



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN 1.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“SISTEMA DE GESTIÓN DEL CONOCIMIENTO BASADO EN UN
MODELO MULTI-AGENTES INTELIGENTES PARA OPTIMIZAR EL
DESEMPEÑO DE LOS PROCESOS DE UNA CADENA DE
SUMINISTRO DE LIMA PERSA”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

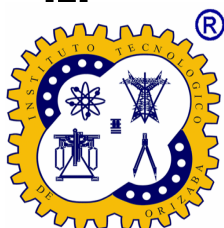
M.I.I. MILDRED VIRGINIA LÓPEZ SEGURA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. GREGORIO FERNÁNDEZ LAMBERT



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

JUNIO, 2024

Contenido

<i>Resumen</i>	<i>XIII</i>
<i>Abstract</i>	<i>XV</i>
<i>Introducción</i>	<i>XVII</i>
<i>Planteamiento del Problema</i>	<i>XVIII</i>
<i>Justificación</i>	<i>XXI</i>
<i>Hipótesis.....</i>	<i>XXII</i>
<i>Objetivos.....</i>	<i>XXIII</i>
Objetivos específicos	XXIII
<i>Capítulo 1. Antecedentes</i>	<i>1</i>
1.1 Introducción	1
1.2 Definición del problema: cadena de suministro del caso de estudio.....	3
1.3 Exportadora de cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.	4
<i>1.3.1 Generalidades de la empresa.....</i>	<i>4</i>
<i>1.3.2 Misión, visión y objetivos.....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.3 Estructura organizacional</i>	<i>6</i>
<i>1.3.4 Localización.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.5 Distribución de planta</i>	<i>7</i>
<i>1.3.6 Descripción del proceso de empaque de limón persa</i>	<i>8</i>
<i>1.3.7 Productos y mercado de la cadena de suministros de la Exportadora San Gabriel S.A. de C.V... 10</i>	
1.4 Región de estudio	11
1.5 Unidad de análisis	12
1.6 Sujeto de estudio	13
1.7 Cadena de suministros de los cítricos del estado de Veracruz	13
<i>1.7.1 Primer eslabón (huertos proveedores).....</i>	<i>14</i>
<i>1.7.2 Segundo eslabón (procesadora).....</i>	<i>15</i>
3.3.2.1 Extractoras	16
3.3.2.2 Gajeras	16
3.3.2.3 Empacadoras.....	16
<i>1.7.3 Comercialización - distribución.....</i>	<i>17</i>
1.8 Conclusiones	18
<i>Capítulo 2. Estado del arte.....</i>	<i>19</i>

2.1 Introducción	19
2.2 Metodología del estado del arte.....	19
2.2.1 Gestión del conocimiento.....	22
2.2.2 Gestión de la cadena de suministro	23
2.2.3 Gestión del conocimiento en la cadena de suministro	23
2.2.4 Agentes inteligentes en la cadena de suministro.....	24
2.2.5 Agricultura de precisión	26
2.3 Conclusiones.....	27
<i>Capítulo 3. Metodología.....</i>	<i>28</i>
3.1 Introducción	28
3.2 Metodología propuesta.....	29
3.3 Etapa 1 Revisión del estado del arte	33
3.4 Etapa 2 Determinación de las problemáticas en el flujo de conocimiento de la CS e identificación de áreas de oportunidad	33
3.4.1 Modelación de la cadena de suministro.....	33
3.4.1.1 Recolección de información	34
3.4.1.2 Selección de huertos en estudio	34
3.4.1.3 Caracterización de los huertos	35
3.4.1.4 Variables y factores inciertos	36
3.4.1.5 Construcción del modelo de simulación (Simio®)	36
3.4.1.5.1 Formulación del problema.....	37
3.4.1.5.3 Definir objetivos y alcance	37
3.4.1.5.4 Objetivo general	37
3.4.1.5.5 Objetivos específicos.....	37
3.4.1.5.6 Alcances	37
3.4.1.6 Desarrollo con Simio®	38
3.4.1.6.1 Conceptualización del modelo.....	38
3.4.1.6.2 Recolección de datos	38
3.4.1.6.3 Construcción del modelo	40
3.4.1.6.4 Control de inventario y medición del nivel de servicio	45
3.4.1.6.5 Experimentación.....	48
3.4.1.6.6 Optimización Opt.Quest de Simio®.....	49
3.4.1.7 Validación y resultados del modelo de simulación de la cadena de suministro	50

