

**Tesis Doctoral**

**Ingeniería Industrial**

**Análisis de las aplicaciones de las tecnologías de la información a la logística y criterios de decisión en las inversiones**



**Autora: María Rodríguez Palero**

**Director: Jesús Muñuzuri Sanz**

Dep. Organización y Gestión de Empresas II  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

2017





Tesis Doctoral  
Ingeniería Industrial

Análisis de las aplicaciones de las  
tecnologías de la información a la  
logística y criterios de decisión en las  
inversiones

Autora:

María Rodríguez Palero

Director:

Jesús Muñuzuri Sanz

Catedrático de Universidad

Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas II

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Tesis doctoral: Análisis de las aplicaciones de las tecnologías de la información a la logística y criterios de decisión en las inversiones

Autor: María Rodríguez Palero

Director: Jesús Muñuzuri Sanz

El tribunal nombrado para juzgar la tesis arriba indicada, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



*A Chus. In  
memoriam.*

*A Fernando, María y  
Teresa.*





# Agradecimientos

---

Son muchas las personas a las que agradecer que esta tesis haya sido posible.

En primer lugar, a mi familia, por su apoyo y motivación. En especial a mis hijas, que me hacen intentar ser cada día más y mejor. A mi marido, que es un ejemplo de trabajo constante y buen hacer. A mi hermana, por su paciente escucha y motivación. A mi hermano, por su confianza en mí. A mi padre, mis suegros y mis cuñados, por hacerme más fácil y posible conciliar la vida familiar y profesional. Y muy especialmente a mi abuelo, que ha sido y es, un ejemplo de lucha constante durante toda mi vida.

En segundo lugar, a mi director y tutor, D. Jesús Muñozuri Sanz. Sólo tengo palabras de agradecimiento para él, por su paciencia, constancia, ayuda y guía en este trabajo, sin él esta tesis no hubiera existido. Al director del departamento, D. Luis Onieva Giménez, por la oportunidad que ha supuesto para mí trabajar en el grupo de investigación que él dirige. A D. Pablo Cortes Achedad por su ánimo y apoyo. A D. José Guadix Martín, por la dosis de motivación añadida y principalmente por la amistad que me ha brindado desde el inicio de esta maravillosa experiencia. A mis compañeros, en especial a Alejandro, Elena, Pablo y Rafa, que han sido más que compañeros, amigos, de los que aprender y tomar ejemplo. A Eva, que siempre tiene una sonrisa amable para recibirte.

Y por último, a mis amigas de siempre.

A todos, mi más sincera gratitud.

*María Rodríguez Palero*

*Sevilla, 2017*

# Abstract

---

In today's society, information and communication are a determining factor in obtaining competitive advantages from companies. New technologies and the connection of physical objects to the network have transformed the world in general. Information systems that make it possible to automatically identify objects, obtain a huge amount of data in real time and promise to transform business paradigms in all areas and consequently in the field of logistics.

This thesis, examines the information and communication technologies that are applicable to the field of logistics. In particular, it analyzes which are the most important factors within the logistics processes in warehouse management. Particular attention is paid to the automatic identification system using radio frequency. This technology, of great interest in the scientific community and in business, has not reached the expected implementation quotas. Therefore, the scientific literature in the field of information and communication technologies in logistics has been analyzed first. The literature has been studied regarding the adoption of innovation in the field of information technology, particularizing the factors that determine the adoption of automatic identification systems by companies. As a contribution, this thesis presents a study carried out with a group of experts to determine which technologies are the most important in logistics management and how important the application of radio frequency identification systems is in warehouse management processes. The study has been researched utilizing three different methodologies, allowing this work to make a comparison between the results obtained as well as between the three methodologies that were applied.

# Resumen

---

En la sociedad actual, la información y la comunicación son un factor determinante en la obtención de ventajas competitivas por parte de las empresas. Las nuevas tecnologías y la conexión de los objetos físicos a la red han transformado el mundo en general. Los sistemas de información que hacen posible la identificación de los objetos de forma automática y la obtención de una enorme cantidad de datos en tiempo real prometen transformar los paradigmas empresariales, en todos los ámbitos y consecuentemente del campo de la logística.

En esta tesis se abordan las tecnologías de la información y comunicación que son de aplicación al ámbito de la logística, en particular se analizan cuáles son las de mayor importancia dentro de los procesos logísticos en la gestión de almacenes. Se presta especial atención al sistema de identificación automática mediante radiofrecuencia. Esta tecnología, de gran interés en la comunidad científica y en la empresarial, no ha alcanzado las cuotas de implantación esperadas. Para este trabajo se ha analizado en primer lugar la bibliografía científica en el campo de las tecnologías de la información y comunicación en la logística. Se ha estudiado la bibliografía respecto a la adopción de las innovaciones en el campo de la tecnología de la información, particularizando en los factores que determinan la adopción de los sistemas de identificación automática por parte de las empresas. Como contribución, esta tesis presenta un estudio realizado sobre un grupo de expertos para determinar qué tecnologías son las de mayor importancia en la gestión logística y qué importancia tiene la aplicación de los sistemas de identificación por radiofrecuencia en los procesos de gestión de almacenes. El estudio se ha abordado desde tres metodologías diferentes, sirviendo este trabajo para realizar una comparación entre los resultados obtenidos y entre las tres metodologías aplicadas.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>x</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Gráficas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xix</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introducción y objeto de la tesis</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Introducción y motivación</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	3
1.3 <i>Estructura de la tesis</i>	4
<b>2 Los sistemas RFID y la gestión de almacenes</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Tecnologías de la información en la cadena de suministro</i>	9
2.2 <i>Sistema de identificación mediante radiofrecuencia</i>	15
2.2.1 <i>Historia del RFID</i>	15
2.2.2 <i>Descripción de un sistema RFID</i>	16
2.3 <i>Comparativa de RFID con el código de barras</i>	20
2.4 <i>Aportación del RFID a la solución de problemas tradicionales en la gestión de almacenes</i>	23
2.4.1 <i>Aportación a la exactitud del inventario</i>	23
2.4.2 <i>Aportación a la disminución del efecto látigo.</i>	25

2.4.3	Aportación del RFID a las políticas de inventario.	26
2.5	<i>Obstáculos en la aplicación del RFID en la gestión de almacenes</i>	28
<b>3</b>	<b>Decisiones de adopción del RFID en la empresa</b>	<b>33</b>
3.1	<i>Teorías sobre adopción de innovaciones en el campo de las tecnologías de la información</i>	34
3.2	<i>Factores específicos que influyen en la adopción de sistemas de auto-identificación</i>	37
3.3	<i>Factores que influyen en la adopción del RFID</i>	40
3.3.1	Estudios empíricos en grandes empresas	42
3.3.2	Estudios para pequeñas y medianas empresas	45
<b>4</b>	<b>Métodos de evaluación</b>	<b>49</b>
4.1	<i>Selección de alternativas mediante elección discreta</i>	49
4.1.1	Caracterización de las alternativas	50
4.1.2	Elección entre alternativas	52
4.1.3	Modelo <i>Multilogit</i> de la utilidad aleatoria	53
4.1.4	Estimación del modelo <i>Multilogit</i>	56
4.1.5	Criterios de eficiencia en el diseño de los cuestionarios	59
4.1.6	Pasos para la aplicación de los modelos de elección discreta	62
4.2	<i>Proceso analítico jerárquico (AHP Analytic Hierarchy Process)</i>	63
4.2.1	Etapas en la aplicación del método AHP	66
4.2.2	Extensiones del método AHP	70
4.2.3	Aplicaciones del método AHP	72
4.3	<i>Modelo de ajuste por regresión lineal múltiple</i>	73
4.3.1	Estimadores de mínimos cuadrados	74
4.3.2	Propiedades de los estimadores de mínimos cuadrados	77
4.3.3	Prueba de hipótesis	78
<b>5</b>	<b>Análisis propuesto</b>	<b>83</b>
5.1	<i>Análisis 1. Aplicaciones TIC en la gestión de almacenes</i>	87
5.1.1	Definición de las variables del estudio	89
5.1.2	Codificación de las variables para el modelo de elección discreta	90
5.1.3	Evaluación mediante modelos de elección discreta	92
5.1.4	Evaluación mediante modelos de regresión lineal	98
5.1.5	Codificación de las variables para el análisis de regresión	100
5.1.6	Evaluación mediante AHP	101
5.2	<i>Análisis 2. Áreas de aplicación del RFID</i>	103

5.2.1	Definición de las variables del estudio	104
5.2.2	Codificación de las variables para el modelo de elección discreta	105
5.2.3	Evaluación mediante modelos de elección discreta.	106
5.2.4	Evaluación mediante análisis de regresión	108
5.2.5	Evaluación mediante AHP	109
5.3	<i>Proceso de recogida de datos</i>	110
5.4	<i>Caracterización del panel de expertos</i>	111
5.5	<i>Obtención de resultados</i>	112
<b>6</b>	<b>Resultados obtenidos</b>	<b>115</b>
6.1	<i>Análisis 1: Tecnologías de la Información en la gestión de almacenes</i>	116
6.1.1	Resultados obtenidos mediante elección discreta	116
6.1.2	Resultados obtenidos mediante ajuste por regresión	126
6.1.3	Resultados obtenidos mediante análisis jerárquico	131
6.1.4	Comparativa entre resultados con las tres metodologías	135
6.2	<i>Análisis 2: Áreas de aplicación del RFID</i>	139
6.2.1	Resultados obtenidos mediante elección discreta	140
6.2.2	Resultados obtenidos mediante análisis por regresión	146
6.2.3	Resultados obtenidos mediante análisis jerárquico	149
6.2.4	Comparativa entre resultados con las tres metodologías	153
<b>7</b>	<b>Conclusiones, aportaciones y líneas futuras</b>	<b>159</b>
7.1	<i>Conclusiones</i>	159
7.2	<i>Aportaciones</i>	163
7.3	<i>Extensiones o líneas futuras</i>	164
<b>Anexo</b>		<b>167</b>
A.	<i>Análisis 1. Aplicaciones TIC en el almacén</i>	167
A.1.	<i>Respuestas al cuestionario para elección discreta</i>	167
A.2.	<i>Respuestas al cuestionario para análisis por regresión</i>	172
A.3.	<i>Respuestas al cuestionario para la metodología AHP</i>	178
B.	<i>Análisis 2. Aplicación del RFID a la gestión de almacenes</i>	182
B.1.	<i>Respuestas al cuestionario para elección discreta</i>	182
B.2.	<i>Respuestas al cuestionario para análisis de regresión</i>	186
B.3.	<i>Respuestas al cuestionario para la metodología AHP</i>	189
<b>Referencias</b>		<b>195</b>







# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1: Proceso de búsqueda de referencias bibliográficas en SCOPUS .....	8
Figura 2-2: Mapa de procesos y TIC en la gestión de almacenes. Fuente: (Correa Espinal et al. 2010) .....	11
Figura 2-3: Ejemplo de código de barras unidimensional y bidimensional (2D). Fuente: <a href="http://www.gs1es.org">www.gs1es.org</a> .....	14
Figura 2-4: Esquema básico de un sistema RFID. Fuente: (Lehpamer 2012) .....	17
Figura 3-1: Importancia relativa de factores para adoptantes y no adoptantes de RFID. Fuente: (Keating et al. 2010) .....	45
Figura 3-2: Propuesta de marco conceptual. Fuente: (Fosso Wamba et al., 2016) ....	46
Figura 4-1: Probabilidad de selección la alternativa 1 para factores de forma $\mu = 0,01$ , $\mu = 1$ y $\mu = 10$ .....	54
Figura 4-2: Representación gráfica de jerarquías para método AHP. Fuente: Elaboración propia .....	67
Figura 4-3: Comparación entre la estructura de jerarquía lineal y en red. Fuente: (Saaty 2004) .....	71
Figura 5-1: Proceso de preparación del estudio realizado .....	85
Figura 6-1: Proceso de obtención de resultados .....	115
Figura 6-2: Resultados proporcionados por el modelo LIMDEP correspondiente al ajuste del modelo de elección discreta para la determinación de los pesos de las tecnologías de la información en la gestión de almacenes.....	117
Figura 6-3: Resultados de los pesos proporcionados por Excel correspondiente al ajuste de regresión para la determinación de los pesos de las tecnologías de la información en la gestión de almacenes.....	127
Figura 6-4: Resultados proporcionados por el modelo LIMDEP correspondiente al ajuste del modelo de elección discreta para la determinación de los pesos de la aplicación del RFID a los procesos de gestión de almacenes .....	140

Figura 6-5: Resultados de los pesos proporcionados por Excel correspondiente al ajuste de regresión para la determinación de los pesos de la aplicación del RFID a los procesos de gestión de almacenes ..... 146

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 6-1: Pesos obtenidos con metodología elección discreta .....	120
Gráfica 6-2: Comparativa entre los pesos estimados mediante elección discreta y los utilizados para el diseño .....	126
Gráfica 6-3: Pesos obtenidos mediante ajuste de regresión lineal múltiple .....	129
Gráfica 6-4: Comparativa entre los pesos estimados con ajuste lineal y los utilizados para el diseño .....	130
Gráfica 6-5: Pesos normalizados obtenidos con la metodología AHP .....	134
Gráfica 6-6: Comparativa de los resultados obtenidos para el análisis 1.....	136
Gráfica 6-7: Pesos obtenidos con metodología elección discreta .....	142
Gráfica 6-8: Comparativa entre los pesos estimados mediante elección discreta y los utilizados para el diseño .....	145
Gráfica 6-9: Pesos obtenidos mediante regresión lineal múltiple. Análisis 2.....	147
Gráfica 6-10: Vectores de prioridad de los expertos, vector medio y vector medio ponderado.....	151
Gráfica 6-11: Pesos obtenidos con la metodología AHP. Análisis 2 .....	152
Gráfica 6-12: Comparativa de los resultados obtenidos para el análisis 2.....	154



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1: Factores estructurales. Fuente:(Hassan et al. 2015).....	38
Tabla 3-2: Factores operativos. Fuente: (Hassan et al. 2015) .....	38
Tabla 3-3: Factores relacionados con los recursos. Fuente: (Hassan et al. 2015).....	39
Tabla 3-4: Factores organizacionales. Fuente: (Hassan et al. 2015).....	39
Tabla 3-5: Factores tecnológicos. Fuente: (Hassan et al. 2015).....	39
Tabla 3-6: Factores del entorno. Fuente: (Hassan et al. 2015) .....	40
Tabla 4-1: Representación de las alternativas en el proceso de elección.....	51
Tabla 4-2: Escala de valoración. Fuente: (Saaty 1990).....	66
Tabla 4-3: Índice aleatorio en función de n. Fuente: (Saaty 1987).....	70
Tabla 5-1: Tecnologías aplicables en la gestión de almacenes. Fuente: (Correa Espinal et al. 2010) .....	88
Tabla 5-2: Variables auxiliares definidas para codificación de las tecnologías .....	89
Tabla 5-3: Codificación del atributo “gestión”. Variables GES1 y GES2 .....	91
Tabla 5-4: Codificación del atributo “identificación”. Variables IDE1 e IDE 2.....	92
Tabla 5-5: Codificación del atributo “preparación de pedidos”. Variables PIC1 y PIC2 .....	92
Tabla 5-6: Codificación del atributo “entradas y salidas”. Variable YMS .....	92
Tabla 5-7: Codificación del atributo "transporte". Variable TMS .....	92
Tabla 5-8: Atributos y valores de las alternativas .....	94
Tabla 5-9: Valoración de los niveles de cada atributo según el experto 1.....	95
Tabla 5-10: Ejemplo de cálculo de la valoración de una alternativa .....	95

Tabla 5-11: Valoración de los niveles de cada atributo según el experto 2.....	96
Tabla 5-12: Escenarios a evaluar en el cuestionario 1 por elección discreta .....	97
Tabla 5-13: Alternativas a evaluar incluidas en el cuestionario 1 .....	99
Tabla 5-14: Escala de importancias relativas utilizada en el cuestionario 1 .....	101
Tabla 5-15: Matriz de comparación por pares solicitada al experto d .....	102
Tabla 5-16: Variables auxiliares definidas para los procesos de aplicación del RFID .....	104
Tabla 5-17: Codificación de los atributos para los niveles 1 y 2 .....	105
Tabla 5-18: Valoración de los niveles de cada atributo según los expertos .....	106
Tabla 5-19: Ejemplo de cálculo de la valoración de una alternativa .....	107
Tabla 5-20: Escenarios a evaluar en el cuestionario 1 para elección discreta .....	108
Tabla 5-21: Matriz de comparación por pares solicitada al experto d .....	109
Tabla 5-22: Sexo, edad y formación del panel de expertos.....	112
Tabla 6-1: Pesos obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta .....	118
Tabla 6-2: Pesos normalizados obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta .....	118
Tabla 6-3: Tasas marginales de sustitución.....	121
Tabla 6-4: Nivel de confianza para $\beta k \neq 0$ .....	124
Tabla 6-5: Pesos estimados mediante el modelo de regresión lineal .....	128
Tabla 6-6: Vectores de prioridad de las matrices de los expertos .....	131
Tabla 6-7: Matriz de correlación de los vectores de prioridad de cada experto y peso asignado.....	132
Tabla 6-8: Pesos estimados con metodología AHP .....	132
Tabla 6-9: Pesos estimados con metodología AHP modificados para análisis.....	133
Tabla 6-10: Pesos obtenidos por las tres metodologías para el análisis 1.....	135
Tabla 6-11: Valores máximos y mínimos obtenidos en el análisis 1.....	136

Tabla 6-12: Matriz de correlación entre las tres metodologías .....	139
Tabla 6-13: Pesos obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta .....	141
Tabla 6-14: Pesos normalizados obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta .....	141
Tabla 6-15: Tasas marginales de sustitución .....	143
Tabla 6-16: Nivel de confianza para $\beta_k \neq 0$ .....	145
Tabla 6-17: Pesos y pesos normalizados obtenidos mediante modelo de regresión lineal. Análisis 2 .....	147
Tabla 6-18: Vectores de prioridad y proporción de consistencia.....	149
Tabla 6-19: Matriz de correlación de los vectores de prioridad y pesos asignados	150
Tabla 6-20: Pesos agregados obtenidos con metodología AHP .....	152
Tabla 6-21: Pesos determinados por las tres metodologías para el análisis 2 .....	153
Tabla 6-22: Valores máximos y mínimos obtenidos con las tres metodologías. Análisis 2 .....	155
Tabla 6-23: Matriz de correlación entre las tres metodologías .....	155
Tabla 0-1: Respuestas de expertos para metodología de elección discreta. Análisis 1. ....	167
Tabla 0-2: Valoraciones aportadas por los expertos. Análisis 1 .....	173
Tabla 0-3: Matrices de comparación por pares. Análisis 1 .....	178
Tabla 0-4: Respuestas de expertos para metodología de elección discreta. Análisis 2. ....	183
Tabla 0-5: Valoraciones aportadas por los expertos. Análisis 2. ....	186
Tabla 0-6: Matrices de comparación por pares. Análisis 2 .....	189





# Acrónimos

---

SCM	<i>Supply Chain Management</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
TIC	<i>Tecnologías de la Información y Comunicación</i>
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
WMS	<i>Warehouse Management System</i>
LMS	<i>Labor Management System</i>
TMS	<i>Transport Management System</i>
YMS	<i>Yard Management System</i>
SCE	<i>Supply Chain Execution</i>
EPC	<i>Electronic Code Product</i>
GTIN	<i>Global Trade Item Number</i>
SSCC	<i>Serial Shipping Container Code</i>
GLN	<i>Global Location Number</i>
GRAI	<i>Global Returnable Asset Identifier</i>
GIAI	<i>Global Individual Asset Identifier</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
TOE	<i>Technology-organization-environment</i>
DOI	<i>Diffusion of Innovations</i>



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETO DE LA TESIS

---

*La verdadera ciencia enseña, por encima de todo, a dudar y ser ignorante.*

*Miguel de Unamuno*

**S**e va a exponer en este primer capítulo la motivación, los objetivos y una descripción de los contenidos de esta tesis.

## 1.1 Introducción y motivación

En pleno siglo XXI, la era digital es una realidad que nos ha desbordado. En apenas 10 años, las tecnologías de la información y comunicación han inundado todos los ámbitos de la vida. El desarrollo de internet, el aumento en las velocidades de conexión, la facilidad de acceso a las nuevas tecnologías, la aparición de los smartphones y las redes sociales, han modificado el paradigma del comercio. Según los últimos datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística (a fecha de 10/05/2017) el 40% de la población entre 16 y 74 años ha comprado por internet en los últimos tres meses. En el rango de edad entre los 25 y 34 años, este mismo porcentaje sube al 57,2%. Por otra parte, la organización internacional GSI, organismo del que se hablará más adelante, en su último informe anual correspondiente al año 2016, indica que un 76% de los consumidores afirman haber comparado precios en internet antes de realizar una compra. En España, la CNMC,

Comisión Nacional para los Mercados y la Competencia, indica que las líneas con banda ancha móvil a de junio de 2017 son ya 40,9 millones, creciendo un 6,5% con respecto al mismo dato del año anterior. Este mismo organismo indica que el comercio electrónico aumentó en España un 20,8% en 2016 respecto al año anterior.

Todo esto hace que el cliente, como consumidor, tenga a su alcance más información y muchos más proveedores entre los que elegir. Para las empresas, esto se transforma en un mundo altamente competitivo, donde el mercado tiene carácter mundial, en el que los costes de los productores deben ser lo menores posibles, y de igual modo deben serlo los costes logísticos a través de toda la cadena de suministro, para poder satisfacer las necesidades y requerimientos del usuario final.

El reto para la logística es enorme. Es imprescindible en el mundo del comercio global optimizar los procesos logísticos que hacen de nexo de unión entre las transacciones digitales y las entregas de bienes que hacen tangibles esas transacciones. Qué duda cabe que la cadena de suministro y la logística se enfrentan a un nuevo paradigma en el que la aplicación de las tecnologías de la información y comunicación juegan un papel diferencial.

La aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación a la gestión de almacenes es necesaria para poder dar respuesta a la nueva era digital. Los operadores logísticos deben adoptar las tecnologías de la información y comunicación que harán posible aumentar su flexibilidad, rapidez y eficiencia. Y que harán posible dar respuesta a las nuevas exigencias del consumidor, caracterizadas por las propiedades de la era digital: la accesibilidad, la inmediatez, la rapidez y la ubicuidad.

Por otra parte, la creciente interconexión de los objetos a internet está consolidando el concepto conocido como Internet de las Cosas o IoT, del inglés *Internet of Things*, donde las necesidades de captura de datos de forma automática a través de la lectura de chips con información sobre el objeto sin intervención humana son imprescindibles. El IoT es posible gracias a varias tecnologías, fundamentalmente la tecnología de localización GPS y la tecnología de identificación por radio frecuencia RFID.

Todo esto modifica sustancialmente el sector tradicional de la logística, que debe ver los cambios, más que como una amenaza, como una oportunidad de obtener ventajas competitivas, pues su papel es fundamental en la materialización de los nuevos modelos de negocio.

La asociación CSCMP, Council of Supply Chain Management Professionals, define la logística como el proceso para planificar, implementar y controlar el flujo eficiente y eficaz de los bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo para satisfacer las necesidades de los clientes. En estos procesos aparecen nuevos actores, tanto en los puntos de origen como en los puntos de consumo, con requerimientos de información intermedios. En esta nueva situación, el sector logístico debe adoptar las nuevas tecnologías de la información y debe adecuar sus sistemas de comunicación a las nuevas formas de identificar los objetos.

Por todo lo anterior, en esta tesis se quiere estudiar el papel que juegan las tecnologías de la información y comunicación en la gestión de almacenes, por ser ésta una de las partes fundamentales de la logística, así como estudiar la importancia que tiene la aplicación de la tecnología de identificación por radio frecuencia en los procesos en los que se divide la gestión de los almacenes.

## **1.2 Objetivos**

El objeto general de esta tesis es abordar el estudio de las tecnologías de la información y comunicación que son de aplicación a la gestión de la cadena logística. En particular, el estudio se centra en las tecnologías de la información que son de aplicación a la gestión de almacenes, profundizando en la tecnología de identificación por radio frecuencia.

Para la consecución de este objetivo general se completará una revisión bibliográfica sobre diversos aspectos y se realizará un estudio empírico basado en la opinión de un grupo de expertos.

En la revisión bibliográfica se abordarán los siguientes temas:

- las tecnologías de la información y comunicación a la gestión de almacenes,
- los sistemas de identificación por radiofrecuencia,
- las teorías sobre adopción de innovaciones tecnológicas,
- los factores que influyen en la adopción de innovaciones tecnológicas y
- los factores que influyen en la adopción de los sistemas de identificación por radiofrecuencia, para las grandes empresas y para las pequeñas y medianas empresas.

En el estudio empírico se analizará la opinión de un panel de expertos, configurado por académicos y profesionales, con los siguientes objetivos:

- estudiar la importancia de las tecnologías de la información y comunicación en la gestión de almacenes, y
- determinar la importancia de la aplicación del sistema de RFID en los diferentes procesos de la gestión de almacenes.

Para ello, se diseñarán dos cuestionarios, uno por cada objetivo, y se recogerán las opiniones de los expertos. Las respuestas aportadas por los expertos, se analizarán mediante tres métodos de evaluación:

- Modelo de elección discreta.
- Proceso Analítico Jerárquico.
- Ajuste mediante regresión lineal múltiple.

Una vez obtenidos los resultados, se analizarán y compararán, tanto con lo estudiado en la revisión bibliográfica como entre los tres métodos obtenidos. Por último, se obtendrán una serie de conclusiones y se presentarán las aportaciones y se indicarán las líneas futuras con las que se dará continuidad a esta tesis doctoral.

### **1.3 Estructura de la tesis**

Se presenta a continuación la estructura de la tesis. Ésta consta de siete capítulos, cuyo contenido se indica en los siguientes párrafos.

El primero de los capítulos expone la motivación, objetivos y estructura de la tesis.

El segundo capítulo está dedicado a los sistemas de información de aplicación en el ámbito de la logística. En el primer apartado de este capítulo se detallan cuáles son las tecnologías de aplicación a la logística, en particular en el ámbito de la gestión de almacenes. Se presentan los sistemas de información para la gestión de almacenes y sistemas que son de aplicación a procesos concretos en los que se divide la gestión de almacenes. A continuación, se describe el sistema de identificación mediante radio frecuencia, RFID (*Radio Frequency Identification*). Se presenta un primer subapartado cuyo fin es contextualizar el RFID desde sus comienzos hasta la actualidad. En segundo lugar, se describen los componentes principales de los sistemas de RFID.

Seguidamente se describen otros sistemas de identificación y posteriormente se compara el sistema RFID con el código de barras, que es el sistema de identificación de mayor aplicación en el ámbito de la logística. El siguiente sub-apartado está dedicado a la aportación del RFID a los problemas clásicos en la gestión de inventarios: la exactitud del inventario, el efecto *bullwhip* y las políticas de abastecimiento.

En el tercer capítulo se han analizado los criterios de decisión para la implantación de la tecnología RFID. Para ello, se ha elaborado un recorrido por las diferentes teorías sobre la adopción de las innovaciones tecnológicas y se han estudiado los factores que influyen en dicha decisión, así como los factores que influyen en la decisión de la implantación de los sistemas de identificación, particularizando para las grandes empresas y para las pequeñas y medianas empresas.

En el cuarto capítulo se presentan los métodos de evaluación mediante los que se van a estimar las importancias relativas de las diferentes tecnologías de aplicación en el ámbito de la gestión de almacenes, presentadas en el capítulo 2, y la importancia relativa de la aplicación del RFID en los distintos procesos de la gestión de almacenes. Los métodos que se presentan son en primer lugar el método de selección entre alternativas discretas, el método de análisis jerárquico, conocido como AHP, *Analytic Hierarchy Process*, y el modelo de ajuste por regresión lineal.

El quinto capítulo presenta el análisis que se ha realizado en esta tesis. En este apartado se expone el análisis propuesto, se define el objetivo del análisis y las herramientas que se utilizarán para la obtención de los resultados. El análisis consta de dos partes en las que a través de la opinión de un panel de expertos se desea obtener las importancias relativas tanto de las tecnologías de aplicación en la gestión de almacenes como de la aplicación del RFID en los distintos puntos de la gestión de almacenes. La opinión de los expertos se ha recogido mediante dos cuestionarios que se presentan en este apartado, así como la codificación utilizada para la aplicación de los modelos de evaluación descritos en el apartado anterior.

El siguiente capítulo, el sexto, recoge los resultados obtenidos en cada uno de los análisis mediante los tres métodos de evaluación y se analizan y comparan dichos resultados.

En el séptimo capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en esta tesis, las aportaciones que se han derivado del desarrollo de la misma y las líneas futuras con las que se dará continuidad al trabajo realizado.

Finalmente, se presentan un anexo, donde se recogen todas las respuestas obtenidas en los cuestionarios recogidos para el estudio realizado, y el listado de las referencias consultadas en el desarrollo de la tesis.



## 2 LOS SISTEMAS RFID Y LA GESTIÓN DE ALMACENES

---

La aplicación de las tecnologías de la información y comunicación a la cadena de suministro ha sido ampliamente estudiada por la comunidad científica. Prueba de ello es el elevado número de referencias bibliográficas que existen si se realiza una simple búsqueda en cualquier base de datos de carácter científico. A modo de ejemplo, la siguiente figura muestra los resultados del proceso de búsqueda de referencias bibliográficas de los términos “tecnologías de la información” y “cadena de suministro” simultáneamente (Figura 2-1). Como puede verse existe un elevado número de artículos que pueden encontrarse en una de las bases de datos de bibliografía científica más conocida, SCOPUS. La búsqueda proporciona 6.880 referencias. Si se realiza una búsqueda de los términos indicados en los campos título y palabras clave en SCOPUS, limitando la búsqueda a los años 2007 al 2017, se encuentran 4.693 referencias. Si se limitan éstas a artículos de revistas, existen 1.798 referencias, y limitando los resultados exclusivamente al área de negocios, gestión y contabilidad, existen 817 referencias.

Otro ejemplo del interés de la comunidad científica, son los numerosos artículos de revisión bibliográfica que tratan este tema desde diversos puntos de vista. Por ejemplo, (Gunasekaran et al. 2017) centran su revisión exclusivamente en artículos sobre la obtención de ventajas competitivas debidas al uso de las TIC en la cadena de suministro entre los años 2004 a 2014. Estos autores destacan 100 artículos de revistas, aclarando que su revisión no ha sido exhaustiva.

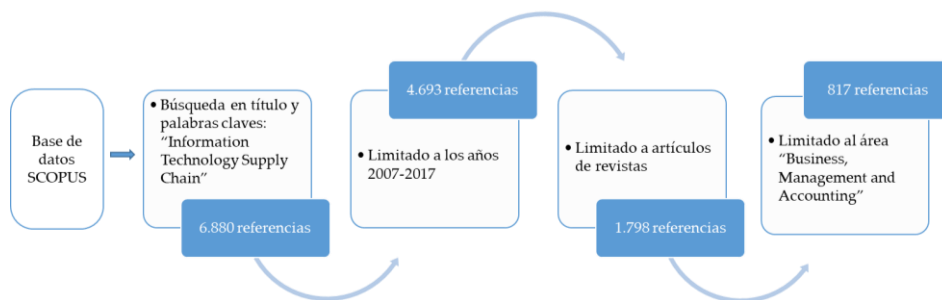


Figura 2-1: Proceso de búsqueda de referencias bibliográficas en SCOPUS

Otros autores, (Thöni & Tjoa 2017), centran su estudio en artículos de revisión bibliográfica en el campo de la aplicación de las tecnologías de la información y comunicación a la gestión sostenible de la cadena de suministro. En este caso, los autores identifican 56 artículos de revisión bibliográfica específicamente de este campo, entre los años 2008 y marzo de 2014. Estos autores además identifican futuros campos de investigación no cubiertos en este ámbito: estudios centrados en la interacción entre máquinas y sistemas multi-agentes con sistemas de identificación tales como el RFID, análisis sectoriales, incidiendo en la necesidad de estudiar las cadenas de suministros con gestión sostenible en el sector público o estudios basados en modelos cuantitativos, son algunas de las posibilidades de análisis no estudiadas que identifican.

Todo lo anterior proporciona una idea de la relevancia del estudio del papel que ocupan las tecnologías de la información y comunicación en la cadena de suministro, así como de las oportunidades aún no satisfechas en el ámbito del conocimiento de la aplicación de las tecnologías de información y comunicación en la cadena de suministro.

Por otra parte, una de las tecnologías de la información y comunicación más tratadas por la comunidad científica es el RFID. Haciendo un proceso de búsqueda similar al anterior para los términos RFID y cadena de suministro en SCOPUS, se dispone de 3.025 referencias. De estas referencias, 2.480 están comprendidas entre los años 2007 y 2017. Restringiendo la búsqueda a artículos de revistas, se encuentran 2.480

referencias, y limitando exclusivamente a áreas relacionadas con la gestión de empresas y la ingeniería, existen 708 artículos.

Mostrado el interés de la comunidad científica en los sistemas de información aplicados a la cadena de suministro, así como en la tecnología RFID, se van a exponer a continuación las principales tecnologías de la información y comunicación de aplicación en la gestión de la cadena de suministro. Seguidamente se describe de forma individual la tecnología de identificación por radiofrecuencia, RFID, cuyo estudio es objeto de esta tesis. En relación a la tecnología RFID se ha abordado una sucinta descripción de los componentes de un sistema de RFID y de su funcionamiento. Se ha realizado una comparación con el código de barras, por ser éste el sistema de identificación más utilizado en la cadena de suministro y al que la tecnología RFID puede asemejarse. Posteriormente se ha analizado la aportación del RFID a los problemas clásicos de la gestión de almacenes. Y por último, se recogen los principales obstáculos en la aplicación del RFID a la gestión de almacenes.

## **2.1 Tecnologías de la información en la cadena de suministro**

La globalización de los mercados, la disminución del ciclo de vida de los productos y las elevadas expectativas de los consumidores han forzado a la industria a una búsqueda continua de la eficiencia. Esto, junto con el avance en las tecnologías de la información y comunicación, TIC, de manera vertiginosa y sostenida en el tiempo, ha hecho evolucionar el concepto de cadena de suministro, así como de la propia gestión de la cadena.

Para ofrecer un producto al consumidor final se deben obtener materias primas, las cuales son transformadas en una o más factorías, los bienes producidos intermedios o finales se concentran en almacenes o centros de distribución y por último se transfieren a los minoristas y estos al consumidor final. Para poder reducir el coste del producto final de manera efectiva, no cabe duda alguna que deben implementarse estrategias que contemplen a toda la cadena en su conjunto y que dichas estrategias deben considerar las interacciones entre los distintos eslabones de la cadena. El concepto cadena de suministro engloba a todos los actores y a todas las interacciones que se generan en el proceso desde la obtención de las materias primas hasta la obtención por parte del consumidor final del bien o servicio que ha requerido. El concepto gestión de la cadena de suministro es el conjunto de métodos

y técnicas que debe aplicarse para poder producir y distribuir los bienes o servicios en la cantidad, calidad, lugar y plazo adecuado, de forma que se minimicen los costes del conjunto al mismo tiempo que se satisfacen los requerimientos del consumidor (Simchi-Levi et al. 2000).

Las tecnologías de la información y comunicación han representado una ventaja competitiva que permite a las empresas aumentar de manera importante su capacidad de integración de las cadenas de suministro. El rápido desarrollo de las TIC permite a las empresas mejorar de manera sostenida su competitividad y la capacidad de respuesta adaptando sus estrategias, métodos y tecnologías a datos suministrados en tiempo casi real (Musa & Dabo 2016).

De acuerdo a (Simchi-Levi et al. 2000) los objetivos de las tecnologías de la información en la cadena de suministro son:

- proporcionar información visible y fiable;
- proporcionar un único punto de suministro de información;
- permitir la toma de decisiones basada en los datos de la cadena de suministro; y
- posibilitar la colaboración con los demás integrantes de la cadena de suministro.

Por otro lado, las TIC en la cadena de suministro pueden clasificarse según la función que desarrollan. (Auramo et al. 2005) identifica tres funcionalidades posibles: pueden ser un vehículo para mejorar los flujos de información de una manera eficiente, pueden servir de soporte para la toma de decisiones o pueden ser utilizadas para mejorar la colaboración y coordinación entre los distintos elementos de la cadena de suministro, siendo esta última utilidad la de mayor relevancia.

Dentro del amplio concepto de gestión de almacenes se van a considerar los siguientes procesos para la realización de este trabajo:

- Proceso de entrada: recepción, inspección y control de las mercancías.
- Proceso de almacenaje: ubicación y custodia de las mercancías.
- Proceso de salida: *picking* o preparación de pedidos y embalaje.
- Proceso de envío de las mercancías.

Existen diversos sistemas de información y comunicación de aplicación en la gestión de almacenes. La siguiente figura muestra el mapa de las tecnologías de la información y comunicación en el ámbito de la gestión de almacenes (Correa Espinal et al. 2010), relacionados con los procesos anteriormente descritos. (Figura 2-2).

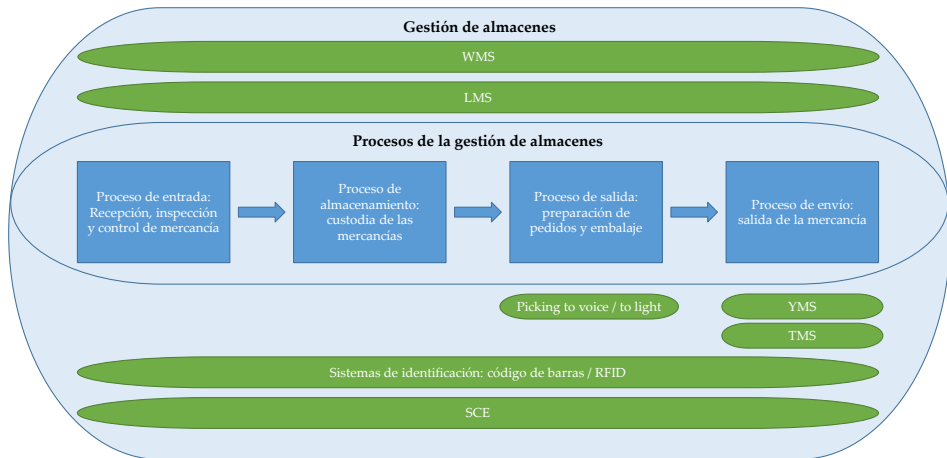


Figura 2-2: Mapa de procesos y TIC en la gestión de almacenes. Fuente: (Correa Espinal et al. 2010)

A continuación, se hace una breve descripción de dichos sistemas de información y de las tecnologías de aplicación en los procesos señalados:

- **WMS: Warehouse Management System.** Es un sistema de información cuyo fin es gestionar la planificación, ejecución y control de los procesos del almacén. Este sistema tiene un carácter transversal en la gestión de almacenes, sirviendo de herramienta de gestión para todos los procesos del almacén: recepción de las mercancías o materiales, ubicación en el mismo, el almacenamiento, preparación de pedido y salida del almacén (Correa Espinal et al. 2009). Estos sistemas de información y comunicación generan información de gran utilidad para la gestión eficiente de los almacenes, tales como registros de utilización de los recursos, cargas de trabajo necesarias, niveles de ocupación del almacén, rotación de los productos, conexiones con aplicaciones web u otros sistemas de información externos, generación de órdenes de pedido de material de forma automática, etc.
- **LMS: Labor Management System.** Sistema de gestión de personal. Este

sistema está enfocado a la gestión del personal que trabaja en el almacén. Su objetivo principal es el aumento de productividad en las labores que realizan los trabajadores, mejorando el desempeño de las tareas realizadas en el almacén. Ello se consigue a través de la planificación, el control y el seguimiento de las tareas a realizar. Elaborando indicadores de desempeño, cuyo análisis permite mejoras significativas, erradicación de ineficiencias, así como una correcta planificación de los recursos humanos necesarios. Por otra parte, genera informes de cada trabajador, se puede utilizar para implementar sistemas de retribución de incentivos, así como para asignar costes a pedidos o clientes concretos. Generalmente, con la implantación de estos sistemas se consigue un rápido aumento de la productividad, alcanzándose cifras cercanas al 100%. Por contra, requiere una gran inversión inicial además de requerir cambios en la estructura organizativa para adecuar el trabajo a los requerimientos del sistema (Correa Espinal et al. 2010).

- **YMS: *Yard Management System*.** Sistema de gestión de muelles. Este sistema está destinado a la gestión de los muelles de carga y descarga, al tráfico de vehículos en las zonas de carga. Estos sistemas ayudan a establecer prioridades de carga y descarga, asociados a la urgencia de las mercancías transportadas. Combinados con sistemas de localización, ayudan a conocer la posición en tiempo real de los elementos de transportes, su movimiento en las zonas de carga y de su estado de cargado o descargado. Es habitual que estos sistemas sean un módulo del sistema transversal de gestión de almacenes, WMS, expuesto anteriormente (Correa Espinal et al. 2010).
- **TMS: *Transportation Management System*.** Sistema de gestión de transporte. Este sistema tiene por objeto optimizar los recursos destinados al transporte de las mercancías, minorando los costes, cumpliendo con las restricciones de servicio requeridas por el cliente externo o interno, y las necesidades del resto de agentes que conforman la cadena de suministro. Estos sistemas optimizan el transporte aportando soluciones combinadas de distintas alternativas de modos de transporte, coste de flotas, tiempos de carga y descarga, rutas de transporte, consolidación de pedidos pequeños, localización de las mercancías en tiempo real si existen tecnologías que faciliten el posicionamiento geográfico, etc.

- **SCE: *Supply Chain Execution***. Esta tecnología está destinada a la gestión integral de la cadena de suministro. Su objetivo es la optimización tanto del flujo de materiales como de la información a lo largo de toda la cadena de suministro. Generalmente es la integración de todos los sistemas anteriores. Este sistema tiene múltiples ventajas, tales como la optimización de los procesos logísticos, el cumplimiento de pedidos a tiempo, la minimización de errores, la optimización de los niveles de inventario, así como su uso óptimo. No obstante presenta también algunos inconvenientes; el principal de ellos es su elevado coste, y otro de los inconvenientes destacados es la dificultad de implantación, que suele resultar larga, costosa y compleja (Correa Espinal et al. 2010).

En relación a las tecnologías que pueden utilizarse para la preparación de pedidos, se detallan las dos más significativas:

- **Pick to light**. Sistema de preparación de pedidos mediante luz. Esta tecnología es utilizada para realizar la preparación de pedidos de forma manual sin la necesidad de utilizar listados en papel. Generalmente, sobre cada hueco de estantería se dispone de un visor o *display* que indica al operario que realiza la preparación, el elemento y cantidad del mismo que debe incluir en el pedido. Los visores se van encendiendo de forma consecutiva guiando al trabajador en la preparación del pedido.
- **Pick to voice**. Preparación de pedidos mediante voz. Esta tecnología es similar a la anterior, pero en este caso el operario es dirigido mediante un sistema de audio receptor emisor (auriculares y micrófono) que le indica el lugar al que desplazarse, el elemento a incluir y la cantidad. Tanto esta tecnología como la anterior, están dirigidas informáticamente por el sistema de gestión de almacenes WMS. Estos sistemas permiten optimizar la preparación de los pedidos, guiando al trabajador por la ruta que optimiza el tiempo y/o los desplazamientos necesarios para realizar la preparación.

Respecto a las tecnologías de identificación de elementos, se describen a continuación las características principales de las dos tecnologías que son de aplicación en el ámbito de la logística. En relación al RFID, por su papel fundamental en esta tesis, se expondrá de forma detallada en el siguiente apartado.

- **Código de barras**. El sistema de código de barras es un sistema de representación de números para la identificación de productos. Este

conjunto de números de identificación es un código internacional con distintas longitudes y denominaciones en función del elemento que identifique, conocido como códigos estándares GS1. GS1 es una organización sin ánimo de lucro integrada por GS1-US, antigua UPCC (*Uniform Product Code Council*) y GS1-International, antigua EAN (*European Article Numbering*), en la que participan más de un millón de empresas e instituciones de más de 100 países según su web. En España, el representante de GS1 es la asociación AECOC, que cuenta con más de 27.000 empresas asociadas. Esta organización trata de crear estándares que permitan identificar, capturar con precisión y compartir automáticamente información sobre productos, ubicaciones y activos. En el caso de que el código esté asociado a un producto comercial o un conjunto de ellos, recibe el nombre de GTIN, *Global Trade Item Number*. En el caso de que identifique a elementos logísticos, como un palé o una caja, se denomina SSCC (*Serial Shipping Container Code*). Si el número del código representa una localización, el código recibe el nombre GLN (*Global Location Number*). Si identifica a un elemento de transporte retornable, se denomina GRAI (*Global Returnable Asset Identifier*). Por último, en el caso de que el número haga referencia a un activo, su denominación es GIAI (*Global Individual Asset Identifier*). En la actualidad existen diferentes tipos de códigos de barras. El tradicional, representado por un conjunto de barras paralelas, cuya información se lee en una única dirección o el código de barras denominado 2D, cuya información está codificada en dos direcciones y es capaz de aportar una mayor cantidad de información. La siguiente figura muestra un ejemplo de cada uno de los dos tipos de códigos de barras indicados (Figura 2-3). El sistema de identificación mediante código de barras es el más utilizado en la actualidad.



Figura 2-3: Ejemplo de código de barras unidimensional y bidimensional (2D). Fuente: [www.gs1es.org](http://www.gs1es.org)



- **RFID. Radio Frequency Identification.** Identificación mediante radiofrecuencia. Esta tecnología se utiliza para identificar mediante ondas de radio un objeto físico, caracterizado por su código EPC, *Electronic Product Code*, en español código electrónico de producto. El EPC se puede representar en varias formas, siendo la binaria la adecuada para la utilización mediante sistemas RFID. La tecnología mediante ondas de radio permite identificar los objetos a distancia, sin necesidad de que exista contacto visual entre los objetos a identificar y el lector de códigos.

## 2.2 Sistema de identificación mediante radiofrecuencia

El RFID es un sistema de identificación de objetos inalámbrico compuesto por unas etiquetas asociadas a los ítems que se quieren identificar, comúnmente denominados por su nombre en inglés *tags*, un conjunto de lectores que extraen la información de las etiquetas, *readers*, y un sistema operativo que procesa y trata la información obtenida por el hardware, conocido como *middleware*. La interconexión entre los *tags* y los *readers* se realiza mediante ondas de radio a distintas frecuencias. La principal característica de la tecnología RFID es que la lectura de datos se produce sin intervención humana y sin necesidad de que exista visión entre las etiquetas a ser leídas y las antenas de lectura.

Se expone a continuación un breve repaso histórico sobre la aparición del RFID. Seguidamente se detallan los componentes que se acaban de indicar en el párrafo anterior y se presenta el esquema de funcionamiento de la tecnología RFID.

### 2.2.1 Historia del RFID

La primera utilización de un sistema de identificación mediante radiofrecuencia se realizó durante la segunda guerra mundial por la aviación británica en 1939. El ejército inglés quería identificar a sus propios aviones de vuelta a las bases áreas frente a los aviones atacantes. Para ello diseñó un sistema de identificación por radio. Este sistema se llamó identificación amigo o enemigo, conocido por sus siglas IFF, del inglés *Identity Friend or Foe*, y es considerado el primer uso del sistema de identificación por radiofrecuencia (Ustundag 2013). El primer uso comercial del RFID se realizó en la década de los 60 con el desarrollo de sistemas de seguridad para

evitar el robo de mercancías. A partir de los años 70 investigadores, desarrolladores, instituciones académicas e instituciones gubernamentales empezaron a trabajar en el desarrollo del RFID. Fue en la década de los 90 cuando el RFID vivió su primer gran despliegue debido a la implantación del peaje electrónico y la implantación de tres millones de etiquetas en vagones de ferrocarril en los EEUU (Landt 2005).

En el mundo industrial, el interés en el RFID creció de forma exponencial en el año 2003, cuando la compañía Wal-Mart, el mayor minorista del mundo, y el Departamento de Defensa de los EEUU anunciaron que obligarían a sus proveedores a la utilización del RFID como medida para mejorar el servicio al cliente y ayudar en las políticas de reabastecimiento. Estos anuncios despertaron gran interés, lo que hizo suponer que se produciría un incremento importante en las aplicaciones y el desarrollo de la tecnología RFID y que ello contribuiría a minorar los costes de la cadena de suministro y a aumentar las ventas (Reyes et al. 2016). Sin embargo, tres años después Wal-Mart rebajó las exigencias a sus proveedores, por diversos motivos, entre ellos la resistencia de los mismos, además de que la implantación no había generado los beneficios esperados (McWilliams 2006). Pese a que los resultados de desarrollo y avance del RFID no fueron los esperados, desde el año 2003, ha habido un interés constante por esta tecnología.

Recientemente, grandes cadenas de distribución han decidido implantar la tecnología RFID. Destacan los casos del grupo Inditex, minorista del sector textil, y el gigante francés del equipamiento deportivo Decathlon. Desde el año 2014, Inditex ha comenzado a etiquetar todas sus prendas con etiquetas RFID. En ese mismo año, Decathlon terminó la implantación del RFID que afectó al 85% de sus artículos ([www.rfidpoint.com](http://www.rfidpoint.com)).

