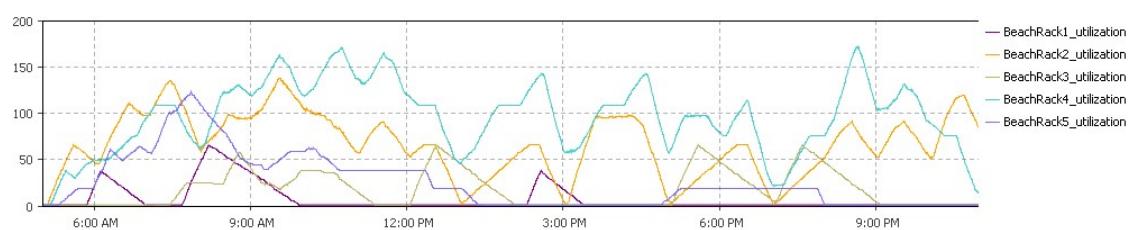


Ilustración 114. Utilización de las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.

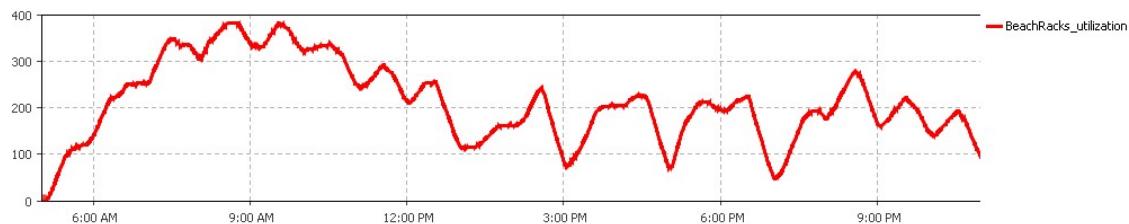


Ilustración 115. Utilización de todas las playas en número de pallets presentes de manera simultánea.

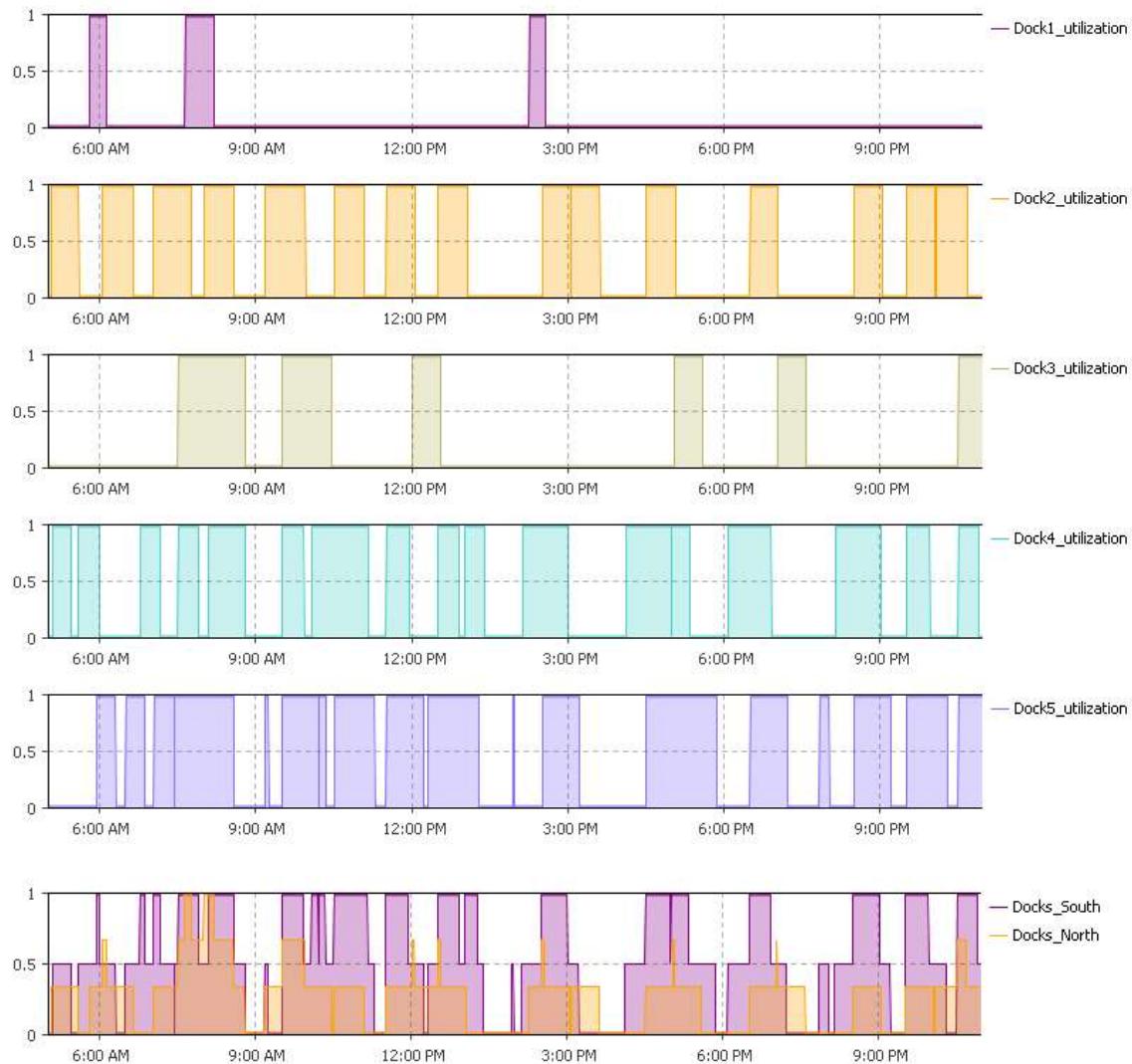


Ilustración 116. Utilización individual de los muelles (primeras 5 imágenes) y del conjunto de muelles del lado Norte (muelles 1, 2 y 3) y del lado Sur (muelles 4 y 5).