3.5 Etapa 3 Modelación de la cadena de suministro del caso de estudio con el enfoque de agentes inteligentes	51
<i>3.5.1 Marco de referencia para la cadena de suministro agroalimentaria</i>	<i>51</i>
3.5.1.1 Descripción del marco de referencia de la cadena de suministro agrícola	53
<i>3.5.2 Selección de software para el desarrollo del SGC para la GCS.</i>	<i>55</i>
3.6 Etapa 4 Determinación de la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes.....	56
3.7 Etapa 5 Desarrollo del modelo de agentes y módulos de apoyo a la decisión.	56
<i>3.7.1 Desarrollo del modelo de agentes.....</i>	<i>57</i>
3.7.1.1 Recolección de datos	57
3.7.1.2 Objetos empleados	57
3.7.1.3 Proveedores	59
3.7.1.4 Proceso de la empacadora	61
3.7.1.5 Centros de distribución	62
<i>3.7.2 Desarrollo de módulos de apoyo a la decisión</i>	<i>63</i>
3.7.2.1 Módulos para selección de proveedores	63
3.7.2.1.1 Técnica de evaluación	64
3.7.2.1.2 Criterios de evaluación de proveedores	66
3.7.2.1.3 Desarrollo del módulo	67
3.7.2.2 Módulo de predicción de rendimiento (proveedores).....	70
3.7.2.2.1 Presentación del módulo de modelos XGBoost de predicción del rendimiento de limón persa	70
3.7.2.2.2 Red neuronal para predicción del rendimiento de calidad exportación	82
<i>3.7.3 Desarrollo de módulos de evaluación de eficiencia de la planta</i>	<i>89</i>
3.7.3.1 Pronóstico de la demanda.....	90
3.7.3.1.1 Generación del conjunto de datos para predicción de la demanda	90
3.7.3.1.2 Prueba de identificación de distribución de los datos.	91
3.7.3.1.2 Exponential smoothing	92
3.7.3.1.3 Interfaz del modelo de predicción de la demanda (exponential smoothing)	94
3.8 Etapa 6 Construcción y validación del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes	95
3.9 Conclusiones.....	97
<i>Capítulo 4. Resultados y conclusión.....</i>	<i>98</i>

4.1 Introducción	98
4.2 Resultados: Etapa 1 revisión del estado del arte.....	98
4.3 Resultados: Etapa 2 Determinación de las problemáticas en el flujo de conocimiento de la cadena de suministro e identificación de áreas de oportunidad	99
4.4 Resultados: Etapa 3 Modelación de la cadena de suministro del caso de estudio con el enfoque de agentes inteligentes	102
4.5 Resultados: Etapa 4 Determinación de la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes	103
4.6 Resultados: Etapa 5 Desarrollo del modelo de agentes y módulos de apoyo a la decisión	103
4.6.1 Validación del modelo de agentes.....	103
4.6.1 Validación de los modelos XGBoost: rendimiento floración, brote y fruto	107
4.6.1.1 Rendimiento floración, brote y fruto	107
4.6.2 Validación de la red neuronal para predicción del rendimiento por calidad de exportación	108
4.6.3 Desarrollo de la interfaz gráfica para el usuario (proveedor-agricultor).....	108
4.6.3.1 Programación de la interfaz	109
4.6.3.2 Visualización de la interfaz	110
4.7 Etapa 6 Construcción y validación del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes (AnyLogic®).....	113
4.8 Conclusiones	114
<i>Discusión de la investigación.....</i>	<i>115</i>
<i>Aportación del estudio al estado del arte.....</i>	<i>117</i>
Aportación al conocimiento (agentes inteligentes)	117
Aportación de desarrollo tecnológico	117
<i>Productividad</i>	<i>118</i>
<i>Referencias bibliográficas.....</i>	<i>124</i>
<i>Anexos</i>	<i>137</i>
ANEXO A. Estado del arte	137
<i>Introducción.....</i>	<i>137</i>
1. Gestión del conocimiento	137
2. Gestión de la cadena de suministro.....	139