## **2.2.2 Descripción de un sistema RFID**

La siguiente figura representa el esquema de los componentes principales de un sistema RFID, así como su funcionamiento básico (Figura 2-4). Los elementos de un sistema de RFID son los siguientes:

### *Etiquetas o Tags*

Las etiquetas son los elementos que se adhieren al objeto que se quiere identificar. La

misión de la etiqueta es almacenar el código EPC de identificación del objeto. Cada objeto a identificar tendrá su etiqueta, que normalmente va adherida al objeto o sujeta de forma que no se pueda desprender.

Las etiquetas constan de un elemento de acoplamiento (capaz de recibir una señal de radio) y un circuito integrado de baja potencia CMOS IC (acrónimo de Complementary Metal Oxide Semiconductor, semiconductor complementario de óxido metálico) (Lehpamer 2012).

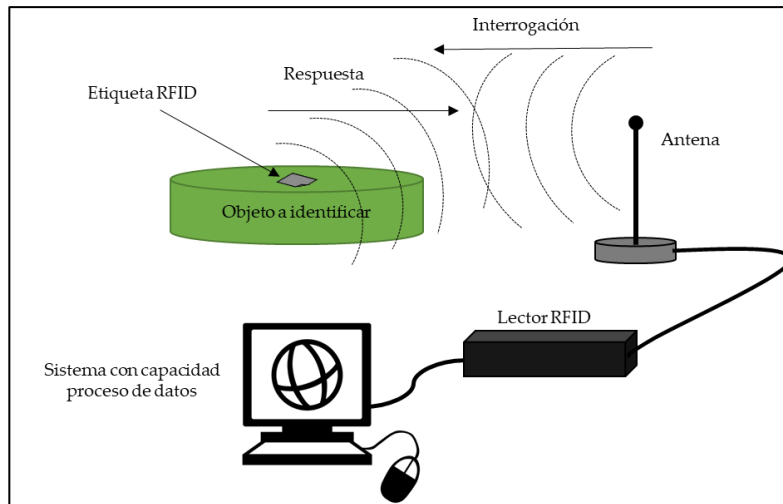


Figura 2-4: Esquema básico de un sistema RFID. Fuente: (Lehpamer 2012)

Existen tres tipos de etiquetas en función de si poseen adicionalmente una batería o no (Lehpamer 2012):

- Etiquetas activas, las cuales poseen una batería que suministra energía para todas las funciones que realiza la etiqueta.
- Etiquetas semipasivas, que poseen una pequeña batería que proporciona energía al chip integrado en la misma, pero que no se usa para la comunicación.
- Etiquetas pasivas, que no tienen baterías. Estas etiquetas al no poseer una fuente de alimentación son las más económicas y más confiables que las activas.

Otra clasificación posible es en función de la capacidad que tiene las etiquetas de ser escritas. En este caso las etiquetas pueden ser (Lehpamer 2012):

- De sólo lectura. Suelen ser las más económicas y suelen contener únicamente el dato de identificación del objeto al que acompañan. Su funcionalidad es menor y básicamente pueden usarse de forma análoga al código de barras, a excepción de que identifican un objeto concreto.
- De lectura y escritura. Estas etiquetas son más complejas. En este caso las etiquetas tienen capacidad para almacenar cierta información adicional. Estas etiquetas pueden ser de escritura una vez y muchas lecturas, o pueden escribirse y leerse numerosas veces. Estas etiquetas son más complejas y por tanto menos económicas que las anteriores. No obstante, permiten un uso mayor, permitiendo incluso su reutilización en diferentes productos.

Por último, las etiquetas están preparadas para trabajar con señales de radio a determinadas frecuencias. En relación al rango de frecuencia en el que son operativas existen etiquetas para alta, media y baja frecuencia.

### Lectores de RFID

El lector es el elemento que se encarga de recoger la información contenida en la etiqueta. Básicamente consta de una antena, para enviar y recibir las señales de radio, un transmisor-receptor de señales de radio y un decodificador de señales. Generalmente los lectores trabajan en un rango concreto de frecuencias, por lo que no pueden usarse de forma simultánea para todas las frecuencias. Los lectores de etiquetas, de forma análoga a lo expresado anteriormente pueden ser para alta, media y baja frecuencia.

Además, existen lectores fijos y lectores portátiles o manuales. Los primeros suelen estar posicionados en lugares estratégicos tales como entradas de almacenes, arcos de entrada y salida en los accesos a establecimientos, etc. Los lectores fijos son utilizados en aplicaciones donde es necesario procesar una gran cantidad de ítems, colocados en lugares aproximadamente fijos y en zonas de primer acceso tales como muelles de entrada. Estos lectores están permanentemente leyendo y escuchando para detectar cualquier etiqueta que entre en la zona de lectura.

Por otra parte, los lectores manuales o portátiles son muy útiles como complemento a los lectores fijos. Pueden utilizarse para leer etiquetas que están pegadas en zonas

incorrectas o en orientaciones no adecuadas, que no pueden ser leídos por los lectores fijos. También son muy útiles para los procesos de recuento de almacén o para la búsqueda de ítems que están mal ubicados.

Por último, los lectores más recientes son lectores móviles, cuya característica principal es que no tienen cables y funcionan con tecnología inalámbrica, y poseen además su propia batería y su antena. Esto los hace especialmente adecuados para ir adheridos a la ropa, o en elementos que se mueven dentro del almacén, tales como carretillas (Lehpamer 2012).

### *Sistema operativo*

El último componente es el sistema operativo para el procesamiento de la información. Los lectores se comunican con un ordenador, al que suministran los datos que son leídos de las etiquetas. Estos sistemas alimentan las bases de datos de los sistemas de información que gestionan el almacén, y que habitualmente están conectados a otras bases de datos que poseen información adicional sobre los ítems.

### *Esquema de funcionamiento*

El esquema de funcionamiento es el mostrado de forma esquemática en la figura anterior (Figura 2-4). Para los sistemas con etiquetas pasivas, cada cierto intervalo de tiempo el lector manda una señal de radiofrecuencia que es transmitida por la antena. Las etiquetas que están en el campo de actuación de la antena reciben la señal en la antena que se encuentra incluida en ellas. Esta misma señal de radiofrecuencia excita el circuito que tiene la etiqueta y sirve como fuente de alimentación al chip de la etiqueta para responder. La etiqueta emite una señal de radio enviando la información del código EPC que contiene y ésta es procesada por el lector. Una vez leída la información es enviada al equipo informático que la procesa. En los sistemas que poseen etiquetas activas, las etiquetas emiten cada cierto tiempo una señal de radiofrecuencia que es escuchada por los lectores que están en su radio de actuación.

## 2.3 Comparativa de RFID con el código de barras

Durante los últimos 40 años, el código de barras ha sido el sistema de identificación utilizado en el ámbito de la gestión de la cadena de suministro. Es por tanto interesante analizar cuáles son las principales características que diferencian este sistema con el RFID, cuya utilidad es similar al código de barras, pero que presenta ventajas adicionales frente a su antecesor.

Se detallan en este apartado ocho características principales que diferencian al RFID con el código de barras en el ámbito de la logística (Hedgepeth 2007):

- **No es necesaria una línea de visión.** Esta es quizás la diferencia más significativa entre el código de barras y el RFID. En el código de barras es necesario que exista una línea de visión directa entre el lector y el código de barras a leer. Esto hace que la posición relativa entre el elemento a identificar y el lector de códigos sea determinante para que se lleve a cabo la lectura. Y ello ocurre tanto si la lectura es manual o automatizada. El artículo debe tener el código de barras en una posición concreta visible y el lector debe ver el código. Esto no ocurre con el sistema RFID. No es necesario que exista una línea de visión entre la etiqueta y el lector, lo que facilita de forma significativa la lectura y amplía las posibilidades de colocación de las etiquetas a sitios que no tienen que ser visibles. Ejemplo claro de esto son las etiquetas RFID que utiliza el sector textil, las cuales se encuentran en el interior de las prendas de ropa e incluso tapadas por diferentes elementos tales como pegatinas, protectores de plástico, etc.
- **Mayor distancia para la lectura.** Otra de las ventajas que presenta el RFID frente al código de barras es la distancia a la que puede leerse un código o una etiqueta. La distancia de lectura para un código de barras es del orden de centímetros, mientras que para las etiquetas de RFID el orden de magnitud es de metros, pudiendo leerse una etiqueta en un rango de hasta 10 metros aproximadamente. Esta propiedad junto con la anterior presenta un conjunto de ventajas organizativas en el ámbito logístico muy importantes. Para dar un ejemplo de ello, supóngase una situación habitual en una plataforma logística: supóngase que una serie de mercancías deben ser descargadas de un contenedor que ha llegado en un barco y deben ser enviadas a distintos lugares en distintos elementos de transporte. Al realizar la descarga del contenedor, es necesario que cada ítem sea identificado para

contabilizar su entrada en el sistema informático que se posea, y conocer a qué lugar y en qué transporte debe ser enviada. En el caso de que la identificación sea mediante un código de barras, es necesario que un trabajador recorra el área de descarga con un lector de códigos de barras, y es necesario que exista una línea visual entre el código y el lector de una distancia pequeña. Lo que implica que el trabajador vea y pueda acceder a cada ítem. La automatización de este proceso sería bastante complicada si las mercancías del contenedor no son homogéneas. O si, aunque en un contenedor sí es homogénea la carga, no lo es respecto a los demás contenedores que se descargan. Supóngase ahora que las mercancías están identificadas mediante etiquetas de RFID, ello posibilita una amplia gama de formas de automatizar el proceso, amplía las posibilidades de colocación de las mercancías en la zona de descarga y no obliga a una posición relativa concreta de las mercancías que posibilite el acceso y la visualización de la etiqueta.

- **Entrada estática de datos.** Otra diferencia es que la información del código de barras es estática, es decir, no puede ser modificada una vez que el código está impreso. Cada código de barras posee una información que puede leerse un número ilimitado de veces mientras no se deteriore la imagen pero que no puede ser cambiada. Las etiquetas de RFID de tipo lectura-escritura pueden ser modificadas en cualquier momento, es decir, se puede sustituir la información que contienen por otra en el caso de que sea necesario. En el código de barras, si se desea cambiar la información se debe eliminar el código inicial y colocar un nuevo código con la información actualizada.
- **Volumen de datos.** La cuarta característica diferenciadora es la cantidad de información que puede almacenar una etiqueta RFID frente a un código de barras. Aunque con los códigos de barras de dos dimensiones ha aumentado considerablemente la cantidad de información que es posible almacenar en un código de barras, es considerablemente inferior a la capacidad de una etiqueta RFID. Un código de barras 2d puede almacenar un máximo de 7.000 caracteres numéricos o 4.200 sin son alfanuméricos (Lehpamer 2012). En las etiquetas RFID la capacidad es muy superior y va en aumento conforme avanza la tecnología. Existen etiquetas con capacidad de hasta 1 megabyte, lo que implica capacidad para almacenar un millón de caracteres.

- **Identificación de ítems.** La siguiente característica diferenciadora es que una etiqueta de RFID contiene un código de producto denominado EPC, *Electronic Product Code*, que identifica de forma única a cada ítem, mientras que el código de barras se utiliza para identificar una clase de producto, caracterizado por su GTIN. El código EPC contiene al código GTIN, que identifica el producto. Para formar el código EPC se añade al estándar GS1 un número de serie, lo que identifica al ítem concreto al que la etiqueta hace referencia.
- **Simultaneidad en la captura de datos.** Otra de las ventajas que presenta la tecnología RFID es que es posible leer varias etiquetas de forma simultánea, mientras que las etiquetas de código de barras deben ser leídas una a una de forma secuencial. Existen experimentos que indican lecturas del orden de cientos de etiquetas en un tiempo inferior a dos segundos.
- **Mayor rapidez de lectura.** Adicionalmente, la rapidez con la que las antenas son capaces de leer los datos de las etiquetas RFID es muy elevada. En teoría esta velocidad puede llegar a las 1.000 etiquetas por segundo. Sin embargo, esta capacidad teórica se ve limitada por las colisiones que se producen de las ondas de radio cuando existen varias antenas actuando de forma simultánea.
- **Capacidad de resistir en entornos hostiles.** La última de las características diferenciadoras es que las etiquetas de RFID pueden introducirse en distintos soportes que hacen que puedan utilizarse en entornos adversos sin que ello afecte a la capacidad de ser detectadas y leídas. Las etiquetas de RFID pueden introducirse en soportes de plástico muy resistentes, lo que posibilita su uso en entornos con suciedad, grasa, pintura, etc. E incluso pueden resistir un posible deterioro por rozamiento o la acción mecánica. Los códigos de barra pueden ser reforzados o recubiertos con cristal o plásticos, pero deben ser transparentes para poder conservar su utilidad, pero no pueden ser cubiertos con suciedad, pintura, etc. La mayor debilidad de las etiquetas está en la flexión de las mismas, debido a que pueda partirse la línea de conexión entre el circuito que contiene los datos y la antena de la etiqueta. Recientemente se han realizado estudios que indican que las etiquetas actuales resisten un número muy elevado de flexiones (Janeczek 2017).



## **2.4 Aportación del RFID a la solución de problemas tradicionales en la gestión de almacenes**

A la hora de abordar el impacto que tienen los sistemas avanzados de identificación, tales como el RFID, en la gestión de las cadenas de suministro, uno de los enfoques utilizados es analizar los problemas tradicionalmente más significativos en la gestión de inventarios, así los autores abordan la aportación a la solución de cada problema de un sistema de identificación como el RFID. Los tres problemas clásicos de la cadena de suministros en los que los autores analizan la mejora que puede aportar el RFID son: la inexactitud de los inventarios, el efecto látigo y la política de inventario (Sarac, Absi & Dauzère-Pérès 2010)

### **2.4.1 Aportación a la exactitud del inventario**

Uno de los principales problemas en las cadenas de suministro es la inexactitud de los datos que reflejan los niveles de inventario de los sistemas de información respecto a los niveles reales del inventario físico. Las diferencias entre los datos recogidos en los sistemas de información y los inventarios físicos ya fueron reconocidos como un potencial problema en la gestión de la cadena de suministros en la década de los 60 (Rinehart 1960). Se debe tener en cuenta que en base a los niveles de inventarios que reflejan los sistemas de información, se toman decisiones de carácter estratégico tales como predicciones de la demanda, decisiones sobre planes de producción, etc. Es por ello necesario que dichos datos tengan la fiabilidad necesaria para ser la base en la toma de decisiones de carácter estratégico y táctico de una compañía.

En el análisis de las aportaciones del RFID en la gestión de la cadena de suministro, son diversos los autores que buscan analizar cómo ayuda el RFID a la exactitud de los datos, así como cuantificar las pérdidas que suponen esta inexactitud y la aportación a la disminución de dichas pérdidas por parte de los sistemas del RFID.

(DeHoratius et al. 2008) tras analizar 370.000 registros de inventarios sobre 37 almacenes de un importante mayorista estadounidense (Gamma), encontraron inexactitudes en el 65% de los casos, lo que da idea de la magnitud del problema. Resultados similares obtuvieron (Kang & Gershwin 2005). En este estudio los autores analizaron la exactitud de los inventarios de un mayorista con miles de referencias

distintas en sus almacenes. El trabajo se realizó en colaboración con el Centro de Autoidentificación del MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts). Las conclusiones obtenidas mostraron que sólo en el 51% de los ítems los datos registrados eran coincidentes con los niveles de inventario físico. Es decir, aproximadamente la mitad de los registros de las diferentes referencias de producto de venta eran erróneas.

Según (Rekik 2011) los errores de la inexactitud de los inventarios se pueden clasificar en cuatro tipos de errores:

1. Errores ocurridos por el registro inadecuado de las operaciones de entrada y salidas. En estos errores se contemplan, los debidos al error al escanear los ítems, al preparar o servir los pedidos y al recibir las mercancías, que siendo errónea las cantidades o ítems que se reciben se registran en el sistema como si fueran las correctas o viceversa.
2. Errores debidos a la colocación inadecuada de los elementos en el almacén. Aunque potencialmente estos elementos podrían ser utilizados para servir la demanda, no sería posible hasta que sean encontrados. Es decir, estando en el sistema de información y en el inventario físico, su mala ubicación los hace imposibles de utilizar para su venta.
3. Pérdidas y deterioros de elementos que los hacen inadecuados para satisfacer la demanda. En estas pérdidas entran los robos, los desperfectos causados por los propios clientes, etc.
4. Elementos que estando en el sistema de información y físicamente en el almacén, no tienen la calidad adecuada y que por tanto no son útiles para su venta. La falta de calidad puede ser debida a un proceso productivo defectuoso, a un proceso de inspección de recepción de mercancías ineficiente, que da entrada en el sistema de información de productos no vendibles, etc.

Respecto a la solución de este problema los sistemas de identificación de ítem de forma unitaria, tales como el que proporcionan las tecnologías de identificación por radio frecuencia, pueden ayudar de manera importante a su resolución. Así diversos autores identifican las potenciales ventajas que aporta la tecnología RFID a la corrección de la inexactitud de los inventarios.

Entre ellos, (Lee et al. 2009) indican que las cadenas de suministro que implantan

sistemas de identificación, RFID, tienen una mayor trazabilidad de los productos a través de la captura de los mismos en tiempo real, por lo que minoran los errores debidos a las transacciones equivocadas.

Según (Zipkin 2006) los sistemas RFID son muy eficientes para eliminar los errores, permitiendo detectarlos más rápidamente y planificar su corrección.

## 2.4.2 Aportación a la disminución del efecto látigo.

El efecto látigo, más conocido por su nombre en inglés *bullwhip effect*, fue descrito por primera vez por (Forrester 1958). El efecto látigo hace referencia a la mayor variabilidad que experimentan las órdenes de pedidos y de producción aguas arriba en las cadenas de suministro, siendo esta variabilidad creciente con el número de actores de la cadena de suministro (Lee et al. 1997). Estos autores analizaron las posibles causas que originan el efecto látigo, encontrando cuatro causas principales las predicciones de la demanda, la fabricación por lotes, la variabilidad de los precios y a los pedidos excesivos cuando los compradores prevén que va a hacer un desabastecimiento. (Mettters 1997) cuantifica el efecto *bullwhip* en las cadenas de suministro, considerando los incrementos de demanda por los compradores por razones no objetivas y los errores en las predicciones de la demanda. Según su investigación, la eliminación de este efecto puede llegar a aumentar los beneficios de una compañía del orden del 15 al 30%.

En las actuales cadenas de suministro globales, el efecto *bullwhip* sigue siendo un problema importante, que investigadores y trabajadores intentan paliar (Cao et al. 2014) . Compartir la información y dar mayor visibilidad a los flujos de información entre los distintos eslabones de la cadena de suministro parece ser una de las mejores estrategias para mitigar el efecto *bullwhip*. Se consigue además con ello mejorar los niveles de servicio, disminuir los niveles de inventario y la rotura de stock (Holweg et al. 2005).

Dentro de las posibles tecnologías que mejoran la visibilidad y generan transparencia en los flujos de información, el RFID es una de las herramientas que los diversos expertos en la materia consideran como adecuada y eficiente para corregir el efecto *bullwhip*.

Son diversos los autores que concluyen que la tecnología RFID es capaz de proporcionar la mejora necesaria para poder compartir la información y mejorar la

calidad de la misma, lo que redundaría en una minoración del efecto *bullwhip*. (Saygin et al. 2007) concluyen que el RFID es capaz de minorar el efecto *bullwhip* debido a que produce una información más veraz en tiempo real de los ítems y sus posiciones. (Imburgia 2006) indica que la minoración del efecto *bullwhip* que produce el RFID se debe a la mayor exactitud de los datos utilizados para hacer las predicciones de la demanda.

Bottani, Montanari and Volpi, (2010) realizaron un estudio cuantitativo del impacto del RFID en el efecto *bullwhip*, así como en los niveles de los stock de seguridad para el sector de los bienes de consumo de alta rotación, participando distribuidores tales como Auchan, Carrefour y productores como Nestle, Loreal, Procter&Gambel o Sony entre otros. En el estudio se utilizó una cadena de suministro de tres escalones: productores, distribuidores y minoristas. El análisis se realizó con dos escenarios posibles: uno de ellos en el que la información no era compartida y otro escenario de información integrada y compartida. Sus estudios concluyen que la mayor visibilidad que proporciona la tecnología RFID reduce de forma significativa el efecto *bullwhip*.

Cabe decir, que la transparencia total en la información, así como su acceso a lo largo de toda la cadena de suministro, no es capaz de hacer desaparecer el efecto *bullwhip* al completo. Así como, el exceso de visibilidad que puede obtenerse con los sistemas RFID también pueden tener efectos negativos en la gestión de la cadena de suministro.

### **2.4.3 Aportación del RFID a las políticas de inventario.**

En la gestión de inventarios es clave la determinación de la frecuencia y los tamaños de pedido de los lotes. Existen diversas metodologías para establecer el lote y frecuencia óptima para maximizar la satisfacción de los clientes, minimizando los costes de inventario y de rotura de stock. Es común a todas las políticas de inventario la necesidad de conocer los niveles de stock, ya sea de manera continua o mediante revisión periódica. Es evidente que el aporte fundamental al RFID en este aspecto es su capacidad para producir datos en tiempo real, lo que aumenta las posibilidades a la hora de tomar decisiones en cuanto a la gestión de los inventarios. No obstante, el RFID también aporta ventajas adicionales que a su vez redundan en una mejor política de reposicionamiento, tales como una mayor fiabilidad de los datos de partida, menores costes laborales para conocer los niveles de inventario, mejor

coordinación entre los distintos departamentos, reducción de los niveles de inventario, etc.

(Thiesse & Buckel 2015) analizan el efecto que tiene la implantación del RFID en minoristas, comparando la política de gestión de inventarios producida por la información de un sistema de RFID con una política de gestión de inventarios tradicional de revisión periódica. En este caso, los autores incluyen una ratio de error en los datos aportados por el sistema de RFID además de analizar el coste de las políticas de inventario para diferentes costes de las etiquetas. En su análisis (Poon, Choy, F. T S Chan, et al. 2011) utilizan un sistema de monitorización con RFID para planificar el abastecimiento de materias primas en un entorno fabril con varias líneas de fabricación, con producción bajo pedido, con metodología "*just in time*" y con lotes de fabricación muy pequeños. En este caso la planificación del abastecimiento de los lotes de material a los puestos de trabajo se hace mediante un algoritmo genético que toma como datos de partida los datos aportados por el sistema RFID de la producción diaria y los niveles de inventario.

(Wang et al. 2008) han simulado la cadena de suministro completa de las pantallas de cristal líquido de un importante fabricante taiwanés. La simulación ha permitido comparar las políticas de inventario (s, S) implementando una con tecnología RFID instalada y sin ella. Los resultados obtenidos indican que el sistema de política de inventario con RFID permite reducir de forma significativa los costes de inventario. En concreto aseveran que el coste total de inventario puede reducirse en un 6,2%. Además, la solución implementada con RFID permite aumentar la tasa de rotación de almacenes en un 7,6%.

(Gaukler 2011) analiza el efecto que tiene el etiquetado mediante RFID a nivel artículo en el nivel de stock en los lineales de un minorista para artículos que tienen elementos sustitutos. El autor realiza su investigación en dos situaciones diferentes: en una cadena de suministro centralizada, en la que productor y minorista son un único conjunto que tratan de maximizar sus beneficios de manera global y en una cadena de suministro descentralizada, en la que proveedor y minorista intentan maximizar sus beneficios de manera independiente. Desde el punto de vista de los niveles de inventario: los resultados indican que el etiquetado a nivel de ítem disminuye la situación de desabastecimiento de los artículos en los lineales del minorista, por tanto, desde el punto de vista de la rotura de stock, el RFID aporta ventajas a la gestión de los lineales y a la reposición de los mismos en el momento adecuado. No obstante, cuando se analizan los beneficios que aporta el

RFID a nivel artículo, los resultados indican que es importante considerar si el elemento es fácil de sustituir por otro artículo similar o no, además de ser de interés el análisis en una cadena de suministro centralizada o descentralizada. Así, si el elemento es fácilmente sustituible, el etiquetado a nivel de artículo mediante RFID no aportará una gran ventaja al minorista, pues el cliente al no encontrar un artículo, lo sustituye por otro y la venta se realiza igualmente. Sin embargo, desde el punto de vista del proveedor o fabricante, la venta se ha perdido, por lo que una correcta gestión de los artículos en los lineales, que eviten situaciones de desabastecimiento, tendrá una importante repercusión en sus beneficios. Así, si el elemento no es fácilmente sustituible el RFID a nivel de artículo aportará un menor beneficio al fabricante, pues su venta no se perderá, en todo caso se aplazará en el tiempo o se cambiará de minorista, y por tanto es el minorista el que sí experimentará una pérdida de las ventas y no el fabricante del artículo.

El autor indica que, para artículos claramente diferenciados, con alto volumen de rotación, cabe esperar los mayores beneficios marginales por la implantación del RFID a nivel artículo desde el punto de vista del minorista. No obstante, para los fabricantes, las mayores ventajas se obtendrán cuanto más fácilmente sustituible sea su artículo. Desde esta perspectiva el autor hace una reflexión sobre quién debe asumir los costes de las etiquetas y los costes fijos que resultan de la implantación de un sistema de RFID a nivel artículo.

## **2.5 Obstáculos en la aplicación del RFID en la gestión de almacenes**

Se exponen en este apartado los cinco obstáculos más señalados en la literatura en referencia a la implantación de los sistemas de RFID:

- **Incertidumbre respecto al retorno de la inversión.** El análisis del retorno de la inversión es uno de los principales criterios en la decisión de la inversión en una nueva tecnología. Algunos estudios sugieren que cuando se realiza el estudio del retorno de la inversión deben considerarse aspectos que engloban a la cadena de suministro completa, cuyos beneficios no son sencillos de tener en cuenta, ya que engloban a diversos actores de la cadena. Las empresas no suelen realizar el análisis en su conjunto, sino de manera

individual. Estos beneficios comunes son los derivados de la integración de la cadena de suministro, como pueden ser las reducciones del efecto *bullwhip*, la minoración de las roturas de stock, etc. (Bertolini et al. 2010) sugieren que considerando los beneficios obtenidos de manera global, el saldo entre los beneficios y los costes de la implantación de los sistemas de RFID es positivo. Sin embargo, si no se consideran estos beneficios ocultos, los análisis individuales pueden resultar negativos. Las dudas surgidas entre las empresas a la hora de medir el retorno de la inversión son uno de los principales obstáculos indicados por las empresas a la hora de abordar la implantación de la tecnología RFID (Lim et al. 2013).

- **Dificultad de integración con los sistemas anteriores.** Otra de las dificultades fundamentales para la implantación de nuevas tecnologías como el RFID es la capacidad para adecuarse a los sistemas de información presentes en las empresas tales como el WMS, los sistemas ERP o de relación con los clientes CRM (Vijayaraman & Osyk 2006). Este problema se ve acrecentado con la ingente cantidad de datos generada mediante la implantación de los sistemas RFID. No tener una plataforma común para poder intercambiar los datos en diferentes formatos y los altos costes de la integración de los sistemas, ha hecho que durante un tiempo las empresas rechacen la implantación del RFID (Rim & Park 2008).
- **Falta de rendimiento.** Otro de los obstáculos más destacados en la literatura es la falta de rendimiento de los sistemas de RFID. Numerosos estudios indican que la lectura de las etiquetas no produce resultados con un 100% de fiabilidad. (Wu et al. 2006; Porter et al. 2004; Leong et al. 2006; Muñuzuri, Rodríguez Palero, et al. 2012; Muñuzuri, Escudero Santana, et al. 2012). Estos problemas de fiabilidad son debidos a diferentes aspectos, tales como la posición de las etiquetas, las colisiones en las lecturas de etiquetas simultáneas o a la presencia de metales y agua. No obstante, estas dificultades están siendo superadas en la actualidad. En los últimos años se han desarrollado etiquetas de doble banda que son capaces de funcionar en alta y baja frecuencia, debido a la presencia de dos antenas, lo que ha abierto un sinfín de nuevas oportunidades (Jacob & Thiemann 2016).
- **Problemas derivados de la privacidad y seguridad.** Los sistemas de identificación por radiofrecuencia han despertado el interés tanto de investigadores y profesionales, como del público en general. El sentir de la

población es que las etiquetas RFID pueden utilizarse para rastrear tanto objetos como personas de forma continua, incluso una vez que el producto está en posesión del cliente, lo que ha creado un cierto rechazo a su uso (Hardgrave & Miller 2006). Desde el punto de vista de la industria, el problema de la privacidad esta derivado de la percepción de que el RFID puede ser utilizado para el espionaje industrial, a través de lecturas no autorizadas de etiquetas contenidas en los productos que circulan por la cadena de suministro y que llegan al cliente final (Roussos & Kostakos 2009). Por otra parte, dado que los sistemas RFID afectan a los procesos que pueden realizar los trabajadores en las empresas, éstos sienten amenazados sus puestos de trabajo (Curtin et al. 2007). (Lim et al. 2013) sugieren diversas formas de paliar estas reticencias. Las reservas mostradas por la industria, deben compensarse con un aumento de la seguridad tanto en el hardware como en el software de gestión del RFID. En relación a las preocupaciones mostradas por el público general, estas deben compensarse mediante la formación, la difusión de las ventajas que presenta el RFID, la transparencia en el uso de las tecnologías y la legislación. Por último, en relación a las dudas surgidas por parte de los empleados de las empresas en las que se implantan los sistemas de RFID, es importante informarles que el objeto de esta tecnología es mejorar su productividad y ayudarles a realizar de forma mejor su propio trabajo. Involucrar al personal que se verá afectado por los nuevos sistemas de RFID en las etapas iniciales de las implantaciones disminuye la resistencia al cambio de los empleados y produce implantaciones con mejores resultados (Keung Kwok & Wu 2009).

- **Desarrollo de estándares.** El último de los obstáculos se relaciona con la no estandarización de los sistemas de RFID. Este problema aparece reflejado desde los inicios del RFID. En el mundo actual, la globalización ha ampliado el mercado al nivel mundial. Esto exige que los sistemas de RFID sean interoperables en distintos países, lo cual hace necesario la armonización de los controles reglamentarios y de las normas internacionales que afectan a los sistemas de RFID. Dado que los sistemas de RFID utilizan ondas de radio, deben cumplir con la regulación y la normativa específica de cada país en el que se vayan a utilizar. En este sentido, existen diversos organismos tanto a nivel europeo como americano que están trabajando en la estandarización de los sistemas de RFID en relación a la interoperabilidad de los mismos (Lehpamer 2012). Igualmente, diversos autores indican que



la falta de estandarización en cuanto a la información de los códigos de identificación es un obstáculo indicado por las empresas (Vijayaraman & Osyk 2006). No obstante, esta falta de estandarización se ha corregido en gran medida en los últimos años (Finkenzeller 2010; Lehpamer 2012). El desarrollo por parte de la organización GS1 de un protocolo de interface, EPC UHF Gen2, que define los requisitos físicos y lógicos de los sistemas RFID de etiquetas y lectores está eliminando en gran medida este obstáculo. En el propósito de mejorar esta estandarización GS1 definió en el año 2009 el código GTIN (Drobnik 2015).

Finalizado este apartado, en el que se han abordado las tecnologías de la información y comunicación de aplicación en la gestión de almacenes y los sistemas RFID, se van a analizar en el siguiente capítulo los factores que influyen en las empresas para las decisiones de inversión en RFID.



# 3 DECISIONES DE ADOPCIÓN DEL RFID EN LA EMPRESA

---

**E**n este capítulo se va a abordar el estudio de los criterios de adopción de la tecnología RFID al ámbito de la logística. Se presenta en primer lugar las diferentes teorías sobre adopción por parte de las empresas de las innovaciones tecnológicas. Posteriormente se analizan los factores que influyen en la adopción de las innovaciones en el campo de los sistemas de identificación y por último se analizan los factores específicos que influyen en la adopción del RFID tanto en las grandes empresas como en las pequeñas y medianas empresas.

El interés de la comunidad científica en el RFID es elevado, como así lo demuestra la ingente cantidad de artículos científicos en revistas especializadas aparecidos desde el comienzo del RFID hasta nuestros días. Por ejemplo, considerando el periodo comprendido entre los años 2000 y 2015 existen 1187 artículos de revistas referentes a la aplicación del RFID en la gestión de cadenas de suministros (Musa & Dabo 2016) y ello sin considerar otros tipos de publicaciones científicas de enorme interés.

Los sistemas RFID han suscitado, como se ha comentado anteriormente, un gran interés en la comunidad científica. No obstante, el interés debe ser compartido por el ámbito empresarial, pues de ello dependerá en gran medida la continuidad de su desarrollo y por consecuencia del interés científico. Uno de los aspectos a considerar siempre por las empresas es no comprometer recursos financieros en bienes que no produzcan un retorno acorde a la inversión realizada. Es por tanto necesario conocer cuáles son los criterios y elementos clave que consideran los gestores empresariales

a la hora de abordar una nueva implantación de un sistema de información y más en concreto de una innovación tecnológica como es el RFID.

Los sistemas de identificación por radiofrecuencia han generado unas altas expectativas de implantación desde sus comienzos. Son diversos los autores que coinciden en afirmar que, tras más de veinte años de desarrollo desde su nacimiento, estas expectativas no se han visto satisfechas (Fosso Wamba et al. 2016) (Vlachos 2014). Resulta de interés realizar un análisis de las causas que producen esta falta de consecución de expectativas.

Desde esta perspectiva se debe analizar cómo las empresas son capaces de absorber los avances en el campo de las innovaciones de las tecnologías de la información y comunicación, TIC. Es de interés conocer cómo se produce la transferencia del conocimiento desde los centros donde nacen las innovaciones a la aplicación real de dichas soluciones en el ámbito empresarial. Resulta aún de mayor interés conocer cómo algunas empresas son permeables a los avances e innovaciones y otras no.

### **3.1 Teorías sobre adopción de innovaciones en el campo de las tecnologías de la información**

Según (Keating et al. 2010) existen dos corrientes de trabajos en este campo. La primera de ellas estudia las características estructurales de la innovación industrial. La segunda estudia la naturaleza de la innovación demandada.

En la primera línea, los autores tratan de dar respuesta a cómo y por qué las innovaciones tecnológicas surgen y qué impacto tienen en las empresas. La segunda corriente pone foco en modelar la demanda de innovación, y cómo se difunde la innovación tecnológica, con el fin de encontrar patrones de comportamiento en la adopción de los nuevos avances tecnológicos. Los investigadores han tratado de ver cuál es la actitud de los adoptantes y su comportamiento relacionado con los avances tecnológicos en TIC. Esto ha llevado a la identificación de varias características de la innovación, las tecnologías y los factores organizacionales y ambientales que afectan a la decisión de adopción de TIC.

Desde la década de los 80, la comunidad científica ha buscado definir teorías que describan cómo se difunden las innovaciones tecnológicas y qué caracteriza el marco contextual apropiado para el desarrollo de una innovación tecnológica. Existe un

número importante de teorías que tratan de explicar la adopción de una innovación tecnológica (Awa et al. 2016):

- Modelo de aceptación tecnológica, TAM (Davis 1985);
- Teoría de la acción razonada, TRA (Ajzen & Fishbein 1980);
- Teoría del comportamiento planificado, TPB (Ajzen 1985);
- Teoría de la difusión de la innovación, DOI (Rogers 1995) ;
- Modelos de fases, SM (Poon & Swatman 1999));
- Marco tecnología, organización y Entorno, TOE (Tornatzky et al. 1990) y
- Teoría de recursos (Caldeira & Ward 2003).

Además se puede añadir a éstas la teoría unificada de la aceptación y el uso de las tecnologías, UTAUT, combinación de varias teorías, incluidas TAM y TPB desarrollada por (Venkatesh et al. 2003).

De todas estas teorías, las más utilizadas en el estudio de la adopción de las innovaciones tecnológicas en el campo de los sistemas de información son las siguientes: TAM, TPB, UTAUT, DOI y TOE (Hassan et al. 2015) . De ellas, tres son teorías que analizan la disposición a adoptar una innovación tecnológica en el ámbito individual (TAM, TPB y UTAUT) y dos de ellas, DOI y TOE, están orientadas a determinar la disposición a adoptar una innovación tecnológica a nivel de empresa (Oliveira & Martins 2011). Es por ello, que la gran mayoría de los estudios que analizan la adopción de TIC en el ámbito de la empresa se apoyan en alguna de estas dos teorías o en la combinación de ambas como se verá más adelante.

La teoría clásica sobre la difusión de las innovaciones, conocida por sus siglas en inglés DOI (Diffusion of Innovations), identifica los cinco factores claves que pueden afectar en la decisión de adoptar o rechazar una innovación en el campo de las TIC (Rogers 1995). Estos factores son:

- Ventaja relativa, que hace referencia al grado de mejora respecto a la situación de partida que perciben los decisores. La ventaja relativa debería poder medirse de forma objetiva en términos de mejora económica; no obstante, existen factores subjetivos que determinan la ventaja percibida por el decisor. Cuanto mayor sea la ventaja relativa percibida, mayor será la ratio de adopción de la innovación.

- Compatibilidad, que es el grado con que una innovación se percibe como consistente respecto a los valores existentes, las experiencias pasadas y las necesidades de los adoptantes.
- Complejidad, que es el grado en que una innovación es percibida como difícil de entender y utilizar.
- Capacidad de ser probada, que es el grado en que una innovación puede ser ensayada o utilizada de forma experimental. A mayor facilidad de prueba, mayor es el coeficiente de adopción de la innovación.
- Capacidad de ser observada, que es el grado con que pueden apreciarse las ventajas de una innovación.

La teoría denominada TOE o *TOE framework (Technology-organization-environment framework)*, (Tornatzky et al. 1990), indica que la adopción de las innovaciones tecnológicas se basa en factores relacionados con el contexto tecnológico de la empresa, los aspectos organizacionales y el entorno en el que se desenvuelve una empresa. El contexto tecnológico engloba el nivel tecnológico relevante para la empresa, tanto a nivel interno como externo. El contexto organizacional hace referencia a diversos aspectos tales como la estructura de la empresa, las relaciones internas, el apoyo de la alta dirección y la complejidad gerencial. Por último, el entorno hace referencia al ámbito en el que se desarrolla la empresa: incluyendo el sector industrial, los competidores y a la administración pública competente.

El marco de referencia presentado por la teoría TOE es consistente con la teoría de la difusión DOI. En la teoría de la difusión, las características internas y externas de la tecnología, así como las características internas y externas de la organización son elementos que predicen cualquier decisión de adopción de una innovación tecnológica. Esto es similar al contexto tecnológico y organizacional que presenta la teoría TOE (Zhu et al. 2006). No obstante, ésta tiene en consideración los aspectos referentes al entorno en el que se desenvuelve la empresa, incluyendo las restricciones y oportunidades que puede tener la empresa debido al entorno en el que se desenvuelve. Por tanto, la TOE combinada con la DOI resulta un punto de partida adecuado para analizar los aspectos relevantes en la adopción de una tecnología (Hsu et al. 2006) de auto identificación como el RFID.

En el siguiente apartado se evalúan cuáles son los factores que se consideran claves en la decisión de la inversión en sistemas de identificación automática por parte de las empresas, tomado como base las teorías anteriormente descritas.

### **3.2 Factores específicos que influyen en la adopción de sistemas de auto-identificación**

Una de las piezas clave en la cadena de suministro son los almacenes y su gestión. El almacén no es simplemente un lugar donde deben almacenarse y conservarse los bienes, sino que deben considerarse las operaciones necesarias que en él se realizan (Hassan et al. 2015). El desempeño en las operaciones del almacén, ya sean intensivas en mano de obra o capital, no sólo afecta a la productividad y al coste del almacén, sino a la eficiencia de toda la cadena de suministro (Gu et al. 2007). La decisión de utilizar un sistema automático de identificación es una pieza clave de las decisiones estratégicas que debe considerar una empresa logística o una empresa de fabricación que opere con grandes almacenes. Las principales tecnologías de identificación automática son: código de barras, reconocimiento óptico de caracteres (OCR), reconocimiento de voz, sistemas biométricos, tarjeta inteligente e identificación de frecuencias de radio. (Hassan et al. 2015). La elección del sistema de identificación automática, por ejemplo entre un sistema de código de barras y RFID, no es una decisión simple, pues existen multitud de factores que afectan a esta decisión (Ilie-Zudor et al. 2011).

La literatura sobre los factores que afectan a la decisión de la inversión en sistemas de identificación automática en el entorno del almacén es escasa (Chow et al. 2006; Karagiannaki et al. 2011; Poon, Choy, F. T. S. Chan, et al. 2011; Hassan et al. 2015)

Se presenta a continuación la lista de factores realizada por (Hassan et al. 2015) bajo la teoría TOE. El autor analiza los aspectos relacionados con la tecnología, la organización y el entorno, específicamente para la gestión del almacén por lo que incluye los aspectos estructurales y operacionales del almacén y que obviamente condicionan la decisión de un responsable de elegir un sistema de identificación automática en el ámbito de la cadena de suministro. El autor presenta una lista de factores, agrupados en seis categorías:

- Factores estructurales del almacén (véase Tabla 3-1).
- Factores operativos del almacén (véase Tabla 3-2).
- Factores relacionados con los recursos (véase Tabla 3-3).
- Factores organizacionales (véase Tabla 3-4).

- Factores tecnológicos (véase Tabla 3-5).
- Factores del entorno (véase Tabla 3-6).

*Tabla 3-1: Factores estructurales. Fuente: (Hassan et al. 2015)*

Listado de factores	Considerado por
• Tamaño del almacén	• (Arooj et al. 2011)
• Número de pasillos	• (Bhuptani & Moradpour 2005)
• Número de bastidores	• (de Koster et al. 2007)
• Nivel de automatización	• (Gu et al. 2007)
• Departamento de layout	• (Karagiannaki et al. 2011)
• Unidad de mantenimiento de stock (SKU) (pallet, caja o artículo)	
• Tipo de producto	
• Temperatura	
• Humedad	
• Ruido	
• Polvo y la suciedad	
• Presión	
• E-Plane (campo eléctrico)	
• H-Plane (campo magnético).	

*Tabla 3-2: Factores operativos. Fuente: (Hassan et al. 2015)*

Listado de factores	Considerado por
• Recepción	• (Rouwenhorst et al. 2000)
• Ubicación	• (Karagiannaki et al. 2011)
• Asignación espacio de reserva	
• Preparación de pedidos	
• Acumulación de órdenes y clasificación	
• Zonificación	
• Procesamiento por lotes	
• Encaminamiento	
• Envíos	
• Política de asignación de almacenamiento.	



Tabla 3-3: Factores relacionados con los recursos. Fuente: (Hassan et al. 2015)

Listado de factores	Considerado por
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades de almacenamiento</li> <li>• Sistemas de almacenamiento</li> <li>• Sistema de gestión de almacenes</li> <li>• Equipos de manipulación de material</li> <li>• Miembros del personal de almacén (mano de obra)</li> <li>• Capacidad de espacio de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Rouwenhorst et al. 2000)</li> <li>• (Karagiannaki et al. 2011)</li> </ul>

Tabla 3-4: Factores organizacionales. Fuente: (Hassan et al. 2015)

Listado de factores	Considerado por
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apoyo de la alta dirección</li> <li>• Capacidad de conocimiento de las TIC</li> <li>• Necesidades internas de almacenamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Hwang et al. 2004)</li> <li>• (Liviu et al. 2009)</li> <li>• (Laosirihongthong et al. 2013)</li> </ul>

Tabla 3-5: Factores tecnológicos. Fuente: (Hassan et al. 2015)

Listado de factores	Considerado por
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes de la tecnología</li> <li>• Costes de desarrollo</li> <li>• Línea de visión; (carga laboral)</li> <li>• Visibilidad</li> <li>• Exactitud</li> <li>• Fiabilidad</li> <li>• Rastreo de artículos</li> <li>• Garantía de trazabilidad</li> <li>• Retiradas de producto</li> <li>• Control de calidad</li> <li>• Almacén de datos de etiquetas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Huber et al. 2007)</li> <li>• (Sarac, Absi &amp; Dauzre-Prs 2010)</li> <li>• (Poon, Choy, F. T. S. Chan, et al. 2011)</li> <li>• (Fosso Wamba &amp; Ngai 2015)</li> </ul>

- Propiedades de información
- Peso etiquetas
- Capacidades de lectura / escritura de la etiqueta
- Vida operativa
- Memoria
- Alcance de las comunicaciones
- Colección de etiquetas de múltiples
- Seguridad
- Privacidad
- Sensibilidad ambiental
- Interferencia
- Innovaciones en curso
- Facilidad de uso
- Normas establecidas
- Actuaciones
- Retorno de la Inversión (ROI)

*Tabla 3-6: Factores del entorno. Fuente: (Hassan et al. 2015)*

Listado de factores	Considerado por
• Presión del gobierno	• (Hwang et al. 2004)
• Presión de la competencia	• (Wang et al. 2010)
• Presión de los clientes	• (Quetti et al. 2012)
• Proveedor de servicio técnico.	

### **3.3 Factores que influyen en la adopción del RFID**

Una vez analizados los factores que determinan la adopción de sistemas de identificación automática, se analizan a continuación los factores que específicamente determinan la adopción de un sistema de RFID en la empresa.

La tecnología RFID ofrece un amplio número de beneficios potenciales. Por ejemplo,

ayuda a los grupos de interés a reducir las pérdidas de inventario, los costes del manejo de materiales, aumenta la precisión de los datos, posibilita la innovación de los procesos y mejora la información compartida en la cadena de suministro (Bottani & Rizzi 2008) (Coltman et al. 2008).

Una parte importante en la decisión estratégica sobre adoptar o no un sistema de RFID es sopesar los beneficios frente a los riesgos identificados. Dado que la adopción de RFID es baja respecto a lo esperado, ello indica que en la mente de los decisores los riesgos son mayores que los beneficios. Los riesgos asociados con los factores organizativos están centrados en la integración de los sistemas existentes en la empresa con los nuevos sistemas que acompañan al RFID. Otra barrera a tener en cuenta es el coste de compra de las etiquetas y la infraestructura necesaria para su lectura y el correcto procesamiento de la información generada.

(Sigala 2007) indica que los dos principales factores para poder realizar la implantación de RFID son haber realizado el análisis de coste beneficio y realizar un estudio sobre la mejor manera de integrar el sistema RFID con los modelos de negocio ya implantados en la empresa y la tecnología utilizada.

Por otra parte, (Hellstrom 2009) indica que el alto coste de adquisición de la tecnología no es siempre una barrera de entrada. Ello indica que el coste del capital no es la única barrera en la adopción de RFID. Surgen muchos problemas técnicos con los softwares existentes y las infraestructuras presentes a la hora de integrar los sistemas de RFID, tanto de las etiquetas como con los lectores.

La estandarización de los datos a través de la cadena de suministros tales como los datos de los productos, vendedores, transportistas, así como los datos de las propias etiquetas de RFID, son críticas a la hora de determinar el valor real del RFID. De hecho, (Whitaker et al. 2007) han determinado empíricamente que la falta de estandarización afecta negativamente a la adopción de estas tecnologías. Los resultados de sus investigaciones sugieren que la ambigüedad en los estándares limita las expectativas del retorno de la inversión porque impide a las empresas desarrollar la tecnología RFID a través de todos los componentes de la cadena de suministro.

Uno de los principales atractivos del RFID es la posibilidad de crear más transparencia en la información a través de la cadena de suministro. Sin embargo, para que las empresas obtengan un beneficio real de RFID, deben trabajar con la complejidad de la información a través de la cadena de suministro. (Keating et al.

2010) sugieren que las empresas que tienen productos del sector industrial con una frecuencia media son las que mayores beneficios pueden obtener en las implantaciones de RFID. Para empresas en el mercado de materias primas la implantación del RFID puede tener menos beneficios. No obstante, los beneficios que se obtienen de la implantación de sistemas de RFID dependen de factores individuales y de organización de las empresas.

### **3.3.1 Estudios empíricos en grandes empresas**

Respecto a la decisión de implantar una nueva tecnología como el RFID, (Keating et al. 2010) analizan cuáles son los factores que las empresas toman en consideración a la hora de decidir si realizar la inversión en RFID.

En su análisis, los autores han analizado dos cuestiones diferentes. En primer lugar, qué factores son considerados como más importantes o menos importantes por las empresas a la hora de tomar la decisión de la inversión en RFID. Y, en segundo término, cómo varía la importancia de estos factores entre las empresas que deciden adoptar esta nueva tecnología y las que no la adoptan.

En su análisis, (Keating et al. 2010) han analizado 21 factores que toman en consideración los decisores a la hora de implantar o no un sistema de RFID. Los 21 factores pueden agruparse en cuatro aspectos diferentes a considerar: recursos, tecnología, automatización y cadena de suministros. Los factores considerados son los siguientes:

- 1) En relación a los recursos necesarios: coste de adquisición, costes de desarrollo, compromiso de la alta dirección, conocimientos a nivel operativo, costes de remplazo y complejidad de la integración.
- 2) Respecto a la tecnología: ambigüedad de los estándares, peligros de seguridad y privacidad, madurez de la tecnología.
- 3) Respecto a la automatización gestión del inventario, capacidad de tener datos, seguimiento y localización, conformidad e innovación de procesos.
- 4) Respecto a la cadena de suministro: visibilidad de la innovación, precisión de los datos, calidad del servicio, toma de decisiones, diferenciación competitiva y tecnología del líder.