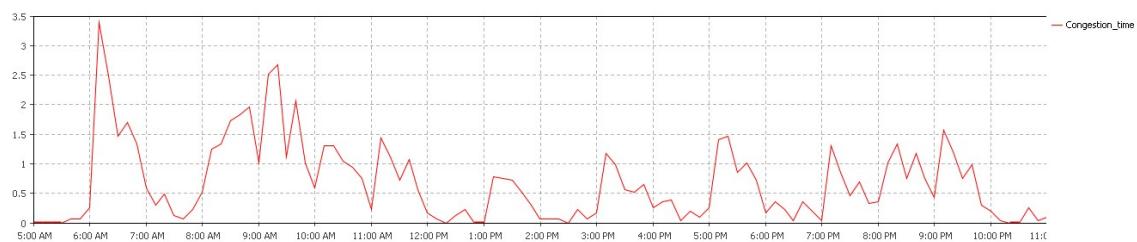


Ilustración 117. Tiempo perdido por problemas de congestión (minutos, eje Y) por hora (eje X).



Ilustración 118. Puntos en los que se produjeron cruces de carretillas (utilizado para el cálculo de congestión).

Anexo 10. Modelo de simulación. Imagen general

A continuación, se presentan imágenes de los modelos de simulación sin y con SGA, acompañados de sendos esquemas que representan de modo muy general el funcionamiento del sistema (se recalca la generalidad del esquema debido a que, mientras éste tiene alrededor de 20 elementos, su equivalente real cuenta con más de 400 que añaden diversas excepciones o cambios puntuales de comportamiento).

Anexo 10.1. Modelo de simulación sin SGA

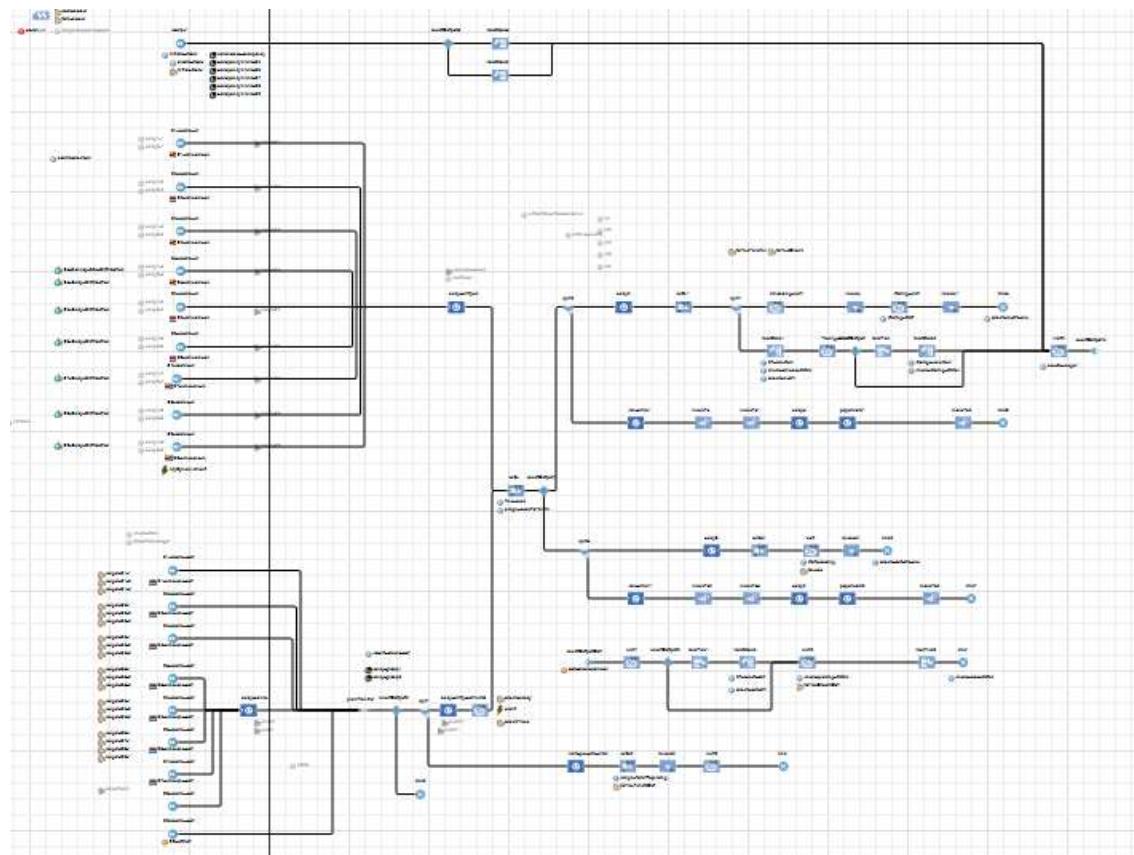


Ilustración 119. Modelo de simulación, en Anylogic, sin el uso de un SGA.