3.	<i>Gestión del conocimiento en la cadena de suministro</i>	140
4.	<i>Agentes inteligentes.....</i>	143
5.	<i>Agentes inteligentes en la gestión del conocimiento</i>	144
6.	<i>Agentes Inteligentes en la gestión de la cadena de suministro.....</i>	147
ANEXO B. Técnicas para clasificación del rendimiento de limón persa		164
1.	<i>Evaluación de técnicas.....</i>	164
1.1	<i>Gradient boosting</i>	164
1.2	<i>Regresión logística.....</i>	165
2.	<i>Análisis de precisión de los modelos para clasificación del rendimiento basado en el uso de fertilizantes</i>	166
ANEXO C. Selección de técnicas de pronóstico de la demanda		167
1.	<i>Análisis de la demanda</i>	167
1.1	<i>ARIMA</i>	167
1.1.1	<i>Prueba ARIMA.....</i>	168
1.2	<i>XGBoost para series temporales</i>	172
1.2.1	<i>Prueba XGBoost para series temporales.....</i>	173
2.	<i>Selección de la técnica para pronóstico.....</i>	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama Funcional de la empresa Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.....	6
Figura 2 Distribución de la planta de la empresa.	7
Figura 3 Diagrama de flujo de proceso de empaque de la Exportadora de Cítricos San Gabriel.	8
Figura 4 Productos de la Exportadora San Gabriel.	10
Figura 5 Cadena productiva de limón persa.	12
Figura 6 Cadena de suministros de los cítricos en el Estado de Veracruz, 2009. Fuente:(Fernández Lambert et al., 2015).....	14
Figura 7 Aprovechamiento industrial del cítrico, Veracruz-2009.....	15
Figura 8 Productos derivados de las procesadoras en el Estado de Veracruz, 2009	17
Figura 9 Artículos SMA en la GCS Publicados entre 2016 y marzo de 2020.	25
Figura 10 Metodología Aplicada.....	31
Figura 11 Módulos de Apoyo a la Decisión Propuestos (por Agente).....	32
Figura 12 Fragmento del formato de toma de tiempos, y prueba de bondad de ajuste. Subproceso: Lavado de limón. Fuente: Exportadora San Gabriel S.A. de C.V.	39
Figura 13 Información de Pedidos E.U.A./Canadá 2009 y Análisis estadístico. Fuente: Exportadora San Gabriel S.A. de C.V	39
Figura 14 Modelo de la CS de Limón Persa sin Animación. Fuente: Elaboración propia...	40
Figura 15 Status Label en el proceso de producción.	43
Figura 16 Estructura de los Objetos en la simulación del eslabón Clientes en SIMIO(R)...	43
Figura 17 Programación de Status Label de control de inventario.....	47
Figura 18 Medición del Nivel de Servicio.	47
Figura 19 Experimentación.	49
Figura 20 Optimización con Opt.Quest de Simio®.	50
Figura 21 Modelo conceptual de la CSA de Limón basado en un enfoque de AI.	52
Figura 22 Marco de referencia para el modelado de la cadena agroalimentaria utilizando el enfoque de Agentes	53
Figura 23 Rol de los agentes inteligentes en el modelo Agente actor.....	56
Figura 24 Processing Model Library.	58

Figura 25 Modelo de Agentes Proveedores-Planta-Almacén.....	60
Figura 26 Propiedades de los proveedores programado en el modelo de agentes.	60
Figura 27 Variable "isTorr" y asignación de probabilidad de clasificación como limón Torreón.	61
Figura 28 Modelo de Agentes Generación y Procesamiento de Órdenes.	62
Figura 29 Propiedades de la generación de órdenes, y variables.	63
Figura 30 Jerarquía Representativa de la Selección de Proveedores.....	65
Figura 31 Programación del Modelo AHPy.	67
Figura 32 Código interfaz del módulo de evaluación de proveedores.	68
Figura 33 Pantalla principal del módulo de evaluación de proveedores.	68
Figura 34 Ventana de Evaluación de Proveedores por Criterios.....	69
Figura 35 Resultado, Reinicio.	69
Figura 36 Variables Modelos XGBoost Rendimiento Floración, Brote y Fruto.....	72
Figura 37 Aplicación de One Hot Encoding al conjunto de datos de la etapa Floración.	76
Figura 38 Diagrama del Modelo XGBoost para la etapa Floración.	81
Figura 39 Programación Red Rendimiento Floración, Base de Datos.	82
Figura 40 Entrenamiento y Prueba de las RNA's.	82
Figura 41 Datos Procesamiento y Registro de llegada de limón.	83
Figura 42 Red Neuronal Calidad.	83
Figura 43 Aplicación de One Hot Encoding al conjunto de datos de la etapa Floración.	85
Figura 44 Formato de Captura de Datos Históricos. Fuente: Empacadora.	86
Figura 45 Árbol de Decisiones para Clasificación del Rendimiento basado en el uso de Fertilizantes.	89
Figura 46 Prueba de Identificación de ajuste de los datos a distribución de probabilidad Exponencial y Weibull.	91
Figura 47 Plot Datos para Exponential Smoothing.	92
Figura 48 Gráfico de Promedio Móvil.	93
Figura 49 Resultados Dickey-Fuller Test.	93
Figura 50 Datos reales, entrenamiento y predicciones.	94
Figura 51 Predicciones con el modelo.....	94
Figura 52 Módulo de Predicción de la demanda, ventana principal.	95