Para dar respuesta a las dos preguntas planteadas, los autores han utilizado una

metodología que produce una escala de importancias relativas. En concreto, lo que han determinado es una escala ordenada de los 21 factores que han considerado que intervienen en la decisión de la inversión de RFID. La metodología utilizada está basada en las máximas diferencias para identificar qué factores son considerados los más importantes y cuáles menos importantes. El método es una variante reducida de los métodos de elección discreta conocido como “escala mejor-peor” (Marley & Louviere 2005) (Louviere & Islam 2008). Los métodos de elección discreta se presentan en el apartado 4.1.

Este método de elección discreta es muy útil a la hora de ordenar preferencias donde la lista de atributos a considerar es extensa. En esta metodología se solicita al decisor elegir de entre una lista cuál de los atributos considera más importante y cuál menos importante, de forma que se ofrecen bloques de atributos de al menos tres ítems y el elector indica cuál es el que considera de mayor relevancia y cuál el que considera de menor relevancia. Esto resulta más sencillo para el decisor que indicar el orden de importancia de una lista de atributos, lo que mejora la ratio de respuestas completas y válidas.

Este método ha sido aplicado con éxito en diferentes contextos para identificar la eficacia de las decisiones gerenciales tomadas y para identificar la estructura de preferencias de productos y servicios entre los decisores empresariales (Buckley et al. 2007)

En su trabajo los autores solicitaron a una muestra de lectores del *RFID Journal* contestar un cuestionario. Se obtuvieron 133 respuestas. El tiempo aproximado para completar el cuestionario era de 30 minutos. El cuestionario se dividía en tres bloques. El primero de ellos estaba dedicado a caracterizar y contextualizar la empresa en la que prestaban sus servicios los encuestados: sector de la empresa; tamaño de la empresa: volumen de negocio; resultados y número de empleados e implantación de las tecnologías de la información y comunicación en la empresa. En el segundo bloque de preguntas se solicitaba al encuestado que eligiera el factor que consideraba más importante a la hora de adoptar un sistema de RFID en su empresa. Este segundo bloque constaba de 21 preguntas. Cada una de ellas presentaba al decisor un conjunto de factores para indicar cuál consideraba más importante y cuál menos importante. El cuestionario se diseñó para que cada factor apareciera el mismo número de veces en el conjunto de bloques y que cada factor fuera comparado con todos los demás factores al menos en una ocasión.

Los autores analizaron de manera global los resultados obteniendo el orden de importancia de los factores. Por otra parte, los autores analizaron los resultados separando los mismos entre los adoptantes del RFID y los que no lo eran, encontrando diferencias significativas entre los factores que consideraban decisivos los encuestados que sí habían adoptado en sus empresas sistemas de RFID y los que no lo habían hecho.

Los resultados obtenidos de forma agrupada reflejan que de los 21 factores el considerado como más importante a la hora de realizar o no una inversión en la implantación de un sistema de RFID es la exactitud de los datos. A continuación, al mismo nivel de significación se encuentran la implicación de la alta dirección, la necesidad de visibilidad de la información y la gestión del inventario. Por último, el factor menos determinante es la amenaza de la privacidad de los datos.

En relación a los resultados encontrados separados entre adoptantes de la tecnología RFID y no adoptantes, los autores indican que entre los adoptantes los factores más significativos son de nuevo la exactitud de los datos, seguido por la implicación de la alta dirección y la visibilidad de la información. Respecto a los no adoptantes, el más importante de los factores sigue siendo la exactitud de los datos, seguido de la gestión del inventario y el seguimiento y localización. Se puede observar que los factores considerados como importantes en el estudio global lo siguen siendo en el análisis diferenciado entre adoptantes y no adoptantes.

Respecto a los menos importantes los mismos factores considerados como los menos importantes en el análisis común siguen siendo los menos importantes en los análisis diferenciados.

Cabe destacar que las diferencias significativas entre el análisis diferenciado y el común radican en que los no adoptantes consideran significativamente importantes los costes de adquisición y los costes de desarrollo no siendo significativos para los adoptantes.

Se muestra a continuación (véase Figura 3-1) la gráfica de importancia relativas obtenidas por los autores diferenciando los resultados entre los adoptantes de una tecnología RFID y los no adoptantes.

Es importante destacar las limitaciones de este estudio indicadas por los propios autores. La primera de ellas es el hecho de que, aunque según los mismos se ha realizado la lista de factores realizando un arduo trabajo de revisión de la literatura, consultando a diversos expertos tanto del mundo académico como del empresarial,

resulta imposible aseverar que no falta ningún factor que pudiera ser significativo. En segundo lugar, analizando las características de las empresas de los encuestados, el trabajo está sesgado hacia empresas de gran tamaño (el número medio de empleados de las empresas es 53.188 empleados).

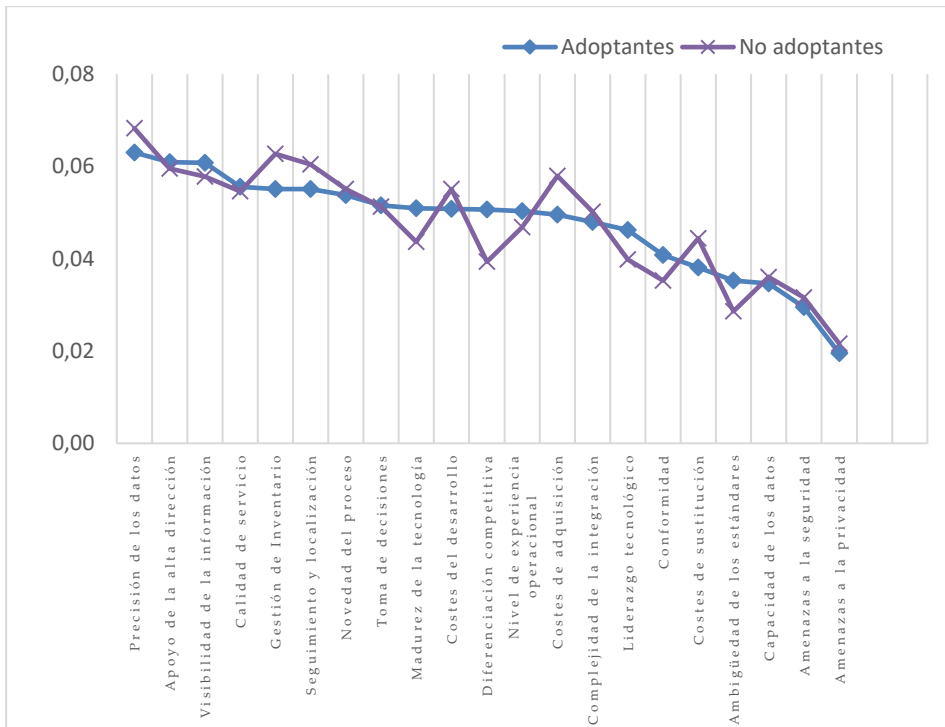


Figura 3-1: Importancia relativa de factores para adoptantes y no adoptantes de RFID. Fuente: (Keating et al. 2010)

### 3.3.2 Estudios para pequeñas y medianas empresas

La Comisión Europea define el conjunto de pequeñas y medianas empresas (PYMES) como aquellas que poseen menos de 250 trabajadores (European Commission 2003). Las empresas con menos de 10 trabajadores se denominan microempresas, las empresas con entre 11 y 50 trabajadores como pequeñas

empresas y las empresas entre 51 y 250 trabajadores como medianas empresas. El tejido empresarial español está compuesto en un 95,7% por microempresas (55,4% no tienen trabajadores asalariados) y tan sólo el 2% de las empresas tienen más de 20 empleados (INE 2017). Tan sólo el 0,1% del tejido empresarial español es gran empresa. Lo que implica que el 99,9% son PYMES. Análogamente ocurre con el tejido empresarial europeo, más del 98% de las empresas europeas se enmarcan en este grupo y sin embargo, es escasa la literatura respecto a la situación de las aplicaciones del RFID en las pequeñas y medianas empresas (Strueker & Gille 2008).

(Fosso Wamba et al. 2016) analizan expresamente cuáles son las características determinantes en la intención de adoptar el RFID en las PYMES. Su estudio se apoya en dos teorías. La teoría de la difusión de la innovación, desarrollada por (Rogers 1995) y la caracterización de la empresa a través de tres aspectos: Tecnología, Organización y Entorno, conocida como *TOE framework*, teoría desarrollada por (Tornatzky et al. 1990), ambas comentadas anteriormente.

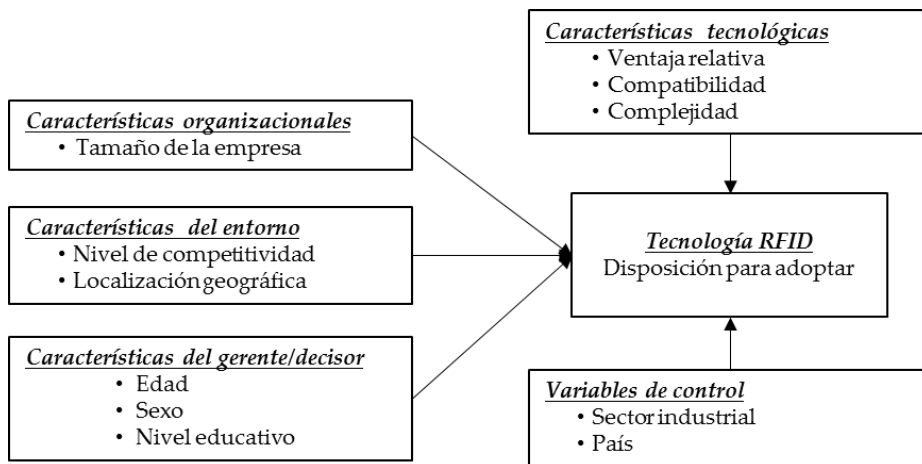


Figura 3-2: Propuesta de marco conceptual. Fuente: (Fosso Wamba et al., 2016)

Apoyándose en estas dos teorías, (Fosso Wamba et al. 2016) proponen un marco conceptual para analizar cuáles son los factores determinantes para adoptar un sistema RFID (véase Figura 3-2).



Basándose en el marco definido los autores definen un conjunto de hipótesis:

- H1: La ventaja relativa que presentan los sistemas de RFID está positivamente relacionada con la intención de adopción del RFID.
- H2: La compatibilidad de los sistemas RFID está positivamente relacionada con la intención de adopción del RFID.
- H3: La complejidad del RFID está negativamente relacionada con la intención de adopción del RFID.
- H4: El tamaño de la empresa está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.
- H5: El nivel de competencia está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.
- H6: La localización geográfica (urbano) está positivamente relacionada con la intención de adopción del RFID.
- H7: La edad del gerente está negativamente relacionada con en la intención de adopción del RFID.
- H8: El género del gerente (masculino) está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.
- H9: El nivel educativo del gerente está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.
- H10: El sector industrial (fabricación) está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.
- H11: El nivel de desarrollo del país está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.

Tras la definición de estas hipótesis, los autores han realizado un estudio transversal de validación empírico. Para ello, se realizó un cuestionario vía web, solicitando a un panel de gestores de PYMES su colaboración. Estos gestores pertenecían a diferentes países: Australia, Reino Unido, India y Estados Unidos. Se obtuvo una ratio de respuestas del 29,39%, obteniéndose 453 cuestionarios de respuesta válidos. En cuanto a la caracterización de la muestra, un 24,1 % de las respuestas era de gerentes de empresas en países en vía de desarrollo (India), siendo el resto de países desarrollados (Australia, Estados Unidos y Reino Unido). Respecto al sector, el 94%

de los encuestados son del sector servicios, siendo tan sólo un 6% fabricantes. Respecto a la edad media de los encuestados fue de 47,99 años, siendo el 70,9% hombres y el 29,1% mujeres. El 70,8% de los gerentes poseía estudios universitarios.

Los resultados fueron que, con un nivel de significancia del 95%, las hipótesis H1 y H2 son ciertas, es decir, que la ventaja relativa y la compatibilidad, son significativas al nivel de confianza indicado. Sin embargo, el nivel de complejidad no es significativo según los resultados obtenidos. Respecto al tamaño de la empresa, rebajando el nivel de confianza al 90% el tamaño sí es relevante, pero si el nivel de confianza exigido es el 95%, no resulta significativo. Los autores indican que puede deberse a que la gran mayoría de las encuestas fue realizada a microempresas.

Por otra parte, el nivel de competencia tampoco resulta significativo. En el caso de la hipótesis referente a la localización, el resultado indica que a un nivel de confianza del 95% la hipótesis correcta es la contraria a la establecida, encontrándose una relación positiva en empresas no ubicadas en entornos urbanos. Por último, a un nivel de confianza del 90% las hipótesis sobre la edad, el género y el nivel educativo tampoco son indicativos de la intención en la adopción de sistemas RFID.

En relación al sector industrial, tampoco es soportada la hipótesis planteada.

Por último, el nivel de desarrollo del país sí está positivamente relacionado con la intención de adopción del RFID.

En resumen, los resultados del análisis empírico realizado por estos autores indican que los aspectos que explican de manera fehaciente la disposición para implantar un sistema RFID en las PYMES son: la ventaja competitiva, la compatibilidad del RFID con los sistemas existentes en la empresa y el nivel de desarrollo del país en el que se encuentra la empresa.

El siguiente apartado está dedicado a exponer los métodos de evaluación que se utilizarán en el análisis realizado en esta tesis. Son tres los que se han considerado oportunos para el desarrollo del análisis que se detallará más adelante. Éstos son el modelo de elección discreta en la selección de alternativas, el proceso de análisis jerárquico y el ajuste por regresión lineal, los cuales se exponen a continuación.

# 4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN

---

La toma de decisiones en un entorno complejo, en el que existen diferentes criterios a considerar y diferentes alternativas posibles, es un problema de elevada dificultad que ha sido estudiado ampliamente por la comunidad científica. Se detallan a continuación dos métodos de selección de alternativas para problemas de decisión con multiplicidad de objetivos: el método de elección discreta y el método de análisis jerárquico. Seguidamente se introduce la base teórica del modelo de ajuste de regresión múltiple. El objetivo perseguido con los tres métodos en esta tesis es extraer de la opinión de un reducido de expertos una estimación de las importancias relativas de ciertos factores como se verá en el Apartado 5.

## 4.1 Selección de alternativas mediante elección discreta

Se presenta a continuación una teoría sobre la selección por parte de individuos entre posibles alternativas disponibles, con el objeto de modelar el comportamiento de los individuos, conocer las características de las funciones representativas de los criterios de selección y las técnicas de estimación de las funciones elegidas en base a la información disponible.

Los problemas de decisión entre alternativas se han aplicado tradicionalmente a los modelos de planificación de transporte. Sin embargo, el comportamiento ante la elección entre diferentes alternativas es un escenario aplicable a numerosos entornos.

Cuando se modelan formalmente los problemas de decisión, la descripción de las alternativas aparece de forma implícita en las restricciones del modelo. De forma,

que el conjunto de valores que resultan admisibles, es decir que cumplen las restricciones, son el conjunto de decisiones admisibles.

Los problemas de decisión pueden presentarse como modelos de optimización cuando el valor que toman las variables refleja la elección de cada posible alternativa. Se usa este enfoque generalmente cuando el conjunto de alternativas es muy elevado o infinito y cuando la caracterización de las alternativas se adecua a una descripción implícita de las variables.

Existe otro enfoque cuando las alternativas son un conjunto finito y no son adecuadas para representarse con una descripción implícita de las variables del modelo. En este caso se enmarcan los modelos de elección discreta, en el que un individuo, en función de ciertas características tiene acceso a un conjunto finito de alternativas discretas entre las que tiene que elegir.

Los modelos de elección discreta (McFadden 1986) son una poderosa herramienta para modelar el comportamiento de los individuos en la selección entre alternativas discretas. Estos modelos se basan en que el individuo observa una utilidad para cada alternativa, siendo la alternativa de mayor utilidad la que tiene mayor probabilidad de ser elegida. Se postula, por tanto, un comportamiento racional de los individuos.

Para la cuantificación del proceso se desarrollan los modelos *multi-logit*, que son capaces de presentar de manera fiel la selección entre elementos discretos. Para ajustar los modelos se deben realizar experimentos en los que se solicita a los individuos que realicen selecciones entre situaciones artificiales que se sean análogas a las situaciones reales. Estos experimentos se conocen como modelos de preferencias declaradas (Louviere 1988).

### **4.1.1 Caracterización de las alternativas**

El primer paso para plantear un modelo de elección discreta es describir las alternativas. Cada alternativa  $j$ , se caracteriza por un vector de atributos que son valorados por el individuo:

$$X_j = (x_{j1}, \dots, x_{ji}, \dots) \qquad \text{Ecuación 4-1}$$

Para determinar la valoración que los individuos otorgan a cada alternativa se utiliza el concepto de utilidad. Se propone una función lineal de los atributos para medir la

utilidad de las alternativas:

$$U_j = f(X_j) = \sum_i \beta_i x_{ji} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

La utilización de la función lineal supone desestimar el efecto que tienen los términos cuadráticos y los términos cruzados, así como los de orden superior, cuyo aporte a la descripción de la utilidad no supera el 20% (Louviere 1988).

Siguiendo con la descripción de las alternativas, una vez conocidos los parámetros  $\beta_j$  se podría determinar la utilidad de cualquier combinación de atributos  $X_j$ . Los modelos de elección discreta tienen por objeto la obtención de los valores de estos parámetros.

Es habitual suponer que los valores de los parámetros  $\beta_j$  son invariantes para los individuos. Así, el proceso de elección entre alternativas se puede presentar como una tabla, en la que se reflejan los valores que toman los L atributos de un conjunto de n alternativas, donde los valores de los parámetros  $\beta_j$  son invariantes, para las alternativas y los individuos (véase Tabla 4-1).

Tabla 4-1: Representación de las alternativas en el proceso de elección

Individuo m	$X_1$	$X_2$	$\dots X_i$	$\dots X_L$
Alternativa 1	$x_{11}$	$x_{12}$	$\dots x_{1i}$	$\dots x_{1L}$
$\vdots$				
Alternativa j	$x_{j1}$	$x_{j2}$	$\dots x_{ji}$	$\dots x_{jL}$
$\vdots$				
Alternativa n	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$\dots x_{ni}$	$\dots x_{nL}$
Parámetro	$\beta_1$	$\beta_2$	$\dots \beta_i$	$\dots \beta_{1L}$

### 4.1.2 Elección entre alternativas

Con el modelo planteado hasta ahora, el individuo escogería siempre la alternativa cuya utilidad calculada en función de la expresión de utilidad propuesta (Ecuación 4-2) fuera mayor. Sin embargo, se observa que, en el proceso de selección de alternativas, en ocasiones el individuo escoge en ciertas ocasiones una alternativa cuya utilidad así calculada resulta inferior a la de otra alternativa. Esto se debe a que existen atributos desconocidos que no están recogidos en la descripción de las alternativas o a la falta de coherencia de los individuos. Para solventar esta cuestión, los modelos introducen una componente aleatoria en la función de utilidad. De esta forma, la utilidad global queda definida por una componente determinista, la recogida en la Ecuación 4-2, y una componente aleatoria  $\xi_j$ , quedando definida como refleja la Ecuación 4-3:

$$U_j = V_j + \xi_j = \sum_i \beta_i x_{ji} + \xi_j \quad \text{Ecuación 4-3}$$

Al utilizar esta función, las utilidades  $U_j$  tienen naturaleza estocástica, por lo que se puede hablar de la utilidad en términos probabilísticos. De este modo, el proceso de selección se transforma en un proceso probabilístico, en el que la probabilidad de que un individuo escoja una alternativa  $k$  es la probabilidad de que la utilidad aleatoria  $U_k$  sea la alternativa de mayor valor entre las utilidades del conjunto de alternativas presentes en el escenario (Ecuación 4-4):

$$P_r \left[ U_k \geq \max_j [U_j; j \in K, j \neq k] \right] \quad \text{Ecuación 4-4}$$

Cuando sólo existen dos posibles alternativas, la probabilidad de elección se representa como refleja la siguiente ecuación (Ecuación 4-5):

$$P_r [U_1 \geq U_2] = P_r [V_1 + \xi_1 \geq V_2 + \xi_2] = P_r [V_1 - V_2 \geq \xi_2 - \xi_1] \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Lo cual refleja que la probabilidad es función de la diferencia entre las utilidades. Además, esto implica que, si se realiza una traslación en la escala de las utilidades en una constante, o si se hace una variación de un factor de escala constante positivo  $\alpha$ , la probabilidad no varía, tal y como puede verse en el siguiente conjunto de expresiones (Ecuación 4-6).

$$\begin{aligned}
 P_r[\alpha U_1 \geq \alpha U_2] &= P_r[\alpha(V_1 + \xi_1) \geq \alpha(V_2 + \xi_2)] = \\
 &= P_r[\alpha(V_1 - V_2) \geq \alpha(\xi_2 - \xi_1)] = P_r[V_1 - V_2 \geq \xi_2 - \xi_1]
 \end{aligned}$$

Ecuación 4-6

Esta propiedad indica que la escala de medición elegida para evaluar las utilidades de las alternativas no afecta a la teoría de elección probabilística, siempre y cuando se puedan realizar operaciones de escalado de las unidades de medida y se pueda escoger el cero origen de la escala.

Se muestran a continuación la familia de modelos *logit*, caracterizados por suponer una distribución Gumbel para el componente aleatorio de la utilidad.

### 4.1.3 Modelo Multilogit de la utilidad aleatoria

Como acaba de comentarse, el conjunto de modelos *logit* suponen que la componente aleatoria de la utilidad sigue una distribución de probabilidad Gumbel, de parámetros 0 y  $\mu$ . Esta distribución resulta adecuada por dos motivos fundamentales, su similitud con la distribución normal y por la comodidad en su manejo. Se presenta seguidamente la función de densidad (Ecuación 4-7) y la función de distribución para la variable aleatoria Gumbel (Ecuación 4-8).

$$f(\xi) = \mu e^{-\mu(\xi)} e^{-e^{-\mu(\xi)}} \text{ con } \mu > 0$$

Ecuación 4-7

$$F(\xi) = e^{-e^{-\mu(\xi)}} \text{ con } \mu > 0$$

Ecuación 4-8

Con esta variable aleatoria la probabilidad de selección de la alternativa k, entre el conjunto de alternativas posibles es la mostrada en la siguiente expresión (Ecuación 4-9).

$$P_k = \Pr(\text{Alternativa } k) = \frac{e^{\mu V_k}}{\sum_i e^{\mu V_i}}$$

Ecuación 4-9

En esta expresión se ha supuesto que todas las componentes aleatorias de las utilidades de las diferentes alternativas están idénticamente distribuidas según una Gumbel, con varianza constante y que son independientes.

Se presenta a continuación el caso para dos alternativas a modo de ilustración, que seguidamente se generalizará para un conjunto más amplio.

### 4.1.3.1 Caso de dos alternativas

Si se considera el proceso de selección entre dos alternativas, a las que se llamará alternativa 1 y alternativa 2, sus funciones de utilidad se expresan como:  $U_1 = V_1 + \xi_1$  y  $U_2 = V_2 + \xi_2$ , donde la parte determinista de la utilidad se representa por  $V_1$  y  $V_2$ , y la parte aleatoria por  $\xi_1$  y  $\xi_2$ , la cual se supone distribuida según una Gumbel  $(0, \mu)$ .

Llamando  $P_1$ , a la probabilidad de que la utilidad de la alternativa 1 sea mayor o igual a la de la alternativa 2, y  $P_2$  a la opción contraria, dichas probabilidades pueden calcularse particularizando la Ecuación 4-9 para dos alternativas, tal y como se indica a continuación (Ecuación 4-10):

$$P_1 = \Pr[U_1 \geq U_2] = \frac{e^{\mu V_1}}{e^{\mu V_1} + e^{\mu V_2}} = \frac{1}{e^{\mu(V_2 - V_1)}} \quad \text{Ecuación 4-10}$$

Se muestran en la Figura 4-1, tres funciones *logit* con factores de forma  $\mu = 0,01$ ,  $\mu = 1$  y  $\mu = 10$ , para la probabilidad de la alternativa 1, con un valor de  $V_2$  igual a 10 y valores de  $V_1$  comprendidos entre 0 y 20.

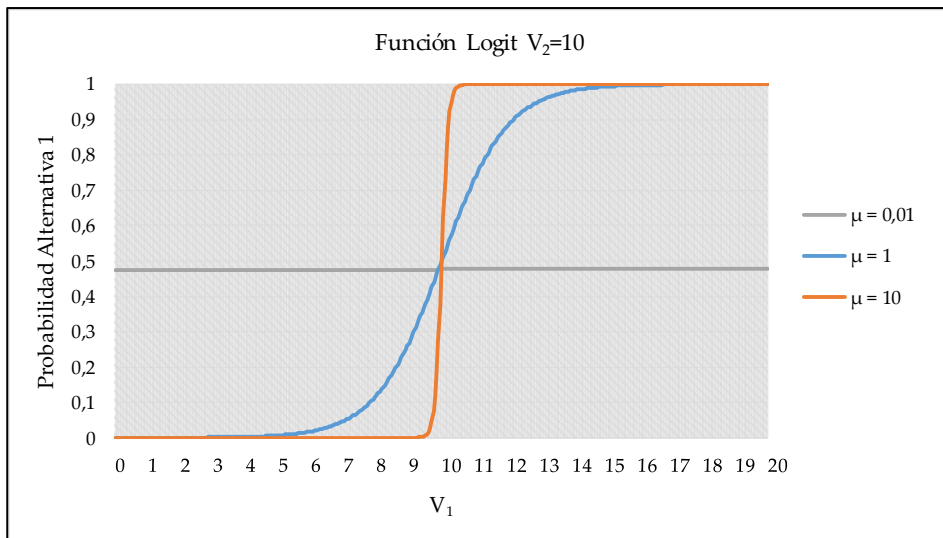


Figura 4-1: Probabilidad de selección la alternativa 1 para factores de forma  $\mu = 0,01$ ,  $\mu = 1$  y  $\mu = 10$



Como se observa, cuando el valor de  $\mu$  tiende a cero, las dos alternativas son equiprobables, y la probabilidad de ambas alternativas es 0,5. Cuando el valor de  $\mu$  aumenta, la función tiende al escalón, y la probabilidad de la alternativa 1 es nula para valores de  $V_1$  inferiores a 10 e igual a 1 para valores de  $V_1$  mayores que 10. Recuérdese que se ha considerado  $V_2$  igual a 10. El caso intermedio representado, para  $\mu = 1$ , es el caso comúnmente utilizado en los modelos de elección discreta.

Del análisis de la ecuación anterior (Ecuación 4-10) se debe también destacar que la probabilidad de selección de las alternativas depende de la diferencia de la parte determinista ( $V_1 - V_2$ ) y no de su cociente ( $V_1/V_2$ ). Esto implica que la modificación en una misma constante para las utilidades no afecta a las probabilidades de selección.

#### 4.1.3.2 Caso de varias alternativas (más de dos)

Para el caso de varias alternativas, denominado modelo *Multilogit*, el comportamiento de los casos extremos para el valor de  $\mu$  es el descrito anteriormente. Para valores elevados del parámetro prevalece la alternativa de mayor componente determinista, y para valores cercanos al cero, todas las alternativas son equiprobables.

La formulación de la expresión general para la probabilidad de selección de la alternativa  $k$ , se puede reflejar como muestra la siguiente ecuación:

$$P_k = \frac{e^{\mu V_k}}{\sum_j e^{\mu V_j}} = \frac{1}{\sum_{j \neq k} e^{\mu(V_j - V_k)}} \quad \text{Ecuación 4-11}$$

Dado que se ha supuesto que todos los términos aleatorios se distribuyen según una Gumbel, estos modelos cumplen la propiedad denominada *IAI: independencia de las alternativas irrelevantes*. El cumplimiento de esta propiedad implica que, al comparar la probabilidad entre dos alternativas, la comparación resulta independiente del resto de alternativas, como puede comprobarse en la siguiente expresión (Ecuación 4-12).

$$\frac{P_k}{P_i} = \frac{e^{\mu V_k}}{e^{\mu V_i}} = e^{\mu(V_k - V_i)} \quad \text{Ecuación 4-12}$$

Es decir, que la probabilidad de selección entre dos alternativas sólo depende de la

utilidad de ellas, siendo independiente de las utilidades del resto de alternativas.

#### 4.1.4 Estimación del modelo *Multilogit*

Para poder utilizar los modelos *Multilogit* para elección discreta es necesario ajustar dichos modelos. El objetivo del ajuste de modelos *Multilogit* es la estimación de los coeficientes  $\beta_i$  que definen las utilidades de las alternativas.

Para realizar esta estimación se realiza un experimento, donde se solicita a una serie de decisores que contesten unas encuestas. En las encuestas se le pide al decisor que evalúe varios escenarios posibles. Cada conjunto de decisión cuenta con un número de alternativas, caracterizadas según sus atributos. Para cada uno de ellos se solicita al decisor que elija la alternativa más favorable según su opinión.

Una vez recogidos los cuestionarios, se tiene una descripción de las alternativas en función de sus atributos y se conoce cuál es la elección en cada caso. Para representar el proceso de elección realizado para el conjunto de alternativas  $m$ , se define una variable binaria,  $\delta_{mk}$ , para cada alternativa, que toma el valor 1, si ésta ha sido elegida y el valor 0 en el caso contrario.

Así, se definen las siguientes expresiones:

$$P_k^m \delta_{mk} = P_k^m \quad \text{Ecuación 4-13}$$

si el individuo, para el conjunto  $m$ , eligió la alternativa  $k$ , y para las alternativas  $j$  no elegidas:

$$P_j^m \delta_{mj} = 0 \quad \text{Ecuación 4-14}$$

O de forma análoga, la siguiente expresión, para la alternativa  $k$  elegida:

$$(P_k^m)^{\delta_{mk}} = P_k^m \quad \text{Ecuación 4-15}$$

Y para el caso de las alternativas  $j$  no elegidas:

$$(P_j^m)^{\delta_{mj}} = 1 \quad \text{Ecuación 4-16}$$

Para un conjunto de observaciones, suponiendo independencia entre las elecciones

realizadas, la probabilidad de que se hayan realizado los resultados observados es el producto de las probabilidades de selección de las alternativas elegidas. Para ajustar los modelos *multilogit* se estiman los parámetros  $\beta_i$  que maximizan la probabilidad de que la muestra sea la observada en las encuestas. Este método de estimación es conocido como *criterio de máxima verosimilitud*.

Se desarrolla a continuación el criterio de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros  $\beta_i$ .

Empleando las variables binarias definidas, la probabilidad de que en el conjunto de alternativas  $m$  el individuo haya elegido la alternativa  $k$  se define por la siguiente expresión:

$$P_k^m = \sum_{\text{alternativa } j} P_j^m \delta_{mj} \quad \text{Ecuación 4-17}$$

O de forma análoga,

$$P_k^m = \prod_{\text{alternativa } j} (P_j^m)^{\delta_{mj}} \quad \text{Ecuación 4-18}$$

Para el desarrollo que se va a realizar, resulta más conveniente utilizar la expresión reflejada en segundo lugar (Ecuación 4-18). Con ello, la probabilidad de la muestra observada queda como se refleja en la Ecuación 4-19:

$$P[\text{Elecciones de la muestra}] = \prod_{\text{situaciones } m} P_k^m \quad \text{Ecuación 4-19}$$

Utilizando la Ecuación 4-18, la función de probabilidad de la muestra observada, denominada de máxima verosimilitud y designada habitualmente con la letra L, puede escribirse como:

$$L = \prod_{\text{situaciones } m} \prod_{\text{alternativas } j} (P_j^m)^{\delta_{mj}} \quad \text{Ecuación 4-20}$$

Para el caso lineal, en el que la función L es función de los parámetros  $\beta_i$ , la estimación del modelo, es un problema de optimización, consistente en maximizar la función definida L para el conjunto de parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ . Es habitual

maximizar la función logaritmo de L, que alcanza su máximo valor para el mismo conjunto de los parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ .

El problema se define como un problema de maximización sin restricciones expresado como sigue:

$$\underset{\beta_i}{\text{Maximizar}} [L] = \underset{\beta_i}{\text{Maximizar}} \left[ \prod_m \prod_j (P_j^m)^{\delta_{mj}} \right] \quad \text{Ecuación 4-21}$$

Tomando el logaritmo neperiano, el problema de optimización puede expresarse con la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} \underset{\beta_i}{\text{Maximizar}} [\ln L(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)] \\ = \underset{\beta_i}{\text{Maximizar}} \left[ \sum_m \sum_j \delta_{mj} \ln(P_j^m) \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4-22}$$

Utilizando la expresión lineal de la parte determinista para la utilidad, indicada en la Ecuación 4-2, y sustituyendo en la función de máxima verosimilitud las probabilidades, la función L a maximizar, en función del conjunto de parámetros a estimar,  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ , es la siguiente:

$$\begin{aligned} L(\beta) &= \sum_m \sum_j \delta_{mj} \ln \left( \frac{e^{\beta X_j^m}}{\sum_k e^{\beta X_k^m}} \right) \\ &= \sum_m \sum_j \delta_{mj} \left[ \beta X_j^m - \ln \left( \sum_k e^{\beta X_k^m} \right) \right] \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4-23}$$

Dado que se han tomado logaritmos de las probabilidades, la función  $L(\beta)$  es siempre negativa. Además, es una función cóncava (Kirk 1995). El ajuste del modelo *multilogit* es por tanto un problema de optimización no lineal sin restricciones de una función cóncava con L variables, cuya solución es el conjunto de parámetros buscados,  $\beta^*(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ .

### 4.1.5 Criterios de eficiencia en el diseño de los cuestionarios

Como se acaba de indicar, el ajuste del modelo es un problema de optimización en el que se quiere maximizar la probabilidad de una muestra observada, ajustando los parámetros ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L$ ) que definen la componente determinista de la utilidad.

Dicho esto, resulta claro que es imprescindible tener una muestra observada representativa de la realidad. Esta muestra se obtiene mediante la realización de encuestas a un grupo de decisores. Es, por tanto, fundamental para la calidad de los resultados obtenidos que la muestra elegida sea adecuada.

Parece lógico pensar, que la muestra presentada a los decisores para poder realizar el ajuste del modelo *multilogit* debería ser completa, esto es, que se evalúen todas las alternativas posibles. Cuando en los cuestionarios destinados a recoger la opinión de los decisores se presentan todas las alternativas posibles, se dice que se ha realizado un diseño factorial completo.

Sin embargo, cuando el conjunto de atributos que caracterizan las alternativas es elevado, o cuando no siendo así, pueden existir varios valores diferentes para los atributos, el número de alternativas posibles es muy numeroso, lo que hace difícil recoger en los cuestionarios todas las alternativas posibles, pues la cantidad de preguntas a contestar sería excesiva. A modo de ejemplo, si cada alternativa está constituida por 7 atributos, tres de los cuales pueden presentar tres niveles diferentes, dos de ellos cuatro niveles y otros dos de dos niveles, el número de combinaciones posibles asciende a,

$$3^3 \times 4^2 \times 2^2 = 1.728$$

Si se realizaran grupos de dos alternativas para realizar la selección, sería necesario evaluar 864 escenarios. Suponiendo que se dispone de un conjunto de 10 decisores, cada uno de ellos debería evaluar más de 80 posibilidades, lo cual resulta completamente excesivo.

Para solventar esta cuestión, es habitual definir cuestionarios que contengan un menor número de combinaciones. Esto se conoce como diseño factorial fraccional del conjunto de atributos (Muñuzuri 2003).

Para poder hacer un diseño factorial fraccionario, se debe garantizar ciertas condiciones de modo que los resultados obtenidos sean lo más exactos posibles. Para ello (Muñuzuri 2003) propone la utilización de los criterios de (Zwerina 1997),

mediante la utilización de la matriz de covarianzas de los parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$  definida por (McFadden 1986), tal y como se indica en la siguiente expresión (Ecuación 4-24):

$$\Sigma_p = (Z'PZ)^{-1} \quad \text{Ecuación 4-24}$$

Donde P es una matriz diagonal de orden  $M$ , siendo  $M$  el número de alternativas a incluir en el diseño factorial, en la que el elemento  $i$  de la diagonal es la probabilidad de elegir la alternativa  $i$  dentro de su conjunto de decisión. Por otra parte, Z es una matriz de orden  $M \times L$ , siendo  $L$  el número de atributos que caracterizan a las alternativas, donde cada elemento viene dado por la expresión:

$$z_{ji}^m = x_{ji}^m - \sum_{k=1}^N x_{ji}^m P_k^m \quad \text{Ecuación 4-25}$$

Donde:

- $j = 1, 2, \dots, N$ , siendo  $N$  el número de alternativas en cada conjunto de decisión  $m$ .
- $i = 1, 2, \dots, L$ , con  $L$  igual al número de atributos que caracterizan a las alternativas.
- $x_{ji}^m$ , es el valor que toma al atributo  $i$  en la alternativa  $j$  del conjunto de decisión  $m$ .
- $P_k^m$ , es la probabilidad del que la alternativa  $k$  resulte elegida en el conjunto de decisión  $m$ .

Por tanto, cada elemento de la matriz Z representa la diferencia entre el valor que toma el atributo  $i$  de la alternativa  $j$  y el valor medio de dicho atributo en el conjunto de alternativas, todo ello para el conjunto de decisión  $m$ . Con ello, cada elemento de Z es una medida de la centralidad de los atributos en las alternativas que componen el conjunto de decisión  $m$ .

Como se puede deducir, la matriz de covarianzas es por tanto una matriz cuadrada de orden  $L$ , pudiendo calcularse su determinante.

La propuesta de (Zwerina 1997) es la utilización del menor valor para el índice denominado *error tipo D* o  $D_{error}$ , que se obtiene como se indica en la siguiente

ecuación (Ecuación 4-26).

$$D_{error} = \det(\Sigma_p)^{1/L}$$

Ecuación 4-26

La minimización del  $D_{error}$  se consigue a través de la aplicación de cuatro criterios de eficiencia. Un mayor grado de cumplimiento de estos criterios implica un menor valor del  $D_{error}$  (Muñuzuri 2003):

- Criterios relativos a la estructura del diseño fraccional entre conjuntos de decisión (Zwerina 1997):
  - Equilibrio de niveles: Cada uno de los posibles niveles que puede tomar un atributo debe aparecer el mismo número de veces en el cuestionario.
  - Ortogonalidad: para cada par de atributos, cada una de las combinaciones posibles debe aparecer el mismo número de veces.

Estos dos criterios son cumplidos de manera directa en el diseño factorial completo de cuestionarios.

- Criterios relativos a la estructura dentro de cada conjunto de decisión (Zwerina 1997):
  - Mínima coincidencia de niveles: la probabilidad de que un nivel de atributo se repita en las alternativas en un mismo conjunto de decisión debe ser mínima.
  - Equilibrio de las utilidades: las utilidades de las alternativas dentro de un mismo conjunto de decisión deben ser lo más parecidas posibles, con el fin de que la elección realizada ofrezca información.

Como se puede apreciar, el único criterio que depende del valor de los parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ , es el criterio de equilibrio de utilidades, ya que estos parámetros son los utilizados para medir la utilidad de cada alternativa.

Por otra parte de la definición del  $D_{error}$  y de la definición de los términos de la matriz de covarianzas de la que se obtiene el  $D_{error}$ , (Ecuación 4-26 y Ecuación 4-25) se aprecia que éste depende de los valores tomados por los parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ , que son los parámetros que se pretende obtener con el modelo *multilogit*.

Para solventar esta dificultad, existen dos posibles enfoques (Muñuzuri, Cortés Achedad, et al. 2012):

1. El primer enfoque consiste en iniciar el proceso con unos valores de  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ . Fijados estos valores, se realiza un algoritmo de búsqueda del diseño factorial que proporcione un valor  $D_{error}$  mínimo. Obtenido el diseño factorial, se estiman los valores  $\beta^*(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$  que maximizan la probabilidad de la muestra observada con el diseño factorial escogido. Obtenidos dichos valores, se comparan con los utilizados para iniciar el proceso. Si los valores son semejantes, se da por bueno el modelo utilizado. En caso contrario se deben actualizar las  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$  iniciales con las obtenidas por el modelo y comenzar un nuevo proceso.
2. El segundo de los enfoques consiste en utilizar técnicas Bayesianas, asumiendo que los valores de  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$  tienen una distribución de probabilidad y calculando secuencialmente el  $D_{error}$ .

En cualquiera de los dos enfoques es necesario además definir un algoritmo para la definición de los diseños fraccionales que producen el  $D_{error}$ . Para el primer enfoque se puede aplicar el método clásico descrito por (Fedorov et al. 1972), que si bien no garantiza un óptimo diseño, garantiza un método razonablemente fiable de aproximación al óptimo global (Muñuzuri 2003). Posteriormente otros autores han desarrollado algoritmos de demostrada eficiencia (Zwerina et al. 1996).

En relación al segundo enfoque, existen también diversos algoritmos para la utilización de distribuciones de probabilidad para los parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ , tales como los desarrollados por (Sandor & Wedel 2002) o (Kessels et al. 2006).

Por último, existen algoritmos que son independientes al enfoque utilizado para la definición de los parámetros  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ , como el algoritmo genético desarrollado por (Muñuzuri, Cortés Achedad, et al. 2012), cuya aplicación es posible tanto para valores iniciales deterministas de las  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L)$ , como para la utilización de distribuciones de probabilidad de las mismas.

#### **4.1.6 Pasos para la aplicación de los modelos de elección discreta**

Una vez definidos todos los elementos que intervienen en los modelos de elección discreta, se resumen en este apartado los pasos a seguir para la aplicación de los



modelos de elección discreta (Louviere et al. 2000):

1. Definición del problema a modelar, especificando las alternativas, mediante la definición de variables a utilizar, y los valores que pueden tomar sus atributos.
2. Definición de la estructura del cuestionario.
3. Codificación de las variables y de sus atributos.
4. Diseño factorial completo o fraccional de las combinaciones de las alternativas.
5. Elaboración de los cuestionarios.
6. Obtención de las respuestas de los individuos.
7. Ajustes del modelo a la función de utilidad.
8. Estimación de los pesos asociados a los atributos.
9. Interpretación de los resultados.

Es importante señalar, que, como en cualquier método de evaluación, el más importante de los pasos es el último: la interpretación de los resultados obtenidos. De la correcta interpretación de los mismos depende el éxito del proceso, pues no serviría de nada tener unos resultados de excelente calidad si de ellos no puede derivarse conclusión alguna que ayude en el avance de la ciencia o para la consecución del objetivo con el que fue diseñado el proceso.

## **4.2 Proceso analítico jerárquico (AHP Analytic Hierarchy Process)**

El proceso analítico jerárquico, más conocido por sus siglas en inglés AHP (Analytic Hierarchy Process), se engloba dentro de los métodos de decisión multicriterio.

El AHP es un método que proporciona una escala de prioridades con la que obtener el orden de elección entre posibles alternativas. Este método fue desarrollado por (Saaty 1977) y ha sido ampliamente utilizado en los problemas de decisión multicriterio desde sus comienzos hasta nuestros días (Vaidya & Kumar 2006; Sipahi & Timor 2010; Forman & Gass 2001).

En las elecciones multicriterio, las diferentes actividades o alternativas deben ser valoradas según distintos objetivos, que pueden ser compartidos por todas o por algunas de las alternativas. El método propuesto por (Saaty 1977) jerarquiza el problema de decisión en subproblemas homogéneos, en base a los distintos objetivos, criterios, subcriterios y alternativas que quieran considerarse. El problema se reduce a valorar el aporte de cada criterio al objetivo final y los pesos o importancias de las alternativas respecto a cada uno de los criterios que se plantean en el problema.

El método construye una matriz de comparación por pares cuyos componentes indican la fuerza con la que una alternativa domina a otra en relación al criterio que se está valorando, o el grado de consecución que aporta un criterio respecto a otro en relación a un objetivo.

Si  $w_i$ , con  $i=1, \dots, n$ , y  $n$  el número de alternativas, indica el peso o importancia de cada alternativa respecto a un criterio, cada elemento de la matriz de comparación,  $a_{ij}$ , es una estimación del valor relativo  $w_i/w_j$ . Así la matriz de comparación por pares queda de la siguiente manera (véase Ecuación 4-27).

$$A = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & \dots & w_1/w_j & w_1/w_n \\ \vdots & \dots & w_i/w_j & \vdots \\ w_n/w_1 & \dots & w_n/w_j & w_n/w_n \end{pmatrix} \quad \text{Ecuación 4-27}$$

Una vez conocida esta matriz de comparación, el método AHP obtiene los pesos o prioridades basándose en el teorema de Perron-Frobenius que indica que toda matriz positiva e irreducible posee un autovalor de módulo máximo,  $\lambda_{m\acute{a}x}$ , que tiene asociado un autovector positivo único. Este autovector puede normalizarse de forma que la suma de sus componentes sea la unidad. Por tanto, este vector, normalizado y único, es el vector de importancias o pesos de cada alternativa respecto al criterio elegido. Las matrices construidas en el método AHP cumplen las condiciones necesarias (positivas e irreducibles) para la aplicación del teorema de Perron-Frobenius.

Una de las ventajas del método AHP es que puede tener en consideración tanto aspectos cuantitativos como cualitativos, convirtiendo estos aspectos cualitativos en

una escala cuantitativa. Esta flexibilidad y la simplicidad matemática para su aplicación han hecho de este método de decisión uno de los más utilizados en numerosos campos de investigación tales como la ingeniería, la alimentación, la gestión de empresas, la salud y la gobernanza (Sipahi & Timor 2010).

Ciertos autores inciden en que la validez del método se basa en comprender las tres funciones principales del método (Forman & Gass 2001):

- su capacidad para estructurar de manera sencilla la complejidad mediante la jerarquización del problema,
- la medición según una escala de proporción y
- su capacidad de síntesis.

Saaty buscaba una manera sencilla de simplificar la complejidad de los problemas con los que debe enfrentarse un decisor. El autor observó algo común en cómo el ser humano afronta la complejidad: dividiendo en pequeños conjuntos de factores homogéneos cada problema. Esta jerarquización de los problemas según diversos autores es una de las claves del éxito del método (Forman & Gass 2001; Osorio Gómez & Orejuela Cabrera 2008).

Por otra parte, la comparación entre pares mediante una escala de proporción posibilita la multiplicación de los pesos o prioridades desde el nivel más alto al más bajo de la jerarquía, cosa que no sería posible con otras escalas que no tuvieran esta propiedad de proporción, como sería una escala nominal, ordinal o mediante intervalos. Así, los pesos o prioridades del nivel más bajo de la jerarquía, que son las posibles alternativas a considerar, pueden obtenerse como múltiplos de los pesos de los niveles superiores, lo que sería un sinsentido en el caso de otro tipo de escala. Se muestra a continuación la escala de proporción original propuesta por (Saaty 1990) y la utilizada en la gran mayoría de las aplicaciones del método AHP (ver Tabla 4-2). Para generar los pesos, se le pide al decisor que, conforme a esta escala, indique la importancia relativa, la preferencia o la probabilidad (en función de si se están evaluando objetivos, alternativas o escenarios). Por otra parte, al ser una escala proporcional, resulta adimensional. Otra ventaja adicional, es que los juicios de valor relativos suelen ser más precisos que los absolutos.

Tabla 4-2: Escala de valoración. Fuente: (Saaty 1990)

Escala	Definición	Explicación
1	Igual de importantes	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Moderada importancia de un factor frente a otro	La experiencia y la razón favorecen a una opción frente a otra
5	Fuerte importancia de un factor frente a otro	La experiencia y la razón favorecen a una opción frente a otra
7	Elevada importancia de un factor frente a otro. Demostrable	Una actividad está fuertemente favorecida frente a otra y su dominancia está demostrada.
9	Absolutamente importante	La experiencia favorece a una actividad frente a otra al nivel más elevado al que puede hacerse esta afirmación
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Valores intermedios.
<b>Recíprocos</b>	Si a la actividad i se le ha asignado uno de los anteriores valores al compararse con j, entonces j tiene el valor recíproco al compararse con i.	

La última de las tres funciones principales del método es la capacidad de síntesis. Aunque el método produce un análisis (descomposición en partes), como indica su nombre, esta descomposición en factores está orientada a la resolución conjunta del problema. Es decir, a la composición del todo como adición de sus partes. No existe ninguna otra metodología que ayude a la síntesis de un problema complejo como lo hace el método AHP (Forman & Gass 2001).

### 4.2.1 Etapas en la aplicación del método AHP

El objetivo de este método, como se ha comentado anteriormente, es establecer las preferencias de un conjunto de elementos o alternativas para resolver un problema de decisión en entornos multicriterio. El método AHP establece un proceso jerárquico que descompone un problema complejo y multidimensional en varios problemas sencillos unidimensionales. Gráficamente esta descomposición puede mostrarse tal y como refleja la siguiente figura (Figura 4-2).