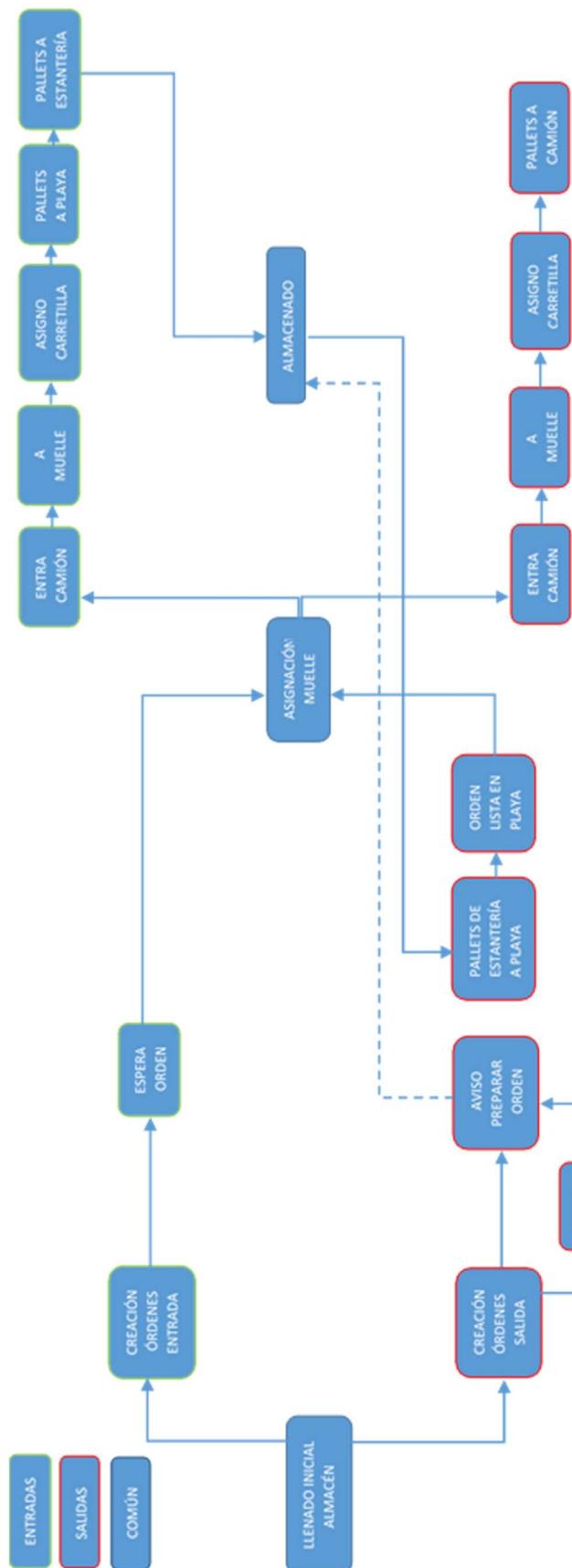


Ilustración 120. Esquema del modelo de simulación sin SGA.

Anexo 10.2. Modelo de simulación con SGA

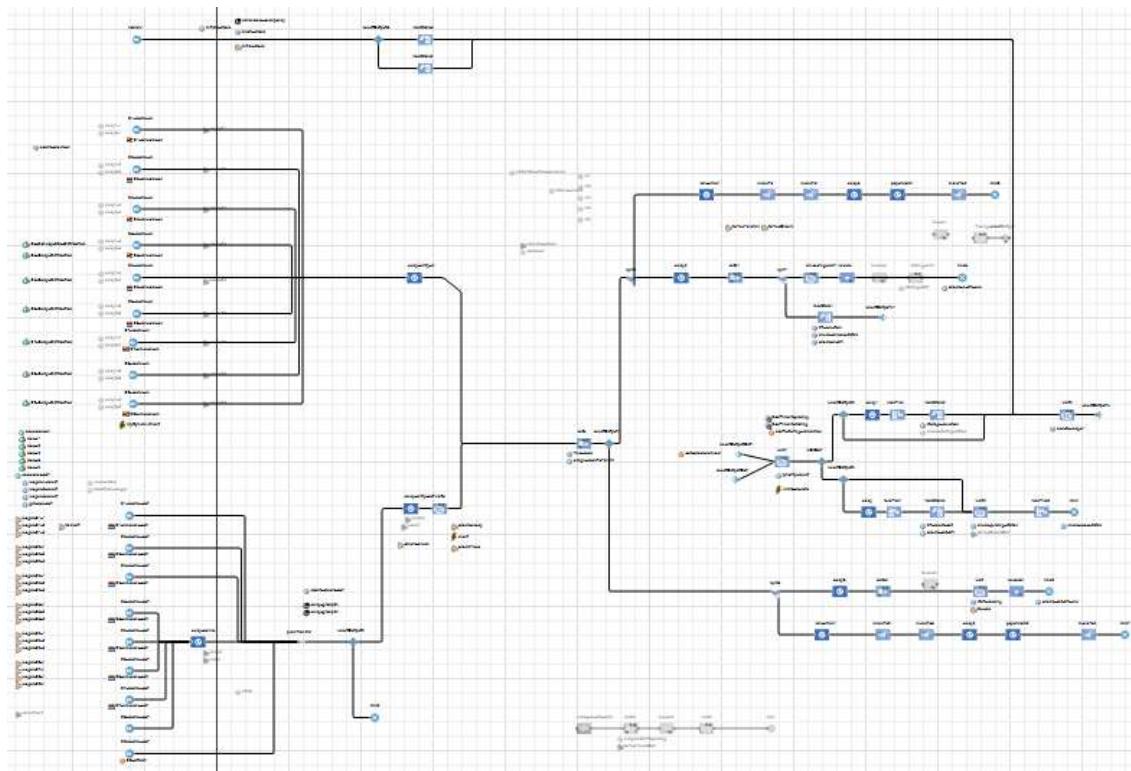


Ilustración 121. Modelo de simulación, en Anylogic, con el uso de un SGA.

La mayor diferencia entre la utilización o no de un SGA para guiar a las carretillas aparece en la parte central del esquema, en donde se juntan entradas y salidas y uno a uno se van liberando los pallets para seguir por el camino que corresponda.