Figura 53 Sub-ventana del módulo de predicción de la demanda.....	95
Figura 54 Sistema de Gestión del Conocimiento para la GCS de Limón Persa.....	96
Figura 55 Resultados del Análisis del Estado del Arte.	99
Figura 56 Resultados Prueba t-Pareada, llegada de producto Proveedores.....	101
Figura 57 Corridas del modelo de simulación de la CS en Simio (Fragmento).	102
Figura 58 Análisis de sensibilidad del modelo de agentes (variable: inventario inicial). ..	106
Figura 59 Prueba T-Pareada Rendimiento Japón.	108
Figura 60 Interfaz Gráfica, programación de la Ventana Principal.....	110
Figura 61 Interfaz Gráfica, Pantalla Principal.	111
Figura 62 Interfaz Gráfica, sub ventana Rendimiento Etapa Floración con Valor de Predicción.	111
Figura 63 Interfaz Gráfica, sub ventana Rendimiento Etapa Fruto con Valor de Predicción.	112
Figura 64 Módulo de Predicción de Rendimiento por Calidad de Exportación.....	112
Figura 65 Sub ventana Clasificación Rendimiento Cosecha; botones Resultado y Reinicio.	113
Figura 66 Carta de aceptación artículo en CILOG 2023.	119
Figura 67 Certificado de Participación CILOG 2023.....	120
Figura 68 Artículo JCR.	121
Figura 69 Registro ante INDAUTOR del Software de Predicción del rendimiento 1 de 2.	122
Figura 70 Registro ante INDAUTOR del Software de Predicción del rendimiento 2 de 2.	123
Figura 71 Modelo Gradient Boosting uso de Fertilizantes. Eficiencia, Predicciones e Features Importance. Fuente: Elaboración propia.	165
Figura 72 Modelo Regresión Logística uso de Fertilizantes.	166
Figura 73 Series normales, logarítmica y logarítmica diferenciada 10lb EUA.....	169
Figura 74 Mejores hiperparámetros para ARIMA, Pedidos EUA presentación 10lb.	170
Figura 75 Tablas de coeficientes, series de datos 10 y 40l. Cliente: EUA.....	170
Figura 76 Gráfico comparativo de datos reales vs. Predecidos, presentación 40lb.....	171
Figura 77 Prueba RSME del modelo.....	171

Figura 78 Prueba RSME del modelo, presentación 10lb, Cliente: EUA.....	171
Figura 79 Gráfico comparativo valores reales vs. valores predichos, para Kilos totales.	172
Figura 80 Plot Pedidos Kilos Totales EUA y Europa.	173
Figura 81 División de los datos en Entrenamiento, Validación y Prueba.	174
Figura 82 Resultados Gridsearch.....	174
Figura 83 Predicciones del modelo XGBoost para series temporales.....	175
Figura 84 Evaluación de los modelos ARIMA, XGBoost para series temporales y Exponential Smoothing; MSE.....	175

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción del proceso de empaque de la Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.....	9
Tabla 2 Caracterización de las cadenas productivas de los cítricos, 2009.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3 Keywords usadas en el buscador de la base de datos y número de resultados hallados.	20
Tabla 4 Filtros aplicados a los resultados de búsqueda en las 4 bases de datos/motor de búsqueda. Fuente: Elaboración Propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 5 Proceso de recopilación de artículos. Fuente: Elaboración Propia a partir de (Moher et al., 2009)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6 Preguntas de Investigación para Criterio de Selección de Artículos. Fuente: Elaboración Propia.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 7 Huertos (Proveedores) seleccionados para la simulación.	34
Tabla 8 Variables y Factores Inciertos CS Limón Persa.	36
Tabla 9 Subprocesos modelado en Simio(R) y distribución de probabilidad programada. .	41
Tabla 10 Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa (Proveedores y Producción) en Simio(R).....	41
Tabla 11 Variables utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa en Simio(R). .	42
Tabla 12 Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa (Clientes) en Simio(R).	44

Tabla 13 Variables utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa en Simio®.....	44
Tabla 14 Parámetros del control de inventario.	46
Tabla 15 Elementos programados para el control de inventario de la empacadora.	46
Tabla 16 Agentes y roles del modelo de agentes de la CS.	54
Tabla 17 Resultados del Análisis de Artículos de Interés con base a SOFTWARE en el cual se diseña e SMA.	55
Tabla 18 Objetos utilizados en la modelación de la CS en AnyLogic®.	58
Tabla 19 Objetos utilizados en la modelación de la CS en AnyLogic®.	59
Tabla 20 Escala fundamental de Saaty.	65
Tabla 21 Variables, Descripción, Unidades y Codificación de las Variables Entrada/Salida en los modelos XGBoost.	73
Tabla 22 Variables, Descripción, Unidades y Codificación de las Variables Entrada/Salida en los modelos XGBoost.	74
Tabla 23 Variables, Descripción, Unidades y Codificación de las Variables Entrada/Salida en los modelos XGBoost.	75
Tabla 24 Variables para la Red de Calidad. Fuente: Elaboración propia.	84
Tabla 25 Variables de Entrada de la RNA basada en Fertilizantes y Fungicidas.	86
Tabla 26 Llegada de cada proveedor a la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. (kilos) 1 de 2.	100
Tabla 27 Llegada de cada proveedor a la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. (kilos) 1 de 2.	101
Tabla 28 Llegada de cada proveedor a la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. (kilos) 2 de 2.	101
Tabla 29 Nivel de Servicio del Modelo de Agentes (muestra).	105
Tabla 30 Resultados de las pruebas de Validación de los modelos XGBoost.	107
Tabla 31 Concentrado de Rendimientos Reales vs. Rendimientos de la Red.	108
Tabla 32 Productividad.	118
Tabla 33 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 1 de 5.	159
Tabla 34 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 2 de 5.	159
Tabla 35 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 3 de 5.	161
Tabla 36 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 4 de 5.	162