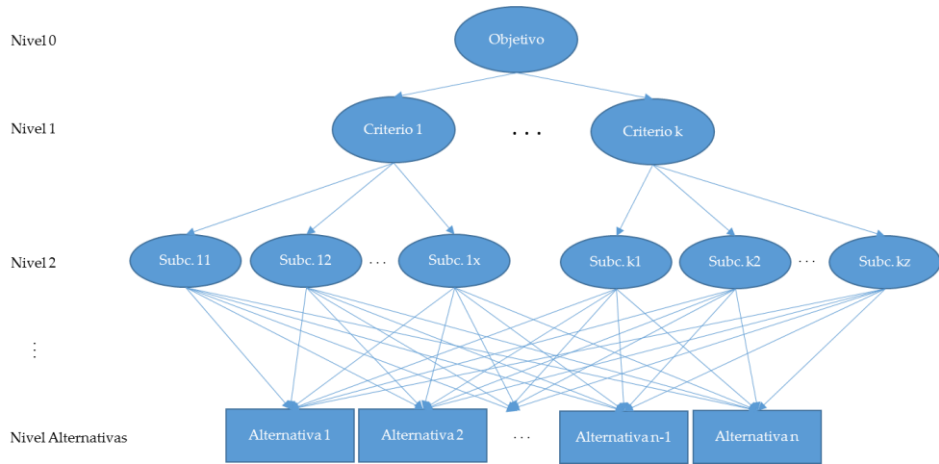


Figura 4-2: Representación gráfica de jerarquías para método AHP. Fuente: Elaboración propia

Se detallan a continuación las etapas en las que puede dividirse la aplicación del método.

### Etapas 1. Definición del problema

La primera etapa para la utilización del método AHP es la definición del problema que se quiere resolver. Especialmente deben detallarse de forma clara el objetivo perseguido, los criterios y subcriterios que se van a considerar y las posibles alternativas entre las que debe elegir el decisor. Se deben considerar también todos los actores que influyen en las posibles alternativas y los grupos de interés a los que afectará la decisión.

### Etapas 2. Definición de la jerarquía del problema

La segunda etapa es la descomposición del problema según la definición anterior para elaborar el árbol de jerarquía del problema. Se debe obtener la jerarquía completa, teniendo especial atención a los grupos de criterios y subcriterios que se apliquen. Se debe cumplir que cada grupo de criterios y subcriterios que van a ser

comparados sean homogéneos. Al finalizar esta etapa debe obtenerse una representación jerárquica del problema similar a la presentada en la figura anterior (Figura 4-2).

### Etapa 3. Elaboración de matrices de comparación por pares

Una vez definida la jerarquía del problema, se realizan las matrices de comparación por pares. Estas matrices indican en una escala proporcional (como puede ser la escala definida por (Saaty 1990) presentada anteriormente (Tabla 4-2)), cuánto más importante es un criterio respecto a otro en relación a la consecución del objetivo perseguido. En el caso de que existan diversos niveles de criterios, para cada nivel jerárquico debe hacerse una matriz de comparación por pares.

A continuación, se deben elaborar las matrices de comparación de las alternativas con respecto a cada criterio establecido. Se realizará una matriz de comparación de alternativas para cada criterio.

### Etapa 4. Cálculo de los pesos relativos de los elementos de cada nivel.

Obtenidas estas matrices, se calculan los vectores de priorización de los criterios y subcriterios, determinando la importancia que tiene cada criterio en la consecución del objetivo o la aportación de cada criterio a su criterio anterior.

Análogamente deben calcularse los vectores de prioridad de cada alternativa respecto al último nivel jerárquico que se haya establecido. Estos vectores indican cómo de importante es una alternativa frente a otra en relación a cada criterio o subcriterio que exista en el último nivel jerárquico.

El vector de priorización de los criterios y subcriterios, coincide con el autovector asociado al autovalor principal de la matriz de comparación por pares (Saaty 1977).

### Etapa 5. Obtención y validación de los resultados.

Para obtener el resultado, es decir, la prioridad de cada alternativa, se multiplica la matriz compuesta por los vectores de prioridad de cada alternativa por columnas, por el vector de prioridades de los criterios. Con ello se obtiene el vector de prioridad de las alternativas, que indica el orden de prelación a la hora de elegir entre las

distintas alternativas.

Para dar por válidos los resultados del método, es necesario comprobar que las matrices de comparación son consistentes. Es decir, que las matrices de comparación por pares, que representan los juicios de valor de los decisores, cumplen las condiciones de reciprocidad y proporcionalidad.

Estas propiedades son esenciales para dar por válidos los juicios emitidos por los expertos. Las matrices son recíprocas si se cumple la Ecuación 4-28:

$$a_{ij} = 1/a_{ji} \quad \forall i, j \quad \text{Ecuación 4-28}$$

Ello se debe a la propia definición de la matriz de comparación por pares:

$$a_{ij} = w_i/w_j \quad \text{y} \quad a_{ji} = w_j/w_i$$

Debido a la forma de obtener la matriz de comparación por pares, sólo se rellena la diagonal superior de la matriz, siempre se satisface la condición de reciprocidad.

Por otra parte, se dice que la matriz es consistente si se cumple:

$$a_{jk} = a_{ik}/a_{ij} \quad \forall i, j, k \quad \text{Ecuación 4-29}$$

Para comprobar si se satisface la consistencia de las matrices, (Saaty 1987) propone determinar la ratio o proporción de consistencia, cuyo valor debe ser menor o igual a 0,10 para que la matriz sea consistente.

La ratio de consistencia se puede obtener como se indica en las siguientes ecuaciones (véase Ecuación 4-30 y Ecuación 4-31) (Saaty 1990).

$$\text{Proporción de consistencia} = \frac{IC}{IA} \leq 0,10 \quad \text{Ecuación 4-30}$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 4-31}$$

Donde  $IC$  es el índice de consistencia, obtenido como indica la Ecuación 4-31, e  $IA$  indica el índice aleatorio.

El índice aleatorio,  $IA$ , representa el valor del índice de consistencia si la matriz de comparación por pares se hubiera completado de manera aleatoria. Obviamente este

valor depende del orden de la matriz. Se muestran a continuación los valores del IA para los distintos órdenes de las matrices propuestos por (Saaty 1987) (véase Tabla 4-3).

Tabla 4-3: Índice aleatorio en función de n. Fuente: (Saaty 1987)

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Índice aleatorio (IA)</b>	0	0	0,58	0,90	1,24	1,41	1,45	1,49

Como se ha indicado la proporción de consistencia debe ser menor de 0,10 para que los resultados puedan darse por válidos. Una vez validados los resultados, se puede dar la aplicación del método por terminada.

#### 4.2.2 Extensiones del método AHP

El método AHP ha sido desarrollado desde sus comienzos dando lugar a diversas variaciones del mismo.

La primera extensión del método, desarrollada también por el mismo autor, es el modelo de análisis jerárquico en red, conocido por sus siglas en inglés, ANP Analytic Network Process (Saaty 2004). Este modelo relaja la hipótesis de la linealidad de la estructura jerárquica, admitiendo que es posible que existan relaciones entre los criterios y sub-criterios de niveles no consecutivos, así como la retroalimentación en los criterios. De este modo la jerarquía queda representada mediante una red, donde existen interrelaciones entre los nodos y donde es posible que existan arcos de un nodo a él mismo. Se muestra a continuación la comparación entre la jerarquía analítica lineal utilizada en el método AHP y la jerarquía en red utilizada en el método ANP (véase Figura 4-3).



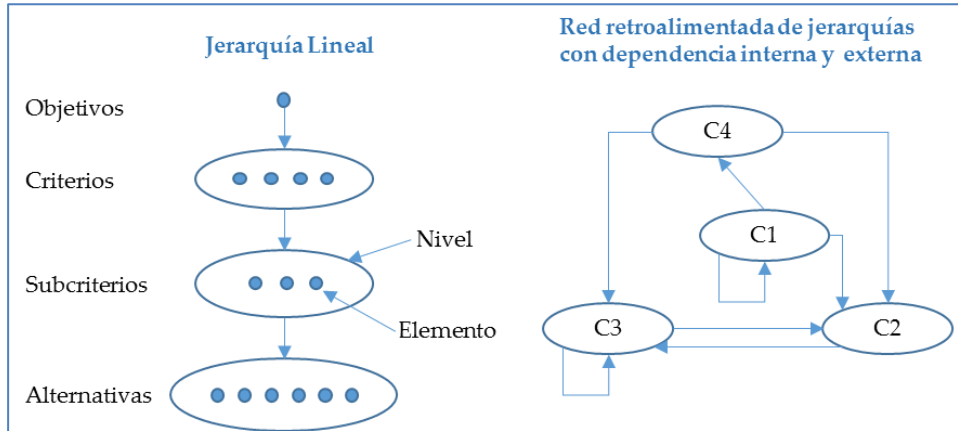


Figura 4-3: Comparación entre la estructura de jerarquía lineal y en red. Fuente: (Saaty 2004)

En la jerarquía en red, los arcos entre dos nodos, por ejemplo, del nodo C4 al C2, indica la dependencia externa de los elementos en C2 respecto a los elementos en C4 en relación a alguna propiedad común. Los arcos de doble dirección, como por ejemplo entre los nodos C2 y C3, indican la realimentación entre los elementos de ambos nodos. El arco que entra y sale de un mismo nodo, como por ejemplo el arco sobre C1, indica la dependencia interna entre los elementos en C1 en relación a alguna propiedad común.

Otra de las extensiones más utilizadas es la aplicación de la teoría de los conjuntos difusos al método AHP, conocido como Fuzzy AHP o FAHP. A diferencia de la teoría clásica de los conjuntos, la teoría de conjuntos difusos permite la evaluación gradual de pertenencia de un elemento a un conjunto. La teoría difusa fue desarrollada por (Zadeh 1965). Aunque su desarrollo teórico y las primeras aplicaciones se realizaron en sus comienzos en el campo de la ingeniería eléctrica, posteriormente ha sido ampliamente utilizada en todos los campos de la ciencia.

La aplicación de la teoría difusa al método AHP fue propuesta por (van Laarhoven & Pedrycz 1983), quien propuso la utilización de una función de pertenencia triangular para los elementos de la matriz de comparación por pares. De este modo, los juicios expresados por el decisor no son opiniones ciertas, sino que son juicios de valor probables, lo que puede ser más acertado en entornos de decisión de incertidumbre.

Posteriormente a este primer desarrollo, muchos autores han propuesto variaciones del método AHP con funciones de pertenencia. Las tres funciones de pertenencia más utilizadas en los métodos FAHP son la función triangular, la función trapezoidal y la Gaussiana, siendo esta última la menos utilizada (Kubler et al. 2016).

### **4.2.3 Aplicaciones del método AHP**

La validez del proceso analítico jerárquico queda demostrada por la enorme aceptación y aplicación en el mundo científico desde su desarrollo hasta la actualidad. Su flexibilidad y su simplicidad matemática han hecho que este método sea uno de los métodos de decisión más elegidos en el campo de la investigación en diferentes áreas tales como ingeniería, alimentación, análisis empresarial, ciencias de la salud y gobernanza (Sipahi & Timor 2010). Son diversos los autores que destacan que uno de los métodos de decisión multi-criterio más utilizado en la literatura científica es el método AHP (Felice & Petrillo 2013; Russo & Camanho 2015; Singh 2016). Siendo además utilizado en experiencias reales en muy diversos campos (Forman & Gass 2001).

Para dar un ejemplo de la importancia del método AHP dentro de los métodos de decisión multi-criterio, tan sólo en el campo de las ciencias ambientales, existen más de 3000 artículos en la base de datos *Web of Science* que hacen referencia a problemas de decisión multi-criterio (Cegan et al. 2017). Según estos autores 1773 de estos artículos utilizan el método AHP o ANP. De entre estos trabajos, 587 sólo utilizan el método AHP. Siendo el resto trabajos que utilizan el método AHP y uno o varios métodos de decisión adicionales. La conclusión de estos autores es que el método AHP tiene una frecuencia del 49% de uso en los problemas de decisión multi-criterio.

Respecto a la utilización del método Fuzzy AHP, según recientes estudios de aplicación de métodos de decisión multi-criterio, el más utilizado de manera individual es el AHP seguido del FAHP (Mardani et al. 2015).

Por todo lo anterior, a la hora de abordar un problema de decisión multicriterio, el método AHP es una de las metodologías a considerar más apropiadas, tanto por la bondad de sus cualidades, robustez y sencillez de aplicación, como por su aceptación en el ámbito de la investigación científica.

### 4.3 Modelo de ajuste por regresión lineal múltiple

El análisis de regresión es una técnica estadística para investigar o modelar la relación entre un conjunto de variables.

Generalmente el análisis de regresión trata de explicar los valores observados de una variable dependiente, denominada  $y$ , en función de un conjunto de  $k$  variables independientes, denominadas variables explicativas o regresores  $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ .

La forma habitual de presentación del modelo de regresión lineal múltiple es la Ecuación 4-32.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \text{Ecuación 4-32}$$

Donde  $\varepsilon$  representa el error estadístico entre la variable observada y la ecuación que se utilizará para estimar los valores de la variable independiente  $y$ . Si se supone que la esperanza estadística del error es nula y su varianza  $\sigma^2$ , para una  $X$  fijada, el valor esperado de la variable  $y$  será:

$$\begin{aligned} E(y|x) &= \mu_{y|x} = E(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon) = \\ &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4-33}$$

Para la varianza de la variable  $y$  se tiene,

$$\begin{aligned} \text{Var}(y|x) &= \sigma^2_{y|x} = \text{Var}(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon) \\ \text{Var}(y|x) &= \sigma^2 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4-34}$$

Esto implica que, para cada valor de  $X(x_1, x_2, \dots)$ , existe una distribución de probabilidades, cuya media es el valor esperado  $y$ , y su varianza  $\sigma^2$  (Ecuación 4-33 y Ecuación 4-34). Habitualmente, el conjunto de parámetros  $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j, \dots, \beta_k)$  son desconocidos y deben ser estimados con un conjunto de observaciones  $(y_i, X_i)$ . Este conjunto de puntos pueden ser obtenidos mediante un estudio observacional, en base a un conjunto de datos históricos o mediante el diseño de un experimento

controlado, definido para obtener los datos requeridos. La mejor opción suele ser definir un experimento ex profeso para recoger los datos. Al definir el experimento, el analista es capaz de controlar las condiciones de recolección de datos, puede separar los efectos de cada factor, etc., obteniéndose datos más apropiados y con menos errores para ello (Montgomery et al. 2002).

La utilización de modelos de regresión puede perseguir diferentes finalidades, las más habituales son: descripción de los datos, estimación de parámetros, predicción y estimación o control (Montgomery et al. 2002).

Supóngase que se desea estimar los parámetros  $(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j, \dots, \beta_k)$ , y que se posee un conjunto de  $n$  observaciones  $(y_i, X_i)$ , con  $n > k$ . Además, se supone que el comportamiento de la nube de puntos puede ser modelada por una ecuación lineal en los parámetros buscados como la presentada en la Ecuación 4-32. Además, se mantiene el hecho de que la esperanza del error es nula, la varianza del mismo es  $\sigma^2$  y que los errores no están correlacionados.

En estas condiciones, la estimación de los parámetros del modelo, se puede realizar mediante el método de mínimos cuadrados, tal y como se detalla en el siguiente apartado.

### 4.3.1 Estimadores de mínimos cuadrados

En el desarrollo de este apartado, se va a suponer que las variables dependientes observadas  $X(x_1, x_2, \dots)$  pueden obtenerse sin error y que son variables no aleatorias. No obstante, bajo ciertas condiciones estas hipótesis pueden relajarse y los resultados siguen siendo válidos. Estas condiciones son dos: que las observaciones de cada  $x_i$  sean independientes, y que la distribución no dependa de los parámetros  $\beta_j$  o de  $\sigma^2$ .

El modelo muestral de regresión correspondiente al ajuste indicado puede escribirse como se indica (Ecuación 4-35):

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ecuación 4-35}$$

La función de mínimos cuadrados se presenta a continuación (Ecuación 4-36).

$$S(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_j, \dots, \beta_k) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left( y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4-36}$$

La estimación de mínimos cuadrados, minimiza la función  $S$  respecto a  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ , derivando e igualando a cero la función respecto a cada parámetro. Con ello se obtienen las siguientes ecuaciones de mínimos cuadrados (Ecuación 4-37 y Ecuación 4-38):

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_0} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( \hat{y}_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 4-37}$$

y

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k} = -2 \sum_{i=1}^n \left( \hat{y}_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij} \right) x_{ij} = 0 \quad \text{Ecuación 4-38}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, k$$

Estas ecuaciones pueden normalizarse obteniéndose las denominadas ecuaciones normales de mínimos cuadrados. Este conjunto posee  $p = k + 1$  ecuaciones, que suele ser más cómodo presentar y manejar en forma matricial.

Sea,  $y$  un vector de  $n \times 1$  componentes, las  $n$  observaciones  $y_i$ ,  $X$  es una matriz de  $n \times p$  de los niveles de las variables dependientes,  $\beta$  un vector de  $p \times 1$  coeficientes de regresión y  $\varepsilon$  un vector de  $n \times 1$  errores aleatorios. La función de mínimos cuadrados puede exponerse en forma matricial tal y como sigue (Ecuación 4-39).

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon^t \varepsilon = (y - X\beta)^t (y - X\beta) \quad \text{Ecuación 4-39}$$

Realizando el producto y teniendo en cuenta que el producto  $\beta^t X^t y$  es un escalar y que su transpuesta es el mismo valor, la ecuación matricial que minimiza la función de mínimos cuadrados puede expresarse con la siguiente ecuación (Ecuación 4-40).

$$\left. \frac{\partial S}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2X^t y + 2X^t X \hat{\beta} = 0 \Rightarrow X^t X \hat{\beta} = X^t y \quad \text{Ecuación 4-40}$$

Por lo que el estimador de mínimos cuadrados para los parámetros buscados es (Ecuación 4-41):

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad \text{Ecuación 4-41}$$

Así, el modelo ajustado de regresión se escribe como sigue (Ecuación 4-42):

$$\hat{y} = x^t \hat{\beta} = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_j \quad \text{Ecuación 4-42}$$

Y el vector de valores ajustados  $\hat{y}_i$ , correspondiente a los valores observados  $y_i$ , se puede obtener con la expresión (Ecuación 4-43):

$$\hat{y} = X \hat{\beta} = X(X^t X)^{-1} X^t y = Hy \quad \text{Ecuación 4-43}$$

La matriz H, se ha definido como  $X(X^t X)^{-1} X^t$  es una matriz  $n \times n$ , que se suele denominar matriz de sombrero, cuyas propiedades son importantes en el análisis de regresión.

A la diferencia entre el valor real para la observación  $i$ ,  $y_i$ , y el valor ajustado,  $\hat{y}_i$ , se le denomina residuo, residual o valor residual ( $e_i$ ), obteniéndose como se indica a continuación (Ecuación 4-44).

$$y = \hat{y} + e \quad \text{Ecuación 4-44}$$

El vector de residuales puede expresarse con otras formulaciones, que pueden resultar de gran utilidad (Ecuación 4-45):

$$e = y - X\hat{\beta} = y - Hy = (1 - H)y \quad \text{Ecuación 4-45}$$

Como se detallará más adelante, los residuos o valores residuales serán de importancia a la hora de analizar la adecuación al modelo de regresión ajustado.

### 4.3.2 Propiedades de los estimadores de mínimos cuadrados

Las propiedades de los estimadores de mínimos cuadrados se pueden demostrar con facilidad.

En primer lugar, en relación al sesgo del estimador, teniendo en cuenta que se ha supuesto que  $E(\varepsilon) = 0$  y que la matriz  $(X^tX)^{-1}(X^tX) = 1$  se demuestra que el estimador de mínimos cuadrados  $\hat{\beta}$  definido es insesgado (Ecuación 4-46):

$$\begin{aligned} E(\hat{\beta}) &= E[(X^tX)^{-1}X^ty] \\ &= E[(X^tX)^{-1}X^t(X\beta + \varepsilon)] \\ &= E[(X^tX)^{-1}(X^tX)\beta + (X^tX)^{-1}X^t\varepsilon] \\ &= \beta \Rightarrow E(\hat{\beta}) = \beta \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4-46}$$

Respecto a la varianza del estimador  $\hat{\beta}$  se expresa con la matriz de covarianza. Para ello, se define la matriz  $C = (X^tX)^{-1}$ , con lo que la matriz de covarianza se obtiene de la siguiente expresión (Ecuación 4-47).

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\hat{\beta}) &= E\{[\hat{\beta} - E(\hat{\beta})][\hat{\beta} - E(\hat{\beta})]^t\} \\ \text{Cov}(\hat{\beta}) &= \sigma^2C \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4-47}$$

De este modo, la varianza de  $\hat{\beta}_j$  es  $\sigma^2C_{jj}$  y la covarianza entre  $\hat{\beta}_i$  y  $\hat{\beta}_j$  es  $\sigma^2C_{ij}$ .

Por último, cabe destacar que el teorema de Gaus-Markov establece que el estimador de mínimos cuadrados,  $\hat{\beta} = (X^tX)^{-1}X^ty$ , es el mejor estimador insesgado para  $\beta$ , donde mejor quiere decir que es el estimador de varianza mínima. Las hipótesis necesarias para que se cumpla este teorema son que la esperanza del error sea nula, que la varianza sea  $\sigma^2$  y que los errores no estén correlacionados.

Además, si los errores siguen una distribución normal, el estimador de mínimos

cuadrados es igualmente el de máxima verosimilitud, es decir, es el estimador de mayor probabilidad.

### **4.3.3 Prueba de hipótesis**

Se detallan a continuación varias pruebas de hipótesis cuyo fin es medir la bondad del ajuste por regresión múltiple, mediante la utilización de los estimadores por mínimos cuadrados. No obstante, debe aclararse, que este texto no pretende hacer una relación exhaustiva de las pruebas de bondad de los modelos de regresión, sino presentar las que se han considerado de mayor importancia y que se utilizarán como medida de la adecuación de los ajustes que se realizan en este mismo trabajo.

#### **4.3.3.1 Prueba de significancia de la regresión**

La bondad del ajuste de regresión se realiza habitualmente mediante la definición de uno o varios estadísticos. Es habitual realizar un contraste de hipótesis, donde la hipótesis nula está asociada a que el ajuste no aporta valor y se rechaza en función de los valores que alcanza un estadístico. Este caso es el de la prueba con el estadístico Fisher-Snedecor que se muestra a continuación. Seguidamente se expone otro de los estadísticos más habituales denominado coeficiente de determinación.

##### **4.3.3.1.1 Prueba con estadístico F de Fisher-Snedecor.**

Esta prueba se considera una prueba general o global de la adecuación del modelo. Su objeto es determinar si existe una relación lineal entre la variable dependiente,  $y$ , y alguna de las variables independientes o regresoras,  $x_k$ .

Para realizar el contraste de hipótesis se establece como hipótesis nula que todos los parámetros de la regresión son nulos, y como hipótesis cierta que al menos existe un valor de los parámetros distinto de cero:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$
$$H_1: \beta_j \neq 0, \text{ al menos para una } j$$

El rechazo de la hipótesis nula implica que al menos uno de los coeficientes de la regresión es no nulo. La prueba se basa en el análisis de la varianza. Para ello se definen los siguientes conceptos:



- suma total de cuadrados,  $SS_T$ ,

$$SS_T = SS_R + SS_{Res} \quad \text{Ecuación 4-48}$$

- suma de cuadrados debidos a la regresión,  $SS_R$ , y

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad \text{Ecuación 4-49}$$

- suma de cuadrados residuales,  $SS_{Res}$ , tal y como se establece en las siguientes expresiones.

$$SS_{Res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad \text{Ecuación 4-50}$$

Se puede demostrar que si es cierta la hipótesis nula, entonces  $SS_R/\sigma^2$  sigue una distribución  $\chi_k^2$ , con  $k$  grados de libertad. También puede demostrarse que  $SS_{Res}/\sigma^2$  tiene una distribución  $\chi_{n-k-1}^2$  y que  $SS_{Res}$  y  $SS_R$  son independientes (Montgomery et al. 2002).

Por tanto, puede definirse el estadístico  $F_0$  como división del valor medio de la suma de los cuadrados de regresión y el valor medio de la suma de los cuadrados residuales, tal y como se indica seguidamente (Ecuación 4-51).

$$F_0 = \frac{SS_R/k}{SS_{Res}/(n-k-1)} = \frac{MS_R}{MS_{Res}} \quad \text{Ecuación 4-51}$$

Que tiene una distribución  $F$  no central con  $k$  y  $(n-k-1)$  grados de libertad y parámetro de no centralidad definido por  $\lambda$ , con  $\lambda$  definido como se indica en la Ecuación 4-52.

$$\lambda = \frac{\beta^* X_c^t X_c \beta^*}{\sigma^2} \quad \text{Ecuación 4-52}$$

Donde  $\beta^* = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^t$  y  $X_c$  es la matriz centrada del modelo, definida por la expresión siguiente:

$$X_c = \begin{bmatrix} x_{11} - \bar{x}_1 & \cdots & x_{1k} - \bar{x}_k \\ x_{21} - \bar{x}_1 & \cdots & x_{2k} - \bar{x}_k \\ \vdots & x_{ij} - \bar{x}_j & \vdots \\ x_{n1} - \bar{x}_1 & \cdots & x_{nk} - \bar{x}_k \end{bmatrix}$$

Este parámetro de no centralidad indica que el valor observado de  $F_0$  debe ser grande para que al menos uno de los coeficiente de la regresión sea no nulo. Por tanto, para rechazar la hipótesis nula se calcula el estadístico  $F_0$  y se rechaza si se cumple la siguiente expresión (Ecuación 4-53):

$$F_0 > F_{\alpha, k, (n-k-1)} \quad \text{Ecuación 4-53}$$

Para conocer las demostraciones y una descripción más detallada de lo expuesto anteriormente puede consultarse (Montgomery et al. 2002).

Los softwares de tratamiento estadístico proporcionan de forma habitual junto con los coeficientes estimados un cuadro de análisis de la varianza, ANOVA, donde se reflejan los valores necesarios para realizar esta prueba de bondad, por lo que es una de las pruebas que deben considerarse para valorar la idoneidad del ajuste realizado.

#### 4.3.3.1.2 $R^2$ y $R^2$ ajustada

Una de las formas de valorar la adecuación del ajuste del modelo de regresión, quizás la más extendida, pero no por ello necesariamente la más adecuada, es la utilización de los estadísticos coeficiente de determinación,  $R^2$ , y coeficiente de determinación ajustado,  $R^2_{adj}$ , que se definen según las ecuaciones siguientes (Ecuación 4-54 y Ecuación 4-55).

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_{Res}}{SS_T} \quad \text{Ecuación 4-54}$$

Dado que  $SS_T$  mide la variabilidad de  $y$  sin considerar el efecto de las variables independientes,  $x_k$ , y  $SS_{Res}$  es una medida de la variabilidad de  $y$  después de haber considerado la variación de  $x_k$ , se puede decir que el estadístico  $R^2$  mide la proporción de la variación que es explicada por los regresores  $x_k$ . Por tanto, valores cercanos a 1, indican que la mayoría de la variación de  $y$  está explicada por el modelo de regresión. No obstante, como se ha indicado, este estadístico debe usarse con precaución, ya que la adición de más variables independientes aumenta el valor de  $R^2$ , sin necesidad de que ello implique una mejora real en el ajuste. De igual modo  $R^2$  aumenta con la dispersión de las variables  $x_k$  y disminuye cuando la dispersión

también lo hace, por lo que valores cercanos a 1 o a 0, pueden llevar a conclusiones no acertadas.

Por estos motivos, se debe tener precaución a la hora de evaluar la bondad de un ajuste sólo con el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Para paliar estos problemas, muchos autores sugieren la utilización del coeficiente de determinación ajustado,  $R_{Adj}^2$  (Montgomery et al. 2002)

$$R_{Adj}^2 = 1 - \frac{SS_{Res}/(n-p)}{SS_T/(n-1)} \quad \text{Ecuación 4-55}$$

En este caso se utiliza el cuadrado medio de los residuos, y el cuadrado medio de la variación total. Ello hace que el estadístico  $R_{Adj}^2$  se vea penalizado al introducir más variables independientes si estas no reducen el cuadrado medio de los residuos.

Por tanto, se puede usar este estadístico para valorar si al incluir cierta variable independiente disminuye la variabilidad total y evitar modelos sobreajustados. Por otra parte, este estadístico ayuda a evaluar y comparar modelos entre sí.

#### 4.3.3.2 Pruebas sobre coeficientes individuales de regresión.

Por último, se presenta una prueba para medir la significación de un coeficiente concreto  $\beta_j$ . En este caso el contraste de hipótesis:

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0$$

En este caso, el estadístico de prueba es la  $t$  de Student, definido por la siguiente ecuación (Ecuación 4-56):

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} \quad \text{Ecuación 4-56}$$

Donde  $\hat{\sigma}^2$  es el estimador para la varianza, que se define en la ecuación siguiente (Ecuación 4-57):

$$\hat{\sigma}^2 = MS_{Res} \quad \text{Ecuación 4-57}$$

Este estimador es un estimador insesgado para la varianza del error. Nótese que, al estar definido sobre el cuadrado medio de los residuos, este estimador depende del modelo, y cualquier incumplimiento de las hipótesis contempladas puede afectar a su validez.

Por otra parte, el término  $C_{jj}$  es el  $j$ -ésimo elemento de la diagonal de la matriz definida anteriormente  $C = (X'X)^{-1}$

En este caso, el contraste de hipótesis se basa en la

La hipótesis nula es rechazada si se cumple que el valor absoluto del estadístico  $t$ , obtenido como se ha indicado anteriormente, definido supera un umbral:

$$|t_0| > t_{\alpha, 2, (n-k-1)} \quad \text{Ecuación 4-58}$$

Siendo  $\alpha$  el nivel de significación para rechazar la hipótesis nula.

Es importante, destacar que esta es una prueba parcial, ya que este estadístico indica la contribución de una de las variables  $x_j$ , fijadas todas las demás variables  $x_i \neq x_j$  (Montgomery et al. 2002)

Una vez presentados los tres métodos de evaluación propuestos, se presenta en el siguiente apartado el análisis propuesto en esta tesis. En este análisis se evaluará la opinión de un grupo de expertos a través de unos cuestionarios de opinión. Los datos recogidos se analizarán mediante las tres metodologías de evaluación que acaban de ser presentadas.

# 5 ANÁLISIS PROPUESTO

---

Se va a exponer a continuación el análisis realizado en este trabajo. De manera general, el objetivo del análisis es contribuir al conocimiento de la aplicación de las tecnologías de la información y comunicación en la cadena de suministro.

Dada la amplitud de la cadena de suministro y de las diferentes tecnologías que pueden aplicarse, se ha concretado dicho objetivo en una parte de la gestión de la cadena de suministro considerada de vital importancia. Ésta es la gestión de almacenes que, como se vio en apartados anteriores, es clave en la gestión de la cadena de suministro. Su correcta gestión tiene efectos importantes en el conjunto completo de la cadena de suministro (Gu et al. 2007; Poon et al. 2009).

Para la consecución del objetivo general establecido, una vez particularizado en la gestión de almacenes, se han definido dos objetivos particulares. El primero de ellos es determinar la importancia de las diferentes tecnologías que pueden aplicarse en las áreas de la gestión de almacenes. En este punto es importante destacar que existen tecnologías aplicables a todo el proceso de gestión de almacenes y tecnologías particulares de una parte del proceso de gestión. En este trabajo se considerarán tecnologías tanto transversales, de aplicación general al proceso completo, como de aplicación a una parte específica del proceso.

El segundo de los objetivos está particularizado para una de las tecnologías que se consideran más importantes actualmente en la gestión de la cadena de suministro: la tecnología de identificación por radio frecuencia, RFID. Como se ha comentado anteriormente, la tecnología RFID es, a priori, una tecnología que presenta incontables ventajas para la gestión de las cadenas de suministro. Sin embargo, su

aplicación no ha resultado tan extendida como se esperaba como se comentó en el apartado correspondiente al estudio de la adopción de esta tecnología. Por ello, se desea conocer en qué partes del proceso de gestión de almacenes puede resultar más relevante.

Para alcanzar los objetivos planteados se ha diseñado un análisis en base a la opinión declarada por un panel de expertos. Es importante destacar que el número de expertos en los que se basan los análisis realizados es pequeño, en relación a otros estudios que analizan aspectos similares como los mostrados en apartados anteriores (Apartado 3.3).

Este análisis se encuentra dividido en dos partes, cada una de ellas encaminada a determinar una de las cuestiones planteadas. Por otra parte, se ha decidido aplicar tres metodologías acordes a los objetivos planteados, que aportarán soluciones a ambos objetivos.

Para cada objetivo definido se realizará un análisis, cuya estructura se detalla en el siguiente apartado. Ambos análisis son análogos en su planteamiento y estructura.

Para recoger la opinión del panel de expertos se han diseñado dos cuestionarios. Uno para cada objetivo particular definido. Como se verá en los siguientes apartados, cada uno de ellos consta a su vez de tres partes, preparadas específicamente para la metodología de análisis que va a ser utilizada. Esto proporcionará tres respuestas a la misma cuestión obtenidas con metodologías diferentes. La resolución por parte de tres metodologías distintas, además de dar una visión más amplia del problema, servirá para comparar los diferentes métodos de análisis.

La siguiente figura resume el proceso seguido para la elaboración del análisis (Figura 5-1).

Tras el diseño de los cuestionarios, se le solicitará al panel de expertos su opinión, que quedará recogida en los cuestionarios definidos para ello.

En relación al primer objetivo, la importancia de cada una de las TIC en la gestión de almacenes puede determinarse de diferentes maneras. En este estudio se ha tratado de obtener la importancia relativa que tienen cada una de ellas para un panel de expertos. Es decir, se han determinado los pesos que en una función de utilidad tendría cada una de ellas, siendo el valor máximo posible de esta utilidad la unidad.

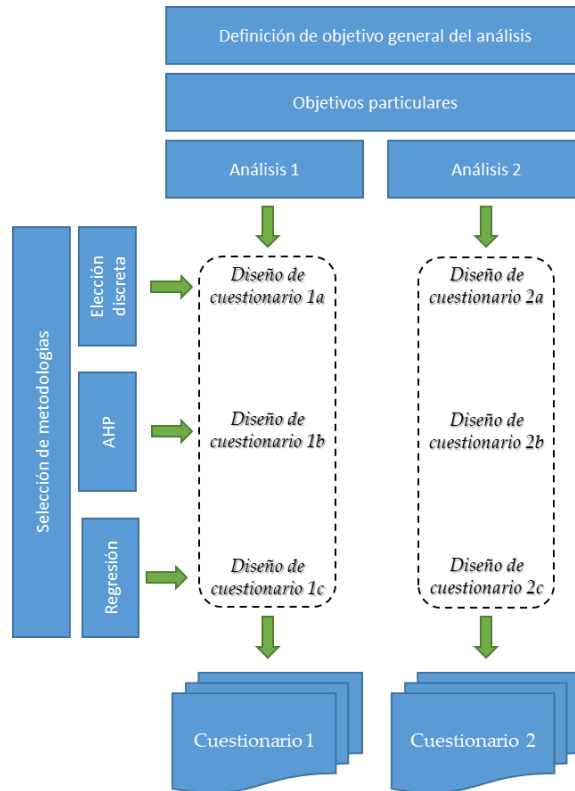


Figura 5-1: Proceso de preparación del estudio realizado

Para el segundo objetivo definido: conocer la importancia de la tecnología RFID en los distintos procesos de la gestión de almacenes, también se buscará determinar la importancia relativa del RFID en cada proceso. Determinando los coeficientes que en una función de utilidad tendría cada uno de ellos, y de forma análoga al anterior objetivo, la suma de los pesos a determinar será igual a la unidad.

En todos los casos se trata de hallar el valor que le otorgan los expertos a cada tecnología, en el primer análisis, o a la aplicación del RFID en un proceso, en el segundo. De este modo, un conjunto posible de tecnologías o aplicaciones, que representa una posible alternativa de gestión de la cadena de suministro, tendrá un valor que puede calcularse como la suma de los valores que el decisor otorga a cada tecnología o aplicación. Si se define un conjunto admisible de tecnologías  $X_j$ , como

un vector de  $k$  componentes, tal y como se muestra a continuación (Ecuación 5-1):

$$X_j = (x_{1j}, \dots, x_{ij}, \dots) \quad \text{Ecuación 5-1}$$

Donde cada componente está ligado a la existencia de una de las tecnologías en estudio, el valor que toma esta alternativa de gestión para un individuo puede calcularse como la suma de los valores que dicho individuo otorga a las componentes del vector. Esta definición coincide con el concepto clásico de utilidad. En este trabajo se propone una expresión lineal para la utilidad. Así, la expresión de la utilidad de la alternativa  $j$  se obtiene como se muestra (Ecuación 5-2):

$$\text{Utilidad}_j = \sum_k \beta_k x_{kj} \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Donde  $\beta_k$  mide la aportación a la utilidad que tiene la componente  $k$  de la alternativa  $j$  que se está caracterizando.

El uso de funciones lineales para la utilidad es ampliamente utilizado por autores de extendida trayectoria en la aplicación de modelos selección de alternativas. (Louviere 1988) afirma que el 80% aproximadamente del valor de la utilidad es aportado por los términos lineales de la función, mientras que aproximadamente un 6% es aportado por productos y términos cuadráticos, siendo el resto aportado por términos de orden superior. Por otra parte, en este análisis, como se verá en los siguientes apartados el número de variables independiente,  $x_k$ , varía entre seis y ocho, por lo que al introducir términos cuadráticos o productos de variables, el número de parámetros a estimar resultaría demasiado elevado para las posibilidades de recolección de datos que se tienen en este trabajo.

Se propone en este trabajo, estimar la importancia de las diferentes tecnologías o de la aplicación del RFID en los distintos procesos, en base a la definición de la función de utilidad definida en la Ecuación 5-2, mediante la estimación de los parámetros  $\beta_k$  con tres metodologías diferentes.

Los métodos seleccionados para dar respuesta a los objetivos planteados son:

- El ajuste mediante modelos de elección discreta.
- El método de análisis jerárquico.
- El ajuste mediante regresión lineal múltiple.



Los tres métodos seleccionados son adecuados para obtener los valores buscados  $\beta_k$ . El ajuste mediante modelos de elección discreta proporciona los pesos de la función de utilidad. Estos pesos miden la aportación de cada una de las alternativas seleccionadas a la utilidad total de la alternativa, que, si bien no tienen que sumar la unidad, pueden normalizarse, ya que las utilidades miden las importancias relativas entre los diferentes valores que pueden tomar los atributos, por lo que una variación de escala no produce variaciones en los pesos relativos.

Por otra parte, el análisis de ajuste por regresión se ha definido para que su resultado proporcione la importancia relativa de cada tecnología. Los valores obtenidos han sido normalizados

Por último, el método de análisis jerárquico proporciona los denominados vectores de prioridad, los cuales representan las importancias relativas de las alternativas analizadas, que pueden considerarse una estimación de los parámetros buscados  $\beta_k$ .

Las tres metodologías utilizadas tratan de encontrar los valores de  $\beta_k$ , donde  $\beta_k$  mide la importancia relativa que tiene la tecnología  $k$  (o la aplicación del RFID en el proceso  $k$  para el segundo análisis) analizada para el conjunto de expertos, siendo la suma de todos los valores igual a la unidad (Ecuación 5-3).

$$\sum_k \beta_k = 1$$

Ecuación 5-3

Es importante destacar, que los tres métodos utilizados suponen un valor de  $\beta_k$  independiente de la alternativa que se esté evaluando. Es decir, los valores de  $\beta_k$  son constantes en cuanto a la alternativa y también en cuanto al individuo, por lo que la solución de cada metodología proporcionará un conjunto de parámetros  $\beta_k$  comparables entre sí, con las salvedades que se comentarán posteriormente.

## 5.1 Análisis 1. Aplicaciones TIC en la gestión de almacenes

El primer análisis a realizar trata de obtener el orden de importancia de cada tecnología dentro de la cadena de suministro, en concreto en la parte relacionada con la gestión de almacenes. Como se detalla en apartados anteriores (Apartado 2.1) las tecnologías que se aplican en la gestión de almacenes pueden ser específicas de un proceso o de aplicación general. Para analizar las tecnologías de la información, éstas

se han clasificado según el proceso al que afectan, ya sea para gestionar un proceso específico del almacén o para gestión transversal del almacén. Las tecnologías analizadas, clasificadas como se ha indicado son las siguientes:

- Tecnologías para la gestión, de aplicación transversal: WMS Y LMS.
- Tecnologías de identificación: tecnología RFID y código de barras.
- Tecnologías para el proceso de preparación de pedidos: preparación de pedidos mediante voz y mediante luz (pick to voice y pick to light).
- Tecnologías para el proceso de entrada y salida, gestión de muelles: YMS.
- Tecnologías para el proceso de transporte: TMS.

El estudio realizado en el presente trabajo trata de abordar qué tecnologías son las más importantes en la gestión de almacenes. A modo de resumen, se recogen en la siguiente tabla las tecnologías que se han incluido en el estudio (véase Tabla 5-1) y que son las indicadas en el apartado dedicado a las tecnologías de la información (Apartado 2.1) y recogidas en la Figura 2-2 de dicho apartado.

*Tabla 5-1: Tecnologías aplicables en la gestión de almacenes. Fuente: (Correa Espinal et al. 2010)*

TIC	Descripción	Área de aplicación
<b>WMS</b>	Warehouse Management System	Transversal
<b>LMS</b>	Labor Management System	Transversal. Gestión laboral
<b>RFID</b>	Radio Frequency Identification	Transversal
<b>Código de barras</b>	Identificación por código de barras	Transversal
<b>Picking to voice</b>	Preparación de pedidos mediante voz	Proceso de salida: preparación de pedidos
<b>Picking to light</b>	Preparación de pedidos con señales luminosas	Proceso de salida: preparación de pedidos
<b>YMS (Yard Management System)</b>	Sistema de gestión de muelles	Proceso de entrada y salida: recepción y salidas de mercancías
<b>TMS (Transporter Management System)</b>	Sistema de gestión de flotas	Transporte de mercancías

Para abordar el tratamiento matemático de las opiniones vertidas por los expertos,

será necesario utilizar una codificación de las tecnologías. Cada tecnología en estudio será representada por una variable.

### 5.1.1 Definición de las variables del estudio

Se detalla a continuación el conjunto de variables utilizadas y cuya definición se mantendrá en todo el análisis realizado.

Para el caso de la codificación de las tecnologías de gestión de almacenes se utilizarán dos variables. Cada una de ellas asociada a una de las dos posibles tecnologías de gestión general. Las variables definidas son *GES1* y *GES2*, asociadas a la tecnología de gestión de almacenes WMS y a la gestión de la tecnología LMS respectivamente.

Para el caso de las tecnologías de identificación, se utilizarán también dos variables, denominadas *IDE1* e *IDE2*, asociadas a la tecnología de identificación del código de barras y a la tecnología RFID respectivamente.

Para las tecnologías asociadas a la preparación de pedidos, se han definido las variables *PIC1* y *PIC2*, asociadas respectivamente a las tecnologías pick to voice y pick to light respectivamente.

Para la tecnología de aplicación de la gestión de muelles, denominada con el acrónimo YMS, se ha definido una variable con el mismo nombre YMS.

Para la tecnología de gestión del transporte, también se ha definido una variable con el mismo nombre que el acrónimo utilizado: TMS.

A modo de resumen se presentan las variables utilizadas (véase Tabla 5-2)

Tabla 5-2: Variables auxiliares definidas para codificación de las tecnologías

Procesos de gestión	Gestión transversal	Identificación	Preparación de pedidos	Entradas y salidas	Transporte
Variables	GES1, GES2	IDE1, IDE2	PIC1, PIC2	YMS	LMS

Todas las variables definidas son variables discretas, cuyos valores serán 1 o -1. El valor 1 se utilizará para indicar la presencia de la tecnología a la que la variable hace referencia, el valor -1 indicará la ausencia de la tecnología en cuestión. No obstante, en el apartado correspondiente a cada metodología de evaluación se describirá de

forma más detalla la codificación particular de cada variable.

La importancia de cada tecnología será una combinación de la apreciación subjetiva de los beneficios e inconvenientes que percibe un experto. Estos beneficios podrán ser en términos de ahorro de costes, de ventajas competitivas aportadas, eficiencia, etc. Por otra parte, los inconvenientes vendrán derivados también de diversos factores, tales como inversión inicial, costes de la implantación, dificultad para adaptarse a las tecnologías ya existentes, etc. En todos los casos, los expertos proporcionan una valoración subjetiva de sus preferencias declaradas y no reveladas. Es decir, no se han podido comparar estos juicios declarados con elecciones reales realizadas por los mismos decisores.

Particularizando la ecuación anteriormente presentada (Ecuación 5-2) para este análisis, la utilidad de cada alternativa se define como se presenta a continuación (Ecuación 5-4).

$$Utilidad = \sum_k \beta_k x_{kj} = \beta_1 GES1 + \beta_2 GES2 + \beta_3 IDE1 + \beta_4 IDE2 + \beta_5 PIC1 + \beta_6 PIC2 + \beta_7 YMS + \beta_8 TMS$$

*Ecuación 5-4*

Para usar las tres metodologías que se han comentado en el apartado anterior, cada cuestionario se ha dividido en tres partes, cada una de ellas orientada a la metodología específica que se va a utilizar en su análisis.

Se expone a continuación la codificación particularizada para el proceso de elección entre alternativas discretas y la elaboración de los cuestionarios para cada una de las metodologías utilizadas.

### **5.1.2 Codificación de las variables para el modelo de elección discreta**

Como se ha comentado en el apartado dedicado a los modelos de elección discreta, éstos funcionan igualmente con valores de atributos continuos o discretos, siendo lo principal que representen la realidad de forma fehaciente, con independencia de las características de las variables.

Para poder realizar el análisis según un modelo de elección discreta, es necesario realizar una correcta definición de las variables y posteriormente una codificación adecuada de las variables definidas.

En general, para definir las variables en modelos de elección discreta los atributos que presentan  $n$  niveles, se modelan con  $n-1$  variables. En el presente estudio, existen atributos de dos y de tres niveles. Como puede observarse, la codificación que se ha presentado al inicio de este apartado (Tabla 5-2) puede adaptarse para que se cumpla este requisito.

Para ello, cada alternativa está compuesta por cinco atributos, que se corresponden a los procesos en los que pueden aplicarse las diferentes tecnologías. Cada atributo puede tomar diferentes valores, que se corresponden con las diferentes tecnologías que se aplican en cada proceso. En el caso de los tres primeros atributos existen tres posibles niveles. Para estos atributos se han definido dos variables auxiliares. Para el caso de los atributos presentados en cuarto y quinto lugar, los atributos sólo poseen dos niveles posibles, por lo que se utiliza una única variable auxiliar para cada uno de ellos.

Dado que los atributos de las alternativas representan posibles tecnologías, las variables tomarán valores discretos. Los valores tomados por éstas son (-1,1). El valor -1 se presenta en el primer nivel para todas las variables y está asociado a la ausencia de la tecnología, entendiendo la ausencia como la no implantación de esta tecnología a la solución de gestión del almacén. El valor 1 está asociado al nivel en el que el atributo toma el valor de presencia de la tecnología al que se refiere la variable, es decir, sí se implanta la solución tecnológica. Para los atributos con tres niveles, existen dos niveles con valor -1, para las variables de los niveles en los que no aparece la tecnología y un único valor 1, correspondiente a la presencia de la tecnología a la que se refiere la variable en ese nivel.

Se resume a continuación la codificación utilizada en cada caso y los valores que toman las variables que representan los niveles de los distintos atributos (véase Tabla 5-3 y siguientes hasta Tabla 5-7).

Tabla 5-3: Codificación del atributo "gestión". Variables GES1 y GES2

	Atributo	Variables auxiliares	
	Gestión transv.	GES1	GES2
Nivel 1	ST	-1	-1
Nivel 2	WMS	1	-1
Nivel 3	WMS+LMS	-1	1

Tabla 5-4: Codificación del atributo "identificación". Variables IDE1 e IDE 2

	Atributo	Variables auxiliares	
	Identificación	IDE1	IDE2
Nivel 1	ST	-1	-1
Nivel 2	Código de barras	1	-1
Nivel 3	RFID	-1	1

Tabla 5-5: Codificación del atributo "preparación de pedidos". Variables PIC1 y PIC2

	Atributo	Variables auxiliares	
	Preparación de pedidos	PIC1	PIC2
Nivel 1	ST	-1	-1
Nivel 2	Pick to voice	1	-1
Nivel 3	Pick to light	-1	1

Tabla 5-6: Codificación del atributo "entradas y salidas". Variable YMS

	Atributo	Variable auxiliar
	Entradas y salidas	YMS
Nivel 1	ST	-1
Nivel 2	YMS	1
Nivel 3	NA <sup>1</sup>	NA

<sup>1</sup> No aplica

Tabla 5-7: Codificación del atributo "transporte". Variable TMS

	Atributo	Variable auxiliar
	Transporte	TMS
Nivel 1	ST	-1
Nivel 2	TMS	1
Nivel 3	NA	NA

### 5.1.3 Evaluación mediante modelos de elección discreta

La primera parte del cuestionario está enfocada al análisis mediante selección de alternativas con modelos de elección discreta. El problema se ha planteado como un problema de decisión entre alternativas discretas. Como se ha comentado en el

apartado correspondiente (Apartado 4.1), los modelos de elección discreta tratan de capturar el proceso de elección de los individuos cuando éstos se ven obligados a elegir entre dos o más alternativas. Los individuos realizan sus elecciones en base a la importancia que estiman de las diferentes componentes o atributos de las alternativas. En un proceso de elección racional, el individuo inspecciona las alternativas en base al valor que él le concede a los atributos que la componen y elige aquella que encuentra con mayor valoración conjunta o utilidad.