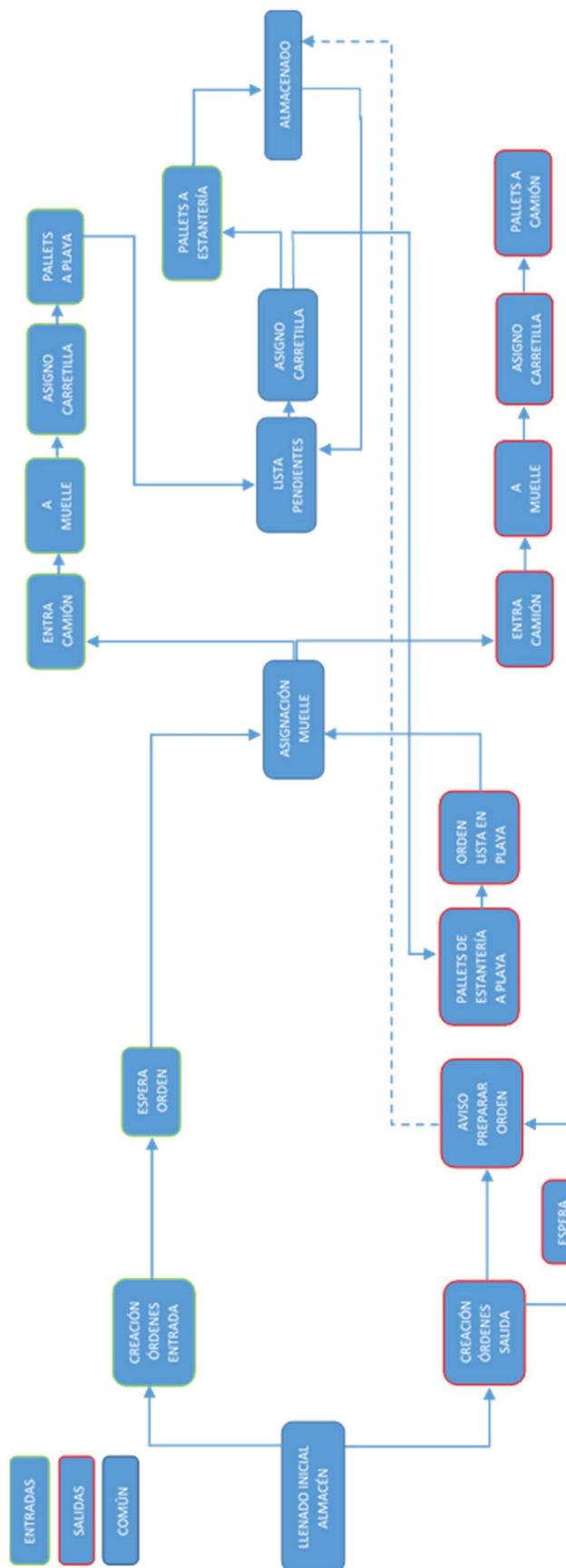


Ilustración 122. Esquema del modelo de simulación con SGA

Anexo 10.3. Elementos comunes a ambos modelos

Anexo 10.3.1. Elementos de Main

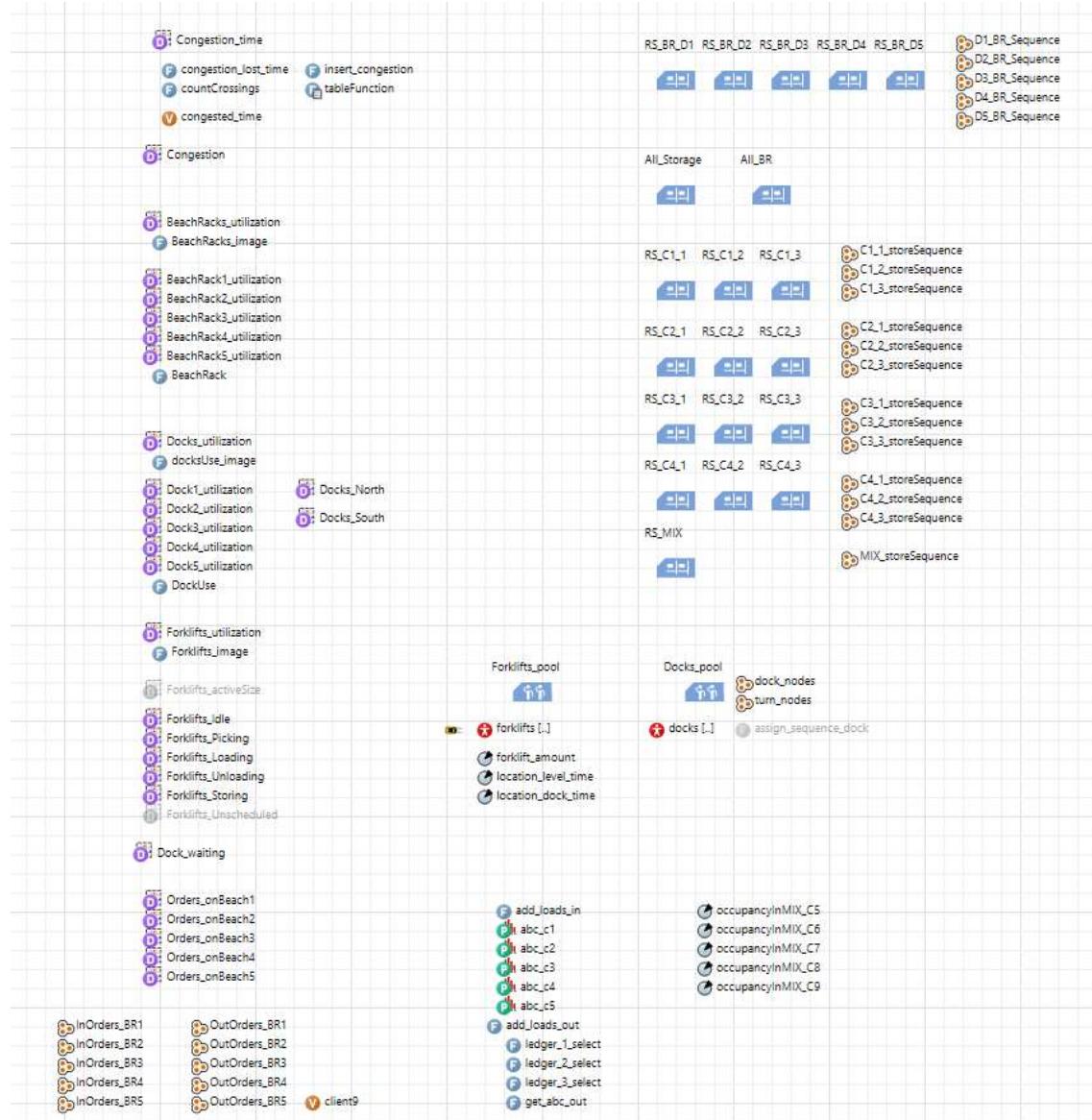


Ilustración 123. Elementos presentes en el agente Main.