Tabla 37 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Ta5 de 5.....	163
Tabla 38 Configuración del modelo Gradient Boost.....	164
Tabla 39 Predicciones del modelo de Regresión Logística.....	166
Tabla 40 Porcentaje de Asertividad en Modelos.....	166

Resumen

Una cadena de suministro (CS) se compone de todas las partes involucradas, directa o indirectamente, para satisfacer la petición de un cliente, incluye no sólo al fabricante y los proveedores, sino también a los transportistas, almacenistas, vendedores al detalle, e incluso a los clientes mismos. Incluye además todas las funciones implicadas en la recepción y satisfacción del pedido de un cliente (Chopra Sunil, & Peter, 2013); puede entenderse como un sistema de flujos bidireccionales, un flujo físico y un flujo de capital coordinados por un **flujo de información y un flujo de conocimiento** que habilitan la cadena de valor para servir al cliente. Existe una estrecha conexión entre el diseño y la administración de los flujos de una cadena de suministro (productos, **información**, y fondos) y su éxito.

El objetivo de toda cadena de suministro debe ser maximizar el valor total generado, y para poder lograrlo es necesaria una correcta gestión de la cadena de suministro; ésta puede ser definida como: “la coordinación sistémica y estratégica de las funciones de negocio tradicional y las tácticas utilizadas a través de esas funciones de negocio, al interior de una empresa y entre las diferentes empresas de una cadena de suministro, con el fin de mejorar el desempeño en el largo plazo tanto de las empresas individualmente como de toda la cadena de suministro” (Iglesias, n.d.).

Actualmente la transición de un enfoque intensivo de procesamiento de datos a procesos de negocios basados en el conocimiento ha hecho crítico el estudio del flujo de conocimiento entre los actores de la CS; resaltando el foco en la gestión del conocimiento (GC). La gestión del conocimiento es el nuevo paradigma de la gestión que ha sustituido, integrándolos y dándolos por supuesto, a los anteriores (Molina and Marsal Serra, n.d.). Fundamentalmente, el objetivo de la GC es el manejo sistemático del conocimiento y del conocimiento potencial (Heisig, 2009) con un enfoque en la **creación de valor** a partir de los recursos intangibles tanto dentro como fuera de una organización (Rubenstein-Montano et al., 2001). Desde una perspectiva interorganizacional, las empresas necesitan desarrollar capacidades relacionadas a la GC para explorar y explotar el conocimiento, como argumentan (Malhotra, 2005). Existe también evidencia teórica y empírica en la literatura acerca de la relación entre la implementación de GC y el mejoramiento del desempeño (Chandra & Kamrani, 2003a).

Esta investigación presenta el desarrollo de un sistema de gestión de conocimiento para la gestión de cadena de suministro basado en un modelo multi agentes inteligentes para optimizar mejorar el desempeño en la gestión de la cadena de suministro del limón persa (*citrus latifolia*), el caso de estudio. Está organizada de la siguiente manera. El Capítulo 1 expone las generalidades de la propuesta de tesis describiendo el planteamiento del problema, objetivos, justificación y metodología propuesta. El Capítulo 2 presenta y la discute el estado del arte en referencia al papel de la gestión del conocimiento en la administración de la CS y a la aplicación del enfoque de agentes inteligentes y otras técnicas en la administración de la CS. En el Capítulo 3 se describe la metodología propuesta para modelar la CS con el enfoque de agentes inteligentes, eventos discretos y el desarrollo de los módulos que conforman el sistema de gestión propuesto; en el Capítulo 4 encontrará lo referente a los Impactos Potenciales de los Resultados de la tesis, se presentan al final del documento las Referencias y Anexos del documento, respectivamente.

Palabras Clave:

Cadena de Suministros, Modelación Basada en Agentes, Gestión del Conocimiento, Gestión de la Cadena de Suministros.

Abstract

A supply chain (SC) is composed of all the parties involved, directly or indirectly, to satisfy a customer's request, including not only the manufacturer and suppliers, but also the transporters, warehousers, retailers, and even the customers themselves. It also includes all the functions involved in receiving and satisfying a customer's order (Chopra Sunil, & Peter, 2013); it can be understood as a system of bidirectional flows, a physical flow and a capital flow coordinated by an information flow and a knowledge flow that enable the value chain to serve the customer. There is a close connection between the design and management of the flows of a supply chain (products, information, and funds) and its success (Chopra Sunil, & Peter, 2013).

The objective of any supply chain should be to maximize the total value generated, and in order to achieve this, proper supply chain management is necessary; this can be defined as: "the systemic and strategic coordination of the traditional business functions and tactics used across those business functions, within a company and between the different companies in a supply chain, in order to improve the long-term performance of both individual companies and the entire supply chain" (Iglesias, n.d.).