La probabilidad de elección de cada alternativa depende de la utilidad de la misma y de las alternativas con las que se compare.

Como se ha definido en el apartado destinado a los modelos de elección discreta, la utilidad de una alternativa  $j$  se compone de una parte determinista y de una parte aleatoria (Ecuación 5-5).

$$U_j = V_j + \xi_j \quad \text{Ecuación 5-5}$$

Donde  $V_j$  es la parte determinista de la utilidad que puede caracterizarse en función de los atributos de cada alternativa  $X_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots)$ . Además, es habitual proponer una relación lineal entre los atributos y la componente determinista (Ecuación 5-6).

$$V_j = \sum_k \beta_k x_{jk} \quad \text{Ecuación 5-6}$$

Los valores de los parámetros  $\beta_k$  se postulan invariantes con respecto a cada alternativa e individuo, y deben estimarse en función de las preferencias reveladas o declaradas (como será en este estudio) en la selección de alternativas.

Se propone estimar las importancias relativas de cada tecnología, utilizando un modelo de elección discreta, igualando la función de utilidad buscada (Ecuación 5-4) a la parte determinista de la utilidad (Ecuación 5-6). Para la obtención de los parámetros se utilizará un modelo *multilogit*.

Para adecuar la utilización de los modelos de elección discreta al objeto del análisis, se tratarán las posibles tecnologías como atributos de las alternativas.

En el caso en estudio cada alternativa se ha modelado con varios atributos, que son los distintos posibles procesos a los que afectan las tecnologías a analizar. Cada atributo puede tomar distintos valores, en función de las posibles opciones de las diferentes tecnologías que se han planteado. Así, cada alternativa está caracterizada

por cinco atributos, los cinco procesos en los que se van a estudiar las tecnologías indicadas, pudiendo tomar cada uno de ellos dos o tres valores, según existan una o varias tecnologías de aplicación. Se detalla a continuación una tabla con los atributos definidos y los distintos valores que puede tomar cada atributo (Tabla 5-8).

*Tabla 5-8: Atributos y valores de las alternativas*

<i>Atributo</i>	<i>Gestión transversal</i>	<i>Identificación</i>	<i>Preparación de pedidos</i>	<i>Entradas y salidas</i>	<i>Transporte</i>
<i>Nivel 1</i>	ST*	ST	ST	ST	ST
<i>Nivel 2</i>	WMS	Código de barras	Pick to light	YMS	TMS
<i>Nivel 3</i>	WMS + LMS	RFID	Pick to voice	-	-

\*ST= Sin tecnología aplicada

Dado que existen tres atributos que pueden tomar tres valores diferentes y dos que sólo pueden tomar dos valores, el conjunto completo de alternativas posibles se compone de 108 elementos (véase Ecuación 5-7), que pueden definirse aplicando un diseño factorial que proporcione todas las combinaciones posibles de los valores tomados por los cinco atributos.

$$\text{Número de alternativas} = 3^3 \times 2^2 = 108$$

*Ecuación 5-7*

Para encontrar la importancia relativa de cada tecnología se han presentado al panel de expertos una serie de escenarios con varias alternativas diferentes, solicitándole que indique cuál es la mejor de ellas. Se ha considerado que un número adecuado de escenarios a evaluar por cada experto sea nueve, contando cada uno de ellos con tres posibles alternativas para su elección.

Tal y como se detalló en el apartado dedicado al diseño de los modelos de elección discreta (Apartado 4.1), para realizar un diseño eficiente de los cuestionarios, es necesario cumplir ciertos criterios, entre ellos el criterio de equilibrio de las utilidades (Zwerina 1997). Para que la elección del decisor aporte información relevante es importante que las tres alternativas que se comparan en cada escenario sean similares, es decir, tengan utilidades similares, no siendo ninguna de ellas claramente dominada por las otras.

Un ejemplo clarificador de esta situación se observa al comparar la alternativa en la que todos los atributos toman el valor -1 (ST = Sin tecnología) con cualquier otra que tenga todos los valores de los atributos en el nivel 2 o 3. En este caso, no se puede



obtener información sobre las preferencias del decisor, pues la alternativa inicial está claramente dominada por cualquier otra, asumiendo que los niveles dos y tres de los atributos aportan valor positivo a la utilidad de la alternativa.

Para evitar estas situaciones, se solicitó a dos de los expertos una estimación inicial de la aportación de cada tecnología la valoración total. Con estas aportaciones se definió una valoración estimada de la utilidad de cada alternativa. En este caso, no se impuso ninguna restricción a los valores que se solicitaron a los expertos, por lo que cada uno de ellos utilizó la escala que le pareció apropiada.

Se detalla a continuación la valoración indicada por el experto 1 (véase Tabla 5-9) para los niveles de cada atributo.

Tabla 5-9: Valoración de los niveles de cada atributo según el experto 1

Atributo	Gestión transversal	Identificación	Preparación de pedidos	Entradas y salidas	Transporte
Nivel 1	0	0	0	0	0
Nivel 2	10	6	1	2	4
Nivel 3	12	8	4	-	-

El cálculo del valor estimado de la utilidad tomado por cada alternativa se realiza por adición de los valores aportados por el experto en función del nivel tomado por los atributos. Se detalla a continuación un ejemplo para una posible alternativa (véase Tabla 5-10 y Ecuación 5-8) cuya estimación inicial para la utilidad resulta ser de 22 unidades.

Tabla 5-10: Ejemplo de cálculo de la valoración de una alternativa

Atributo	Gestión transversal	Identificación	Preparación de pedidos	Entradas y salidas	Transporte
Nivel tomado	Nivel 3	Nivel 2	Nivel 1	Nivel 1	Nivel 2
Descripción del nivel	WMS y LMS	Código de barras	ST	ST	TMS
Valor que toma el atributo	12	6	0	0	4

$$\text{Valor de la alternativa} = 12 + 6 + 0 + 0 + 4 = 22$$

*Ecuación 5-8*

Conforme a esta valoración calculada, se ordenaron las alternativas y se definieron escenarios de alternativas con valores estimados para la utilidad homogéneos. Dado que existen 108 alternativas diferentes, se fijó que cada escenario posible tuviera tres alternativas, con ello existen 36 escenarios a evaluar. El hecho de elegir tres alternativas para cada elección a realizar, se debe a la necesidad de no tener un número muy elevado de preguntas en cada cuestionario para cada experto.

Por otra parte, con las valoraciones del experto 2 se procede de manera análoga, obteniéndose otros 36 escenarios diferentes. Se muestran a continuación las valoraciones dadas por el experto 2 (véase Tabla 5-11).

*Tabla 5-11: Valoración de los niveles de cada atributo según el experto 2*

<i>Atributo</i>	<i>Gestión</i>	<i>Identificación</i>	<i>Preparación de pedidos</i>	<i>Entradas y salidas</i>	<i>Transporte</i>
<i>Nivel 1</i>	0	0	0	0	0
<i>Nivel 2</i>	9	8	7	4	6
<i>Nivel 3</i>	11	10	8		

Definidos los 36 escenarios posibles con las valoraciones del experto 2, se dispone de un conjunto total de 72 escenarios posibles, cada uno compuesto por tres alternativas.

Dado que existen ocho expertos, se deben seleccionar 9 escenarios para ser evaluados en cada cuestionario. Para configurar esta primera parte del cuestionario 1 se asignó un número aleatorio a cada uno de los 36 escenario entre 0 y 1. A continuación se ordenaron los escenarios según dicho número aleatorio, tomando agrupaciones de 9 elementos para cada cuestionario. Con ello se obtuvieron 4 conjuntos de escenarios. Se repitió el proceso con los 36 escenarios obtenidos con las valoraciones del experto 2, obteniéndose otros cuatro conjuntos de 9 escenarios cada uno. Cada grupo de 9 escenarios fue asignado a un cuestionario. De este modo, se dispone de la primera parte de los ocho cuestionarios necesarios.

A modo de ilustración se detallan seguidamente los escenarios evaluados por uno de los decisores (véase Tabla 5-12). En la tabla se muestra la utilidad calculada con las valoraciones aportadas por el experto 1. El total de los cuestionarios realizados

puede verse en el anexo correspondiente, junto con las respuestas aportadas por cada encuestado (Apartado A.1)

Tabla 5-12: Escenarios a evaluar en el cuestionario 1 por elección discreta

Escenario	Gestión	Identificación	Preparación de pedidos	Entradas y salidas	Transporte	Valor
1	WMS + LMS	Código de barras	No	No	TMS	22
	WMS + LMS	Código de barras	Pick to voice	No	No	22
	WMS + LMS	RFID	No	YMS	No	22
	WMS	RFID	No	No	TMS	22
	WMS	RFID	Pick to voice	No	No	22
	WMS + LMS	No	Pick to voice	YMS	TMS	22
3	WMS	Código de barras	Pick to light	No	TMS	21
	WMS	RFID	Pick to light	YMS	No	21
	WMS + LMS	Código de barras	Pick to light	YMS	No	21
4	WMS	No	Pick to light	No	No	11
	No	Código de barras	No	YMS	TMS	12
	No	Código de barras	Pick to voice	YMS	No	12
5	WMS + LMS	Código de barras	Pick to light	YMS	TMS	25
	WMS + LMS	RFID	Pick to light	No	TMS	25
	WMS	Código de barras	Pick to voice	YMS	TMS	26
6	WMS + LMS	RFID	Pick to light	No	No	21
	WMS	Código de barras	No	YMS	TMS	22
	WMS	Código de barras	Pick to voice	YMS	No	22
7	No	RFID	Pick to voice	No	TMS	16
	WMS	No	No	YMS	TMS	16
	WMS	No	Pick to voice	YMS	No	16
8	No	No	Pick to light	No	TMS	5
	No	No	No	YMS	TMS	6
	No	No	Pick to voice	YMS	No	6
9	WMS + LMS	Código de barras	No	No	No	18
	WMS	Código de barras	Pick to light	YMS	No	19
	WMS	RFID	Pick to light	No	No	19

Como puede observarse en la última columna, en cada escenario evaluado, las alternativas tienen valores estimados para la utilidad similares, siendo en todos los escenarios la diferencia entre el valor estimado de las utilidades de cada alternativa contenidas en él menor o igual a la unidad.

Ello garantiza que los decisores comparan alternativas similares, lo que aportará un mejor conocimiento de la importancia relativa de cada atributo, es decir, de cada tecnología. No obstante, se quiere señalar que los encuestados no disponían de la última columna en el cuestionario, por lo que no conocían la valoración inicial calculada de cada alternativa.

Es importante destacar que las valoraciones iniciales de las utilidades aportadas por los expertos (Tabla 5-9 y Tabla 5-11) son equivalentes a estimar unos valores de  $\beta_i$  para iniciar el método. Una vez obtenidos los pesos proporcionados por el modelo deberá analizarse el acierto de estos valores iniciales.

#### **5.1.4 Evaluación mediante modelos de regresión lineal**

La segunda parte del cuestionario está preparada para analizar sus resultados mediante un ajuste de regresión lineal múltiple. En este caso, se solicita a los encuestados que valoren en una escala numérica del 1 al 10 las alternativas presentadas, siendo 1 la peor valoración y 10 la mejor. Cada cuestionario cuenta con 27 alternativas a evaluar.

En este caso, se propone utilizar un modelo de ajuste por regresión lineal múltiple para estimar los valores de  $\beta_k$ . Definiendo la valoración de la alternativa  $j$  dada por cada experto mediante la siguiente función (Ecuación 5-9):

$$\text{Valoración Alternativa}_j = \sum_{k=1}^8 \beta_k x_{kj} \quad \text{Ecuación 5-9}$$

Siendo  $x_{kj}$  el valor que toma la variable  $x_k$  en la alternativa  $j$ , y el peso asignado a cada variable,  $\beta_k$ , desconocido.

Para el diseño de las alternativas se ha utilizado el mismo diseño factorial completo presentado en el apartado anterior. Por tanto, de nuevo se cuenta con un conjunto de posibles alternativas de 108 elementos, que representan todas las combinaciones

posibles de las distintas tecnologías consideradas en el estudio, aplicables al proceso de gestión de almacenes.

Para seleccionar las alternativas que se incluyen en cada cuestionario se formaron 4 grupos de 27 alternativas. Cada una de las 108 alternativas fue asignada a uno de los cuatro grupos de manera aleatoria. Para ello se asignó un número aleatorio entre 0 y 1 a cada alternativa. A continuación, se ordenaron las alternativas según dicho número y se asignaron por orden consecutivo a cada cuestionario. Las 27 primeras alternativas al cuestionario 1, las 27 segundas al cuestionario 2 y así, sucesivamente. Se repitió este proceso dos veces, obteniéndose otro conjunto de 4 grupos de 27 alternativas cada uno. Cada uno de los ocho grupos de 27 alternativas se incluyó en un cuestionario.

Mediante este proceso cada decisor evalúa 27 alternativas, y todas las alternativas son evaluadas por 2 expertos diferentes, siendo el conjunto presentado a cada decisor distinto en cada caso.

A modo de ilustración se muestra el grupo de alternativas a evaluar por el decisor 1 (véase Tabla 5-13). Como se observa, las alternativas se encuentran ordenadas según la primera columna, correspondiente al número aleatorio asignado. El cuestionario entregado a los expertos no dispone de esta primera columna e incluye una última para que cada encuestado indique su valoración.

Tabla 5-13: Alternativas a evaluar incluidas en el cuestionario 1

Número Aleatorio	Gestión	Identificación	Preparación de pedidos	Entradas y salidas	Transporte
0,01530359	No	RFID	Pick to light	YMS	No
0,02526133	WMS + LMS	Código de barras	Pick to voice	YMS	No
0,04440419	No	RFID	No	YMS	No
0,04999426	WMS	No	No	YMS	No
0,05890035	WMS + LMS	RFID	No	No	TMS
0,05915316	WMS + LMS	Código de barras	Pick to light	YMS	TMS
0,06383902	WMS	Código de barras	Pick to voice	YMS	TMS
0,07237849	WMS + LMS	RFID	Pick to light	No	No
0,07880477	WMS + LMS	No	Pick to light	No	TMS

Número Aleatorio	Gestión	Identificación	Preparación de pedidos	Entradas y salidas	Transporte
0,08855947	WMS + LMS	No	Pick to voice	No	No
0,09387264	WMS + LMS	RFID	Pick to light	YMS	No
0,10437424	No	Código de barras	No	YMS	No
0,12182109	WMS	RFID	Pick to light	YMS	No
0,15791484	WMS	RFID	Pick to light	No	No
0,17362366	No	Código de barras	Pick to light	No	No
0,18389733	WMS	Código de barras	Pick to light	YMS	No
0,18873430	No	No	Pick to voice	No	No
0,19844096	No	No	Pick to voice	YMS	TMS
0,20884782	WMS	RFID	Pick to light	YMS	TMS
0,21553525	No	RFID	Pick to voice	YMS	TMS
0,21557863	No	RFID	Pick to light	No	No
0,22764732	WMS	No	Pick to light	No	TMS
0,23524698	WMS	No	Pick to voice	No	TMS
0,24240702	WMS	Código de barras	No	YMS	TMS
0,26347276	WMS	RFID	Pick to light	No	TMS
0,26622738	WMS	Código de barras	No	No	No
0,27038134	No	Código de barras	No	No	TMS

### 5.1.5 Codificación de las variables para el análisis de regresión

En este caso, cada alternativa  $X_j$  puede representarse como un vector de 8 posiciones, donde las variables toman valores discretos (-1,1). Las variables toman el valor -1 cuando no está presente la tecnología de referencia de la variable y 1 cuando sí lo está, tal y como se muestra a continuación (Ecuación 5-10) de forma totalmente análoga a la codificación para el modelo de elección discreta.

$$X_j = (GES1, GES2, IDE1, IDE2, PIC1, PIC2, YMS, TMS)$$

*Ecuación 5-10*

Como se ha indicado, en esta parte del cuestionario se ha solicitado a cada experto una valoración numérica de 1 a 10 para cada alternativa mostrada.

Así, la valoración de la alternativa  $j$  dada por cada experto se ha modelado mediante la siguiente función (Ecuación 5-11):

$$\text{Valoración}_j = \sum_{k=1}^8 \beta_k x_{kj} \quad \text{Ecuación 5-11}$$

Siendo  $x_{kj}$  el valor que toma la variable  $x_k$  en la alternativa  $j$ , y el peso asignado a cada variable,  $\beta_k$ , desconocido.

Los ocho cuestionarios elaborados para esta segunda parte, así como las valoraciones dadas por cada encuestado pueden verse en el anexo correspondiente (Apartado A.2).

### 5.1.6 Evaluación mediante AHP

Para poder realizar el análisis con la metodología AHP se solicitó a cada encuestado completar una matriz de comparación por pares donde los elementos a comparar son las diferentes tecnologías en estudio. Es decir, se solicitó a los encuestados que indicaran la importancia relativa de una tecnología frente a otra. En este caso se utilizó una escala simplificada de 1 a 5, mostrada en la siguiente tabla (Tabla 5-14).

Tabla 5-14: Escala de importancias relativas utilizada en el cuestionario 1

Escala	Definición	Explicación
1	Igual de importantes	Ambas tecnologías contribuyen igualmente al objetivo
2	Moderada importancia de una tecnología frente a otra	La experiencia y la razón favorecen a una tecnología frente a otra
3	Fuerte importancia de una tecnología frente a otra	La experiencia y la razón favorecen a una tecnología frente a otra
4	Elevada importancia una tecnología frente a otra. Demostrable	Una tecnología está fuertemente favorecida frente a otra y su dominancia está demostrada.
5	Absolutamente importante	La experiencia favorece a una tecnología frente a otra, al nivel más

Escala	Definición	Explicación
		elevado al que puede hacerse esta afirmación.

En este tercer apartado del cuestionario, se le solicitó a los ocho encuestados que emitieran sus juicios sobre la misma matriz de comparación por pares. Dado que existen 8 tecnologías a evaluar, y se deben realizar comparaciones por pares, el número de comparaciones a evaluar se corresponde con combinaciones de ocho elementos tomados de dos en dos, que da lugar a 28 parejas posibles (Ecuación 5-12).

$$C_m^n = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!}; C_8^2 = \frac{8!}{2!6!} = 28 \quad \text{Ecuación 5-12}$$

Se muestra a continuación, la matriz solicitada a los encuestados (Tabla 5-15), donde cada encuestado debe remplazar el valor  $a_{ij}^d$  por la importancia relativa de la tecnología  $i$  frente a la  $j$  según su opinión, siendo el encuestado el experto  $d$ . Para medir la importancia relativa de una tecnología frente a otra, el experto debe utilizar la escala simplificada definida anteriormente (véase Tabla 5-14). Por ejemplo, el valor  $a_{25}^1$  indica la importancia relativa que tiene para el experto 1 la tecnología *LMS* frente a la tecnología *Pick to light*.

Tabla 5-15: Matriz de comparación por pares solicitada al experto  $d$

Tecnología	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS		$a_{12}^d$	$a_{13}^d$	$a_{14}^d$	$a_{15}^d$	$a_{16}^d$	$a_{17}^d$	$a_{18}^d$
LMS			$a_{23}^d$	$a_{24}^d$	$a_{25}^d$	$a_{26}^d$	$a_{27}^d$	$a_{28}^d$
Código de barras				$a_{34}^d$	$a_{35}^d$	$a_{36}^d$	$a_{37}^d$	$a_{38}^d$
RFID					$a_{45}^d$	$a_{46}^d$	$a_{47}^d$	$a_{48}^d$
Pick to light						$a_{56}^d$	$a_{57}^d$	$a_{58}^d$
Pick to voice							$a_{67}^d$	$a_{68}^d$
YMS								$a_{78}^d$
TMS								

Una vez obtenidas las respuestas de cada experto, se evaluaron los índices de consistencia de cada matriz, tal y como se indica en el apartado dedicado a la metodología AHP (Apartado 4.2). Comparando este índice con el índice aleatorio se



obtiene la proporción de consistencia o ratio de consistencia, que debe ser menor o igual a 0,10 (Saaty 1987). En el caso de que se obtengan matrices con una proporción de consistencia mayor de lo permitido, se descarta la utilización de la opinión del experto cuya matriz de comparación por pares no es consistente.

## 5.2 Análisis 2. Áreas de aplicación del RFID

En este segundo análisis se ha tratado de conocer la importancia de la aplicación de la tecnología de identificación RFID en las distintas áreas de la gestión de almacenes para la eliminación de los errores que se producen en los distintos procesos.

Si bien, el objeto de la gestión de almacenes es conseguir la eficiencia y eficacia del flujo físico de los elementos, éste está supeditado al correcto flujo de la información que necesariamente debe producirse en dicha gestión. Uno de los principales sistemas de información para la gestión de almacenes es el RFID, facilitador del flujo de información. El RFID, como tecnología de identificación de objetos puede aumentar la fiabilidad de la información y disminuir los errores humanos que se producen en el sistema de información.

Las áreas de la gestión de almacenes en las que se ha analizado el uso del RFID son las siguientes:

- Recepción. En este proceso se pretende medir la aportación de la tecnología RFID para evaluar la correcta descarga de las mercancías en el almacén.
- Expediciones. En este proceso se quiere estimar el aporte que produce el RFID para realizar la correcta carga de la mercancía en los elementos de transporte que se utilicen.
- Control de ubicaciones. En este caso, la aplicación del RFID pretende mejorar la fiabilidad entre los elementos físicos y los datos reflejados en los sistemas de información, así como asegurar que cada elemento está en el lugar correcto.
- Picking. En relación al proceso de preparación del pedido, se evalúa en este caso la mejora que presenta el RFID para la propia preparación del pedido, con independencia de que se use adicionalmente una tecnología como podría ser pick to light o pick to voice.

- Preparación de pedidos. En este caso, se analiza la utilidad del RFID para una vez preparados los pedidos, se realice una comprobación de que éstos estén correctos.
- Crossdocking. En las plataformas de crossdocking se analiza el aporte del RFID para disminuir los errores que se producen en el intercambio de las mercancías desde el transporte de llegada hasta el de salida.

De manera análoga a la realización del análisis previo, para abordar el tratamiento matemático de las opiniones vertidas por los expertos, será necesario utilizar una codificación de los procesos en los que puede utilizarse la tecnología RFID.

### 5.2.1 Definición de las variables del estudio

Cada proceso en el que se puede plantear la aplicación del RFID se modelará mediante una variable, que se utilizará para las tres metodologías de evaluación.

Se detalla a continuación la tabla con las variables definidas (Tabla 5-16).

*Tabla 5-16: Variables auxiliares definidas para los procesos de aplicación del RFID*

<i>Procesos con RFID</i>	<i>Recepción</i>	<i>Expediciones</i>	<i>Control de ubicaciones</i>	<i>Picking</i>	<i>Preparación de pedidos</i>	<i>Crossdocking</i>
<i>Variables</i>	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK

Este segundo análisis trata de evaluar la importancia que tiene para el panel de expertos la utilización de la tecnología RFID en cada uno de los procesos definidos.

Para valorar la importancia, se recogerán las opiniones del mismo panel de expertos que en el caso anterior. Estos expertos proporcionaran sus opiniones o preferencias declaradas, no reveladas, ya que se desconoce las decisiones reales realizadas por estos.

El objeto de este análisis es encontrar los pesos que midan la importancia que los expertos le dan a la aplicación del RFID en cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la gestión de almacenes. De este modo, el objeto se traduce en estimar los pesos de la siguiente función de utilidad (Ecuación 5-13).

$$U = \sum_i \beta_i x_{ij} = \beta_1 REC + \beta_2 EXP + \beta_3 CUB + \beta_4 PIC + \beta_5 PED + \beta_6 CDK$$

*Ecuación 5-13*

Se detalla a continuación cómo se han elaborado las tres partes en las que se divide el cuestionario utilizado en este segundo análisis.

El segundo cuestionario diseñado es análogo al primero. De igual modo que el anterior, se divide en tres partes, cada una de ellas para la aplicación de una metodología. El cuestionario se ordena de la misma forma que el anterior y se estructura de forma semejante. Se detallan a continuación las particularidades de la codificación de las variables para el modelo de elección discreta y cómo se han elaborado cada una de las partes de este segundo cuestionario.

## 5.2.2 Codificación de las variables para el modelo de elección discreta

Para poder realizar el ajuste mediante el modelo *logit* a la función de utilidad, es necesario realizar una codificación adecuada de las variables. Al igual que en el apartado anterior, las variables utilizadas en el modelo son variables discretas. Cada alternativa se ha modelado con seis atributos, correspondientes a los procesos de aplicación del RFID definidos en el análisis. Cada atributo se modela con la variable correspondiente. Las variables pueden tener dos niveles, el primer nivel se asigna a la ausencia del RFID en el proceso que corresponde al proceso de aplicación en la gestión de almacenes y el segundo a la utilización de un sistema RFID para realizar el proceso correspondiente. Las variables toman el valor -1 para el nivel 1, nivel de referencia que indica ausencia de tecnología RFID. Y toman el valor 1 para el nivel 2, nivel que representa la aplicación del RFID en el proceso indicado por el atributo correspondiente (Tabla 5-17).

*Tabla 5-17: Codificación de los atributos para los niveles 1 y 2*

Atributo	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK
Nivel 1	ST* = -1	ST = -1	ST = -1	ST = -1	ST = -1	ST = -1
Nivel 2	CT* = 1	CT = 1	CT = 1	CT = 1	CT = 1	CT = 1

### 5.2.3 Evaluación mediante modelos de elección discreta.

La primera parte del cuestionario se utilizará para recoger las preferencias declaradas del panel de expertos con el fin de modelar el problema como un problema de elección discreta y realizar un ajuste según un modelo *logit* para la función de utilidad, con lo que se obtendrá una estimación para los valores buscados,  $\hat{\beta}_k$ .

En este caso, se presentará a cada decisor un conjunto de escenarios dicotómicos, es decir, con dos posibles alternativas. Para elaborar los cuestionarios se ha definido en primer lugar el conjunto completo de alternativas.

Una vez definidas las alternativas mediante el conjunto de atributos, se ha realizado un diseño factorial completo para determinar el conjunto completo de alternativas posibles. Dado que existen 6 atributos que pueden tomar dos valores diferentes, el conjunto completo de alternativas tiene 64 elementos (Ecuación 5-14).

$$\text{Número de alternativas} = 2^6 = 64 \qquad \text{Ecuación 5-14}$$

Los escenarios a evaluar por parte de cada experto están compuestos por dos alternativas. Igualmente, para cumplir el criterio de equilibrio en el diseño del cuestionario, se solicitó a dos de los expertos una valoración inicial de la importancia relativa que tiene la aplicación del RFID en los procesos. Se detalla en la tabla siguiente la valoración aportada por ambos expertos. La valoración del nivel 1 se supone nula para ambos expertos (Tabla 5-18)

Tabla 5-18: Valoración de los niveles de cada atributo según los expertos

Atributo	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK
Nivel 1	ST* = 0	ST = 0	ST = 0	ST = 0	ST = 0	ST = 0
Nivel 2	CT*	CT	CT	CT	CT	CT
Valoración Experto 1	8	8	2	4	3	8
Valoración Experto 2	8	5	6	5	7	8

Con estas valoraciones iniciales se determina una estimación de la valoración de la utilidad de cada alternativa como suma de las valoraciones particulares de los atributos que la componen. Se detalla un ejemplo de la estimación de la valoración de la utilidad alcanzada por una alternativa posible, utilizando los valores aportados

por el experto 1 (Tabla 5-19 y Ecuación 5-15).

Tabla 5-19: Ejemplo de cálculo de la valoración de una alternativa

Atributo	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK
Nivel tomado	Nivel 2	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 1	Nivel 1	Nivel 2
Descripción del nivel	CT	ST	CT	ST	ST	CT
Valor que toma el atributo	8	0	2	0	0	8

*Valor estimado de la alternativa*

$$= 8 + 0 + 2 + 0 + 0 + 8 = 18$$

*Ecuación 5-15*

Con las valoraciones aportadas por los expertos se estima una valoración de la utilidad del conjunto completo de alternativas. Para la elaboración de los cuestionarios, se tomó en primer lugar la valoración de todas las alternativas con los pesos indicados por el primer experto. Se ordenaron de forma creciente en función de dicha valoración y se realizaron conjuntos de escenarios compuestos por dos alternativas consecutivas. Dado que existen 64 alternativas, con este proceso se obtienen 32 escenarios a evaluar. De manera análoga se ha procedido con las valoraciones del segundo experto, generándose otros 32 escenarios posibles con valoraciones similares.

Dado que existen 64 escenarios posibles, se estimó que cada cuestionario incluyera 8 escenarios distintos. La elección de esta cantidad, 8 escenarios, obedece a realizar un cuestionario que no resultara demasiado extenso para los encuestados. La asignación de escenarios a cada cuestionario se realizó de forma aleatoria siguiendo el mismo proceso descrito anteriormente en el análisis anterior.

Se detalla a continuación los escenarios evaluados en uno de los cuestionarios. En dicha tabla puede observarse la estimación de la valoración de cada alternativa. Como puede apreciarse en la última columna, las valoraciones dentro de cada escenario son homogéneas. Por otra parte, hay que destacar que dicha columna no se incluye en el cuestionario presentado a cada experto (Tabla 5-20).

Tabla 5-20: Escenarios a evaluar en el cuestionario 1 para elección discreta

Escenario	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK	VALOR ESTIMADO
1	CT	ST	CT	ST	ST	CT	18
	CT	CT	CT	ST	ST	ST	18
2	ST	ST	ST	ST	CT	ST	3
	ST	ST	ST	CT	ST	ST	4
3	CT	CT	ST	CT	CT	CT	31
	CT	CT	CT	CT	CT	CT	33
4	ST	ST	ST	CT	CT	ST	7
	ST	ST	ST	ST	ST	CT	8
5	CT	ST	ST	ST	ST	CT	16
	CT	CT	ST	ST	ST	ST	16
6	CT	CT	ST	CT	CT	ST	23
	CT	CT	ST	ST	ST	CT	24
7	ST	ST	CT	CT	CT	CT	17
	ST	CT	CT	CT	CT	ST	17
8	CT	ST	ST	ST	CT	ST	11
	ST	ST	ST	CT	ST	CT	12

Una vez definidas las variables, diseñados los cuestionarios y definida la codificación para procesar la información, el siguiente paso en el ajuste del modelo es recoger las respuestas a los cuestionarios.

El conjunto completo de las respuestas está recogido en el anexo correspondiente (Apartado B.1).

## 5.2.4 Evaluación mediante análisis de regresión

Para la segunda parte del cuestionario, dedicado a recoger las opiniones de los expertos para el ajuste de los pesos mediante un modelo de regresión lineal múltiple se ha solicitado a cada experto que realice una valoración de diferentes alternativas. En este caso, se solicita al experto una valoración numérica de 1 a 10, donde 1 es la peor valoración y 10 la máxima valoración.

Para el diseño de las alternativas, se ha utilizado el conjunto anteriormente realizado. Por tanto, se cuenta con 64 alternativas diferentes. En cada cuestionario se incluyeron 16 alternativas distintas a valorar. Dado que se ha contado con un panel de ocho

expertos, cada alternativa se ha evaluado dos veces. Por otra parte, la asignación de las alternativas a los cuestionarios se realizó de manera aleatoria con el mismo proceso aplicado para el diseño del cuestionario del análisis 1. Cada conjunto presentado a cada experto es diferente. Con el proceso seguido se garantiza que todas las alternativas sean evaluadas por dos expertos diferentes.

La codificación de las variables para su tratamiento, se realizó de manera consistente con todo el proceso de análisis. Es decir, los valores de los dos posibles niveles de los atributos de cada alternativa son (-1,1), siendo el valor negativo para el nivel 1 y el valor positivo para el nivel 2. Esta es la misma codificación utilizada en el apartado anterior (Tabla 5-17).

Una vez elaborados todos los cuestionarios y debidamente codificadas las alternativas y las respuestas del panel de expertos, se ha utilizado un ajuste de regresión lineal múltiple para determinar los valores de los pesos de la función de utilidad. Los cuestionarios completos y las valoraciones de los expertos pueden consultarse en el anexo correspondiente (Apartado B.2).

### 5.2.5 Evaluación mediante AHP

La elaboración de este apartado del cuestionario es totalmente análoga a la ya expuesta en el apartado correspondiente del primer análisis presentado (Apartado 5.2.5) utilizando las variables correspondientes a este segundo análisis. Para no resultar demasiado repetitivo, se presenta de directamente la matriz de comparación por pares solicitada a cada experto en todos los cuestionarios (Tabla 5-21).

Tabla 5-21: Matriz de comparación por pares solicitada al experto  $d$

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Preparación de pedidos	Crossdocking
Recepción		$a_{12}^d$	$a_{13}^d$	$a_{14}^d$	$a_{15}^d$	$a_{16}^d$
Expediciones			$a_{23}^d$	$a_{24}^d$	$a_{25}^d$	$a_{26}^d$
Control de ubicaciones				$a_{34}^d$	$a_{35}^d$	$a_{36}^d$
Picking					$a_{45}^d$	$a_{46}^d$
Preparación de pedidos						$a_{56}^d$
Crossdocking						

Como se observa, dado que existen 6 posibles procesos y que se deben realizar

comparaciones entre dos elementos, existen 15 pares a evaluar (Ecuación 5-16).

$$C_m^n = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!}; C_6^2 = \frac{6!}{2!4!} = 15 \quad \text{Ecuación 5-16}$$

Igualmente se solicitó a los expertos que indicaran la importancia relativa de cada tecnología respecto a todas las demás, utilizando la misma escala presentada anteriormente (Tabla 5-14). Obtenidas las matrices de comparación por pares se analizó la consistencia de las mismas, en el caso de que alguna matriz tenga una ratio de consistencia superior a 0,10 se rechaza la utilización de la matriz de comparación por pares realizada por dicho experto.

Las matrices finales recogidas para cada experto están disponibles en el apartado destinado a tal efecto (Apartado B.3), así como los valores de la proporción de consistencia obtenidos.

### **5.3 Proceso de recogida de datos**

Una vez definidos los cuestionarios, el siguiente paso es la recogida de datos. Como se ha indicado, para cada análisis se solicitó al panel de expertos que contestara un cuestionario. Éste se componía de tres partes, cada una de ellas descrita anteriormente y que se presentan a continuación de forma resumida

La primera parte del cuestionario está dirigida a la recogida de datos para la utilización de la metodología de elección discreta de preferencias declaradas con un ajuste multilogit (para el primer análisis) o logit (para el segundo).

En el caso del primer análisis, a cada experto se le proporcionó un cuestionario con nueve escenarios de tres alternativas cada uno, para que indicaran cuál de las alternativas consideraban la mejor del escenario. Cada alternativa es un conjunto de posibles tecnologías de la información aplicadas a la gestión de almacenes que debían considerar implantada para la mejor gestión del almacén. Los valores de los atributos de cada alternativa se proporcionaron sin codificar, tal y como se muestran en la Tabla 5-12.

En el caso del segundo análisis, esta parte del cuestionario está compuesta por 8 escenarios con dos alternativas posibles. Cada alternativa viene definida por seis variables que indican los procesos en los que se puede o no aplicar la tecnología



RFID. Cada experto debe indicar su preferencia ante las dos posibles alternativas e indicar cuál prefiere. El cuestionario presentado a cada experto no está codificado y se refleja si el proceso posee tecnología RFID o no, indicando las palabras “sí” y “no”, para una mayor comprensión.

La segunda parte del cuestionario está encaminada a la obtención de los mismos parámetros que el anterior, pero mediante un análisis de regresión lineal múltiple. Esta segunda parte del cuestionario, consta de 27 alternativas distintas, para el primer análisis, que el experto debe valorar con una calificación de 1 a 10, siendo 1 la peor calificación y 10 la mejor. Cada alternativa se detalló de forma análoga a la parte anterior. Es decir, las alternativas a valorar estaban descritas sin utilizar la codificación presentada en el apartado anterior. En el segundo análisis, esta parte consta de 16 alternativas a valorar en la misma escala de 1 a 10.

Por último, en la tercera parte del cuestionario, donde se desea aplicar la metodología AHP, se solicita a todos los expertos la matriz de comparación por pares. Esta matriz es la mostrada en el Apartado 5.1.6 en la Tabla 5-15 para el primer análisis y en el Apartado 5.2.5 en la Tabla 5-21, en el caso del segundo análisis y en cada análisis es idéntica en los ocho cuestionarios elaborados.

Por último, es importante destacar que cada cuestionario estaba acompañado de un cuadro resumen que incluía el significado de los acrónimos utilizados y un breve resumen de cada tecnología. Los cuestionarios fueron enviados por vía electrónica (e-mail) y recogidos de igual manera en un periodo de una semana.

Además, antes del envío del cuestionario, se realizó una reunión inicial donde se mostró el cuestionario completo al panel de expertos y se aclararon las dudas de interpretación que pudieran surgir.

## **5.4 Caracterización del panel de expertos**

El panel de expertos está compuesto por 8 miembros. Todos ellos del sector académico o industrial. Se detalla a continuación una tabla para su caracterización (Tabla 5-22).

Tabla 5-22: Sexo, edad y formación del panel de expertos

<b>Sexo</b>	Mujeres: 2	Hombres: 6	
<b>Edades</b>	Menor de 40 años: 6	Mayor de 40: 2	
<b>Formación</b>	Ing. Industrial: 2	Ing. Informático: 1	Ing. Telecomunicación: 5

Todos los expertos del sector industrial pertenecen a una misma empresa, del sector químico. Dicha empresa emplea 800 personas, con un volumen de facturación de 375 millones de euros para el año 2015 y un EBITDA para ese mismo año de 46 millones de euros. La empresa posee una fábrica situada en la comunidad autónoma de Andalucía, con una superficie en planta de 80.000 m<sup>2</sup> y un almacén automático de 200.000 m<sup>3</sup> con capacidad para 40.000 palés.

## 5.5 Obtención de resultados

Una vez recogidas las opiniones de los expertos, se realiza la codificación de las variables para cada parte del cuestionario según se ha definido en el apartado correspondiente.

En el primer caso, la primera parte del cuestionario, en la que se realizará el ajuste según el modelo *multilogit* o *logit* para elección discreta, para procesar los juicios emitidos por los expertos se ha utilizado el paquete de software comercial LIMDEP® (Econometric Software, Inc.). El programa proporciona los valores estimados  $\hat{\beta}_k$ , así como otros valores de importancia para determinar la calidad del ajuste y de las estimaciones obtenidas.

Las respuestas a los cuestionarios proporcionadas por el panel de expertos están disponibles en el anexo correspondiente (Apartado A.1 y Apartado B.1).

Los resultados obtenidos se presentan en el apartado destinado a tal efecto (Apartado 6.1.1).

Para el segundo apartado del cuestionario, encaminado a realizar un ajuste de regresión lineal para estimar los valores, se codificaron las respuestas y se realizó el ajuste con el programa comercial Microsoft Excel. Ello proporciona unos valores estimados de  $\hat{\beta}_k$ , así como otros valores estadísticos generales para analizar la

bondad del ajuste, un análisis de la varianza y otros estadísticos adicionales particulares de cada coeficiente estimado.

Para el tercer apartado del cuestionario, una vez identificadas las matrices de comparación por pares válidas de cada experto, se puede obtener el vector de prioridades que cada decisor otorga a los elementos comparados. Estos vectores indican las importancia relativa de la tecnología  $k$  para cada experto  $d$ ,  $\hat{\beta}_k^d$ . Además, se cumple que la suma de las importancias relativas para cada decisor es igual a la unidad (Ecuación 5-17).

$$\sum_k \hat{\beta}_k^d = 1 \quad \text{Ecuación 5-17}$$

Existen softwares comerciales específicos de análisis jerárquico que proporcionan los vectores buscados, sin embargo, también pueden obtenerse los resultados con programas de hojas de cálculo. Para obtener los vectores de prioridad, en este trabajo, se usará la estimación ANC (*Average of Normalization Columns*) propuesta por (Saaty & Vargas 1982) que da una mayor exactitud que otras aproximaciones (Saaty & Vargas 1982). Este método propone la utilización de la media aritmética de las columnas normalizadas para la estimación del autovector principal, tal y como se detalla en la Ecuación 5-18. Esta solución ha sido obtenida mediante la utilización del programa comercial Microsoft Excel.

$$\beta_k^d = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{kj}^d}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^d} \quad \text{Ecuación 5-18}$$

El vector de importancias relativas de cada experto es un vector de ocho componentes o seis según el análisis realizado,  $\beta_k^d$  que indica la importancia relativa de la tecnología  $k$  para el experto  $d$  o de la utilización de tecnología RFID en el proceso  $k$  para los análisis 1 y 2 respectivamente.

Para poder agregar las opiniones subjetivas de cada experto, se han ponderado sus opiniones en función de su cercanía a la media de las opiniones otorgadas por el panel de expertos completo lo que proporciona una mayor robustez al proceso (Beltrán et al. 2014).

Para ello, se ha seguido un proceso basado en la matriz de correlación de los vectores de prioridad de los expertos, según el proceso definido por (Aldian & Taylor 2005). En primer lugar, se ha calculado la matriz de correlación de los vectores de prioridad

de cada experto. Cuanto más cercano a uno es el índice de correlación de la opinión de un experto, más cercano es su grado de acuerdo con la opinión conjunta del panel. Por otra parte, los valores negativos más elevados, cercanos a menos uno, representan mayor desacuerdo entre la opinión mostrada por el experto y la opinión conjunta.

Una vez obtenida la matriz de correlación se han definido los pesos tal y como se indica en las siguientes ecuaciones (Ecuación 5-19 y Ecuación 5-20). Donde,  $w_d$  es el peso determinado para el experto  $d$ ,  $t$  es el número de expertos en el panel,  $r_{di}$  es el coeficiente de correlación entre las opiniones subjetivas de los expertos  $d$  e  $i$ . La utilización de la función exponencial obedece a la eliminación de los valores negativos de los coeficientes de correlación.

$$C_d = \sum_{i=1}^t e^{r_{di}} - e^{r_{dd}} \quad \text{Ecuación 5-19}$$

$$w_d = \frac{C_d}{\sum_{i=1}^t C_i} \quad \text{Ecuación 5-20}$$

Así, los valores  $\hat{\beta}_k$  buscados pueden obtenerse como se indica en la Ecuación 5-21:

$$\hat{\beta}_k = \sum_{d=1}^t \beta_k^d \cdot w_d \quad \text{Ecuación 5-21}$$

Una vez obtenidos los resultados, el siguiente paso, y quizás el de mayor importancia, es la interpretación y discusión de los mismos. Por su importancia, se presentan separadamente en el siguiente apartado.

# 6 RESULTADOS OBTENIDOS

Se detallan en este apartado los resultados obtenidos en los dos procesos de análisis presentados en el apartado anterior. El proceso seguido se muestra en la Figura 6-1.

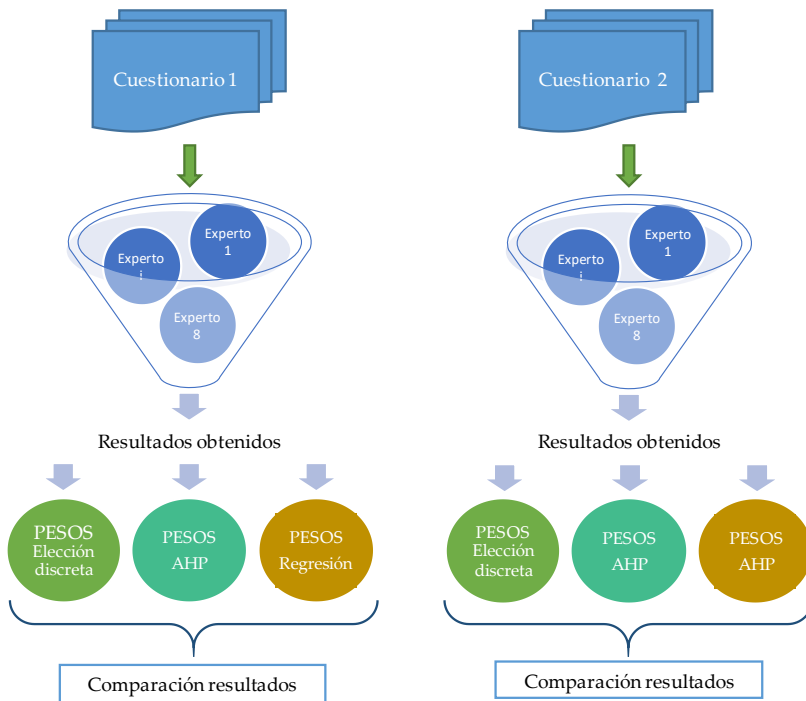


Figura 6-1: Proceso de obtención de resultados

En primer lugar, se han analizado los ocho cuestionarios solicitados al panel de expertos para cada uno de los análisis realizados en función de la metodología aplicada. Con cada una de las metodologías se han obtenido los pesos proporcionados por la opinión agregada del panel de expertos. Ello proporciona tres estimaciones de cada grupo de parámetros.

Es de interés analizar las soluciones encontradas, tanto el valor en sí mismo, como las diferencias entre las estimaciones determinadas según el método utilizado.

## **6.1 Análisis 1: Tecnologías de la Información en la gestión de almacenes**

Se presentan en primer lugar los resultados obtenidos del análisis sobre las tecnologías de la información y comunicación en la gestión de almacenes con las tres metodologías de aplicación, así como una comparación de los mismos.

### **6.1.1 Resultados obtenidos mediante elección discreta**

Los resultados obtenidos de los cuestionarios se trataron con el paquete de software LIMDEP® (Econometric Software Inc.). El ajuste al modelo multilogit de los resultados obtenidos del análisis de los cuestionarios se muestra en la siguiente figura (Figura 6-2). El contenido de la figura es el siguiente:

- En la parte superior aparecen datos del modelo de elección discreta (discrete choice) que ha sido ajustado.
- En el primer recuadro aparecen los datos relativos a la bondad del ajuste realizado.
- En las siguientes columnas aparecen en la primera de ellas los nombres de las variables utilizadas.
- En la siguiente columna se reflejan los pesos proporcionados por el software utilizado LIMDEP para las variables, es decir para cada tecnología analizada.
- En la tercera columna aparecen la desviación estándar de cada peso.