Anexo 10.3.2. Elementos de los agentes

AGENTE	ELEMENTO	NOMBRE
ORDER	PARÁMETRO	<i>in1out2</i>
	PARÁMETRO	<i>client</i>
	PARÁMETRO	<i>delay_1</i>
	PARÁMETRO	<i>delay_2</i>
	PARÁMETRO	<i>order_number</i>
	VARIABLE	<i>dock_assigned</i>
	VARIABLE	<i>forklift_assigned</i>
	VARIABLE	<i>truck_assigned</i>
	VARIABLE	<i>FromToTruck</i>
	VARIABLE	<i>FromToStorage</i>
PALLET	VARIABLE	<i>waiting_for_dock</i>
	VARIABLE	<i>expected_docking</i>
	ARRAY	<i>load</i>
	PARÁMETRO	<i>client</i>
	PARÁMETRO	<i>abc</i>
DOCK	PARÁMETRO	<i>order_number</i>
	VARIABLE	<i>dock_assigned</i>
	VARIABLE	<i>forklift_assigned</i>
FORKLIFT	PARÁMETRO	<i>dock_number</i>
	PARÁMETRO	<i>dock_node</i>
TRUCK	PARÁMETRO	<i>turn_node</i>
	PARÁMETRO	<i>forklift_id</i>
CONGESTION	ARRAY	<i>crossed_times</i>
	PARÁMETRO	<i>order</i>
	PARÁMETRO	<i>forklift</i>
	PARÁMETRO	<i>crossed</i>

Tabla 23. Elementos (parámetros, variables y arrays) de los diversos agentes del modelo de simulación.

Además, las carretillas cuentan con un gráfico de estados para señalar la labor que desarrollan en cada momento:

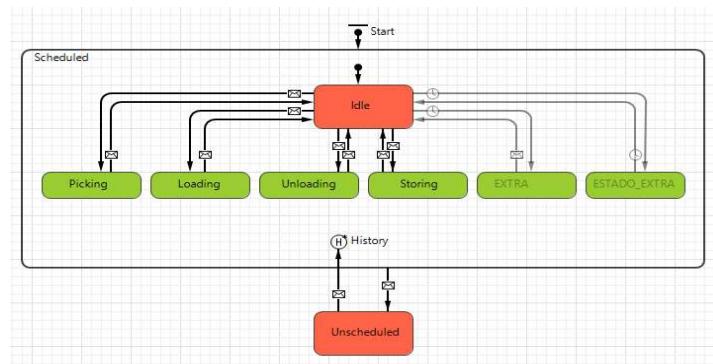


Ilustración 124. Estados del agente Forklift.

Anexo 11. Funciones principales del modelo de simulación

En este anexo se muestran las funciones más representativas del modelo. No son suficientes para reconstruir el modelo, ya que éste contiene muchas más, pero sí dan una idea, si el lector ha utilizado anteriormente el programa Anylogic y posee algún conocimiento de Java, de cómo recrear ciertas funciones, tales como la congestión o el sistema de gestión de almacenes.

Anexo 11.1. Congestión

El análisis de la congestión no está previsto para las carretillas en Anylogic (aunque se espera que con la próxima actualización se incluya), de modo que fue necesario buscar una alternativa. Para ello desarrolló una función que se ejecuta cada 1 segundo y que va contando a través de booleanos el número de carretillas diferentes con las que se ha cruzado cada una. Al llegar a una estantería para depositar o retirar una carga, automáticamente añade un tiempo extra proporcional al número de carretillas cruzadas y vuelve a poner los contadores a cero. Además, guarda las coordenadas del sitio donde se produjo el cruce, para poder luego representarlo en una gráfica superpuesta al propio plano del almacén.

El tiempo que se añade se obtiene en función de las pérdidas en un cruce normal entre carretillas (se considera 1 segundo) y el que provoca esperar a que se suba o baje un pallet (la mitad de la media estimada). Se asigna un porcentaje del 85% a cruces normales y un 15% por subidas y bajadas.

Código que ejecutan las carretillas:

```

for (Forklift C : main.forklifts)
{
    if (!equals(C))
        if ((isBusy()) && (C.isBusy()))
        {
            if (distanceTo(C)<10)
            {
                for (Congestion cross : crossed_times)
                {
                    if (cross.forklift == C)
                    {
                        if (cross.crossed == false)
                        {
                            cross.crossed = true;
                            main.Congestion.add(getX()+uniform(-5, 5), 700-getY()+uniform(-5,
5));
                        }
                    }
                }
            }
        }
}

```

Anexo 11.2. Sistema de gestión de almacenes

El SGA se basa en el algoritmo de la función *priority select*, que selecciona, cada vez que una carretilla queda libre y cada 1 segundo (por ejecución del evento *WMS_execute*), la carga más apropiada para la carretilla teniendo en cuenta distancias y prioridades.

F priority_select

```

double distance = 0;
double bestDistance = infinity;
Pallet bestPallet = null;

coeff_storing_calculated = Coefficient_storing(All_BR.size());

if (wait1.size() != 0)
{
    for (Pallet pallet : wait1)
    {
        if (pallet.inState(pallet.Storing))
        {
            distance = network.getDistance(new
Point(forklift.getX(),forklift.getY()), new
Point(pallet.getX(),pallet.getY()) );
            distance = distance * coeff_storing_calculated;
            if(distance < bestDistance)
            {
                bestDistance = distance;
                bestPallet = pallet;
            }
        }
        if (pallet.inState(pallet.Picking))
        {
            distance = network.getDistance(new
Point(forklift.getX(),forklift.getY()), new
Point(pallet.getX(),pallet.getY()) );
            distance = distance *
Coefficient_picking(pallet.time_load - time());
            if(distance < bestDistance)
            {
                bestDistance = distance;
                bestPallet = pallet;
            }
        }
    }

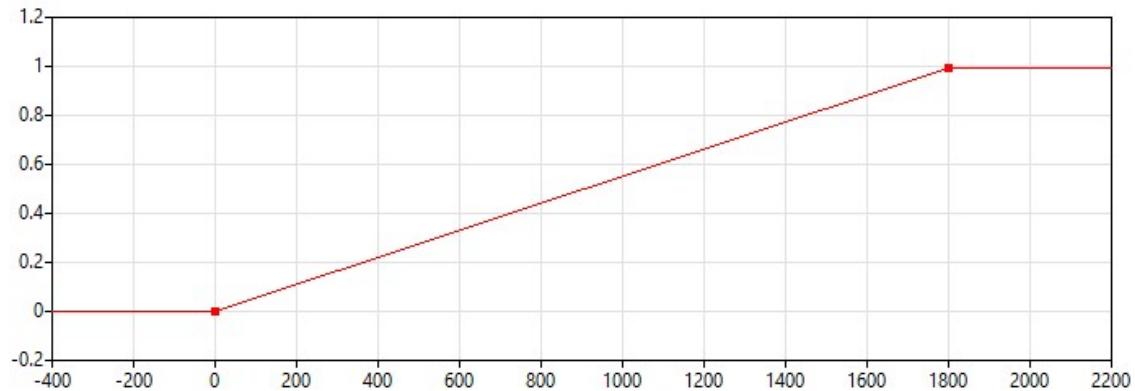
    bestPallet.forklift_assigned = forklift;
    wait1.free(bestPallet);
}