Currently, the transition from an intensive focus on data processing to knowledge-based business processes has made it critical to study the flow of knowledge between CS actors, highlighting the focus on knowledge management (KM). Knowledge management is the new management paradigm that has replaced, integrating and taking for granted, the previous ones (Molina & Marsal Serra, n.d.). Fundamentally, the objective of KM is the systematic management of knowledge and potential knowledge (Heisig, 2009) with a focus on value creation from intangible resources both inside and outside an organization (Rubenstein-Montano, Liebowitz, Buchwalter, Mccaw, et al., 2001). From an inter-organizational perspective, firms need to develop KM-related capabilities to explore and exploit knowledge, as argued by (Malhotra, 2005). There is also theoretical and empirical evidence in the literature on the relationship between KM (Chandra & Kamrani, 2003a).

This research presents the development of a knowledge management system for supply chain management based on an intelligent multi-agent model to optimize improve performance in the supply chain management of the Persian lemon (*citrus latifolia*) supply chain, the case study. It is organized as follows. Chapter 1 presents the generalities of the thesis proposal describing the problem statement, objectives, justification and proposed methodology. Chapter 2 presents and discusses the state of the art regarding the role of knowledge management in CS management and the application of the intelligent agent approach and other techniques in CS management. Chapter 3 describes the proposed methodology for modeling CS with the intelligent agent approach, discrete events and the development of the modules that make up the proposed management system; in Chapter 4 you will find the Potential Impacts of the Results of the thesis, the References and Annexes of the document are presented at the end of the document, respectively.

Keywords:

Supply Chain, Agent-Based Modeling, Knowledge Management, Supply Chain Management

Introducción

La gestión eficiente y efectiva de la GCS es fundamental para el éxito de una empresa (Alomoto et al., 2015). A través de los años la inteligencia artificial se ha posicionado como una de las herramientas más útiles para el apoyo en la toma de decisiones, existen diversas técnicas que permiten la conexión e intercambio de información efectiva entre todos los actores de la CS, técnicas como los Sistemas Expertos, o de Apoyo a la Decisión basados en Lógica Difusa, Redes Neuronales Artificiales; los Agentes Inteligentes o la Realidad Virtual.

La gestión del conocimiento ocupa indiscutiblemente un lugar prominente en la obtención y desarrollo de ventajas competitivas en las organizaciones, la gestión eficiente de la información permite obtener ventajas competitivas frente a un mercado de exigencia creciente, donde se impone el perfeccionamiento de los procesos (Lahaba & Santos, 2001), el objetivo principal en la aplicación de la gestión del conocimiento en cualquier organización es generar valor y la gestión de este activo es el camino más adecuado actualmente y en el futuro; la aplicación de técnicas de IA hace eficiente la gestión del conocimiento a lo largo cualquier organización, el uso de técnicas de IA en la GCS se ha analizado ya desde hace varios años, específicamente la aplicación de los Agentes Inteligentes (AI) y los SMA se remonta a los años 80's, estos se diseñaron para capturar muchos de los desafíos involucrados en el apoyo a las prácticas cambiantes de la cadena de suministro (Lei et al., 2006). Basado en ello, este trabajo de investigación presenta el desarrollo de un sistema de gestión del conocimiento para la gestión de la cadena de suministro que permite optimizar la Gestión de cada uno de sus eslabones.

La metodología propuesta permite evaluar la capacidad de la cadena de suministro de satisfacer la demanda de producto, a través de la métrica de desempeño del Nivel de Servicio de la planta, estimada mediante un modelo de simulación de eventos discretos y el modelo multi agentes; gestionar la información referente a los proveedores; mediante la predicción y clasificación el rendimiento por ton/ha y por calidad de exportación a través de tres modelos XGBoost, tres redes neuronales y un árbol de clasificación; además de la selección de éstos con un modelo basado en Analytic Hierarchy Process (AHP); y predecir la demanda a través de un modelo de predicción basado en suavización exponencial.

Planteamiento del Problema

El mercado cambia a una velocidad mayor que la capacidad de aprender de los empleados.

Alfred Zollar, presidente de Lotus Development.

En los últimos años, la cadena de suministro ha tomado gran importancia en el desarrollo de diversas empresas, funcionando como un eje integrador que facilita la coordinación y trabajo entre diversas áreas y grupos de interés relacionados a la organización (Type & Valdivia, 2018) la gestión de la cadena de suministro es un elemento clave para la competitividad de las empresas debido a la importancia que tiene en los resultados empresariales a través del margen de beneficio, de los plazos de entrega, de la calidad del producto/servicio, de la satisfacción del cliente; con la aparición de las Nuevas Tecnologías y más en concreto de Internet, la gestión de la cadena de suministro ha visto una importante oportunidad para mejorar debido a la disminución de costes de interacción con los proveedores (Pérez & Santos, 2009).