- En la cuarta columna el cociente entre el valor del peso y su desviación estándar.
- La quinta columna refleja la probabilidad de que el peso tuviera un valor real nulo.

```

--> DISCRETE CHOICE
    ; Lhs = CHOICE, NIJ
    ; Rhs = GES1, GES2, IDE1, IDE2, PIC1, PIC2, YMS, TMS
    ; Describe
    ; List
    ; Crosstab $
Normal exit from iterations. Exit status=0.

+-----+
| Discrete choice (multinomial logit) model |
| Maximum Likelihood Estimates              |
| Model estimated: Jan 26, 2017 at 00:33:59PM. |
| Dependent variable                        Choice |
| Weighting variable                        None |
| Number of observations                     72 |
| Iterations completed                       5 |
| Log likelihood function                   -67.95834 |
| Log-L for Choice model =                 -67.95834 |
| R2=1-LogL/LogL*   Log-L fncn   R-sqrd   RsqAdj |
| No coefficients   -79.1001   .14086   .09032 |
| Constants only.  Must be computed directly. |
|                               Use NLOGIT ;...; RHS=ONE $ |
| Response data are given as ind. choice. |
| Number of obs.=   72, skipped   0 bad obs. |
+-----+

+-----+-----+-----+-----+-----+
|Variable | Coefficient | Standard Error | b/St.Er. | P[|Z|>z] |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| GES1    | 1.257618084 | .58153084      | 2.163    | .0306   |
| GES2    | 1.564577336 | .71094477     | 2.201    | .0278   |
| IDE1    | .9554644946 | .44636954     | 2.141    | .0323   |
| IDE2    | .9815349981 | .54374942     | 1.805    | .0711   |
| PIC1    | .9837661780 | .39601841     | 2.484    | .0130   |
| PIC2    | 1.093751319 | .35239653     | 3.104    | .0019   |
| YMS     | .2485091920 | .21811950     | 1.139    | .2546   |
| TMS     | .1571042863 | .31406979     | .500     | .6169   |
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

Figura 6-2: Resultados proporcionados por el modelo LIMDEP correspondiente al ajuste del modelo de elección discreta para la determinación de los pesos de las tecnologías de la información en la gestión de almacenes

Se detalla también un resumen de los pesos obtenidos para cada tecnología en la siguiente tabla (Tabla 6-1)

Tabla 6-1: Pesos obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta

Tecnología de la información aplicada la almacén	$\hat{\beta}_i$ (Pesos)
WMS	1,258
WMS con LMS	1,565
Código de barras	0,955
RFID	0,982
Pick to light	0,984
Pick to voice	1,094
YMS	0,249
TMS	0,1574

Dado que se pretende comparar los resultados obtenidos en las tres metodologías, se ha decidido normalizar los valores de los pesos obtenidos tanto mediante el ajuste con el modelo *multilogit*, como los pesos obtenidos mediante el ajuste de regresión lineal mostrados en el siguiente apartado.

Como ya se ha comentado con anterioridad, la escala en que se representan las utilidades en este modelo de ajuste es inmaterial en cuanto a su utilización como criterio de elección, por lo que los pesos pueden ser normalizados, de forma que su suma sea la unidad sin pérdida de significación. Se detalla a continuación la tabla de pesos normalizados (Tabla 6-2).

Tabla 6-2: Pesos normalizados obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta

Tecnología de la información aplicada la almacén	$\hat{\beta}_i$ (Pesos)
WMS	0,174
WMS con LMS	0,216
Código de barras	0,132
RFID	0,136
Pick to light	0,136
Pick to voice	0,151
YMS	0,034
TMS	0,022
SUMA TOTAL PESOS	1,000



### 6.1.1.1 Signo y valor de los resultados

La primera valoración de los resultados del modelo debe centrarse en el signo de los parámetros. Dado que la probabilidad de elección de una alternativa depende de su utilidad, en los modelos de elección discreta, el analista debe tener unas expectativas de signo para los coeficientes que desea estimar.

En este estudio, los pesos deben tener signo positivo, ya que la presencia de una tecnología es siempre una ventaja con respecto al no poseerla. En el estudio se ha evaluado la utilidad que tiene tenerla ya implantada, obviando los posibles problemas que se derivarían del proceso de implantación. Si se hubiera considerado esto, sí sería posible encontrar valores negativos, que indicarían que la presencia de esa componente resta a la utilidad en vez de sumar, siempre y cuando la percepción del decisor es que la implantación va a suponer más inconvenientes que ventajas.

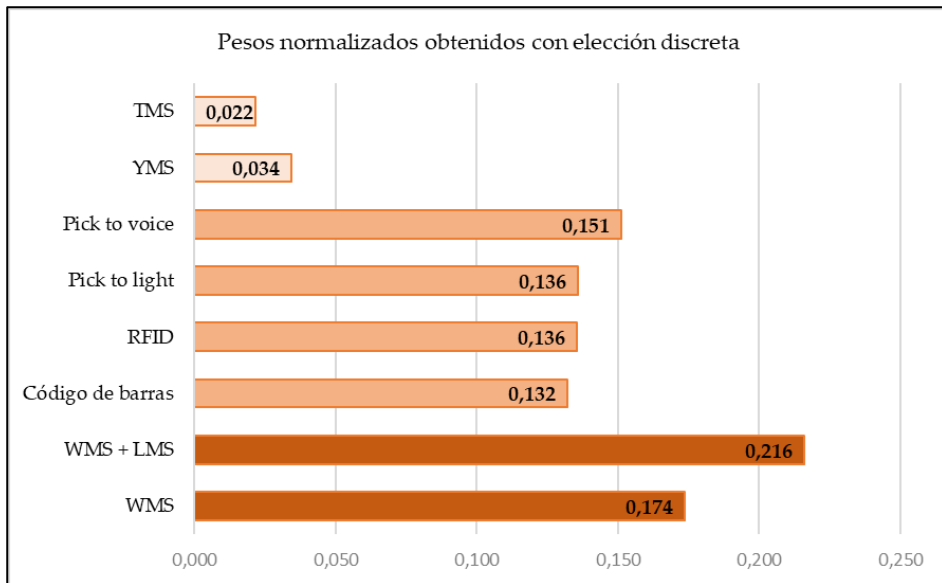
Como se observa en la Figura 6-2 y en las tablas de resumen de resultados (Tabla 6-1 y Tabla 6-2) los pesos estimados cumplen las expectativas en cuanto al signo, pues todos los valores estimados son mayores que cero.

Con respecto a los valores alcanzados, se observa que el mayor peso lo tiene el conjunto de la tecnología WMS y LMS (Estas variables hacen referencia al sistema de gestión de almacenes general, WMS, junto con el sistema de gestión de los recursos humanos asignados a la gestión de almacén, LMS). El valor del parámetro estimado es 0,2160. Es decir, su aportación a la utilidad, es del 21,60 %.

El menor peso es el obtenido por la tecnología aplicada a la gestión del transporte, TMS. En este caso el valor estimado resulta de 0,02169, que es un orden de magnitud inferior al más importante, representando su presencia una aportación a la utilidad del 2,17 %.

En referencia a la utilidad aportada por las diferentes tecnologías, se pueden definir tres niveles de importancia según el ajuste realizado a la opinión mostrada por el conjunto de expertos. Como se aprecia en la siguiente gráfica de resultados (Gráfica 6-1) las tecnologías asociadas a la gestión integral del almacén aportan a la utilidad en torno a un 20%, las tecnologías de identificación, código de barras y RFID, junto con los sistemas de preparación de pedidos, pick to light y pick to voice, proporcionan un aporte a la utilidad similar entre ellas en torno al 13%-15% cada una. Por otra parte, las tecnologías de gestión del transporte y de la gestión de muelles o patios, tienen una aportación a la utilidad de un orden de magnitud inferior a las anteriores, representando su aportación a la utilidad tan sólo del 2%-

3% aproximadamente.



Gráfica 6-1: Pesos obtenidos con metodología elección discreta

Por otra parte, el cociente de los parámetros estimados  $\hat{\beta}_i / \hat{\beta}_j$  son un indicador de las tasas marginales de sustitución de las variables que intervienen en la función de utilidad.

En este sentido realizando el cociente  $\hat{\beta}_{WMS+LMS} / \hat{\beta}_i$ , o su inversa, reflejado en la siguiente tabla (Tabla 6-3), se obtienen las tasas marginales con respecto a la tecnología más valorada por los expertos en cuanto a la utilidad.

Tabla 6-3: Tasas marginales de sustitución

	$\hat{\beta}_i$	$\hat{\beta}_{WMS+LMS} / \hat{\beta}_i$	$\hat{\beta}_i / \hat{\beta}_{WMS+LMS}$
WMS	0,174	0,804	1,244
WMS + LMS	0,216	1,000	1,000
Código de barras	0,132	0,611	1,638
RFID	0,136	0,627	1,594
Pick to light	0,136	0,629	1,590
Pick to voice	0,151	0,699	1,430
YMS	0,034	0,159	6,296
TMS	0,022	0,100	9,959

Del análisis de estos resultados se pueden obtener las siguientes consideraciones:

- Añadir a la aplicación de gestión del almacén, un paquete de tecnologías de la información que permita la gestión de los recursos humanos del almacén, así como su planificación, proporciona una utilidad de 1,24 veces la utilidad del sistema de gestión general sin gestión de los recursos humanos.
- Las tecnologías de la información utilizadas para la identificación de objetos, ya sea la utilización de códigos de barras o RFID, tienen una utilidad del orden del 0,6 de la utilidad de un sistema de gestión general. O lo que es semejante, la utilidad de un sistema de gestión general del almacén es 1,6 veces mayor que la de identificación de objetos.
- Por otra parte, las tecnologías de la información dedicadas a la preparación de pedidos, son consideradas de menor importancia por los expertos. El orden de magnitud de las tasas de sustitución es similar a las tecnologías de identificación. Son aproximadamente 0,6 veces la utilidad del sistema de gestión completo, o el sistema de gestión completo tiene una utilidad del orden de 1,6 veces mayor.
- Por último, la utilidad de los sistemas de gestión del transporte y de gestión de muelles o dársenas es muy inferior a la utilidad de los sistemas de gestión generales. En el caso de los sistemas de gestión de muelles, la utilidad de poseer un sistema de gestión integral, incluido la gestión del personal,

reporta una utilidad 6 veces superior (6,296 veces). Respecto a los sistemas de gestión del transporte, la diferencia es aún mayor, siendo la utilidad de los sistemas generales de gestión del orden de 10 veces superior al de gestión del transporte (9,959 veces).

Cabe discutir si estos resultados son esperados. Dado que lo que se solicitó a los expertos es una elección entre distintas alternativas de tecnologías de la información destinadas todas ellas a medir la importancia de las tecnologías de la información dedicadas a la gestión del almacén, una tecnología de amplio alcance, con capacidad para planificar y administrar el almacén en su conjunto debe ser la que mayor utilidad aporte a la tarea de gestión de almacenes. Por otra parte, la inclusión en esta tecnología de la posibilidad de gestión de los recursos humanos no es una cuestión baladí, pues de sobra es conocida la importancia del coste del factor humano en cualquier sistema de gestión. Por tanto, el hecho de que el sistema de gestión de almacenes general, junto con un sistema de gestión del personal para dicha tarea, tenga la mayor utilidad es lo esperado.

Por otra parte, que los sistemas de identificación de elementos, ya sea RFID o código de barras tengan utilidades inferiores es razonable. Además, el hecho de que los expertos no hayan dado una utilidad mayor al RFID frente al código de barras está acorde con el hecho constatado de que los sistemas RFID no acaben de implantarse frente al código de barras, tal y como se reflejó en el apartado destinado al análisis de la adopción de los sistemas RFID (Apartado 3). Parece lógico pensar, que, si los expertos percibieran una utilidad significativamente mayor al RFID frente al código de barras, éste primer sistema se implantaría mayoritariamente. Adicionalmente, aunque como se reflejó en el diseño del análisis no se han tenido en cuenta las dificultades o costes asociados a la implantación, es poco probable que, a la hora de realizar una elección entre diferentes alternativas, los expertos consigan abstraerse totalmente de la percepción intrínseca que tengan de las dificultades derivadas de la puesta en marcha de un sistema RFID o de las dificultades que generan la integración de los sistemas RFID con el resto de sistemas de información de las empresas.

Por último, también resulta esperado encontrar que la utilidad de las tecnologías de la información destinadas a la gestión de los muelles y al transporte sean las de utilidad menor en cuanto a la gestión del almacén, toda vez que puede pensarse que la salida, una vez preparada la mercancía, ya no es una parte sustancial de la gestión del almacén, quedando quizás estos sistemas fuera del ámbito de la gestión del almacén propiamente dicha en opinión de los expertos. También es lógico que, en

cuanto a la comparación entre ambos sistemas, la influencia de los sistemas de gestión de muelles sea algo superior a la del transporte, pues la operación de carga y descarga de los productos afecta en mayor medida a la gestión del almacén que la gestión del transporte, que sí podría considerarse fuera de la gestión del almacén, si consideramos esta como la gestión de las flotas, sin incluir la gestión de los tiempos de abastecimiento en el transporte.

### 6.1.1.2 Bondad del ajuste

Respecto a la bondad del ajuste realizado, el coeficiente de determinación  $R^2$  es un indicador de la bondad del ajuste para los modelos lineales. Sin embargo, en los modelos *multilogit*, seguidos en la metodología de elección discreta, este valor no tiene sentido.

En su lugar se calcula el valor pseudo- $R^2$  de McFadden, que puede obtenerse como se indica en la Ecuación 6-1. No obstante, este valor no indica la variación de la variable independiente explicada con el modelo, como sí lo hace el coeficiente de determinación  $R^2$  en los modelos lineales tradicionales.

$$R^2 = 1 - \frac{\ln(\hat{\beta})}{\ln(\hat{y})} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Por otra parte, puede decirse que a mayor valor de la función log-verosimilitud, mejor es el ajuste, sin embargo, es necesario comparar su valor con modelos de la misma clase, por lo que no se puede utilizar el valor calculado que aparece en la Figura 6-2 como medida de la bondad del ajuste, pues sólo se posee un modelo.

Por ello, para valorar la bondad del ajuste obtenido se van a analizar dos aspectos diferentes: la probabilidad de que los parámetros ajustados sean realmente nulos y la capacidad de acierto del modelo encontrado.

Respecto a los valores estimados para los pesos,  $\widehat{\beta}_k$ , bajo el supuesto de que las estimaciones de los parámetros estén normalmente distribuidos, se pueden definir intervalos de confianza.

Así, el valor real del parámetro  $\beta_i$  estará en el intervalo definido por su estimación más menos 1,96 su desviación tipo a un nivel de confianza del 95% (Ecuación 6-2). Para otros niveles de probabilidad, 90% y 99%, la constante que multiplica a la desviación tipo toma el valor 1,645 y 2,575 respectivamente.

$$\beta_i \in [\hat{\beta}_i \pm 1,96\hat{s}_i] \quad \text{Ecuación 6-2}$$

Fijando como nivel de confianza el 95%, podemos asegurar que si se cumple la Ecuación 6-3, el valor  $\beta_i$  será nulo con una probabilidad del 5% o lo que es lo mismo, será distinto de cero con una probabilidad del 95%.

$$\left| \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{s}_i} \right| > 1,96 \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Analizando estos valores para la estimación obtenida (Figura 6-2) a un nivel de significación del 90%, se puede afirmar que los valores  $\beta_{WMS}$ ,  $\beta_{WMS+LMS}$ ,  $\beta_{\text{Código de barras}}$ ,  $\beta_{RFID}$ ,  $\beta_{\text{Pick to light}}$  y  $\beta_{\text{Pick to voice}}$  son distintos de cero. Aumentando el nivel de significación al 95% podemos realizar la misma afirmación para los mismos valores a excepción del valor de  $\beta_{RFID}$ .

Se detalla a continuación una tabla con el nivel de significación concreto que se ha obtenido para el que puede asegurarse que cada valor de  $\beta_k$  estimado es distinto de cero (Tabla 6-4).

Tabla 6-4: Nivel de confianza para  $\beta_k \neq 0$

Parámetro estimado	Nivel de confianza
$\beta_{WMS}$	96,94%
$\beta_{WMS+LMS}$	97,22%
$\beta_{\text{Código de barras}}$	96,77%
$\beta_{RFID}$	92,89%
$\beta_{\text{Pick to light}}$	98,70%
$\beta_{\text{Pick to voice}}$	98,10%
$\beta_{YMS}$	74,54%
$\beta_{TMS}$	38,31%

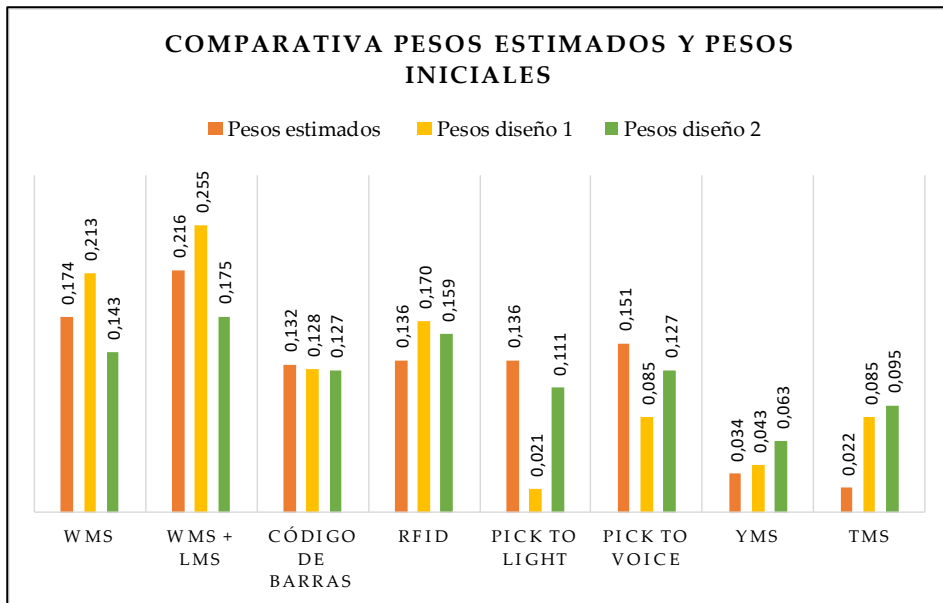
Otra medida que se puede realizar para determinar la bondad del ajuste, es analizar en qué porcentaje de veces estos valores proporcionan una utilidad máxima para la alternativa elegida por los expertos en los cuestionarios recogidos. Es decir, cuál es el porcentaje de aciertos en la elección de cada alternativa con el modelo resultante para las opiniones declaradas y recogidas en los cuestionarios.

Analizando esto, se encuentra, que los pesos obtenidos proporcionan la máxima utilidad a la misma alternativa que han elegido los expertos en el 55,56% de los casos. Es decir, el modelo propuesto tiene una tasa de aciertos cercana al 56%.

Por último, es de interés valorar el acierto en los valores de  $\beta_k$  que se utilizaron para el diseño de los cuestionarios. Es decir, su similitud con los valores estimados  $\hat{\beta}_k$ . Como puede observarse de la siguiente gráfica (Gráfica 6-2) existen diferencias significativas respecto a los valores utilizados para el diseño de los cuestionarios y los valores finalmente obtenidos. Esta diferencia es muy significativa para el parámetro  $\hat{\beta}_{TMS}$  para los dos parámetros utilizados en los dos diseños realizados. Si estudiamos el cociente entre el valor utilizado para el diseño y el valor estimado, se observa que en ambos casos este valor es del orden de 4, de hecho, la diferencia entre cada uno de los valores utilizados y el parámetro estimado es más de tres veces el valor del parámetro estimado.

Como se indicó en el apartado dedicado a los modelos de elección discreta pudiera ser conveniente ajustar el modelo y repetir el análisis. Dado que, con cada ajuste del modelo, se deben realizar los diseños de los cuestionarios resultaría necesario recoger en cada iteración las opiniones de los expertos. Esto no es factible en este trabajo, por lo que no ha sido posible ajustar el modelo en un proceso iterativo. En el caso de que se dispusiera de un panel más amplio, podría utilizarse un pequeño grupo de expertos para realizar cuantos ajustes fueran necesarios y una vez calibrado el modelo realizar los cuestionarios al conjunto completo de los expertos. Dado que el número de expertos disponibles es pequeño, no ha sido posible realizar el ajuste.

No obstante, a excepción del valor indicado para el parámetro  $\hat{\beta}_{TMS}$ , como se observa de la gráfica indicada, los valores iniciales utilizados para la inicialización del proceso son en general una buena predicción de las estimaciones resultantes con el ajuste mediante el modelo de elección discreta.



Gráfica 6-2: Comparativa entre los pesos estimados mediante elección discreta y los utilizados para el diseño

## 6.1.2 Resultados obtenidos mediante ajuste por regresión

La siguiente figura muestra el resultado del ajuste mediante un modelo de regresión lineal múltiple proporcionado por el programa Microsoft Excel (Figura 6-3).

Como se observa, en la primera parte de la figura aparecen los datos relativos al ajuste:

- Coeficiente de correlación múltiple: R
- Coeficiente de determinación  $R^2$
- Coeficiente de determinación  $R^2$  ajustado
- El error típico
- Las observaciones utilizadas en el ajuste.

A continuación, está el análisis de la varianza, denominado generalmente por su



acrónimo inglés ANOVA (*Analysis of Variance*). Donde aparecen los valores que determinan la variación que puede explicarse por el ajuste y la que se debe a los residuos, así como los valores cuadráticos medios. Aparece también el estimador F y el valor significativo de dicho estimador.

Por último, en el tercer bloque aparecen los resultados propiamente dichos de la regresión, así como el error típico de cada coeficiente. El estadístico t, su significación, y los valores inferior y superior que engloban al 95% de la nube de puntos.

Estadísticas de la regresión						
Coefficiente de correlación múltiple		0,871006				
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>		0,758651				
R <sup>2</sup> ajustado		0,749324				
Error típico		1,088851				
Observaciones		216				
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedia de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	8	771,444503	96,430563	81,335039	1,095E-59	
Residuos	207	245,418539	1,185597			
Total	215	1016,863042				
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	7,383185	0,117142	63,027791	0,000000	7,152241	7,614128
GES1	0,907738	0,090738	10,003991	0,000000	0,728850	1,086626
GES2	1,436012	0,090738	15,825986	0,000000	1,257124	1,614900
IDE1	0,790675	0,090738	8,713859	0,000000	0,611786	0,969563
IDE2	1,227927	0,090738	13,532721	0,000000	1,049038	1,406815
PIC1	0,533978	0,090738	5,884861	0,000000	0,355090	0,712866
PIC2	0,820188	0,090738	9,039125	0,000000	0,641300	0,999077
YMS	0,639385	0,074087	8,630198	0,000000	0,493323	0,785447
TMS	0,510747	0,074087	6,893892	0,000000	0,364686	0,656809

Figura 6-3: Resultados de los pesos proporcionados por Excel correspondiente al ajuste de regresión para la determinación de los pesos de las tecnologías de la información en la gestión de almacenes

Tal y como se ha comentado en el análisis de los resultados obtenidos mediante el ajuste *multilogit*, los valores de los parámetros estimados con el modelo de regresión discreta se han normalizado, de forma que los resultados obtenidos mediante las tres metodologías de aplicación sean comparables entre sí. Se detallan a continuación los pesos obtenidos y los valores normalizados para dichos pesos (Tabla 6-5).

Tabla 6-5: Pesos estimados mediante el modelo de regresión lineal

	$\hat{\beta}_i$	$\hat{\beta}_i$ normalizados
WMS	0,908	0,132
WMS + LMS	1,436	0,209
Código de barras	0,791	0,115
RFID	1,228	0,179
Pick to light	0,534	0,078
Pick to voice	0,820	0,119
YMS	0,639	0,093
TMS	0,511	0,074

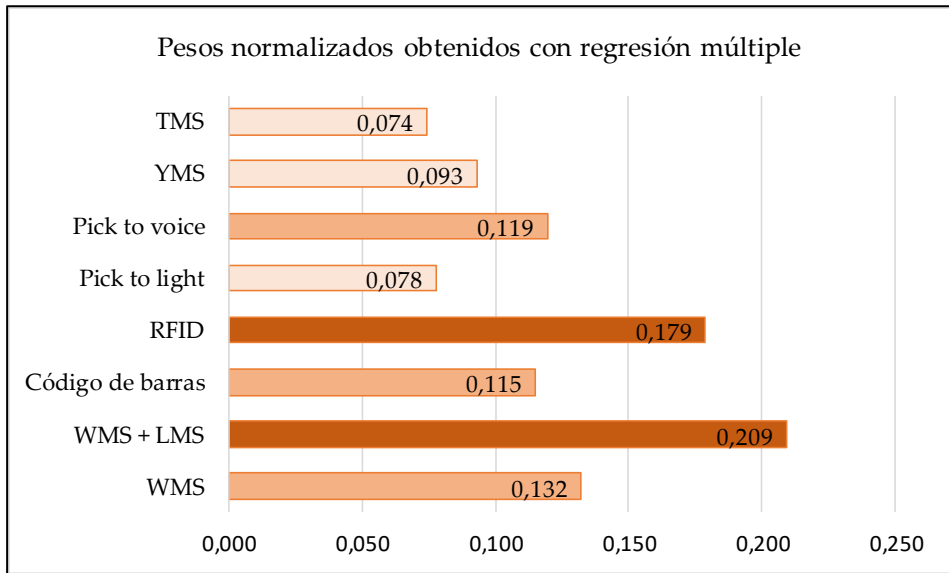
### 6.1.2.1 Signo y valor de los resultados

En este caso, el ajuste también arroja coeficientes positivos, como era de esperar. Por tanto, en primera aproximación, los valores estimados son adecuados, al menos en relación al signo obtenido, lo que no impide que se analice posteriormente de forma más profunda la bondad del ajuste.

Respecto a los valores, analizando los datos de la Tabla 6-5 y la Gráfica 6-3 se puede observar que el mayor peso obtenido es para la combinación de las tecnologías WMS y LMS, en este caso, el valor obtenido es 0,209. Es decir, su aportación a la utilidad en la gestión de almacenes es cercana al 21%. El menor de los valores se ha obtenido para la tecnología de gestión del transporte de mercancías, con un valor de 0,074. Puede concluirse que la mayor valoración es casi tres veces la menor de las valoraciones. Es decir, para la gestión de almacenes, según los pesos obtenidos, la utilidad del sistema de gestión integral de almacenes es tres veces la de la gestión de flotas. Esto está acorde a lo esperado, pues el objetivo es buscar la aportación de cada tecnología a la gestión de almacenes.

Haciendo una clasificación en tres niveles, análoga a la realizada en el apartado anterior, las tecnologías de mayor importancia con un rango superior a 0,15, son la combinación de WMS y LMS, y el RFID (0,179). Con un peso medio, de entre 0,110 a 0,150, se encuentran las tecnologías WMS, sin gestión de los recursos humanos, y las tecnologías pick to voice y código de barras. Por último, en un nivel inferior, comprendido entre 0,05 y 0,10 se encuentran las tecnologías pick to light, YMS y

TMS.



Gráfica 6-3: Pesos obtenidos mediante ajuste de regresión lineal múltiple

### 6.1.2.2 Bondad del ajuste

En los modelos de regresión lineal se puede medir la bondad del ajuste analizando el valor del coeficiente de determinación  $R^2$ , con las salvedades indicadas en el apartado dedicado a este estadístico (Apartado 4.3.3.1.1). Como se observa en la Figura 6-3 el valor obtenido en este caso es 0,759. Esto indica que el modelo ajustado describe el 75,9% de la variabilidad de las observaciones analizadas. Por otra parte el estadístico  $R_{Adj}^2$  toma un valor muy parecido, 74,9%.

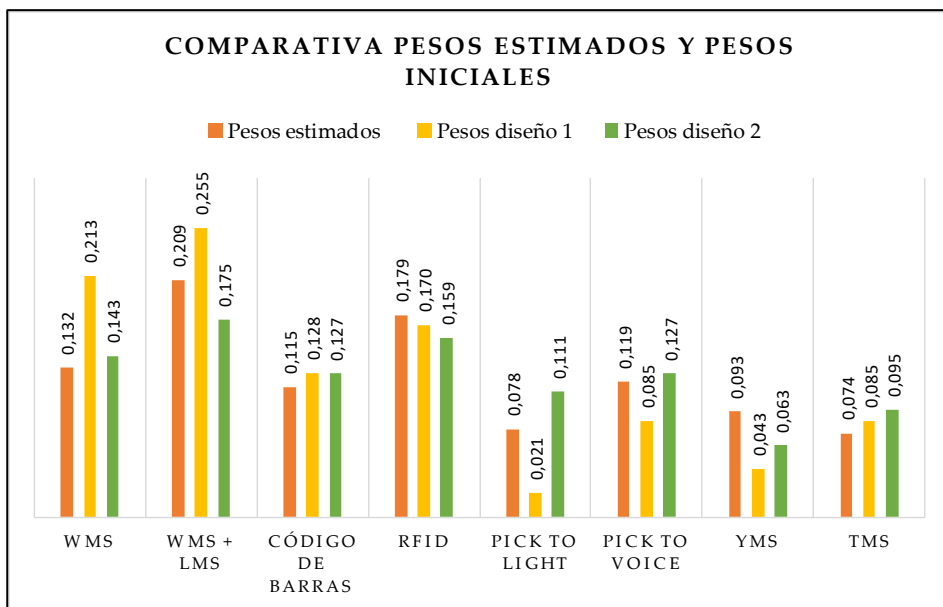
En relación al análisis de la varianza, se observa que el estadístico  $F_0$  toma un valor elevado,  $F_0 = 81,335$ , con  $p_{valor} = 1,095 \cdot 10^{-59}$ , lo indica que se puede rechazar la hipótesis nula ( $\beta_j = 0 \forall j$ ) para un nivel de confianza muy elevado, cercano al 100%. Esto indica que, al menos una de las variables independientes, es decir una de las tecnologías analizadas, está relacionada con la valoración que hacen los expertos de la solución tecnológica presentada para la gestión del almacén.

De forma global, los datos indican que el 76% de la variación de la variable  $y$ , la

utilidad, es explicada por la presencia de las tecnologías en cada uno de los procesos, pudiendo además asegurarse que al menos una de las tecnologías tiene un valor significativo en dicha utilidad.

Por último, en relación al aporte que cada una de las tecnologías hace a la valoración, como se observa de la parte inferior de la Figura 6-3, podemos afirmar con un nivel de significación cercano al 100%, que ninguno de los coeficientes  $\beta_j$  es nulo. Ello puede deducirse de los valores del estimador  $t_0$  y la probabilidad de que el valor sea nulo que reflejan la cuarta y quinta columna de la parte inferior de la Figura 6-3 para cada una de las variables independientes del modelo. Esto indica que la presencia de cualquiera de las tecnologías aporta de forma positiva a la utilidad en la gestión de almacenes según la opinión mostrada por los expertos.

Por último, se presentan los coeficientes de ajuste estimados frente a los aportados para el diseño de los escenarios (Gráfica 6-4).



Gráfica 6-4: Comparativa entre los pesos estimados con ajuste lineal y los utilizados para el diseño

En este caso, también existen diferencias significativas entre los valores obtenidos y los datos aportados para el diseño de los escenarios. Sin embargo, en la utilización de esta metodología, no existe una influencia en los resultados, ya que las

alternativas presentadas a los encuestados no se presentan agrupadas, como en el caso de la metodología anterior.

### 6.1.3 Resultados obtenidos mediante análisis jerárquico

Se detallan a continuación los vectores de prioridad obtenidos por cada experto, así como la proporción de consistencia de cada matriz de correlación (Tabla 6-6)

Tabla 6-6: Vectores de prioridad de las matrices de los expertos

	EXP. 1	EXP. 2	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8
WMS	0,267	0,155	0,277	0,282	0,134	0,167	0,061	0,321
LMS	0,058	0,045	0,194	0,048	0,091	0,101	0,055	0,046
Código de barras	0,173	0,144	0,118	0,093	0,140	0,197	0,196	0,166
RFID	0,192	0,163	0,166	0,178	0,214	0,219	0,196	0,166
Pick to light	0,137	0,216	0,090	0,091	0,127	0,085	0,129	0,097
Pick to voice	0,088	0,182	0,067	0,174	0,127	0,117	0,129	0,097
YMS	0,050	0,055	0,049	0,045	0,052	0,042	0,120	0,053
TMS	0,035	0,040	0,040	0,087	0,115	0,072	0,112	0,056
IC/IA	<b>0,05</b>	<b>0,14</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>0,08</b>	<b>0,05</b>

Como se puede observar, la proporción de consistencia de la matriz de comparación por pares del experto 2, es superior a lo aconsejable, ya que toma un valor de 0,14, superior a lo aconsejable: 0,10 (véase el término en la última fila de la tercera columna de la Tabla 6-6). Tras observar este hecho, se decide no considerar el vector de prioridad del experto 2 para la agregación de las opiniones.

Una vez eliminado este vector de prioridad, para obtener las opiniones agregadas se determina la matriz de correlación de los siete vectores de prioridad a incluir (Tabla 6-7). Una vez obtenida ésta, se calculan los pesos de ponderación para determinar el vector de prioridad final que proporcionará los valores estimados de los parámetros  $\beta_k$ .

Tabla 6-7: Matriz de correlación de los vectores de prioridad de cada experto y peso asignado

	EXP 1	EXP 3	EXP 4	EXP 5	EXP 6	EXP 7	EXP 8
EXP 1	1	0,691	0,790	0,621	0,777	0,168	0,950
EXP 3	0,691	1	0,566	0,306	0,559	-0,381	0,699
EXP 4	0,790	0,566	1	0,543	0,571	-0,089	0,874
EXP 5	0,621	0,306	0,543	1	0,840	0,572	0,474
EXP 6	0,777	0,559	0,571	0,840	1	0,504	0,679
EXP 7	0,168	-0,381	-0,089	0,572	0,504	1	-0,014
EXP 8	0,950	0,699	0,874	0,474	0,679	-0,014	1
PESO ASIGNADO	<b>0,164</b>	<b>0,130</b>	<b>0,147</b>	<b>0,145</b>	<b>0,159</b>	<b>0,098</b>	<b>0,158</b>

Como se observa, los mayores pesos son los utilizados para los expertos 1 y 6. Las opiniones vertidas por los expertos 3 y 7 son las más alejadas de la media como se observa de la matriz de correlación (Tabla 6-7). En especial se puede señalar la del experto 7, cuyo coeficiente de ponderación es 0,098. Nótese que, para una ponderación idéntica entre todos los expertos, el coeficiente utilizado sería 0,143.

Se detalla ahora el vector de prioridad obtenido con las opiniones agregadas según su índice de correlación (Tabla 6-8).

Tabla 6-8: Pesos estimados con metodología AHP

	$\hat{\beta}_i$
WMS	0,222
LMS	0,088
Código de barras	0,153
RFID	0,189
Pick to light	0,107
Pick to voice	0,113
YMS	0,057
TMS	0,071

En este caso, antes de proceder al análisis de los resultados obtenidos es necesario

realizar unas consideraciones en relación a los mismos. Como se indica en la elaboración del cuestionario y la metodología, en el análisis AHP se han comparado las diferentes tecnologías de manera individual en todos los casos. Esto es especialmente relevante en el caso de la tecnología de gestión de personal y recursos del almacén, denominada en el estudio de la tecnología LMS. En las dos metodologías anteriores, la aportación a la utilidad de la tecnología LMS se midió de manera conjunta con la tecnología de gestión general de almacenes: WMS. Para que los resultados obtenidos sean comparables, y dado que se asume en todo el trabajo que la utilidad es aditiva, se obtendrá el valor conjunto para las tecnologías WMS y LMS, como la suma de los dos parámetros obtenidos. Con ello, la tabla de resultados que se utilizará para analizar los resultados se detalla a continuación (Tabla 6-9), así como la gráfica que representa estos datos (Gráfica 6-5).

Tabla 6-9: Pesos estimados con metodología AHP modificados para análisis

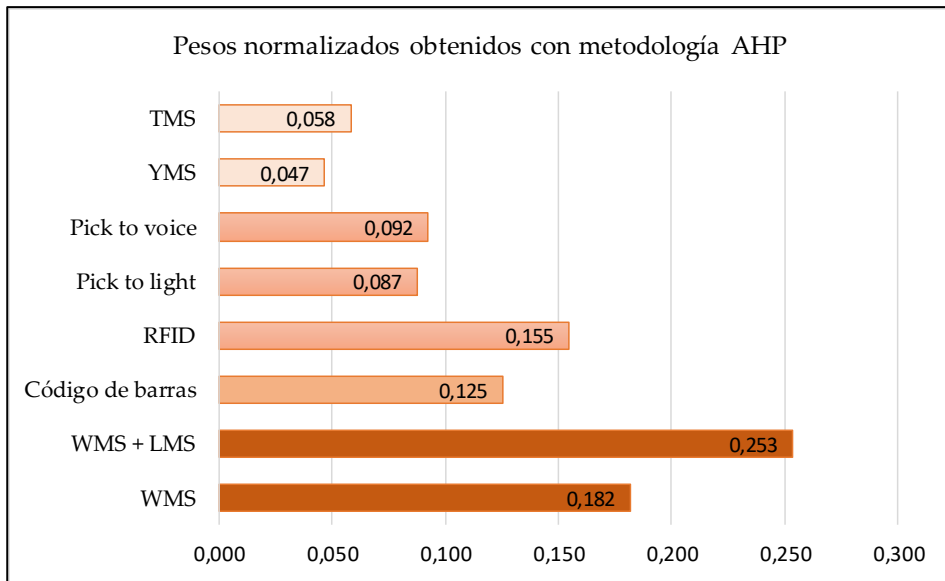
	$\hat{\beta}_i$
WMS	0,182
WMS + LMS	0,253
Código de barras	0,125
RFID	0,155
Pick to light	0,087
Pick to voice	0,092
YMS	0,047
TMS	0,058

Una vez hecha esta consideración, los resultados vuelven a coincidir respecto al valor más elevado encontrado. De nuevo, el conjunto de las tecnologías WMS y LMS tiene el mayor de los pesos en la utilidad. En este caso, ese valor es más elevado que en los anteriores, 0,253. La siguiente tecnología en importancia es el sistema de gestión general son la incorporación de la gestión de los recursos humanos, WMS.

También existe coincidencia en los valores inferiores encontrados, que son los obtenidos para las tecnologías destinadas a la gestión de flotas y la gestión de dársenas o muelles, TMS e YMS. En el nivel intermedio de importancia, se encuentran en primer lugar las dos tecnologías de identificación, RFID y código de barras, con valores similares de 0,155 y 0,125 respectivamente. En segundo nivel, a

un grado de importancia algo menor están las dos tecnologías utilizadas para la preparación de pedidos, pick to voice y pick to light, con valores 0,092 y 0,087 muy similares entre ellos.

En este caso, en relación a la tecnología de identificación utilizada, el análisis de las matrices de comparación por pares indica que los expertos prefieren la tecnología de código de barras frente al RFID. En relación a la tecnología de preparación de pedidos los expertos no muestran una preferencia significativa por ninguna de ellas, pues las valoraciones resultantes son muy similares.



*Gráfica 6-5: Pesos normalizados obtenidos con la metodología AHP*

























Por último, en esta tecnología no cabe realizar una bondad del ajuste, puesto que no se ha realizado un ajuste. Los vectores de prioridad obtenidos muestran los pesos relativos que cada decisor otorga a las tecnologías. La adecuación de estos valores pasa por la adecuación del autovector principal de la matriz de comparación como valor de prioridades, que tiene relación con la aceptación de la propia metodología. Por último, cabe analizar la adecuación de la aproximación usada para obtener el autovector. Como se indicó en el apartado dedicado a esta metodología, (Saaty & Vargas 1982) indican que esta aproximación produce los valores más exactos entre los utilizados.



### 6.1.4 Comparativa entre resultados con las tres metodologías

Se detallan en este apartado los resultados obtenidos con las tres metodologías de manera conjunta para su comparación y análisis. A modo de resumen se presentan los resultados en una tabla (Tabla 6-10) donde cada columna refleja los resultados obtenidos con una metodología.

Tabla 6-10: Pesos obtenidos por las tres metodologías para el análisis 1

	Elección discreta	Regresión	AHP
WMS	 0,174	 0,132	 0,182
WMS + LMS	 0,216	 0,209	 0,253
Código de barras	 0,132	 0,115	 0,125
RFID	 0,136	 0,179	 0,155
Pick to light	 0,136	 0,078	 0,087
Pick to voice	 0,151	 0,119	 0,092
YMS	 0,034	 0,093	 0,047
TMS	 0,022	 0,074	 0,058

Se detallan estos mismos resultados en forma gráfica (Gráfica 6-6) lo que ayudará a un análisis visual de los mismos. La gráfica presentada es una gráfica radial, de ocho ejes en los que se presenta el valor estimado para cada tecnología por ejes, unidos por una línea poligonal cerrada para cada metodología.

También se presenta una tabla donde se han reflejado los valores máximos y mínimos obtenidos con cada metodología (Tabla 6-11).



Gráfica 6-6: Comparativa de los resultados obtenidos para el análisis 1

Tabla 6-11: Valores máximos y mínimos obtenidos en el análisis 1

	Elección discreta		Regresión		AHP	
	Tecnología	Valor	Tecnología	Valor	Tecnología	Valor
<b>Máximo Valor</b>	WMS + LMS	0,216	WMS + LMS	0,209	WMS + LMS	0,253
<b>Mínimo Valor</b>	TMS	0,022	TMS	0,074	YMS	0,057

Tras el análisis de los resultados pueden reflejarse las siguientes consideraciones:

Dado que se busca la importancia de cada tecnología en la gestión de almacenes, es de esperar que las tecnologías de aplicación transversal, que contribuyen como herramienta global en la gestión de almacenes, sean las más valoradas. Los resultados ratifican esta afirmación. En la estimación de los parámetros, las tres metodologías indican que la tecnología más valorada por los expertos es el binomio WMS+LMS. En todos los casos, el parámetro estimado para esta tecnología supera el umbral del 20% de la utilidad. En particular, el mayor valor es el determinado con la metodología AHP (0,253). Las metodologías de análisis discreto y el ajuste mediante el modelo de regresión indican que los expertos valoran esta tecnología con utilidades muy cercanas, de 0,216 y 0,209 respectivamente.

En relación a las metodologías que menos aportan a la gestión de almacenes, en los tres casos, son las metodologías dedicadas a la gestión de flotas y a la gestión de muelles. En el caso de la elección mediante elección discreta y el ajuste por regresión, la de menor aporte es la tecnología aplicada a la gestión de flotas, seguida de la gestión de muelles y en el caso de la metodología AHP, los resultados son en orden inverso, la de menor importancia es la gestión de muelles y la anterior la de gestión de flotas. Como ya se indicó, desde el punto de vista de la aportación a la gestión de almacenes, parece lógico que estas dos tecnologías, que pueden enmarcarse en sistemas externos a la propia gestión de almacenes, aunque obviamente dentro de la gestión de la cadena de suministro, sean las menos valoradas.

En relación a las tecnologías analizadas dedicadas a la identificación de elementos, código de barras y RFID, aunque no existe unanimidad en los resultados en relación a los valores obtenidos, sí lo existe en el orden de importancia. En los tres casos se obtiene que la metodología RFID tiene una aportación a la utilidad en la gestión de almacenes mayor que el código de barras. En los tres casos, la utilidad de las tecnologías de identificación está en el rango de 0,10 a 0,20. En el caso del análisis mediante elección discreta las elecciones de los expertos indican que su valoración es prácticamente la misma, los valores son 0,132 para el código de barras y 0,136 para RFID, es decir, apenas existe diferencia. En relación al análisis mediante regresión, la diferencia es la mayor de las obtenidas, los valores son 0,115 y 0,179, respectivamente. En la metodología AHP los valores son 0,155 y 0,125. Como se puede observar, aunque en todos los casos la metodología RFID resulta de mayor utilidad que el código de barras, esta diferencia es poco significativa, en ningún caso la utilidad del RFID supera ampliamente al código de barras. Ello parece estar en consonancia con los trabajos que indican que la tecnología RFID no es capaz de sustituir a la tecnología del código de barras. Para que la tecnología RFID se implantara de manera mayoritaria, sería necesario que los gestores de las empresas, apreciaran una utilidad significativamente mayor que con los sistemas actuales, como puede ser el código de barras, que está completamente instalado e integrado en los productos a través de la cadena de suministro.

En relación a las tecnologías analizadas para la preparación de pedidos, pick to light y pick to voice, de nuevo, los resultados, aunque difieren numéricamente, aportan el mismo orden de preferencia con las tres metodologías de análisis. En todos los casos, la tecnología pick to voice aporta un valor algo superior a la tecnología pick to light. A priori, sin más especificaciones sobre el tipo de picking a realizar o la tipología de

productos, podría suponerse que la tecnología asociada a los sistemas de pick to voice son más fáciles de aplicar y de utilizar, así como más versátiles. Por otra parte, diversos autores indican que los errores cometidos al realizar la orden de picking son significativamente mayores en los procesos asistidos con pick to light (0,40%) frente a los realizados con pick to voice, (0,08%) (Ten Hompel & Schmidt 2007) . Todo ello es coherente con los resultados obtenidos.

En relación al uso de las tres metodologías, se observa que, no habiéndose obtenido los mismos valores para la importancia o utilidad de cada tecnología, los órdenes de prioridad sí son similares. Esto nos indica que las tres metodologías pueden utilizarse a la hora de obtener los parámetros buscados, siempre y cuando no sea necesaria una gran exactitud en los parámetros a estimar. La metodología de elección discreta junto con el modelo de ajuste de *multilogit* está especialmente orientada a obtener estos valores. Esta metodología requiere el uso de softwares específicos para procesar la información recogida, así como importantes conocimientos para su aplicación y comprensión. Estos softwares son poco habituales en el ámbito de la empresa, siempre que no sea una empresa dedicada a la elaboración de estudios. Esto puede suponer un grave inconveniente a la hora de decantarse por esta metodología. Por otra parte, la metodología AHP, aunque muy utilizada en el ámbito científico y académico, es menos conocida en el ámbito empresarial, su aplicación requiere ciertos conocimientos de álgebra no muy extendidos. Para obtener los resultados exactos debe contarse con algún programa de cálculo matemático, o utilizarse aproximaciones como la indicada en este trabajo, que pueden implementarse en programas de tratamiento de hojas de cálculo, muy extendidos y utilizados en el ámbito empresarial. Por último, el modelo de ajuste por regresión lineal múltiple es quizás el ajuste más sencillo de hacer y que requiere unos conocimientos más básicos y por tanto más fáciles de tener. Además, puede obtenerse con un programa de tratamiento de hojas de cálculo, lo que presenta una ventaja a la hora de utilizar esta metodología.

Se muestra a continuación una tabla con los coeficientes de correlación obtenidos entre las tres metodologías (Tabla 6-12).

Esta tabla indica el grado de acuerdo o desacuerdo entre los resultados obtenidos con las tres metodologías. En primer lugar, cabe destacar que el mayor nivel de correlación, 0,890, cercano al 90% es el alcanzado entre la metodología AHP y el ajuste con el modelo de regresión lineal. El menor nivel de correlación se encuentra entre los valores obtenidos mediante el ajuste *multilogit* para el modelo de elección

discreta y el análisis por regresión.

Tabla 6-12: Matriz de correlación entre las tres metodologías

	<i>Elección discreta</i>	<i>Regresión</i>	<i>AHP</i>
<i>Elección discreta</i>	1	0,724	0,859
<i>Regresión</i>	0,724	1	0,890
<i>AHP</i>	0,859	0,890	1

Por otra parte, se ha evaluado el grado de acierto que producen los coeficientes estimados con la metodología AHP y el análisis de regresión en las elecciones declaradas por los expertos en el primer apartado del cuestionario preparado para su uso mediante elección discreta. Para cada escenario se ha evaluado la utilidad de las tres alternativas, tanto con los parámetros estimados mediante el modelo de regresión lineal, como con los valores obtenidos por la metodología AHP. Una vez obtenidas las utilidades, se ha comprobado si la alternativa de mayor utilidad es la seleccionada por el experto. Como se indica en el apartado dedicado al análisis de elección discreta, con los parámetros estimados con el ajuste multilogit el porcentaje de aciertos es del 55,6%. Con los parámetros estimados mediante la metodología AHP, el porcentaje de aciertos es del 51,4%. Como se ha comentado, los resultados obtenidos con estas dos metodologías son similares, por lo que como era de esperar, los valores de la utilidad obtenidos resultan similares. En relación al porcentaje de aciertos con los parámetros estimados con el ajuste lineal por regresión, éste disminuye al 40,3%. También este resultado es coherente con lo indicado anteriormente, ya que, en este caso, los coeficientes difieren algo más, recuérdese que el coeficiente de correlación en este caso es del 0,724.

## 6.2 Análisis 2: Áreas de aplicación del RFID

Se presentan ahora los resultados obtenidos en el segundo análisis realizado. En este caso, el objetivo es determinar cuál es la utilidad relativa que aporta en cada proceso de la gestión de almacenes la utilización de la tecnología de identificación mediante RFID en la eliminación de errores.

### 6.2.1 Resultados obtenidos mediante elección discreta

Como en el caso anterior, los resultados obtenidos de los cuestionarios se trataron con el paquete de software LIMDEP®. El ajuste al modelo logit de los resultados obtenidos de los cuestionarios se muestra en la siguiente figura (Figura 6-4).

```

--> DISCRETE CHOICE
      ; Lhs = CHOICE, NIJ
      ; Rhs = REC, EXP, CUB, PIC, PED, CDK
      ; Describe
      ; List
      ; Crosstab $
Normal exit from iterations. Exit status=0.