```

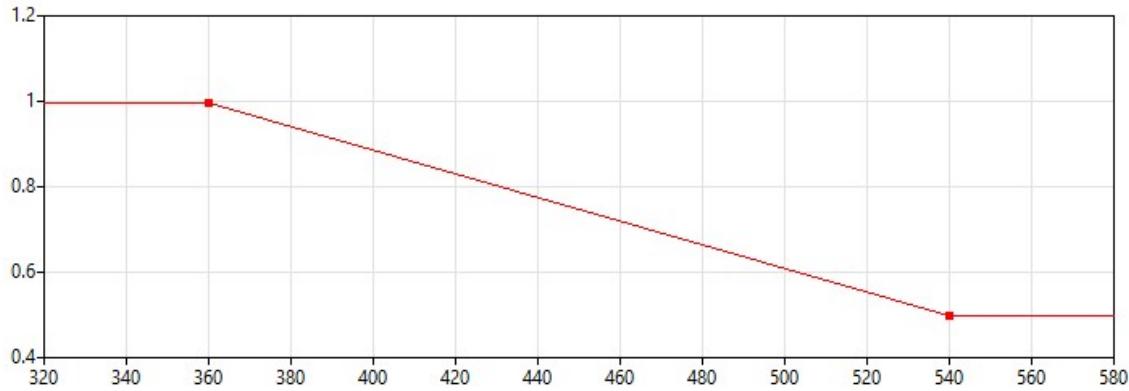
 WMS_execute

```
if (Forklifts_pool.idle() > 0)
{
    for (Forklift forklift : forklifts)
    {
        if (forklift.isIdle())
        {
            priority_select(forklift);
        }
    }
}
```

 Coefficient_picking

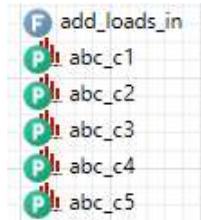


 Coefficient_storing



Anexo 11.3. Añadir pallets a órdenes de entrada

Esta acción se realiza con la función *add_loads_in*, basándose en cinco distribuciones propias de los clientes que no tienen cargas únicas.



F add_loads_in

```

int size = selectFrom(order_size_in).
    where(order_size_in.client.eq(order.client)).
    uniqueResult(order_size_in.size);

int client = order.client;

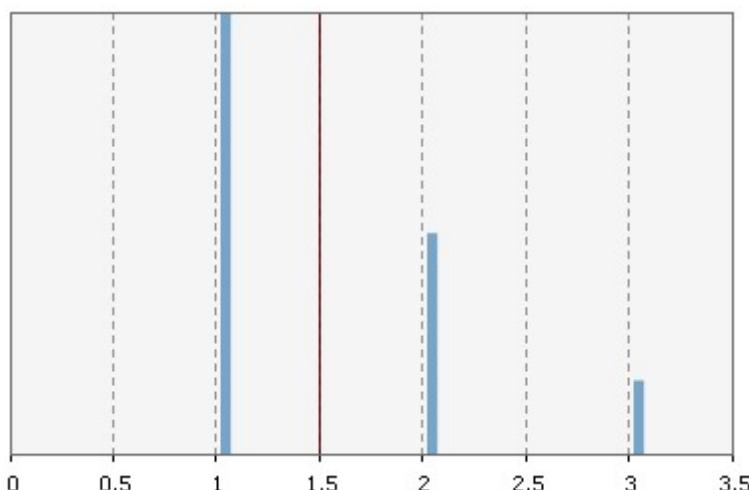
Pallet newPallet = null;

for (int i=0 ; i < size; i++ )
{
    if (order.client > 5)
    {
        newPallet = new Pallet(client, 1 , order.order_number);
    }
    if (order.client == 1)
    {
        newPallet = new Pallet(client, (int)
abc_c1.get(getDefaultRandomGenerator()) , order.order_number);
    }
    if (order.client == 2)
    {
        newPallet = new Pallet(client, (int)
abc_c2.get(getDefaultRandomGenerator()) , order.order_number);
    }
    if (order.client == 3)
    {
        newPallet = new Pallet(client, (int)
abc_c3.get(getDefaultRandomGenerator()) , order.order_number);
    }
    if (order.client == 4)
    {
        newPallet = new Pallet(client, (int)
abc_c4.get(getDefaultRandomGenerator()) , order.order_number);
    }
    if (order.client == 5)
    {
        newPallet = new Pallet(client, (int)
abc_c5.get(getDefaultRandomGenerator()) , order.order_number);
    }

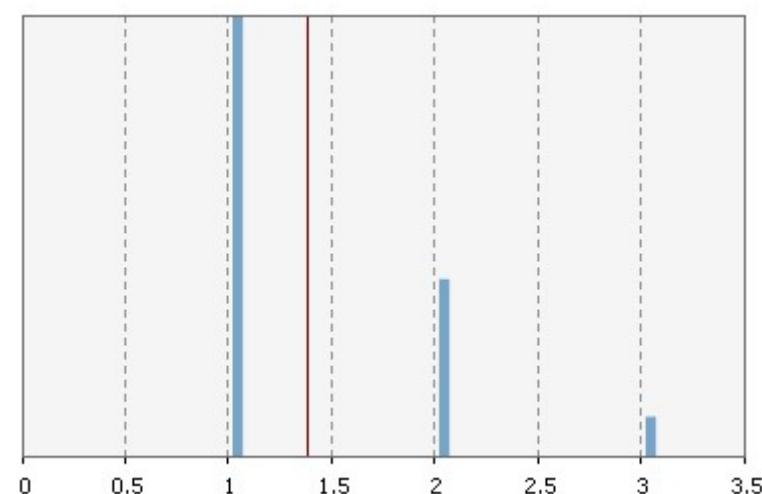
    order.load.addLast(newPallet);
}