La gestión del conocimiento (GC) es reconocida como una herramienta que facilita el compartir y utilizar el conocimiento, dado que las cadenas de suministro, están compuestas de distintos procesos que implican la toma constante de decisiones, que impactan de manera positiva o negativa en cada uno de estos procesos, y que pueden representar grandes pérdidas para la empresa si estas decisiones son tomadas sin el respaldo de información eficiente, es decir con la presencia de incertidumbre; la subjetividad de esta toma de decisiones, la existencia de variables combinatorias y decisiones multiobjetivo; el impacto negativo de estas características puede ser reducido y a su vez el proceso de toma de decisiones optimizado con la implementación en la Gestión de la Cadena de Suministro de la Gestión del Conocimiento.

Como ya se mencionó existe evidencia acerca de la relación entre la implementación de GC y el mejoramiento del desempeño de la cadena de suministro. "La tendencia internacional afecta a las economías en todos los niveles de desarrollo. Para los países de la vanguardia del mundo, el equilibrio entre el conocimiento y los recursos se ha desplazado tanto hacia el primero que el conocimiento se ha convertido quizás en el factor más importante que

determina el nivel de vida ... la mayoría de las economías tecnológicamente avanzadas están realmente basadas en el conocimiento " (For & World, 1999).

Para permanecer competitivas, las cadenas de suministro deben adaptarse a los cambios tecnológicos y a las expectativas de los clientes (Chopra Sunil, & Peter, 2013), la inteligencia artificial se ha propuesto como una herramienta útil para el apoyo a la toma de decisiones, la cual ayuda a los miembros de la CS a conectarse, facilitando el intercambio de información entre los diversos actores empresariales a través de la CS.

Existen diversas técnicas de inteligencia artificial entre las cuales se pueden numerar los Sistemas Tradicionales como los Sistemas Expertos, o de Apoyo a la Decisión basados en Lógica Difusa, Redes Neuronales Artificiales; los Agentes Inteligentes o la Realidad Virtual. Los sistemas basados en agentes son una técnica válida para representar y analizar la CS debido a las características de autonomía, habilidad social (comunicación), reactividad (modificación de su comportamiento) y proactividad (lleva a cabo nuevas actividades) de un agente inteligente. Los sistemas de gestión del conocimiento basados en agentes se han encontrado prometedores en la gestión de la CS, en la coordinación y colaboración de licitación mediada por agentes, subasta y contratación, así como en la gestión del conocimiento empresarial.

Esta investigación propone la gestión del conocimiento y cadena de suministro a través de Agentes Inteligentes teniendo como caso de estudio a una planta empacadora de limón persa.

En el orden mundial los años del 2006 y 2007 marcaron un incremento en los precios de los productos alimentarios con un aumento más pronunciado a comienzos del 2008. Aunque por la naturaleza pasajera de algunos de los factores que están detrás del aumento de los precios de los alimentos, estos debieron haberse estabilizado entre 2008-2009 y posteriormente disminuir paulatinamente, sin embargo, esto no fue así y se prevé permanezcan con la tendencia de aumento debido a factores como la duplicación de los costos de transporte en el mismo periodo, o el relacionado con la oferta y la demanda como se citó en el trabajo desarrollado por (Fernández Lambert, 2010).

La relación menor oferta y mayor demanda da como resultado en ciertas regiones un incremento de precios en ciertos alimentos del agro. En este sentido la agricultura juega un

papel cada vez más crucial en el abastecimiento (seguridad) alimentaria, particularmente en países menos industrializados; y dada la naturaleza compleja, dinámica, y no lineal de los sistemas agropecuarios, este seguirá requiriendo de soluciones apoyadas en técnicas y tecnologías avanzadas que ayuden tanto a dar mayor certidumbre, comprensión y soluciones apropiadas a la rentabilidad de los cultivos, así como el aseguramiento del abasto del producto al eslabón siguiente del campo, y de la población más vulnerable, básicamente es necesaria la aplicación de técnicas que aseguren una correcta y eficiente gestión de la CS agroalimentaria, para de esta manera asegurar no solo el abasto sino también minimizar la alza en los costos.

Justificación

La gestión de la cadena de suministro es uno de los aspectos en los que más énfasis se ha hecho en el mundo empresarial en los últimos años. La globalización del mundo empresarial ha traído consigo un aumento importante de la competitividad debido a la apertura de nuevos mercados. Esto obliga a las empresas a competir con entidades cuyos costes de personal, costes financieros, etc. son muy competitivos. Es por ello que cualquier estrategia que consiga optimizar o mejorar los procesos importantes a nivel de costes constituye un factor decisivo para la supervivencia de la empresa. Promover nuevos mecanismos (gerenciales y tecnológicos) de información y comunicación entre los participantes en un segmento de cadena de suministro, resulta una necesidad imperiosa. No solo con la pretensión de incorporar una suma de enfoques y herramientas que generalmente duplican acciones y esfuerzos, sino también de integrar armónicamente sus componentes, a la luz de los métodos contemporáneos de gestión (Alba Cabañas & Herrera Lemus, 2016).