+-----+
| Discrete choice (multinomial logit) model |
| Maximum Likelihood Estimates             |
| Model estimated: Feb 21, 2017 at 06:45:15PM. |
| Dependent variable                       Choice |
| Weighting variable                       None |
| Number of observations                    64 |
| Iterations completed                     6 |
| Log likelihood function                   -35.95441 |
| Log-L for Choice model =                 -35.95441 |
| R2=1-LogL/LogL*   Log-L fncn   R-sqrd   RsqAdj |
| No coefficients   -44.3614   .18951   .10567 |
| Constants only.  Must be computed directly. |
|               Use NLOGIT ;...; RHS=ONE $ |
| Response data are given as ind. choice. |
| Number of obs.=   64, skipped   0 bad obs. |
+-----+

+-----+-----+-----+-----+-----+
|Variable| Coefficient | Standard Error | b/St.Er. | P[|Z|>z] |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| REC    | 1.036809249 | .69019061      | 1.502    | .1330    |
| EXP    | 1.333640949 | .62988986      | 2.117    | .0342    |
| CUB    | 1.455888029 | .67952597      | 2.143    | .0322    |
| PIC    | 1.269315618 | .54659159      | 2.322    | .0202    |
| PED    | 1.119927304 | .58830776      | 1.904    | .0570    |
| CDK    | 1.117045252 | .69981023      | 1.596    | .1104    |
+-----+-----+-----+-----+-----+

```

Figura 6-4: Resultados proporcionados por el modelo LIMDEP correspondiente al ajuste del modelo de elección discreta para la determinación de los pesos de la aplicación del RFID a los procesos de gestión de almacenes

Se detalla también un resumen de los pesos obtenidos para cada tecnología en la siguiente tabla (Tabla 6-13), así como la tabla de los pesos normalizados (Tabla 6-14).

Como ya se ha comentado anteriormente, el peso mide la importancia relativa de la utilización de la tecnología RFID en cada uno de los procesos evaluados de la gestión de almacenes. Dado que se miden valores de importancia relativa y que la escala de la utilidad es inmaterial respecto a su utilización como selección de alternativas, se pueden normalizar los pesos de forma que su suma coincida con la unidad.

Tabla 6-13: Pesos obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta

Procesos del almacén	$\hat{\beta}_k$
REC	1,037
EXP	1,333
CUB	1,456
PIC	1,269
PED	1,120
CDK	1,117

Tabla 6-14: Pesos normalizados obtenidos del ajuste del modelo de elección discreta

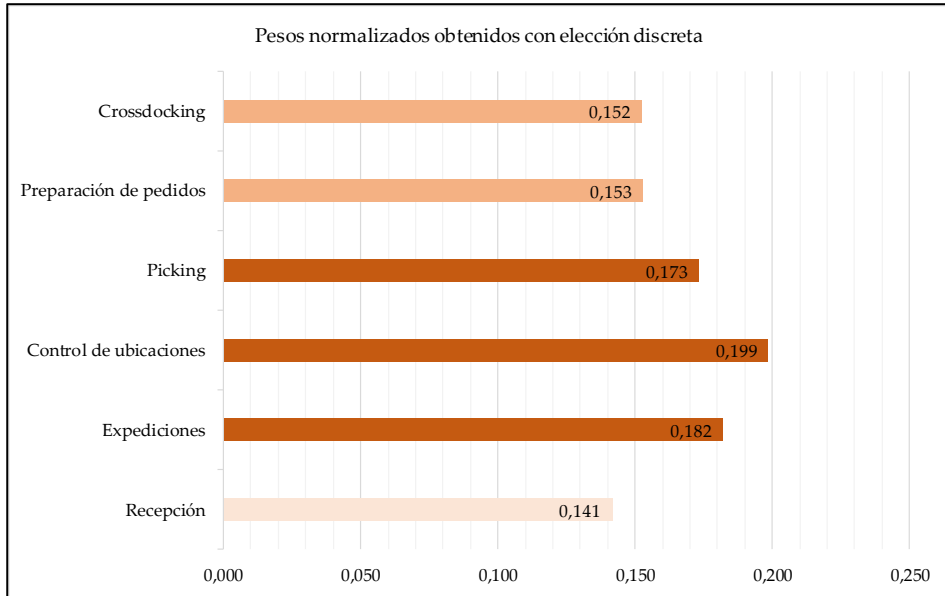
Procesos del almacén	$\hat{\beta}_k$
REC	0,141
EXP	0,181
CUB	0,199
PIC	0,173
PED	0,153
CDK	0,152
SUMA TOTAL	1,000

### 6.2.1.1 Signo y valor de los resultados

Al igual que en el análisis anterior, es de esperar que los parámetros obtenidos tengan un signo determinado. En este caso, de forma análoga al primer análisis, puesto que los parámetros están asociados a la utilidad que proporciona la presencia del RFID en cada proceso, se espera que los parámetros  $\hat{\beta}_k$  tengan signo positivo. Esto se deriva del hecho de suponer que tener una aplicación de tipo RFID aplicada produce una utilidad mayor que no tenerla. Como se observa de la tabla anterior

(Tabla 6-14) los pesos obtenidos mediante el ajuste cumplen con las expectativas de signo siendo todos ellos positivos.

Respecto a los valores alcanzados, se muestra a continuación una gráfica que ayudará a analizar los mismos (Gráfica 6-7).



Gráfica 6-7: Pesos obtenidos con metodología elección discreta

En este caso, los expertos otorgan la mayor utilidad del RFID para la eliminación de errores a su aplicación al proceso de control de ubicaciones seguido del proceso de expediciones y el proceso de picking. En un nivel inferior de utilidad, está la aplicación del RFID a los procesos de preparación de pedidos y a los procesos en plataformas de crossdocking. La utilidad para el proceso de recepción presenta el menor valor.

En la relación a las tasas marginales de sustitución, la siguiente tabla muestra los cocientes entre cada parámetro estimado  $\hat{\beta}_k$  y el mayor de ellos  $\hat{\beta}_{CUB}$ . (Tabla 6-15). Como se observa, la utilidad de la aplicación del RFID al control de ubicaciones es 1,4 veces la utilidad en el proceso de recepción y 1,3 veces superior que en la preparación de pedidos y en proceso de crossdocking. Respecto a la utilización en el proceso de expediciones y en el proceso de picking, la aplicación del RFID a estos



procesos, según la opinión recogida, es de utilidad similar a la obtenida para el proceso de control de ubicaciones.

Tabla 6-15: Tasas marginales de sustitución

	$\hat{\beta}_h$	$\hat{\beta}_{CUB} / \hat{\beta}_k$	$\hat{\beta}_k / \hat{\beta}_{CUB}$
Recepción	0,141	1,404	0,712
Expediciones	0,182	1,092	0,916
Control de ubicaciones	0,199	1,000	1,000
Picking	0,173	1,147	0,872
Preparación de pedidos	0,153	1,300	0,769
Crossdocking	0,152	1,303	0,767

Estos valores son acordes a los resultados que se derivan del análisis de la bibliografía sobre RFID presentada en apartados anteriores.

En relación al valor que tiene mayor ponderación en la utilidad del RFID es en el control de ubicaciones. Como se ha visto en el apartado dedicado a las aplicaciones del RFID en la solución del problema de gestión de almacenes, uno de los principales problemas es la inexactitud de los datos, y dentro de estos problemas, la incorrecta colocación de los mismos es señalada por los autores como un problema a considerar. La inadecuada ubicación hace que un elemento que está en el almacén, y que por tanto ya se ha incurrido en su coste de compra, de recepción y de ubicación, aunque sea una incorrecta, tenga la característica de no vendible o procesable. Este problema tiene una muy fácil solución, que es encontrar el elemento en el almacén. Es por ello, que en este caso el RFID aporta una solución sencilla y de rápida implementación, que sería simplemente localizar en el sistema informático su ubicación física mediante la lectura de su etiqueta RFID. Otra ventaja muy significativa que aporta el control de ubicaciones mediante RFID es poder realizar de manera sencilla el control de inventarios o el recuento de almacenes, que siempre supone un consumo de recursos de mano de obra muy importante y de gran coste para todas las compañías, ya que es necesario realizarlo al menos una vez anualmente para el cierre del ejercicio económico y más veces si se quiere tener un

control real de los inventarios.

El segundo valor en importancia es el obtenido en el proceso de expediciones. Como es bien sabido, los costes de logística inversa derivados de que los elementos, por diferentes razones, tengan que recorrer la cadena en el sentido inverso al natural, son importantes y representan cargas de trabajo adicionales con su consecuente coste. El último punto de control para la correcta salida de una mercancía es el control de expediciones, luego puede pensarse que el RFID aportará en este punto de la cadena el mayor valor para evitar un error humano que implicaría un envío o salida incorrecta.

Por último, en relación al menor valor encontrado, éste es en la recepción de mercancías (0,141). No obstante, como se puede observar, los dos valores siguientes en orden de importancia, preparación de pedidos y crossdocking, son muy cercanos (0,152 y 0,153). Por ello, es difícil obtener conclusiones fundamentadas sobre los motivos por los que éstos son los procesos en los que aporta menor valor el RFID.

### **6.2.1.2 Bondad del ajuste**

Como se comentó en el apartado de los resultados del primer análisis, el valor de  $R^2$  no puede utilizarse como en los procesos de ajuste lineal, donde este índice es utilizado como medida inicial de la bondad del ajuste.

Estudiaremos en este caso, las probabilidades que los parámetros estimados  $\hat{\beta}_k$  sean realmente nulos, a diferentes niveles de confianza. Para ello, se muestra a continuación el nivel de confianza con el que puede asegurarse que  $\beta_k \neq 0$  para cada uno de los seis parámetros estimados (Tabla 6-16). En este caso, se puede afirmar que con un nivel de confianza del 87% todos los valores de los parámetros estimados son distintos de cero, por lo que ninguno de los atributos parece ser irrelevante en la utilidad que proporciona la aplicación del RFID en los distintos procesos que se han definido de gestión del almacén. Es decir, todos los procesos analizados, definidos como atributos, influyen de manera significativa en la utilidad de cada alternativa.

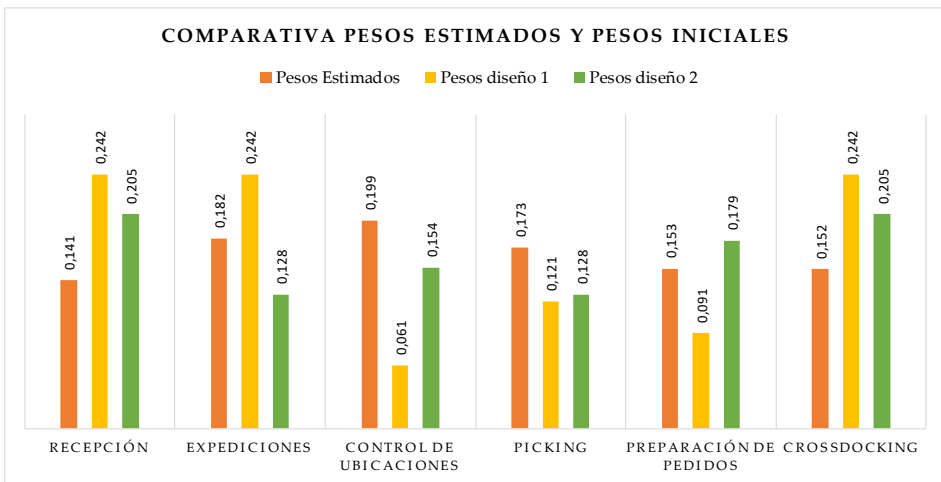
Por otra parte, también se puede valorar el porcentaje de aciertos que produce el modelo en cuanto a las preferencias declaradas por los expertos. En este caso, como se indicó en el diseño de cuestionarios, se han presentado 64 escenarios de dos alternativas en el total de cuestionarios. El modelo ajustado produce la misma respuesta en 46 de los 64 escenarios evaluados, lo que se corresponde a una tasa de aciertos del 71,88%. Ello indica que, en este caso, el modelo se ajusta mejor a la

realidad que pretende representar que en el análisis anterior.

Tabla 6-16: Nivel de confianza para  $\beta_k \neq 0$

Parámetro estimado	Nivel de confianza
$\hat{\beta}_{REC}$	86,7%
$\hat{\beta}_{EXP}$	96,6%
$\hat{\beta}_{CUB}$	96,8%
$\hat{\beta}_{PIC}$	98,0%
$\hat{\beta}_{PED}$	94,3%
$\hat{\beta}_{CDK}$	89,0%

Se presenta a continuación la comparación de los pesos estimados con los utilizados en el proceso de diseño de los cuestionarios (Gráfica 6-8).



Gráfica 6-8: Comparativa entre los pesos estimados mediante elección discreta y los utilizados para el diseño

Como ocurre en el primer análisis, los pesos utilizados para el diseño de los cuestionarios difieren sustancialmente de los pesos estimados con el modelo. Muy significativo es el caso del control de ubicaciones. Al igual que en el caso anterior, tal y como se indicó es preciso, en el diseño de los cuestionarios, realizar una serie de ajustes del modelo a utilizar que proporcionarían con seguridad mejores resultados.

No obstante, por los mismos motivos que se expusieron en el apartado anterior, esto no ha sido posible.

## 6.2.2 Resultados obtenidos mediante análisis por regresión

La siguiente figura muestra el resultado del ajuste por regresión proporcionado por el programa Excel (Figura 6-5) para el segundo análisis realizado.

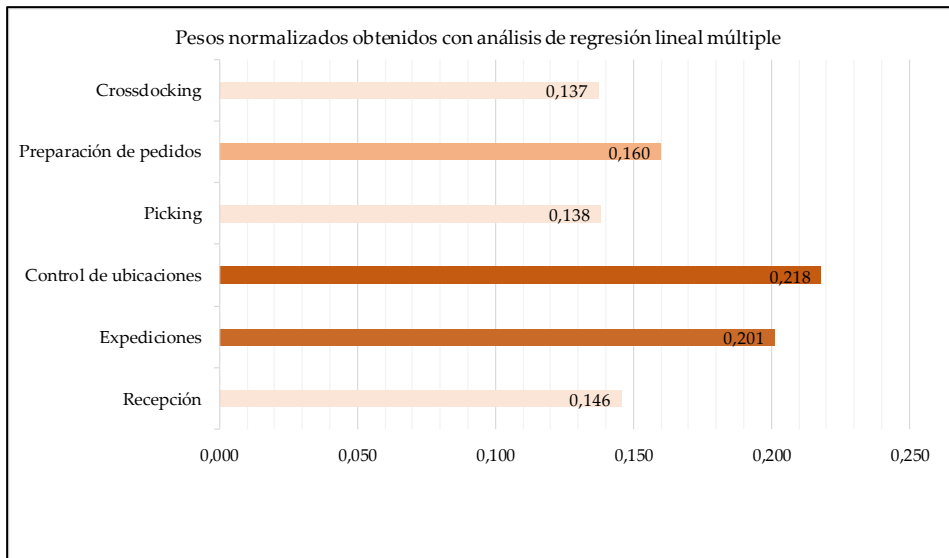
<i>Estadísticas de la regresión</i>						
Coefficiente de correlación múltiple		0,885766				
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>		0,784582				
R <sup>2</sup> ajustado		0,773900				
Error típico		1,013297				
Observaciones		128				
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
Regresión	6	452,495536	75,415923	73,449682	5,5013E-38	
Residuos	121	124,239158	1,026770			
Total	127	576,734694				
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	5,250000	0,089564	58,617558	0,000000	5,072685	5,427315
REC	0,658482	0,089564	7,352117	0,000000	0,481167	0,835797
EXP	0,910714	0,089564	10,168352	0,000000	0,733400	1,088029
CUB	0,986607	0,089564	11,015715	0,000000	0,809292	1,163922
PIC	0,625000	0,089564	6,978281	0,000000	0,447685	0,802315
PED	0,723214	0,089564	8,074868	0,000000	0,545900	0,900529
CDK	0,620536	0,089564	6,928436	0,000000	0,443221	0,797850

*Figura 6-5: Resultados de los pesos proporcionados por Excel correspondiente al ajuste de regresión para la determinación de los pesos de la aplicación del RFID a los procesos de gestión de almacenes*

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores obtenidos para los coeficientes de la regresión y sus valores normalizados (Tabla 6-17), así como una gráfica que ayudará a la interpretación de los resultados obtenidos (Gráfica 6-9).

Tabla 6-17: Pesos y pesos normalizados obtenidos mediante modelo de regresión lineal. Análisis 2

	$\hat{\beta}_k$	$\hat{\beta}_k$ normalizados
Recepción	0,658	0,146
Expediciones	0,910	0,201
Control de ubicaciones	0,987	0,218
Picking	0,625	0,138
Preparación de pedidos	0,723	0,160
Crossdocking	0,620	0,137



Gráfica 6-9: Pesos obtenidos mediante regresión lineal múltiple. Análisis 2

### 6.2.2.1 Signo y valor de los resultados

Tal y como se ha indicado, en los apartados anteriores, las expectativas respecto al signo de los coeficientes indican que estos deben ser positivos. Como se refleja en la tabla de resultados está expectativa es satisfecha, teniendo todos los coeficientes el signo adecuado: positivo.

En relación a los valores obtenidos, como se observa, el proceso en el que la utilidad

del RFID es mayor, es el control de ubicaciones. Como se ha comentado en el apartado anterior, esto es coherente con el hecho de que uno de los problemas clásicos de la gestión de almacenes es la inexactitud de los datos. El siguiente valor en importancia es el obtenido para el control de las expediciones. Ello como se indicó anteriormente, puede relacionarse con los sobre costes derivados de la logística inversa, que irremediamente se producen cuando el envío de la mercancía no es el adecuado. Por ello, parece lógico que los expertos otorguen gran importancia a evitar el error humano en el último proceso de control antes de realizar el envío de una mercancía. Dado que el envío suele ser para un cliente, generalmente externo, al coste de la logística inversa, hay que añadir la insatisfacción generada en el cliente, cantidad difícilmente cuantificable económicamente, pero de gran repercusión.

Por último, al igual que ocurre en la metodología anterior, los valores inferiores encontrados son muy similares entre sí, lo que no permite una interpretación clara de los mismos para obtener conclusiones significativas.

### **6.2.2.2 Bondad del ajuste**

Respecto a la bondad del ajuste, en primer lugar, se analizan tres valores encaminados a conocer la bondad del ajuste de forma global.

El coeficiente de determinación  $R^2$  obtenido con el modelo de ajuste de regresión lineal múltiple es 0,785. El coeficiente de determinación ajustado es 0,774. El primero de ellos indica que el 78,5% de la variabilidad de la variable independiente,  $y$ , que representa la valoración expresada por los expertos puede explicarse con la variación de las variables independientes. En este caso con la aplicación o no de la tecnología RFID en los distintos procesos de la gestión de almacenes.

El coeficiente de determinación ajustado expresa el mismo valor, pero midiendo los términos medios de la variación, y no sus valores absolutos, por lo que se utiliza para comparar distintos ajustes en los que se añaden variables independientes o regresoras. En este caso, no es de aplicación su utilización, dado que sólo se ha considerado un modelo de ajuste y por otro lado, se utilizará un estadístico para valorar la aportación de cada una de las variables regresoras.

Otra medida de la bondad del ajuste puede determinarse mediante el análisis del estadístico F. Como se observa en la Figura 6-5, el valor que toma este estadístico en el modelo presentado es 73,450. Con un p-valor de  $5,501 \cdot 10^{-38}$ , es decir con un valor prácticamente nulo. Es decir, se puede afirmar que se rechaza la hipótesis nula

que supone que todos los coeficientes regresores son nulos. Por tanto, puede afirmarse, con un nivel de significación, cercano al 100%, que existe al menos un valor de  $\beta_j$  no nulo.

Por otra parte, en relación a los parámetros estimados de forma individual, como refleja la misma figura (Figura 6-5) se han obtenido los valores del estadístico  $t_0$ , así como la probabilidad con la que se puede afirmar que dichos valores, fijados el resto, son nulos. Estos valores se reflejan en el tercer grupo de datos de la figura indicada, en la tercera y cuarta columna. En este caso, también se puede afirmar con un nivel de significación casi del 100% son no nulos. Como se observa, con un grado de detalle de seis decimales, la probabilidad de que los coeficientes sean nulos es cero.

Ello indica que en la valoración que hacen los expertos, la aplicación del RFID aporta un valor positivo en todos los procesos de gestión del almacén.

### 6.2.3 Resultados obtenidos mediante análisis jerárquico

Se muestra a continuación la tabla con los vectores de prioridad obtenidos de cada experto, así como la proporción de consistencia (Tabla 6-18). Como se observa, en esta ocasión, todas las matrices recogidas en los cuestionarios resultaron consistentes.

Tabla 6-18: Vectores de prioridad y proporción de consistencia

	EXP. 1	EXP. 2	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8
REC	0,171	0,139	0,110	0,181	0,218	0,197	0,159	0,235
EXP	0,227	0,352	0,075	0,104	0,210	0,197	0,206	0,235
CUB	0,051	0,082	0,345	0,114	0,145	0,098	0,305	0,138
PIC	0,120	0,080	0,246	0,295	0,045	0,304	0,102	0,125
PED	0,352	0,075	0,173	0,125	0,187	0,110	0,168	0,179
CDK	0,078	0,271	0,052	0,182	0,195	0,094	0,061	0,087
IC/IA	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,07</b>	<b>0,10</b>

Para realizar la agregación de las opiniones de los expertos, se sigue el mismo

proceso que en el apartado anterior. Se muestra a continuación la matriz de correlación de las opiniones de los expertos (Tabla 6-19).

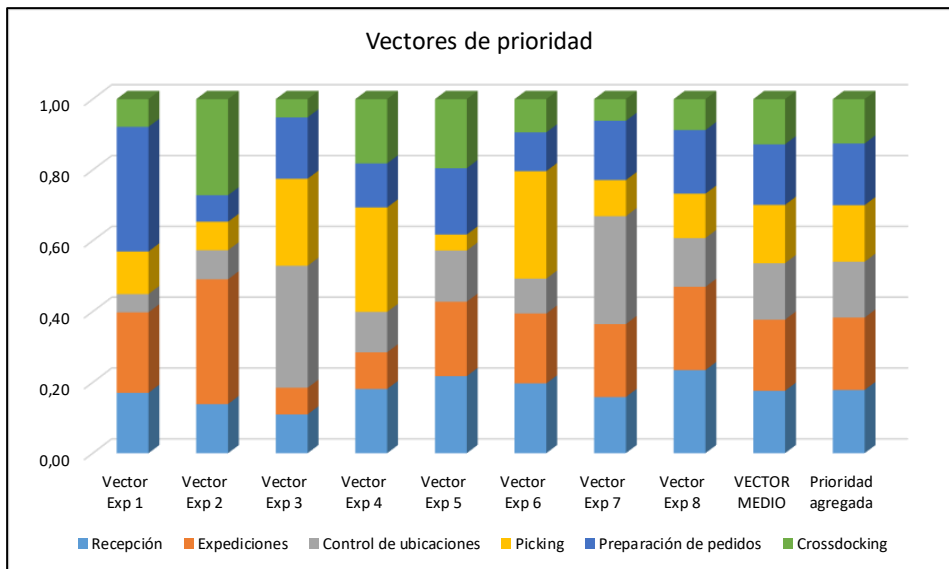
Como se observa de la tabla, el mayor peso es el asignado al experto 8, seguido del experto 1, con pesos ponderados 0,151 y 0,131. En este caso, el peso que daría lugar a una opinión media sería 0,125. También cabe destacar del análisis de esta tabla, que los expertos muestran opiniones dispares, como se deduce de los coeficientes de correlación obtenidos, en general muy distantes del valor 1, que indicaría total concordancia de las opiniones. El mayor coeficiente de correlación es 0,7168, lejano al 1, mostrado en el elemento  $a_{64}$ . Debido a esto, el vector de prioridades agregado, es muy similar al vector que resulta si se aplica una media aritmética simple, como se observa al examinar las últimas dos columnas de la gráfica siguiente (Gráfica 6-10), donde las ocho primeras barras muestran el vector de prioridad de cada experto, y las dos últimas muestran el vector de prioridad medio y el último el vector de prioridad con la media ponderada con los pesos obtenidos en la Tabla 6-19. Como se puede observar, las dos últimas barras son prácticamente iguales.

*Tabla 6-19: Matriz de correlación de los vectores de prioridad y pesos asignados*

	EXP. 1	EXP. 2	EXP. 3	EXP. 4	EXP. 5	EXP. 6	EXP. 7	EXP. 8
EXP. 1	1	-0,021	-0,300	-0,300	0,345	-0,014	-0,023	0,568
EXP. 2	-0,021	1	-0,757	-0,317	0,527	-0,075	-0,192	0,205
EXP. 3	-0,300	-0,757	1	0,092	-0,649	0,047	0,597	-0,276
EXP. 4	-0,323	-0,317	0,092	1	-0,730	0,717	-0,656	-0,407
EXP. 5	0,345	0,527	-0,649	-0,730	1	-0,581	0,115	0,517
EXP. 6	-0,014	-0,075	0,047	0,717	-0,581	1	-0,278	-0,278
EXP. 7	-0,023	-0,192	0,597	-0,656	0,115	-0,278	1	0,359
EXP. 8	0,568	0,205	-0,276	-0,407	0,517	0,223	0,359	1
PESO ASIGNADO	<b>0,131</b>	<b>0,118</b>	<b>0,111</b>	<b>0,108</b>	<b>0,129</b>	<b>0,122</b>	<b>0,129</b>	<b>0,151</b>



Otro detalle importante que puede derivarse del análisis de la tabla de correlación de las opiniones es que los expertos no están de acuerdo en la utilidad de la aplicación del RFID a los distintos procesos. Existe una importante disparidad de opiniones según refleja los valores de correlación obtenidos, en general lejanos a 1, e incluso en su gran mayoría negativos, lo que indica que las opiniones son contrarias. Esto es acorde a las discrepancias de opiniones que recogen los análisis de adopción de la tecnología RFID, mostradas en el apartado (Apartado 3). Esta discordancia influye sin duda en la falta de motivación en la implantación del RFID.

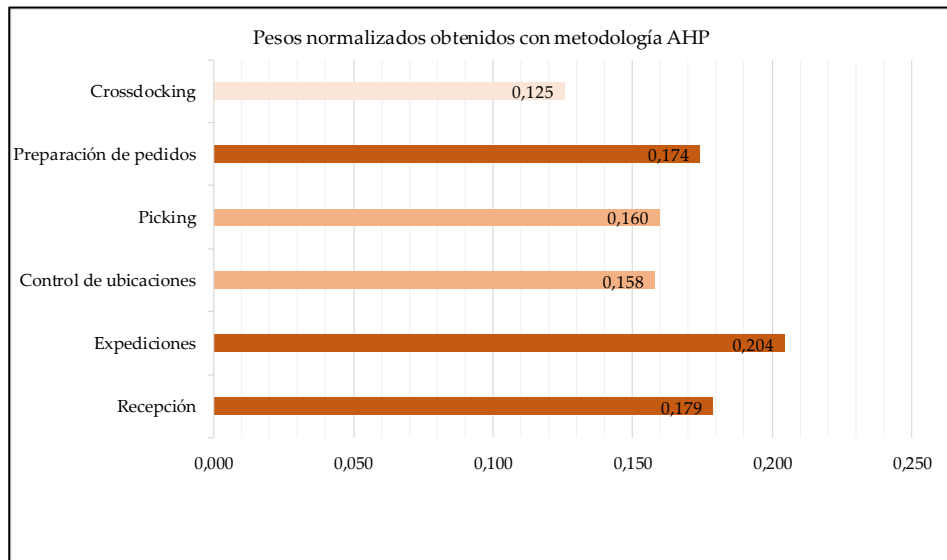


Gráfica 6-10: Vectores de prioridad de los expertos, vector medio y vector medio ponderado.

Se muestra a continuación la tabla con los parámetros obtenidos (Tabla 6-20) utilizando los pesos definidos anteriormente, así como una gráfica que permite una interpretación visual.

Tabla 6-20: Pesos agregados obtenidos con metodología AHP

Procesos del almacén	$\hat{\beta}_k$
Recepción	0,179
Expediciones	0,204
Control de ubicaciones	0,158
Picking	0,160
Preparación de pedidos	0,174
Crossdocking	0,125
<b>SUMA TOTAL</b>	<b>1,000</b>



Gráfica 6-11: Pesos obtenidos con la metodología AHP. Análisis 2

En este caso el máximo valor es el encontrado para la utilización del RFID al proceso de expediciones, que toma un valor de 0,204. Como se ha comentado anteriormente el proceso de expediciones es el último proceso antes de que las mercancías salgan fuera del alcance de la gestión del almacén, por lo que puede ser de gran utilidad un sistema RFID que ayude a evitar el error humano. También se puede destacar, que

al estar situado aguas abajo del proceso, los errores que haya habido anteriormente, serían detectados antes de la salida del almacén.

Los siguientes parámetros estimados por orden de mayor a menor importancia, toman valores muy cercanos entre ellos, se encuentran en una horquilla de amplitud 0,02. Como ocurre en la metodología anterior, esto imposibilita obtener conclusiones acerca de los valores encontrados, pues un error mínimo en las estimaciones puede cambiar el orden de importancia.

Cabe destacar, que el parámetro que toma el menor valor es el asignado a la utilización del RFID en los procesos de crossdocking, con un valor de 0,125.



















Se muestra a continuación un apartado para la comparación de los resultados obtenidos con las tres metodologías.

## 6.2.4 Comparativa entre resultados con las tres metodologías

En este apartado se presentan de manera conjunta los resultados obtenidos con las tres metodologías.

Para facilidad del lector, se resumen en la siguiente tabla los pesos estimados en cada una de las metodologías utilizadas (Tabla 6-21) y que serán analizados conjuntamente en este apartado.

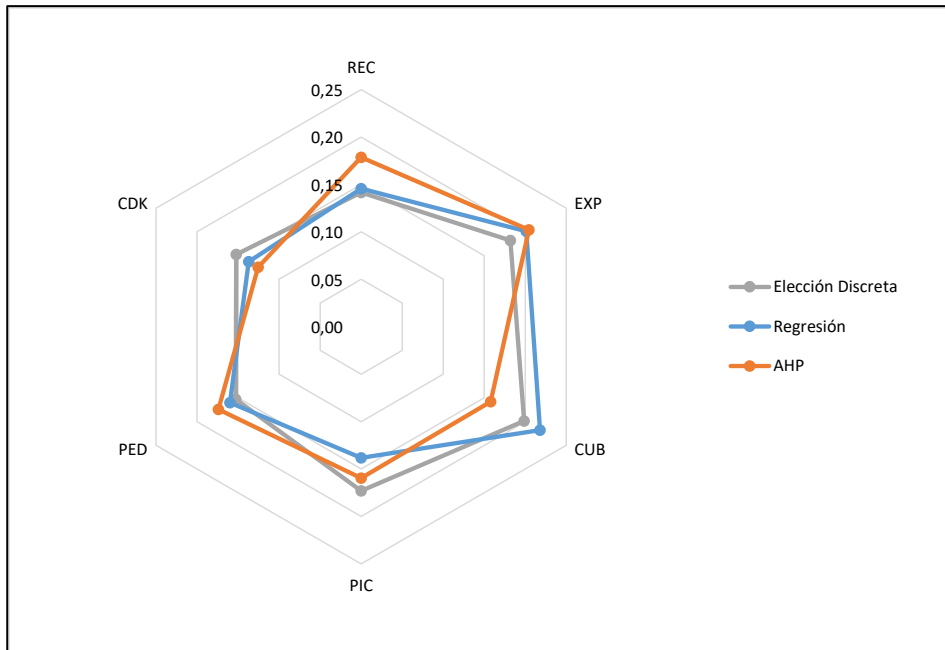
Tabla 6-21: Pesos determinados por las tres metodologías para el análisis 2

	Elección Discreta	Regresión	AHP
REC	 0,141	 0,146	 0,179
EXP	 0,182	 0,201	 0,204
CUB	 0,199	 0,218	 0,158
PIC	 0,173	 0,138	 0,160
PED	 0,153	 0,160	 0,174
CDK	 0,152	 0,137	 0,125

Se muestra a continuación una gráfica radial, donde en cada eje se ha presentado el valor obtenido de la aportación de la utilidad del RFID a cada proceso (Gráfica 6-12). Los puntos de cada metodología se han unido entre sí para producir una línea

poligonal cerrada, cada metodología se ha indicado en un color.

Esta gráfica permite ver de forma sencilla que no existen valores muy extremos en ninguna de las metodologías, pues los polígonos que representan cada una de ellas están muy centrados en el origen y las distancias a los vértices desde el origen son similares. Por otra parte, se puede ver que el análisis por regresión y por elección discreta tienen mayor concordancia entre sí (líneas azul y gris respectivamente). La metodología AHP produce valores más dispares.



*Gráfica 6-12: Comparativa de los resultados obtenidos para el análisis 2*

Estas mismas conclusiones pueden obtenerse del análisis numérico de la tabla siguiente, donde se reflejan los valores máximos y mínimos encontrados con cada metodología (Tabla 6-22).

Tabla 6-22: Valores máximos y mínimos obtenidos con las tres metodologías. Análisis 2

	Elección discreta		Regresión		AHP	
	Tecnología	Valor	Tecnología	Valor	Tecnología	Valor
Máximo Valor	CUB	0,199	CUB	0,218	EXP	0,204
Mínimo Valor	REC	0,141	CDK	0,137	CDK	0,125

Como queda reflejado, no existe concordancia para el proceso en el que la utilidad del RFID resulta máxima o mínima entre las tres metodologías. Por otra parte, tal y como muestra la gráfica radial, los valores obtenidos con los modelos de elección discreta y regresión tienen mayor similitud que los obtenidos mediante la metodología AHP.

Esta discordancia puede analizarse con mayor profundidad a través de la matriz de correlación entre los resultados obtenidos con cada metodología. Se presenta en la siguiente tabla dicha matriz (Tabla 6-23).

Tabla 6-23: Matriz de correlación entre las tres metodologías

	<i>Elección discreta</i>	<i>Regresión</i>	<i>AHP</i>
<i>Elección discreta</i>	1	0,811	0,151
<i>Regresión</i>	0,811	1	0,431
<i>AHP</i>	0,151	0,431	1

Tal y como se ha indicado, los resultados obtenidos mediante elección discreta y el análisis de regresión tienen una mayor similitud. Este hecho es corroborado por el coeficiente de correlación entre ellos 0,811. Sin embargo, los resultados de la metodología AHP son muy diferentes respecto a los encontrados con las otras dos metodologías. Como se muestra en la Tabla 6-23 el coeficiente de correlación del método AHP respecto al modelo de elección discreta es muy pequeño 0,151, lo que indica que no hay concordancia en los resultados obtenidos entre estas dos metodologías. En cuanto al coeficiente de correlación entre el método AHP y el análisis de regresión, aunque es algo superior, resulta también bajo, no alcanzando si quiera el valor medio de 0,5.

Por otra parte, el hecho de que las opiniones de los expertos sean tan dispares produce unos valores muy cercanos entre sí, como se observa, en todos los casos los

parámetros estimados son muy cercanos unos a otros. La diferencia entre el mayor y el menor valor de los parámetros es muy pequeña en las tres metodologías. Este hecho es aún más significativo en el análisis de elección discreta, donde la amplitud del intervalo donde se encuentran los parámetros estimados tiene un valor de 0,058. Si la aportación del RFID fuera igual en todos los procesos, los parámetros que se obtendrían para cada proceso serían iguales. Dado que se han analizado seis procesos, la utilidad equitativa que aportaría el RFID a cada proceso tendría un valor esperado de 0,167. Como se observa, la mayoría de los parámetros estimados son muy cercanos a este valor. Esto podría deberse a que los expertos otorgan igual utilidad a todos los procesos, sin embargo, esta afirmación es errónea en este caso. Al haber aplicado la metodología AHP, se tiene el vector de prioridades de cada experto (véase Gráfica 6-10). Como se observa de la gráfica indicada, las utilidades dadas por cada uno de los expertos a la aplicación del RFID en los distintos procesos no es homogénea y cercana a 0,167, sino que es muy diferente en cada caso. Esta falta de acuerdo en las opiniones de los expertos hace que el parámetro de la utilidad de cada atributo tienda al valor medio. Esto se ve claramente si se analiza una alternativa con dos únicos atributos, A y B, si se repita el proceso de decisión dos veces, donde una de las alternativas sólo posee A y la otra sólo posee B, y al hacer la elección, un individuo opta por una y el otro por la otra, puesto que estamos suponiendo que los parámetros son invariantes a las alternativas y al decisor, el valor del parámetro que hará las alternativas equiprobables es 0,5, suponiendo por tanto igual importancia para los dos atributos.

Adicionalmente, el hecho de que los pesos estimados sean tan cercanos produce otro problema. Un nivel de error pequeño puede inducir órdenes de importancias muy diferentes. Se observa que, para el ajuste mediante elección discreta, el grado de acierto del modelo en referencia a las preferencias declaradas por los expertos es del 71,88%, lo que teniendo en cuenta que los escenarios son dicotómicos no es un porcentaje demasiado elevado, toda vez que la elección al azar entre dos alternativas produce una tasa de éxito del 50%.

Teniendo en cuenta estas salvedades, se pueden obtener algunas conclusiones de los valores encontrados. Se puede decir que, el proceso en el que el aporte de la tecnología RFID es más significativo, es el proceso de expediciones. Este proceso resulta elegido con las tres metodologías en primer o segundo lugar. Respecto al proceso al que el aporte de la tecnología RFID para la eliminación del error humano tiene menor importancia, según los resultados obtenidos, es el proceso de

crossdocking. Este proceso resulta en último lugar por valor de los pesos con el uso de los métodos AHP y análisis de regresión. Con el proceso de elección discreta resulta en penúltima posición.

Como se ha comentado anteriormente, el hecho que el control de expediciones sea el proceso al que mayor utilidad se le otorga al RFID para evitar el error humano es ciertamente lógico, ya que, en el control de expediciones, se pueden detectar los errores cometidos en este proceso y en los anteriores, ello aumenta la eficiencia del control, desde el punto de vista del posible número de errores detectados. Este proceso es además el último antes que el producto salga del paraguas de la gestión de almacenes, por lo que es el último proceso en el que gestor puede evitar que un error cometido sea detectado externamente, por el cliente o siguiente eslabón en la cadena de suministro, que por norma general es significativamente peor y de mayor coste.

El hecho de que el proceso que menor importancia a obtenido sea el crossdocking puede derivarse del hecho de que los expertos no son gestores de plataformas logísticas o empresas de transporte, sino gestores de un proceso fabril, cuya preocupación fundamental es producir al nivel de calidad fijado, con el menor coste posible y cumpliendo los niveles de servicio establecidos, por lo que toda vez que los productos pasan el control de expediciones y son enviados a las plataformas de distribución logísticas donde podría realizarse el proceso de crossdocking finaliza su responsabilidad. Es probable que si el conjunto de expertos incluyera a gestores logísticos o de empresas del sector del transporte el proceso de crossdocking estaría a otro nivel de importancia.





# 7 CONCLUSIONES, APORTACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

**E**n esta tesis se ha analizado la importancia que tienen un conjunto específico de tecnologías de la información y comunicación en la gestión de almacenes y la utilidad de los sistemas de identificación por radio frecuencia, RFID, en la eliminación de los errores humanos producidos en la gestión de almacenes. Para realizar ambos estudios, se han utilizado tres metodologías diferentes. Un modelo de elección discreta, un modelo de análisis jerárquico y un ajuste por regresión lineal. Se presentan a continuación las conclusiones alcanzadas, las aportaciones que han surgido de esta tesis y las futuras extensiones con las que se dará continuidad a la misma.

## 7.1 Conclusiones

Se detallan seguidamente las conclusiones obtenidas en los dos análisis realizados:

### Análisis de las TIC en la gestión de almacenes

Las tecnologías de la información incluidas en este primer trabajo son:

- WMS, Warehouse Management System
- LMS: Labour Management System
- Sistema de identificación mediante RFID
- Sistema de identificación mediante código de barras
- Sistema de preparación de pedidos pick to light
- Sistema de preparación de pedidos pick to voice
- YMS, Yards Management System
- TMS, Transporter Management System

En relación a los resultados obtenidos se puede concluir en primer lugar que, dentro de las tecnologías de la información y comunicación aplicadas a la gestión de almacenes, los sistemas de gestión completa que incluyen gestión de la fuerza laboral son las más valoradas por los expertos. Estos sistemas de información son los que mayor utilidad aportan a la gestión del almacén, frente a otros sistemas tales dedicados a procesos específicos, como pueden ser sistemas de identificación, sistemas para picking o sistemas de información dedicados a los procesos de gestión de muelles o transporte.

Atendiendo a las tecnologías de identificación, la opinión de los expertos indica que tienen una cierta preferencia por la tecnología RFID, pero muy cercana a la tecnología del código de barras. Ello está en consonancia con el hecho de que la tecnología del código de barras no ha sido sustituida por los sistemas de RFID. En los sectores en los que está presente mayoritariamente el RFID, como puede ser el sector de la moda, esta tecnología se ha cumplimentado con el mantenimiento de los sistemas de código de barras, pero no lo ha reemplazado.

Respecto a los sistemas de información destinados a la preparación de pedidos sin lista como son el sistema que utiliza la voz para guiar al preparador de pedidos o aquellos que utilizan dispositivos luminosos, denominados sistemas pick to voice y pick to light, respectivamente, los expertos indican que resulta de mayor utilidad o importancia los sistemas pick to voice.

Por último, en relación al primer análisis, los expertos otorgan una importancia relativamente pequeña a los sistemas de gestión de muelles y a los sistemas de gestión de transportes dentro de la gestión de almacenes.

### Análisis de la importancia del RFID en los procesos de gestión de almacenes

El segundo análisis realizado trata de abordar la capacidad del RFID en la eliminación de los errores humanos en los principales procesos llevados a cabo en la gestión de almacenes.

Los procesos considerados son:

- Recepción de mercancías
- Expediciones
- Control de ubicaciones

- Proceso de picking mediante voz y luz
- Proceso de preparación final de pedidos o consolidación de pedidos
- Crossdocking

De los resultados obtenidos se puede inferir que los dos procesos en los que es más importante la presencia del RFID son en el proceso de expediciones y en el de control de ubicaciones. También se puede indicar que el que menor importancia refleja en este sentido es en el proceso de crossdocking. Es importante señalar que los expertos no muestran una opinión unánime en relación a esta cuestión, por lo que la opinión agregada del conjunto produce valores muy homogéneos entre todos los procesos. Por otra parte, esta similitud hace que pequeños errores en los resultados influyan de manera significativa en el orden de importancia establecido, por lo que se debe ser cauto a la hora de obtener conclusiones más profundas en relación a la aplicación del RFID en los procesos.

En relación a los resultados obtenidos en ambos análisis, cabe destacar que los resultados encontrados mediante las tres metodologías de evaluación son en general similares, tanto para el primer análisis realizado como para el segundo. Las diferencias en los resultados son poco significativas, por lo que se puede concluir que el estudio es consistente, existiendo coherencia entre los resultados.

### Metodologías utilizadas

Para estudiar la importancia que tienen las diferentes tecnologías en el proceso de gestión de almacenes se ha establecido una función lineal que mide la utilidad total del proceso de gestión de almacén. Cada uno de los componentes de la función de utilidad está asociado a la presencia de uno de los sistemas de información evaluados. El coeficiente de cada término de la función de utilidad representa la aportación a la utilidad de cada tecnología analizada. Estos coeficientes, denominados  $\beta_k$ , han sido obtenidos mediante tres diferentes métodos: mediante un método de elección discreta, un análisis jerárquico AHP y mediante un ajuste de regresión lineal.

El análisis mediante elección discreta está especialmente diseñado para encontrar los valores de utilidad que aporta cada atributo que caracteriza una alternativa. Debido a ello, los pesos estimados son los más apropiados para modelar el proceso de elección de un individuo. Otra de las ventajas de esta metodología es la sencillez del

cuestionario que cada entrevistado debe realizar, no requiriendo dificultosas explicaciones para su correcta realización. En cada cuestionario, el entrevistado sólo debe indicar cuál entre un conjunto de posibles alternativas considera la mejor. Esto es una ventaja muy importante en cualquier método de análisis basado en cuestionarios, pues la calidad de los resultados obtenidos depende en gran medida de la correcta cumplimentación de los mismos. Como inconveniente cabe destacar, que la correcta aplicación de este método requiere unos conocimientos muy específicos poco habituales en el ámbito externo al académico. Por otra parte, para poder resolver de manera los modelos de ajuste, es necesario disponer de software específicos destinados al ajuste mediante modelos logísticos que son de elevado coste, ya que la mayoría de los sistemas y herramientas de análisis estadístico no dispone de este tipo de herramientas.

En relación a la metodología AHP, esta metodología está orientada a la selección de alternativas siguiendo un esquema jerárquico de niveles, donde el primero de ellos es el objetivo general y en orden descendente se definen los diferentes criterios o sub-criterios que se desean incluir, para definir en el último nivel el conjunto de alternativas posibles. En cada nivel se requiere la realización de una o más matrices de comparación por pares. El método AHP tiene como resultado un vector de orden de prioridades para las alternativas entre las que se debe decidir. En este caso, se ha utilizado una matriz de comparación por pares para las tecnologías analizadas. Así, dado que se han evaluado 8 tecnologías, se ha solicitado a cada encuestado que realice 28 comparaciones de parejas de tecnologías y se ha obtenido el vector de prioridades como estimación de los parámetros  $\beta_k$ .

Este método presenta ciertos inconvenientes. El elevado número de comparaciones a realizar dificulta la validez de los juicios emitidos por el encuestado, debido a que es fácil que las matrices sean inconsistentes, lo que impide que puedan ser utilizadas o que requieren ser solicitadas de nuevo al entrevistado. Por otra parte, requiere un esfuerzo mayor por parte del encuestado para realizar la encuesta, así como es más difícil de entender lo que se le solicita. Respecto a las ventajas que presenta cabe destacar que, aunque existen softwares específicos para obtener los resultados, estos pueden obtenerse mediante cualquier programa de hojas de cálculo de fácil y extendida aplicación. Otra de las ventajas más interesantes es que se puede valorar para cada encuestado si las opiniones recogidas en el cuestionario tienen el nivel de consistencia adecuado para ser incluidas en la opinión agregada.

Por último, se ha realizado un ajuste mediante regresión lineal múltiple para estimar

los coeficientes de la función de utilidad. En relación a la utilización de esta metodología cabe decir que este método no está específicamente orientado a modelar el proceso de elección de alternativas de un individuo. Para realizar el ajuste se ha solicitado a cada encuestado una valoración de la utilidad de un conjunto de alternativas. Cada encuestado debe hacer una valoración para distintas alternativas que son combinaciones de ocho tecnologías. Esto presenta dos dificultades, en primer lugar, hacer las valoraciones requeridas no es sencillo para el entrevistado y, por otra parte, es difícil analizar si el conjunto de las opiniones expresadas por cada encuestado es consistente. Como ventaja cabe destacar que cualquier programa de tratamiento estadístico, así como los programas de tratamiento de hojas de cálculo tienen herramientas para realizar un análisis de regresión, proporcionando además valores estadísticos sobre la bondad del ajuste.

En relación a la idoneidad de las metodologías, si bien, las tres metodologías han aportado resultados similares, el método de elección discreta presenta una ventaja muy importante respecto a los otros dos métodos utilizados. Ésta es la facilidad para contestar los cuestionarios por parte de los expertos. Tanto para el método AHP, como para la valoración requerida para el análisis por regresión, los encuestados destacaron la complejidad de las mismas. Esta ventaja es de vital importancia, pues uno de los mayores problemas de los estudios basados en encuestas es la completa y correcta cumplimentación de las mismas.

## 7.2 Aportaciones

Algunos de los resultados de esta tesis se encuentran publicados en revistas indexadas y en proceeding de congresos. Entre los documentos presentados cabe destacar los siguientes:

- Muñuzuri Sanz, Jesús, Cortés Achedad, Pablo, Rodríguez Palero, María, Grosso de la Vega, Rafael: Use of a genetic algorithm for building efficient choice designs. *International Journal of Bio-Inspired Computation*. 2012. Vol. 4. Núm. 1. Pag. 27-32. (Factor de impacto JCR 2012: 1,351 in Computer Science, Theory and Method Q1; in Computer Science, Artificial Intelligence, Q2).
- Muñuzuri Sanz, Jesús, Escudero Santana, Alejandro, Rubia Marcos, Carlos Rodrigo, Rodríguez Palero, María: Evaluación y respuesta a los problemas

y fallos de implantación en un proyecto piloto industrial de identificación por radio frecuencia. *Dyna: Ingeniería e Industria*. 2012. Vol. 87. Núm. 5. Pag. 593-600 (Factor de impacto JCR 2012: 0,237 in Engineering Multidisciplinary, Q4).

- Muñuzuri Sanz, Jesús, Rodríguez Palero, María, Grosso de la Vega, Rafael, Cortés Achedad, Pablo: What to expect? Inconveniences and reasons for failure in RFID pilots. Comunicación en congreso. International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Guimarães, Portugal. 2012.

### 7.3 Extensiones o líneas futuras

En referencia a la metodología utilizada, el método de elección discreta es el más apropiado para captar el proceso de elección entre diferentes alternativas que realiza un individuo. Estos modelos son de amplia aplicación a diferentes sectores de la organización industrial, en concreto en muchas de las líneas de investigación del grupo en el que se ha realizado esta tesis. Uno de los inconvenientes encontrados es la necesidad de disponer de software específicos para estimar los parámetros del modelo. Una de las extensiones de este trabajo es implementar en lenguaje R un algoritmo que proporcione los valores de los parámetros buscados, así como los valores estadísticos que miden la bondad del ajuste. El lenguaje de programación R enfocado al análisis estadístico y a la presentación gráfica de los resultados obtenidos. Es además un lenguaje de programación libre lo que solventa el problema de las licencias necesarias para obtención de los resultados.

En relación al análisis de elecciones discretas, el método utilizado es un modelo de análisis basado en las preferencias declaradas por el panel de expertos. En los análisis de preferencias declaradas, tal y como se ha visto, se presentan al decisor escenarios posibles, pero no reales, y el decisor indica cuál es, en su opinión, la mejor de las alternativas. Una posible ampliación del estudio sería realizar el análisis mediante preferencias reveladas. El análisis de las preferencias reveladas implica contar con un panel de expertos que hubiera tenido que realizar el análisis de la adopción de una tecnología concreta o que en sus instituciones se hubiera estudiado la posibilidad de adopción del RFID. Con ello, el estudio se realizaría mediante el análisis de las preferencias observadas. Esto aportaría una información más veraz y

permitiría comparar los resultados con los obtenidos mediante el análisis de las preferencias declaradas.

Otra posible ampliación del estudio realizado sería mejorar la aproximación que se ha hecho de la utilidad. Como se refleja en el capítulo correspondiente, se ha elegido una aproximación lineal para la utilidad, despreciando la aportación de los términos cuadráticos y cruzados de las variables. En el caso de poder disponer de una muestra de respuestas más amplias sería posible incluir dichos términos en la función de utilidad, lo que aportaría precisión a las estimaciones encontradas.

Sería también de interés, poder realizar el estudio con un abanico más amplio para el panel de expertos, que incluyera profesionales de distintos sectores industriales, incluyendo profesionales del ámbito de la logística, lo que aportaría unos resultados de mayor aplicación.

Por otra parte, si se analiza la literatura científica se observa que existen muchos casos de estudio de la aplicación del RFID a diferentes ámbitos territoriales, sin embargo, no existe ninguno que incluya la comunidad autónoma de Andalucía. Este es otra de las posibles extensiones de este trabajo, un estudio de la aplicación de la tecnología RFID a Andalucía.





# ANEXO

Se detallan a continuación las respuestas obtenidas del panel de expertos. Se presentan en primer lugar los resultados para el análisis 1 separados para cada parte del cuestionario según la metodología de análisis utilizada. Posteriormente se presentan los del análisis 2, e igualmente se presentan separados en cada una de las partes en las que se divide el cuestionario.

## A. Análisis 1. Aplicaciones TIC en el almacén

### A.1. Respuestas al cuestionario para elección discreta

Se detallan a continuación las respuestas a los cuestionarios realizados por los expertos de valoración de escenarios para la metodología de elección discreta (Tabla 0-1)

Tabla 0-1: Respuestas de expertos para metodología de elección discreta. Análisis 1.

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Mejor alternativa
86	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0
93	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
99	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0
62	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	0
69	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
84	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0
54	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0
67	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
91	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0
41	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0
16	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0
23	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
92	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	0
102	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
60	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0
101	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Mejor alternativa
52	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0
59	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0
34	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0
40	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0
47	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
6	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0
11	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	0
85	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
55	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
65	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	0
14	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
27	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0
50	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0
57	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
63	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0
71	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
88	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0
95	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	0
82	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	0
87	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
97	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0
28	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0
35	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
38	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0
44	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0
53	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
78	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	0
37	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
18	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0
31	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
103	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1
58	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	0
64	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	0
80	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0
89	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
48	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0
70	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0
94	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1
100	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	0
19	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Mejor alternativa
29	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	0
12	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0
107	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	0
104	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
72	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0
10	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	0
15	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0
26	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	0
33	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	0
39	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
42	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	0
79	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
24	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
5	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0
49	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
74	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0
81	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
36	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0
46	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	0
51	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
7	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	0
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0
9	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
98	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0
105	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
68	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0
61	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0
76	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0
83	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
45	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
75	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0
32	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0
13	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
8	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
17	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0
96	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	0
106	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	0
108	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1
43	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	0

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Mejor alternativa
77	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
22	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	0
73	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
20	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0
30	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1
56	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0
66	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1
90	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	0
105	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	0
54	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1
67	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0
8	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	0
29	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1
45	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0
94	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	0
107	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	0
56	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
76	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0
97	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0
22	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
82	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	0
86	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
99	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	0
96	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	0
104	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
108	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	0
91	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0
58	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1
71	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	0
28	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
43	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	0
18	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0
64	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1
84	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	0
88	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0
89	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