```

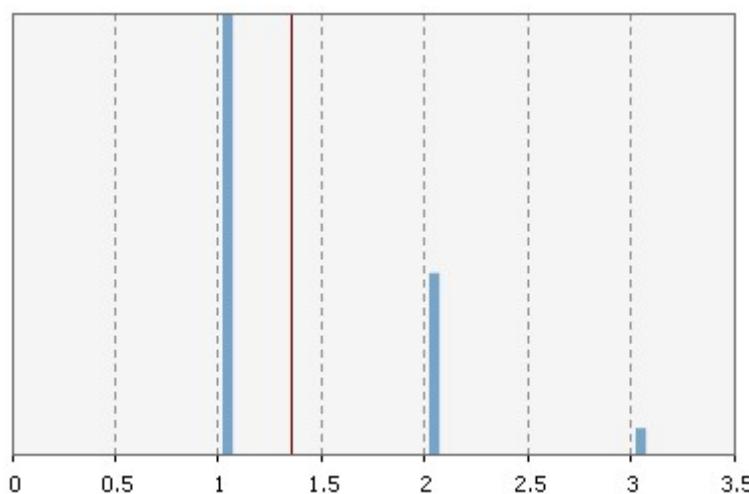
 abc_c1

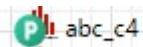


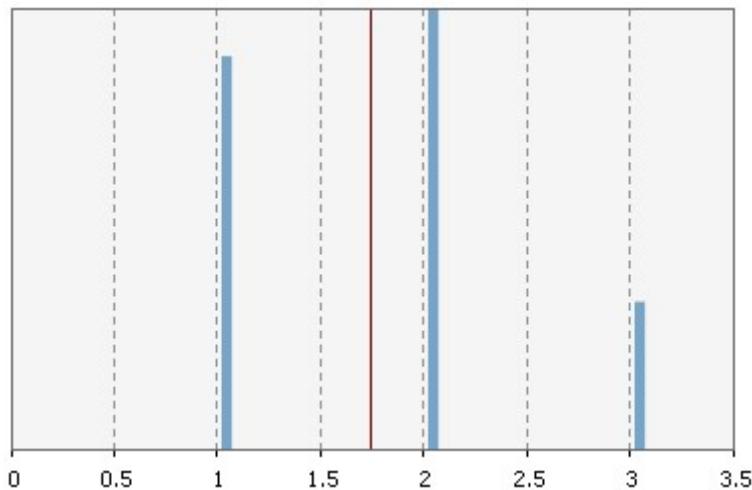
 abc_c2



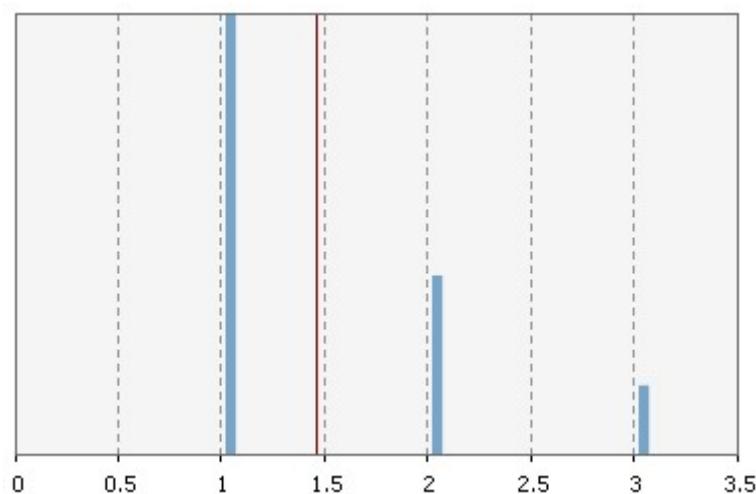
 abc_c3



 abc_c4

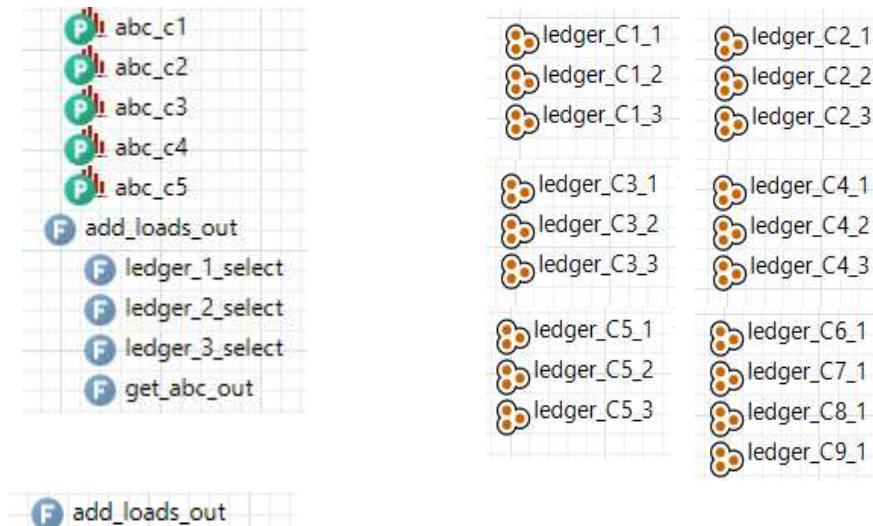


 abc_c5



Anexo 11.4. Añadir pallets a órdenes de salida

Esta acción requiere un proceso algo más complicado que para los pallets de entrada, apoyándose en las listas de pallets presentes en el almacén (*ledgers*).



```

int size = selectFrom(order_size_out).
            where(order_size_out.client.eq(order.client)).
            uniqueResult(order_size_out.size);

int client = order.client;

ArrayList<Pallet> ledger1 = ledger_1_select(client);
ArrayList<Pallet> ledger2 = null;
ArrayList<Pallet> ledger3 = null;

int inStore = ledger1.size();

if (order.client < 6)
{
    ledger2 = ledger_2_select(client);
    ledger3 = ledger_3_select(client);
    inStore = inStore + ledger2.size() + ledger3.size();
}

size = min(inStore , size);

for (int i = 0 ; i < size ; i++)
{
    int abc = get_abc_out(client);
    Pallet newPallet = null;
}

```

```
if (abc == 1)
{
    if (ledger1.size() > 0)
    {
        newPallet = ledger1.get( uniform_discr( 0,
ledger1.size() - 1 ));
        toInsert.add(newPallet);
        ledger1.remove(newPallet);
    }
    else
    {
        if (ledger2.size() > 0)
        {
            newPallet = ledger2.get( uniform_discr( 0,
ledger2.size() - 1 ));
            toInsert.add(newPallet);
            ledger2.remove(newPallet);
        }
        else
        {
            if (ledger3.size() > 0)
                newPallet = ledger3.get( uniform_discr( 0,
ledger3.size() - 1 ));
            toInsert.add(newPallet);
            ledger3.remove(newPallet);
        }
    }
}

if (abc == 2)
{
    if (ledger2.size() > 0)
    {
        newPallet = ledger2.get( uniform_discr( 0,
ledger2.size() - 1 ));
        toInsert.add(newPallet);
        ledger2.remove(newPallet);
    }
    else
    {
        if (ledger1.size() > 0)
        {
            newPallet = ledger1.get( uniform_discr( 0,
ledger1.size() - 1 ));
            toInsert.add(newPallet);
            ledger1.remove(newPallet);
        }
        else
        {
            if (ledger3.size() > 0)
                newPallet = ledger3.get( uniform_discr( 0,
ledger3.size() - 1 ));
            toInsert.add(newPallet);
            ledger3.remove(newPallet);
        }
    }
}
```

```

if (abc == 3)
{
    if (ledger3.size() > 0)
    {
        newPallet = ledger3.get( uniform_discr( 0,
ledger3.size() - 1 ) );
        toInsert.add(newPallet);
        ledger3.remove(newPallet);
    }
    else
    {
        if (ledger1.size() > 0)
        {
            newPallet = ledger1.get( uniform_discr( 0,
ledger1.size() - 1 ) );
            toInsert.add(newPallet);
            ledger1.remove(newPallet);
        }
        else
        {
            if (ledger2.size() > 0)
            newPallet = ledger2.get( uniform_discr( 0,
ledger2.size() - 1 ) );
            toInsert.add(newPallet);
            ledger2.remove(newPallet);
        }
    }
}
}

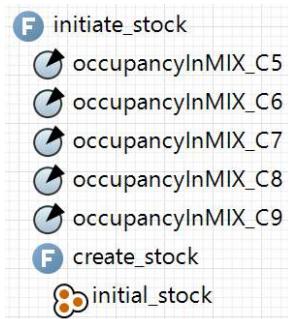
order.FromToTruck = toInsert.size();
order.FromToStorage = toInsert.size();

if (!toInsert.isEmpty())
{
    for (Pallet p : toInsert)
    {
        wait5.free(p);
        p.time_load = time() + order.delay_2;
    }
}
toInsert.clear();

```

Anexo 11.5. Iniciar stock

El código para el llenado inicial del almacén se lanza una vez al principio de la simulación. La función *initiate_stock* es la que se encarga de crear un número de pallets equivalente al porcentaje de llenado seleccionado, utilizando para ello de apoyo la función *create_stock*, que va guardando estos pallets en un *array (initial_stock)* del que luego cogerá la información la fuente de entrada a sistema.



F *initiate_stock*

```

or (int client = 1 ; client < 10 ; client++)
{
RackSystem rack1 = null;
RackSystem rack2 = null;
RackSystem rack3 = null;

if (client < 5)
{
if (client == 1)
{
    rack1 = RS_C1_1;
    rack2 = RS_C1_2;
    rack3 = RS_C1_3;
}

if (client == 2)
{
    rack1 = RS_C2_1;
    rack2 = RS_C2_2;
    rack3 = RS_C2_3;
}

if (client == 3)
{
    rack1 = RS_C3_1;
    rack2 = RS_C3_2;
    rack3 = RS_C3_3;
}

if (client == 4)
{
    rack1 = RS_C4_1;
    rack2 = RS_C4_2;
    rack3 = RS_C4_3;
}
  
```

```

        create_stock(client, (int) (rack1.capacity() *
warehouse_occupancy), 1);
        create_stock(client, (int) (rack2.capacity() *
warehouse_occupancy), 2);
        create_stock(client, (int) (rack3.capacity() *
warehouse_occupancy), 3);
    }

    if (client == 5)
    {
        create_stock(client, (int) (RS_MIX.capacity() *
warehouse_occupancy *occupancyInMIX_C5), 1);
    }

    if (client == 6)
    {
        create_stock(client, (int) (RS_MIX.capacity() *
warehouse_occupancy *occupancyInMIX_C6), 1);
    }

    if (client == 7)
    {
        create_stock(client, (int) (RS_MIX.capacity() *
warehouse_occupancy *occupancyInMIX_C7), 1);
    }

    if (client == 8)
    {
        create_stock(client, (int) (RS_MIX.capacity() *
warehouse_occupancy *occupancyInMIX_C8), 1);
    }

    if (client == 9)
    {
        create_stock(client, (int) (RS_MIX.capacity() *
warehouse_occupancy *occupancyInMIX_C9), 1);
    }

}

```

F create_stock

```

Pallet newPallet = null;

for (int i=0 ; i < stock; i++ )
{
    newPallet = new Pallet(client, abc , 0);

    initial_stock.addLast(newPallet);
}

```