32	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0
48	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0
68	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0
92	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
72	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0
5	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Mejor alternativa
9	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0
13	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
10	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	0
14	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
27	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0
31	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1
47	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	0
51	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	0
90	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	0
103	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	0
70	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	0
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
35	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
42	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	0
79	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	0
37	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	0
25	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
98	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	0
36	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	0
55	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
95	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1
100	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	0
66	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	0
15	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	0
6	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	0
39	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
7	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	0
73	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
11	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	0
17	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	0
38	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0
75	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
81	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
85	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
23	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	0
26	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	0
41	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
63	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	0

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Mejor alternativa
83	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
87	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	0
16	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0
33	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	0
77	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
102	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1
60	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0
106	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	0
80	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	0
101	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0
59	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
49	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
74	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
12	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	0
30	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	0
46	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
50	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	0
20	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1
57	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	0
62	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	0
19	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	0
40	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
61	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0
34	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0
53	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
78	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	0
52	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	0
69	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	0
93	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
24	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0
44	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
65	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	0

## A.2. Respuestas al cuestionario para análisis por regresión

Se adjuntan en la siguiente tabla las valoraciones realizadas por los expertos a cada alternativa, utilizadas para el ajuste de los pesos por regresión lineal (Tabla 0-2).

Tabla 0-2: Valoraciones aportadas por los expertos. Análisis 1

Escenario	GES1	GES2	IDE1	IDE2	PIC1	PIC2	YMS	TMS	Valoración
31	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	6
95	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	8
27	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	5
39	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	6
98	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	8
92	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	9
60	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	8
101	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	9
78	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	6
81	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	4
103	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	9
15	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	4
67	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	8
65	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	7
17	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	4
55	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	8
9	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	3
12	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	4
68	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	10
36	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	6
29	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	5
42	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	7
46	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	6
52	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	8
66	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	9
49	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	5
14	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	4
8	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	3
94	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	6
18	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	5
22	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	4
45	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	2
104	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	10
34	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	6
20	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	6
48	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	4
54	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	6
30	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	7
93	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	5
33	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	5
102	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	9

108	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	9
85	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	4
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
35	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	6
11	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	2
74	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	3
76	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	4
57	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	4
50	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	4
69	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	6
58	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	5
24	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	5
82	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	4
38	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	3,9
63	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	6,1
71	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	7,1
53	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	6,5
80	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	8,1
7	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	3,3
59	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	6,8
99	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	8,4
77	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	8,4
62	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	5,8
106	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	9,0
72	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	7,4
44	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	5,8
96	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	9,4
79	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	7,8
90	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	9,0
70	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	6,8
88	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	8,4
73	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5,8
40	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	4,5
100	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	8,7
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	3,6
28	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	3,9
51	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	5,8
89	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	8,7
23	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	4,2
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	2,0
32	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	5
26	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	3
61	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	6



37	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3
84	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	8
107	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	9
75	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	4
47	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	6
86	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	6
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1
16	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	3
56	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	7
19	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	3
97	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	6
41	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	4
105	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	8
43	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	5
25	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	2
6	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	2
87	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	6
91	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	7
83	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	7
5	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
13	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
10	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	2
64	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	7
97	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	4
45	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	3
78	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	5
51	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	4
2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	2
21	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	4
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
37	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2
32	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	8
99	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	7
8	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	5
30	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	6
107	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	7
81	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	2
75	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	2
76	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	3
57	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	3
62	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	4
42	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	3

26	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	3
85	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	3
50	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	4
38	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	3
41	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	3
11	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	4
55	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	7
7	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	3
29	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	4
34	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	6
12	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	4
46	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	5
25	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	3
49	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	5
39	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	3
86	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	6
108	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	10
17	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	4
90	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	8
67	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	7
16	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	6
83	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	5
23	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	6
63	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	6
54	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	7
68	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	9
33	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	4
65	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	6
56	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	9
43	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	5
102	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	9
47	1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	5
28	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	6
15	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	4
69	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	6
87	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	6
82	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	6
98	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	6
9	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
70	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	7
44	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	7
52	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	7
84	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	8

80	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	8
4	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	3
71	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	5
18	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	4
66	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	4
48	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	5
59	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	5
106	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	8
103	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	7
101	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	6
13	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	2
53	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	5
74	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	4
79	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	5
20	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	6
58	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	5
61	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	5
31	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	4
91	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	8
88	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	7
36	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	5
105	-1	1	-1	1	1	-1	-1	-1	7
96	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	8
104	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	10
89	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	7
72	1	-1	-1	1	1	-1	1	1	9
64	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	8
92	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	8
27	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	6
3	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	4
24	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	5
22	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	4
19	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	4
94	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	8
35	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	5
95	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	7
40	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	6
100	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	8
10	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	4
14	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	4
93	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	6
5	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	3
77	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	5

60	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	8
73	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	5
6	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	4

### A.3. Respuestas al cuestionario para la metodología AHP

Se detallan a continuación las matrices de comparación por pares realizadas por los expertos para el método AHP, indicando el valor  $\lambda_{m\acute{a}x}$ , el índice de consistencia y la proporción de consistencia.

Tabla 0-3: Matrices de comparación por pares. Análisis 1

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	4,00	2,00	2,00	3,00	3,00	4,00	5,00
LMS	0,25	1,00	0,33	0,25	0,33	0,50	2,00	2,00
Código de barras	0,50	3,03	1,00	0,33	2,00	3,00	4,00	5,00
RFID	0,50	4,00	3,03	1,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Pick to light	0,33	3,03	0,50	1,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Pick to voice	0,33	2,00	0,33	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00
YMS	0,25	0,50	0,25	0,33	0,33	0,50	1,00	2,00
TMS	0,20	0,50	0,20	0,25	0,25	0,33	0,50	1,00
$\lambda_{m\acute{a}x}$								8,50
IC								0,07
Prop. Consistencia								0,05

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	3,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00	4,00

LMS	0,33	1,00	0,30	0,30	0,30	0,30	1,00	1,00
Código de barras	1,00	3,33	1,00	0,20	1,00	1,00	3,00	3,00
RFID	1,00	3,33	5,00	1,00	0,20	0,20	3,00	3,00
Pick to light	1,00	3,33	1,00	5,00	1,00	2,00	3,00	4,00
Pick to voice	1,00	3,33	1,00	5,00	0,50	1,00	3,00	4,00
YMS	0,33	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	1,00	2,00
TMS	0,25	1,00	0,33	0,33	0,25	0,25	0,50	1,00

λ <sub>máx</sub>	9,35
IC	0,19
Prop. Consistencia	0,14

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	1,57	2,71	2,14	3,29	3,86	4,43	5,00
LMS	0,64	1,00	2,14	1,57	2,71	3,29	3,86	4,43
Código de barras	0,37	0,47	1,00	0,50	1,57	2,14	2,71	3,29
RFID	0,47	0,64	2,00	1,00	2,14	2,71	3,29	3,86
Pick to light	0,30	0,37	0,64	0,47	1,00	1,57	2,14	2,71
Pick to voice	0,26	0,30	0,47	0,37	0,64	1,00	1,57	2,14
YMS	0,23	0,26	0,37	0,30	0,47	0,64	1,00	1,57
TMS	0,20	0,23	0,30	0,26	0,37	0,47	0,64	1,00

λ <sub>máx</sub>	8,15
IC	0,02
Prop. Consistencia	0,01

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
---------	-----	-----	------------------	------	---------------	---------------	-----	-----

WMS	1,00	5,00	3,00	2,00	3,00	2,00	5,00	3,00
LMS	0,20	1,00	0,60	0,20	0,60	0,20	1,00	0,60
Código de barras	0,33	1,67	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,00
RFID	0,50	5,00	1,67	1,00	2,00	1,00	4,00	2,00
Pick to light	0,33	1,67	1,00	0,50	1,00	0,60	2,00	1,00
Pick to voice	0,50	5,00	1,67	1,00	1,67	1,00	4,00	2,00
YMS	0,20	1,00	0,50	0,25	0,50	0,25	1,00	0,60
TMS	0,33	1,67	1,00	0,50	1,00	0,50	1,67	1,00

$\lambda_{\text{máx}}$	8,07
IC	0,01
Prop. Consistencia	0,01

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	2,00	0,50	0,33	1,00	1,00	3,00	2,00
LMS	0,50	1,00	0,50	0,33	1,00	1,00	2,00	1,00
Código de barras	2,00	2,00	1,00	0,50	1,00	1,00	2,00	1,00
RFID	3,00	3,00	2,00	1,00	1,00	1,00	3,00	2,00
Pick to light	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00
Pick to voice	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,00
YMS	0,33	0,50	0,50	0,33	0,50	0,50	1,00	0,33
TMS	0,50	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	3,00	1

$\lambda_{\text{máx}}$	8,38
IC	0,05
Prop. Consistencia	0,04

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	2,00	0,50	0,50	2,00	2,00	4,00	3,00
LMS	0,50	1,00	0,50	0,50	1,00	1,00	3,00	2,00
Código de barras	2,00	2,00	1,00	0,50	2,00	2,00	4,00	3,00
RFID	2,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	3,00	2,00
Pick to light	0,50	1,00	0,50	0,50	1,00	0,50	2,00	1,00
Pick to voice	0,50	1,00	0,50	0,50	2,00	1,00	3,00	2,00
YMS	0,25	0,33	0,25	0,33	0,50	0,33	1,00	0,50
TMS	0,33	0,50	0,33	0,50	1,00	0,50	2,00	1,00

λmáx	8,31
IC	0,04
Prop. Consistencia	0,03

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25
LMS	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,25	0,25
Código de barras	2,00	2,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00
RFID	2,00	2,00	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00
Pick to light	2,00	2,00	0,50	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00
Pick to voice	2,00	2,00	0,50	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00
YMS	4,00	4,00	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00
TMS	4,00	4,00	0,33	0,33	0,50	0,50	1,00	1,00

λmáx	8,77
IC	0,11

Prop. Consistencia	0,08
--------------------	------

ASPECTO	WMS	LMS	Código de barras	RFID	Pick to light	Pick to voice	YMS	TMS
WMS	1,00	5,00	4,00	3,00	4,00	4,00	3,00	3,00
LMS	0,20	1,00	0,33	0,25	0,33	0,33	1,00	1,00
Código de barras	0,25	3,00	1,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00
RFID	0,33	4,00	0,50	1,00	2,00	2,00	4,00	4,00
Pick to light	0,25	3,00	0,50	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00
Pick to voice	0,25	3,00	0,50	0,50	1,00	1,00	2,00	2,00
YMS	0,33	1,00	0,33	0,25	0,50	0,50	1,00	1,00
TMS	0,33	1,00	0,33	0,25	0,50	0,50	1,00	1,00

λ <sub>máx</sub>	8,50
IC	0,07
Prop. Consistencia	0,05

## B. Análisis 2. Aplicación del RFID a la gestión de almacenes

### B.1. Respuestas al cuestionario para elección discreta

Se muestran en la siguiente tabla las respuestas de los expertos para la metodología de elección discreta en el análisis 2 (Tabla 0-4).



Tabla 0-4: Respuestas de expertos para metodología de elección discreta. Análisis 2.

Escenario	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK	Mejor alternativa
42	1	-1	1	-1	-1	1	1
57	1	1	1	-1	-1	-1	0
3	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
5	-1	-1	-1	1	-1	-1	0
56	1	1	-1	1	1	1	0
64	1	1	1	1	1	1	1
7	-1	-1	-1	1	1	-1	1
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	0
34	1	-1	-1	-1	-1	1	0
49	1	1	-1	-1	-1	-1	1
55	1	1	-1	1	1	-1	1
50	1	1	-1	-1	-1	1	0
16	-1	-1	1	1	1	1	0
31	-1	1	1	1	1	-1	1
35	1	-1	-1	-1	1	-1	1
6	-1	-1	-1	1	-1	1	0
20	-1	1	-1	-1	1	1	1
36	1	-1	-1	-1	1	1	0
51	1	1	-1	-1	1	-1	0
22	-1	1	-1	1	-1	1	1
17	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
33	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
8	-1	-1	-1	1	1	1	1
23	-1	1	-1	1	1	-1	0
59	1	1	1	-1	1	-1	0
30	-1	1	1	1	-1	1	1
24	-1	1	-1	1	1	1	1
40	1	-1	-1	1	1	1	0
21	-1	1	-1	1	-1	-1	1
37	1	-1	-1	1	-1	-1	0
52	1	1	-1	-1	1	1	0
54	1	1	-1	1	-1	1	1
63	1	1	1	1	1	-1	1
58	1	1	1	-1	-1	1	0
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
9	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
4	-1	-1	-1	-1	1	1	0
19	-1	1	-1	-1	1	-1	1
11	-1	-1	1	-1	1	-1	0
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1

46	1	-1	1	1	-1	1	0
61	1	1	1	1	-1	-1	1
39	1	-1	-1	1	1	-1	1
18	-1	1	-1	-1	-1	1	0
38	1	-1	-1	1	-1	1	0
53	1	1	-1	1	-1	-1	1
43	1	-1	1	-1	1	-1	1
14	-1	-1	1	1	-1	1	0
15	-1	-1	1	1	1	-1	1
10	-1	-1	1	-1	-1	1	0
28	-1	1	1	-1	1	1	1
44	1	-1	1	-1	1	1	0
47	1	-1	1	1	1	-1	1
26	-1	1	1	-1	-1	1	0
25	-1	1	1	-1	-1	-1	1
41	1	-1	1	-1	-1	-1	0
29	-1	1	1	1	-1	-1	0
45	1	-1	1	1	-1	-1	1
60	1	1	1	-1	1	1	0
62	1	1	1	1	-1	1	1
32	-1	1	1	1	1	1	0
48	1	-1	1	1	1	1	1
12	-1	-1	1	-1	1	1	1
27	-1	1	1	-1	1	-1	0
12	-1	-1	1	-1	1	1	1
38	1	-1	-1	1	-1	1	0
55	1	1	-1	1	1	-1	1
16	-1	-1	1	1	1	1	0
15	-1	-1	1	1	1	-1	1
22	-1	1	-1	1	-1	1	0
46	1	-1	1	1	-1	1	0
58	1	1	1	-1	-1	1	1
43	1	-1	1	-1	1	-1	1
50	1	1	-1	-1	-1	1	0
63	1	1	1	1	1	-1	0
62	1	1	1	1	-1	1	1
33	1	-1	-1	-1	-1	-1	0
21	-1	1	-1	1	-1	-1	1
7	-1	-1	-1	1	1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1	-1	0
17	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
9	-1	-1	1	-1	-1	-1	0
44	1	-1	1	-1	1	1	0

32	-1	1	1	1	1	1	1
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
5	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1
25	-1	1	1	-1	-1	-1	0
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1
11	-1	-1	1	-1	1	-1	0
14	-1	-1	1	1	-1	1	1
26	-1	1	1	-1	-1	1	0
61	1	1	1	1	-1	-1	1
24	-1	1	-1	1	1	1	0
28	-1	1	1	-1	1	1	0
47	1	-1	1	1	1	-1	1
35	1	-1	-1	-1	1	-1	0
29	-1	1	1	1	-1	-1	1
54	1	1	-1	1	-1	1	1
59	1	1	1	-1	1	-1	0
18	-1	1	-1	-1	-1	1	1
37	1	-1	-1	1	-1	-1	0
60	1	1	1	-1	1	1	0
64	1	1	1	1	1	1	1
45	1	-1	1	1	-1	-1	0
57	1	1	1	-1	-1	-1	1
49	1	1	-1	-1	-1	-1	0
10	-1	-1	1	-1	-1	1	1
41	1	-1	1	-1	-1	-1	0
4	-1	-1	-1	-1	1	1	1
27	-1	1	1	-1	1	-1	1
53	1	1	-1	1	-1	-1	0
56	1	1	-1	1	1	1	0
48	1	-1	1	1	1	1	1
39	1	-1	-1	1	1	-1	0
51	1	1	-1	-1	1	-1	1
8	-1	-1	-1	1	1	1	0
20	-1	1	-1	-1	1	1	1
42	1	-1	1	-1	-1	1	0
31	-1	1	1	1	1	-1	1
40	1	-1	-1	1	1	1	0
52	1	1	-1	-1	1	1	1
36	1	-1	-1	-1	1	1	0
30	-1	1	1	1	-1	1	1
34	1	-1	-1	-1	-1	1	0
23	-1	1	-1	1	1	-1	1

3	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	0

## B.2. Respuestas al cuestionario para análisis de regresión

*Tabla 0-5: Valoraciones aportadas por los expertos. Análisis 2.*

Escenario	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK	Valoración
12	-1	-1	1	-1	1	1	4
19	-1	1	-1	-1	1	-1	6
46	1	-1	1	1	-1	1	3
34	1	-1	-1	-1	-1	1	3
62	1	1	1	1	-1	1	9
48	1	-1	1	1	1	1	8
47	1	-1	1	1	1	-1	7
38	1	-1	-1	1	-1	1	4
32	-1	1	1	1	1	1	8
41	1	-1	1	-1	-1	-1	4
59	1	1	1	-1	1	-1	9
8	-1	-1	-1	1	1	1	5
63	1	1	1	1	1	-1	9
18	-1	1	-1	-1	-1	1	5
45	1	-1	1	1	-1	-1	6
13	-1	-1	1	1	-1	-1	3
16	-1	-1	1	1	1	1	7
28	-1	1	1	-1	1	1	9
29	-1	1	1	1	-1	-1	6
7	-1	-1	-1	1	1	-1	2
37	1	-1	-1	1	-1	-1	3
60	1	1	1	-1	1	1	10
22	-1	1	-1	1	-1	1	7
39	1	-1	-1	1	1	-1	4
10	-1	-1	1	-1	-1	1	5
25	-1	1	1	-1	-1	-1	5
5	-1	-1	-1	1	-1	-1	2
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	3
40	1	-1	-1	1	1	1	7
6	-1	-1	-1	1	-1	1	4
14	-1	-1	1	1	-1	1	6

Escenario	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK	Valoración
57	1	1	1	-1	-1	-1	5,7
20	-1	1	-1	-1	1	1	4,0
44	1	-1	1	-1	1	1	7,0
61	1	1	1	1	-1	-1	7,9
55	1	1	-1	1	1	-1	7,0
9	-1	-1	1	-1	-1	-1	3,6
50	1	1	-1	-1	-1	1	3,6
26	-1	1	1	-1	-1	1	4,9
56	1	1	-1	1	1	1	7,4
51	1	1	-1	-1	1	-1	4,9
33	1	-1	-1	-1	-1	-1	2,3
43	1	-1	1	-1	1	-1	6,6
27	-1	1	1	-1	1	-1	6,1
58	1	1	1	-1	-1	1	6,1
54	1	1	-1	1	-1	1	5,7
11	-1	-1	1	-1	1	-1	5,3
52	1	1	-1	-1	1	1	6
3	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
17	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
21	-1	1	-1	1	-1	-1	4
49	1	1	-1	-1	-1	-1	3
30	-1	1	1	1	-1	1	7
15	-1	-1	1	1	1	-1	5
4	-1	-1	-1	-1	1	1	3
42	1	-1	1	-1	-1	1	5
64	1	1	1	1	1	1	10
31	-1	1	1	1	1	-1	6
24	-1	1	-1	1	1	1	7
53	1	1	-1	1	-1	-1	6
23	-1	1	-1	1	1	-1	5
35	1	-1	-1	-1	1	-1	3
36	1	-1	-1	-1	1	1	5
19	-1	1	-1	-1	1	-1	2
57	1	1	1	-1	-1	-1	6
3	-1	-1	-1	-1	1	-1	1
53	1	1	-1	1	-1	-1	6
63	1	1	1	1	1	-1	8
13	-1	-1	1	1	-1	-1	4
14	-1	-1	1	1	-1	1	5
59	1	1	1	-1	1	-1	7
47	1	-1	1	1	1	-1	7
27	-1	1	1	-1	1	-1	6

Escenario	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK	Valoración
51	1	1	-1	-1	1	-1	5
40	1	-1	-1	1	1	1	6
33	1	-1	-1	-1	-1	-1	2
60	1	1	1	-1	1	1	9
36	1	-1	-1	-1	1	1	5
5	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
22	-1	1	-1	1	-1	1	5
46	1	-1	1	1	-1	1	6
38	1	-1	-1	1	-1	1	4
24	-1	1	-1	1	1	1	5
9	-1	-1	1	-1	-1	-1	2
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
61	1	1	1	1	-1	-1	8
62	1	1	1	1	-1	1	9
50	1	1	-1	-1	-1	1	4
48	1	-1	1	1	1	1	8
43	1	-1	1	-1	1	-1	6
41	1	-1	1	-1	-1	-1	3
42	1	-1	1	-1	-1	1	4
29	-1	1	1	1	-1	-1	5
16	-1	-1	1	1	1	1	6
6	-1	-1	-1	1	-1	1	5
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	2
58	1	1	1	-1	-1	1	5
12	-1	-1	1	-1	1	1	4
37	1	-1	-1	1	-1	-1	3
64	1	1	1	1	1	1	10
56	1	1	-1	1	1	1	8
15	-1	-1	1	1	1	-1	6
10	-1	-1	1	-1	-1	1	4
17	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
54	1	1	-1	1	-1	1	5
32	-1	1	1	1	1	1	8
26	-1	1	1	-1	-1	1	6
8	-1	-1	-1	1	1	1	5
55	1	1	-1	1	1	-1	4
4	-1	-1	-1	-1	1	1	3
44	1	-1	1	-1	1	1	6
7	-1	-1	-1	1	1	-1	5
31	-1	1	1	1	1	-1	7
35	1	-1	-1	-1	1	-1	5
21	-1	1	-1	1	-1	-1	4

Escenario	REC	EXP	CUB	PIC	PED	CDK	Valoración
49	1	1	-1	-1	-1	-1	6
28	-1	1	1	-1	1	1	8
39	1	-1	-1	1	1	-1	6
30	-1	1	1	1	-1	1	8
45	1	-1	1	1	-1	-1	6
25	-1	1	1	-1	-1	-1	4
52	1	1	-1	-1	1	1	8
18	-1	1	-1	-1	-1	1	6
34	1	-1	-1	-1	-1	1	5
20	-1	1	-1	-1	1	1	5
23	-1	1	-1	1	1	-1	5
11	-1	-1	1	-1	1	-1	4

### B.3. Respuestas al cuestionario para la metodología AHP

Se detallan a continuación las matrices de comparación por pares realizadas por los expertos para el método AHP

*Tabla 0-6: Matrices de comparación por pares. Análisis 2*

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	0,33	4,00	2,00	0,25	4,00
Expediciones	3,03	1,00	3,00	2,00	0,50	3,00
Control ubicaciones	0,25	0,33	1,00	0,33	0,20	0,50
Picking	0,50	0,50	3,03	1,00	0,33	2,00
Prep. de pedidos	4,00	2,00	5,00	3,03	1,00	3,00
Crossdocking	0,25	0,33	2,00	0,50	0,33	1,00

$\lambda_{\text{máx}}$	6,53
IC	0,11
Prop. Consistencia	0,09

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	0,33	1,00	3,00	3,00	0,20
Expediciones	3,00	1,00	5,00	3,00	4,00	2,00
Control ubicaciones	1,00	0,20	1,00	1,00	1,00	0,33
Picking	0,33	0,33	1,00	1,00	1,00	0,33
Prep. de pedidos	0,33	0,25	1,00	1,00	1,00	0,33
Crossdocking	5,00	0,50	3,00	3,00	3,00	1,00

λmáx	6,47
IC	0,09
Prop. Consistencia	0,08

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	1,80	0,33	0,33	0,50	2,60
Expediciones	0,56	1,00	0,25	0,33	0,33	1,80
Control ubicaciones	3,00	4,00	1,00	1,80	2,60	5,00
Picking	3,00	3,00	0,56	1,00	1,80	4,20
Prep. de pedidos	2,00	3,00	0,38	0,56	1,00	3,40
Crossdocking	0,38	0,56	0,20	0,24	0,29	1,00

λmáx	6,14
------	------



IC	0,03
Prop. Consistencia	0,02

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	3,00	2,00	0,60	0,60	1,00
Expediciones	0,33	1,00	0,60	0,40	2,00	0,40
Control ubicaciones	0,50	1,67	1,00	0,40	1,00	0,60
Picking	1,67	2,50	2,50	1,00	3,00	2,00
Prep. de pedidos	1,67	0,50	1,00	0,33	1,00	0,60
Crossdocking	1,00	2,50	1,67	0,50	1,67	1,00

$\lambda_{\text{máx}}$	6,40
IC	0,08
Prop. Consistencia	0,06

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	1,00	2,00	5,00	1,00	1,00
Expediciones	1,00	1,00	2,00	4,00	1,00	1,00
Control ubicaciones	0,50	0,50	1,00	3,00	1,00	1,00
Picking	0,20	0,25	0,33	1,00	0,25	0,20
Prep. de pedidos	1,00	1,00	1,00	4,00	1,00	1,00
Crossdocking	1,00	1,00	1,00	5,00	1,00	1,00

$\lambda_{\text{máx}}$	6,08
IC	0,02

Prop. Consistencia	0,01
--------------------	------

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	1,00	2,00	0,50	2,00	3,00
Expediciones	1,00	1,00	2,00	0,50	2,00	3,00
Control ubicaciones	0,50	0,50	1,00	0,50	1,00	0,50
Picking	2,00	2,00	2,00	1,00	3,00	3,00
Prep. de pedidos	0,50	0,50	1,00	0,33	1,00	2,00
Crossdocking	0,33	0,33	2,00	0,33	0,50	1,00

λmáx	6,26
IC	0,05
Prop. Consistencia	0,04

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	0,5	0,5	1,00	2,00	3,00
Expediciones	2,00	1,00	1,00	2,00	0,5	3,00
Control ubicaciones	2,00	1,00	1,00	4,00	3,00	4,00
Picking	1,00	0,50	0,25	1,00	0,5	2,00
Prep. de pedidos	0,50	2,00	0,33	2,00	1,00	2,00
Crossdocking	0,33	0,33	0,25	0,50	0,50	1,00

λmáx	6,44
IC	0,09
Prop. Consistencia	0,07

ATRIBUTO	Recepción	Expediciones	Control de ubicaciones	Picking	Prep. de pedidos	Crossdocking
Recepción	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	4,00
Expediciones	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	4,00
Control ubicaciones	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50
Picking	0,50	0,50	1,00	1,00	0,50	3,00
Prep. de pedidos	0,50	0,50	2,00	2,00	1,00	3,00
Crossdocking	0,25	0,25	2,00	0,33	0,33	1,00

$\lambda_{\text{máx}}$	6,64
IC	0,13
Prop. Consistencia	0,10



# REFERENCIAS

---

- Ajzen, I., 1985. From Intentions to Actions: A Theory of Planned Behavior. In *Action Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 11–39.
- Ajzen, I. & Fishbein, M., 1980. *Understanding attitudes and predicting social behavior*, Prentice-Hall.
- Aldian, A. & Taylor, M., 2005. A consistent method to determine flexible criteria weights for multicriteria transport project evaluation in developing countries. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, pp.3948–3963.
- Arooj, A., Mufti, M. & Jamal, H., 2011. Collaborative Communication of Active RFID Tags for Warehouse Asset Management. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 11(2).
- Auramo, J., Kauremaa, J. & Tanskanen, K., 2005. Benefits of IT in supply chain management: an explorative study of progressive companies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 35(2), pp.82–100.
- Awa, H.O., Ukoha, O. & Emecheta, B.C., 2016. Using T-O-E theoretical framework to study the adoption of ERP solution. *Cogent Business & Management*, 3(1), pp.1–23.
- Beltrán, J. et al., 2014. Development of a metrological management model using the AHP and SEM techniques. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 31(7), pp.841–857.
- Bertolini, M. et al., 2010. The Benefits of RFID and EPC in the Supply Chain: Lessons from an Italian Pilot Study. In *The Internet of Things*. New York, pp. 293–302.

- Bhuptani, M. & Moradpour, S., 2005. *RFID field guide: deploying radio frequency identification systems*, Sun Microsystems/Prentice Hall PTR.
- Bottani, E., Montanari, R. & Volpi, A., 2010. The impact of RFID and EPC network on the bullwhip effect in the Italian FMCG supply chain. *International Journal of Production Economics*, 124(2), pp.426–432.
- Bottani, E. & Rizzi, A., 2008. Economical assessment of the impact of RFID technology and EPC system on the fast-moving consumer goods supply chain. *International Journal of Production Economics*, 112(2), pp.548–569.
- Buckley, P.J., Devinney, T.M. & Louviere, J.J., 2007. Do managers behave the way theory suggests? A choice-theoretic examination of foreign direct investment location decision-making. *Journal of International Business Studies*, 38(7), pp.1069–1094.
- Caldeira, M.M. & Ward, J.M., 2003. Using resource-based theory to interpret the successful adoption and use of information systems and technology in manufacturing small and medium-sized enterprises. *European Journal of Information Systems*, 12(2), pp.127–141.
- Cao, Q., Baker, J. & Schniederjans, D., 2014. Bullwhip effect reduction and improved business performance through guanxi: An empirical study. *International Journal of Production Economics*, 158, pp.217–230.
- Cegan, J.C. et al., 2017. Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. *Environment Systems and Decisions*, 37(2), pp.123–133.
- Chow, H.K.H. et al., 2006. Design of a RFID case-based resource management system for warehouse operations. *Expert Systems with Applications*, 30(4), pp.561–576.
- Coltman, T., Gadh, R. & Michael, K., 2008. RFID and Supply Chain Management: Introduction to the Special Issue. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 3(1), pp.1–4.
- Correa Espinal, A., Andrés, R. & Montoya, G., 2009. Information Technologies in Supply Chain Management. , 157(June), pp.37–48.
- Correa Espinal, A., Gómez Montoya, R.A. & Cano Arenas, J.A., 2010. Gestión de almacenes y tecnologías de la información y comunicación (TIC). *Estudios Gerenciales*, 26(117), pp.145–171.

- Curtin, J., Kauffman, R.J. & Riggins, F.J., 2007. Making the “MOST” out of RFID technology: A research agenda for the study of the adoption, usage and impact of RFID. *Information Technology and Management*, 8(2), pp.87–110.
- Davis, F., 1985. A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems. *Massachusetts Institute of Technology*, (December 1985), p.291.
- DeHoratius, N., Mersereau, A.J. & Schrage, L., 2008. Retail Inventory Management When Records Are Inaccurate. *Manufacturing & Service Operations Management*, 10(2), pp.257–277.
- Drobnik, O., 2015. *Barcodes with iOS [Recurso electrónico] : bringing together the digital and physical worlds / Oliver Drobnik*, Shelter Island, NY : Manning Publications,.
- European Commission, 2003. Commission Recommendation of 6 May 2003 concerning the definition of micro, small and medium-sized enterprises. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reco/2003/361/oj> [Accessed June 10, 2017].
- Fedorov, V.V. (Valerii V., Studden, W.J. & Klimko, E.M., 1972. *Theory of optimal experiments*, New York [etc.] : Academic Press.
- Felice, F. De & Petrillo, A., 2013. RFID in Green Supply Chain: Proposal of a Multicriteria Decision Model Based on AHP. *2013 IEEE 10th International Conference on e-Business Engineering*, pp.364–369.
- Finkenzeller, K., 2010. *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*,
- Forman, E. & Gass, S., 2001. The Analytic Hierarchy Process – An Exposition. *Operations Research*, 49(4), pp.469–486.
- Forrester, J.W., 1958. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36(4), pp.37–66.
- Fosso Wamba, S. et al., 2016. Determinants of RFID adoption intention by SMEs: an empirical investigation. *Production Planning & Control*, 27(12), pp.979–990.
- Fosso Wamba, S. & Ngai, E.W.T., 2015. Importance of issues related to RFID-enabled healthcare transformation projects: results from a Delphi study. *Production Planning & Control*, 26(1), pp.19–33.

- Gaukler, G.M., 2011. Item-level RFID in a retail supply chain with stock-out-based substitution. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7(2), pp.362–370.
- Gu, J., Goetschalckx, M. & McGinnis, L.F., 2007. Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), pp.1–21.
- Gunasekaran, A., Subramanian, N. & Papadopoulos, T., 2017. Information technology for competitive advantage within logistics and supply chains: A review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 99, pp.14–33.
- Hardgrave, B.C. & Miller, R., 2006. The Myths and Realities of RFID. *International Journal of Global Logistics Supply Chain Management*, 1, pp.1–16.
- Hassan, M. et al., 2015. Factors affecting selection decision of auto-identification technology in warehouse management: An international Delphi study. *Production Planning and Control*, 26(12), pp.1025–1049.
- Hedgpeath, W.O., 2007. *RFID metrics: decision making tools for today's supply chains*, Boca Raton, FL : CRC Press.
- Hellstrom, D., 2009. The cost and process of implementing RFID technology to manage and control returnable transport items. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 12(1), pp.1–21.
- Holweg, M. et al., 2005. Supply chain collaboration: Making sense of the strategy continuum. *European Management Journal*, 23(2), pp.170–181.
- Ten Hompel, M. & Schmidt, T., 2007. *Warehouse management: automation and organisation of warehouse and order picking systems*, Berlin, Heidelberg : Springer.
- Hsu, P.-F., Kraemer, K. & Dunkle, D., 2006. Determinants of E-Business Use in U.S. Firms. *International Journal of Electronic Commerce*, 10(4), pp.9–45.
- Huber, N., Michael, K. & McCathie, L., 2007. Barriers to RFID adoption in the supply chain. *2007 1st Annual RFID Eurasia*, (September), pp.1–6.
- Hwang, H.-G. et al., 2004. Critical factors influencing the adoption of data warehouse technology: a study of the banking industry in Taiwan. *Decision Support Systems*, 37(1), pp.1–21.
- Ilie-Zudor, E. et al., 2011. A survey of applications and requirements of unique



- identification systems and RFID techniques. *Computers in Industry*, 62(3), pp.227–252.
- Imburgia, M.J., 2006. The Role of RFID within EDI: Building a Competitive Advantage in the Supply Chain. In *2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*. IEEE, pp. 1047–1052.
- INE, 2017. España en cifras 2017. , p.55. Available at: [http://www.ine.es/prodyser/espa\\_cifras/2017/index.html#34](http://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2017/index.html#34) [Accessed June 10, 2017].
- Jacob, P. & Thiemann, U., 2016. New ESD challenges in RFID manufacturing. *Microelectronics Reliability*, (2016), pp.6–10.
- Janeczek, K., 2017. Reliability analysis of UHF RFID tags under long-term mechanical cycling. *Microelectronics Reliability*, 75, pp.96–101.
- Kang, Y. & Gershwin, S.B., 2005. Information inaccuracy in inventory systems: stock loss and stockout. *IIE Transactions*, 37, pp.843–859.
- Karagiannaki, A., Papakiriakopoulos, D. & Bardaki, C., 2011. Warehouse contextual factors affecting the impact of RFID. *Industrial Management & Data Systems*, 111(5), pp.714–734.
- Keating, B.W. et al., 2010. Unpacking the RFID investment decision. *Proceedings of the IEEE*, 98(9), pp.1672–1680.
- Kessels, R., Goos, P. & Vandebroek, M., 2006. A comparison of criteria to design efficient choice experiments. *Journal of Marketing Research*.
- Keung Kwok, S. & Wu, K.K.W., 2009. RFID-based intra-supply chain in textile industry. *Industrial Management & Data Systems*, 109(9), pp.1166–1178.
- Kirk, R.E., 1995. *Experimental design: procedures for the behavioral sciences*, Monterey, California: Brooks/Cole.
- de Koster, R., Le-Duc, T. & Roodbergen, K.J., 2007. Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), pp.481–501.
- Kubler, S. et al., 2016. A state-of the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications. *Expert Systems with Applications*, 65, pp.398–422.

- van Laarhoven, P.J.M. & Pedrycz, W., 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1–3), pp.229–241.
- Landt, J., 2005. The history of RFID. *IEEE Potentials*, 24(4), pp.8–11.
- Laosirihongthong, T., Punnakitkashem, P. & Adebajo, D., 2013. Improving supply chain operations by adopting RFID technology: evaluation and comparison of enabling factors. *Production Planning & Control*, 24(1), pp.90–109.
- Lee, Y.M., Cheng, F. & Leung, Y.T., 2009. A quantitative view on how RFID can improve inventory management in a supply chain. *International Journal of Logistics-Research and Applications*, 12(1), pp.23–43.
- Lehpamer, H., 2012. *RFID Design Principles, Second Edition*, Boston : Artech House,.
- Leong, K.S. et al., 2006. Synchronization of RFID readers for dense RFID reader environments. In *Proceedings - 2006 Symposium on Applications and the Internet Workshops, SAINT 2006 Workshops*. pp. 48–51.
- Lim, M.K., Bahr, W. & Leung, S.C., 2013. RFID in the warehouse: A literature analysis ( 1995 – 2010 ) of its applications , benefits , challenges and future trends. *International Journal of Production Economics*, 145.1(SEPTEMBER), pp.409–430.
- Liviu, I., Ana-Maria, T. & Emil, C., 2009. *WAREHOUSE PERFORMANCE MEASUREMENT – A CASE STUDY*,
- Louviere, J.J., 1988. *Analysing Decision Making: Metric Conjoint Analysis*, Newbury Park (Ca), [etc.]: Sage Publications.
- Louviere, J.J., Hensher, D.A. & Swait, J.D., 2000. *Stated Choice Methods : Analysis and Applications*.
- Louviere, J.J. & Islam, T., 2008. A comparison of importance weights and willingness-to-pay measures derived from choice-based conjoint, constant sum scales and best-worst scaling. *Journal of Business Research*, 61(9), pp.903–911.
- Mardani, A., Jusoh, A. & Zavadskas, E.K., 2015. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 42(8), pp.4126–4148.
- Marley, A.A.J. & Louviere, J.J., 2005. Some probabilistic models of best, worst, and best–worst choices. *Journal of Mathematical Psychology*, 49, pp.464–480.

- McFadden, D., 1986. The Choice Theory Approach to Market Research. *Marketing Science*, 5(4), pp.275–297.
- McWilliams, G., 2006. Wal-Mart's Radio-Tracked Inventory Hits Static. *The Wall Street Journal*, pp.1–3.
- Metters, R., 1997. Quantifying the bullwhip effect in supply chains. *Journal of Operations Management*, 15(2), pp.89–100.
- Montgomery, D.C. et al., 2002. *Introducción al análisis de regresión lineal*, México : Patria Cultural.
- Muñuzuri, J., Escudero Santana, A., et al., 2012. Evaluating and overcoming implementation problems and deficiencies in an industrial pilot project of radio frequency identification (RFID) [Evaluación y respuesta a los problemas y fallos de implantación en un proyecto piloto industrial de identificación]. *Dyna (Spain)*, 87(5), pp.593–600.
- Muñuzuri, J., 2003. *La Logística Urbana de Mercancías: Soluciones, Modelado y Evaluación*. Universidad de Sevilla.
- Muñuzuri, J., Cortés Achedad, P., et al., 2012. Use of a genetic algorithm for building efficient choice designs. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 4(1), p.27.
- Muñuzuri, J., Rodríguez Palero, M., et al., 2012. What to expect ? Inconveniences and reasons for failure in RFID pilots. In pp. 1–10.
- Musa, A. & Dabo, A.A.A., 2016. A Review of RFID in Supply Chain Management: 2000-2015. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 17(2), pp.189–228.
- Oliveira, T. & Martins, M.F.O., 2011. Literature review of information technology adoption models at firm level. *The Electronic Journal Information Systems ...*, 14(1), pp.110–121.
- Osorio Gómez, J.C. & Orejuela Cabrera, J.P., 2008. El Proceso De Análisis Jerárquico (Ahp) Y La Toma De Decisiones Multicriterio. Ejemplo De Aplicación. *Scientia Et Technica*, XIV(39), pp.247–252.
- Poon, S. & Swatman, P.M., 1999. An exploratory study of small business Internet commerce issues. *Information & Management*, 35(1), pp.9–18.
- Poon, T.C., Choy, K.L., Chan, F.T.S., et al., 2011. A real-time production operations

- decision support system for solving stochastic production material demand problems. *Expert Systems with Applications*, 38(5), pp.4829–4838.
- Poon, T.C., Choy, K.L., Chan, F.T.S., et al., 2011. A real-time warehouse operations planning system for small batch replenishment problems in production environment. *Expert Systems with Applications*, 38(7), pp.8524–8537.
- Poon, T.C. et al., 2009. A RFID case-based logistics resource management system for managing order-picking operations in warehouses. *Expert Systems with Applications*, 36(4), pp.8277–8301.
- Porter, J.D., Billo, R.E. & Mickle, M.H., 2004. A Standard Test Protocol for Evaluation of Radio Frequency Identification Systems for Supply Chain Applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 23(1), pp.46–55.
- Quetti, C., Pigni, F. & Clerici, A., 2012. Factors affecting RFID adoption in a vertical supply chain: the case of the silk industry in Italy. *Production Planning & Control*, 23(4), pp.315–331.
- Rekik, Y., 2011. Inventory inaccuracies in the wholesale supply chain. *International Journal of Production Economics*, 133(1), pp.172–181.
- Reyes, P.M., Li, S. & Visich, J.K., 2016. Determinants of RFID adoption stage and perceived benefits. *European Journal of Operational Research*, 254(3), pp.801–812.
- Rim, S.C. & Park, I.S., 2008. Order picking plan to maximize the order fill rate. *Computers and Industrial Engineering*, 55(3), pp.557–566.
- Rinehart, R.F., 1960. Effects and Causes of Discrepancies in Supply Operations. *Operations Research*, 8(4), pp.543–564.
- Rogers, E.M., 1995. *Diffusion of innovations* 3rd Editio.,
- Roussos, G. & Kostakos, V., 2009. rfid in pervasive computing: State-of-the-art and outlook. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(1), pp.110–131.
- Rouwenhorst, B. et al., 2000. Warehouse design and control: Framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, 122(3), pp.515–533.
- Russo, R.D.F.S.M. & Camanho, R., 2015. Criteria in AHP: A systematic review of literature. In *Procedia Computer Science*.
- Saaty, R.W., 1987. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used.

- Mathematical Modelling*, 9(3–5), pp.161–176.
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp.234–281.
- Saaty, T.L., 2004. Fundamentals of the analytic network process — Dependence and feedback in decision-making with a single network. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(2), pp.129–157.
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), pp.9–26.
- Saaty, T.L. & Vargas, L.G., 1982. *The Logic of Priorities Applications in Business, Energy, Health, and Transportation*, Springer Netherlands.
- Sandor, Z. & Wedel, M., 2002. Profile Construction in Experimental Choice Designs for Mixed Logit Models. *Marketing Science*.
- Sarac, A., Absi, N. & Dauzère-Pérès, S., 2010. A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 128(1), pp.77–95.
- Sarac, A., Absi, N. & Dauzre-Prs, S., 2010. A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 128(1), pp.77–95.
- Saygin, C., Sarangapani, J. & Grasman, S.E., 2007. A systems approach to viable RFID implementation in the supply chain. In *Trends in Supply Chain Design and Management*. pp. 3–27.
- Sigala, M., 2007. RFID Applications for Integrating and Informationalizing the Supply Chain of Foodservice Operators: Perspectives from Greek Operators. *Journal of Foodservice Business Research*, 10(1).
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. & Simchi-Levi, E., 2000. *Designing and managing the supply chain : concepts, strategies, and case studies*, Boston, etc. : Irwin/McGraw-Hill.
- Singh, B., 2016. Analytical Hierarchical Process (Ahp) and Fuzzy Ahp Applications- a Review Paper. , (November 2016).
- Sipahi, S. & Timor, M., 2010. The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management Decision*, 48(5), pp.775–808.

- Strueker, J. & Gille, D., 2008. The SME Way of Adopting RFID Technology: Empirical Findings from a German Cross-Sectoral Study. In *ECIS 2008 Proceedings*.
- Thiesse, F. & Buckel, T., 2015. A comparison of RFID-based shelf replenishment policies in retail stores under suboptimal read rates. *International Journal of Production Economics*, 159, pp.126–136.
- Thöni, A. & Tjoa, A.M., 2017. Information technology for sustainable supply chain management: a literature survey. *Enterprise Information Systems*, 11(6), pp.828–858.
- Tornatzky, L.G., Fleischer, M. & Chakrabarti, A.K., 1990. *The processes of technological innovation*, Lexington, Mass. : Lexington Books.
- Ustundag, A., 2013. The Business Value of RFID. In A. Ustundag, ed. *The Value of RFID: Benefits vs. Costs*. London: Springer London, pp. 3–12.
- Vaidya, O.S. & Kumar, S., 2006. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), pp.1–29.
- Venkatesh, V. et al., 2003. User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *Source: MIS Quarterly*, 27(3), pp.425–478.
- Vijayaraman, B.S. & Osyk, B.A., 2006. An empirical study of RFID implementation in the warehousing industry. *The International Journal of Logistics Management*, 17(1), pp.6–20.
- Vlachos, I.P., 2014. A hierarchical model of the impact of RFID practices on retail supply chain performance. *Expert Systems with Applications*, 41(1), pp.5–15.
- Wang, S.J., Liu, S.F. & Wang, W.L., 2008. The simulated impact of RFID-enabled supply chain on pull-based inventory replenishment in TFT-LCD industry. *International Journal of Production Economics*, 112(2), pp.570–586.
- Wang, Y.M., Wang, Y.S. & Yang, Y.F., 2010. Understanding the determinants of RFID adoption in the manufacturing industry. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(5), pp.803–815.
- Whitaker, J., Mithas, S. & Sharda, M.S., 2007. A Field Study of RFID Deployment and ReturnExpectations. *Production and Operations Management*, 16(5), pp.599–612.
- Wu, N.C. et al., 2006. Challenges to global RFID adoption. *Portland International Conference on Management of Engineering and Technology*, 2, pp.618–623.

- Zadeh, L. a., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), pp.338–353.
- Zhu, K., Kraemer, K.L. & Xu, S., 2006. The Process of Innovation Assimilation by Firms in Different Countries: A Technology Diffusion Perspective on E-Business. *Management Science*, 52(10), pp.1557–1576.
- Zipkin, P., 2006. **OM Forum** — The Best Things in Life Were Free: On the Technology of Transactions. *Manufacturing & Service Operations Management*, 8(4), pp.321–329.
- Zwerina, K., 1997. *Discrete choice experiments in marketing : use of priors in efficient choice designs and their application to individual preference measurement*, Heidelberg: Physica-Verlag.
- Zwerina, K., Huber, J. & Kuhfeld, W., 1996. A general method for constructing efficient choice designs. *Durham, NC: Fuqua School of Business, Duke Univesrity*, (September), pp.39–59.