Un estudio exploratorio desarrollado por (Heisig, 2009) reunió los puntos de vista de una red global expertos en el campo de la GC, los cuales resaltaron la importancia del intercambio de conocimiento en la gestión de la CS como un área importante de investigación. En las últimas dos décadas, la disciplina de gestión del conocimiento se ha enriquecido con una gran riqueza de contribuciones de una multitud de académicos y una amplia acumulación de experiencias en la práctica organizacional en casi todos los sectores económicos y sociedades de todo el mundo. Desde el punto de vista metodológico de la investigación existe una mayor utilización de métodos cualitativos, mientras que una minoría de los trabajos adoptan enfoques cuantitativos (Bhosale & Kant, 2016; Marra, Ho, & Edwards, 2012).

La presente investigación doctoral plantea el uso del enfoque multiagentes para la gestión del conocimiento en una CS, este tipo de modelo de agentes se le llama simulación multi-método, ya que combina las técnicas de IA (agentes que toman decisiones) con la simulación de eventos discretos y/o simulación de dinámica de sistemas para sincronizar la toma de decisiones de los agentes a lo largo de la CS; los sistemas multiagentes se han implementado a lo largo de los años, con una mayor tendencia actualmente, en diferentes procesos de la CS, sin embargo, la combinación de este enfoque con la Gestión del Conocimiento aplicada a la Gestión de la Cadena de Suministro no ha sido enteramente explotada. Los agentes

inteligentes (técnicas de IA) son los que realizan la gestión el conocimiento para ser más eficiente la administración de los recursos, de esta manera la gestión de la cadena de suministros ve optimizada en cada uno de sus procesos, que ahora son desarrollados bajo un enfoque de comunicación efectiva haciendo la toma de decisiones un proceso confiable y eficiente.

Hipótesis

El desarrollo de un sistema de gestión de conocimiento basado en el modelo de multiagentes inteligentes **permitirá mejorar el desempeño de la cadena de suministros del caso de estudio**. Esta mejora se fundamentará en indicadores clave como el rendimiento del fruto en la cosecha, la mejora de la calidad del fruto, la predicción del rendimiento, entre otros, concentrados en la medición del nivel de servicio, es decir el equilibrio entre lo que la empresa produce y lo que el cliente demanda.

Objetivos

Desarrollar un sistema de gestión del conocimiento basado en un modelo de multi agentes inteligentes para mejorar el desempeño de los procesos de la cadena de suministro del caso de estudio, considerando la subjetividad en la toma de decisiones, la presencia de incertidumbre y variables combinatorias, decisiones multi objetivo y la identificación de patrones de comportamiento.

Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte de la cadena de suministro y de la gestión del conocimiento, además del enfoque de sistemas basados en agentes para analizar su aplicación en la gestión de la CS.
- Identificar los procesos estándar clave para la gestión del conocimiento en los procesos de la CS, con el fin de determinar las problemáticas en el flujo de conocimiento de la cadena de suministro, caso de estudio.
- Determinar una metodología para modelar la CS utilizando el enfoque de multi agentes inteligentes considerando la subjetividad en la toma de decisiones, la presencia de incertidumbre y variables combinatorias, decisiones multi objetivo y la identificación de patrones de comportamiento.
- Desarrollar la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes para asegurar un flujo eficiente de conocimiento a lo largo de la CS.
- Desarrollar los módulos de gestión de información del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes para asegurar un flujo eficiente de conocimiento a lo largo de la CS.
- Implementar el sistema de gestión del conocimiento basado en multi agentes en la cadena de suministro caso de estudio para validar su funcionamiento mediante la evaluación de métricas de desempeño.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Introducción

La cadena de suministro tiene por objeto *generar valor* en cada transacción e integrar los distintos actores mediante sistemas logísticos diseñados intencionalmente para lograr los objetivos competitivos de *tiempo, valor, modo y lugar* (Cherres & Juárez, 2015); la globalización de los mercados hace más compleja su gestión; por ello, es necesario mejorar las condiciones de las compañías productoras o comercializadoras de bienes y servicios que se encuentran participando en un ambiente de negocios internacionales, a raíz de esto se han implementado las tecnologías de la información para hacer eficiente esta gestión.

Los costos de suministro físico, son costos que tienen que ver con: transporte de bienes de suministro o insumos, costo de inventarios de bienes de suministro o insumos, costo de procesamiento de pedidos, costo de almacenamiento, costo de administración y gastos generales asociados a los costos de suministro (Bellesteros et al., 2010), “en América Latina el costo logístico es de 15 a 20%, aproximadamente” (Cherres & Juárez, 2015), (Eskigun et al., 2005) afirman que “los costos logísticos de las empresas americanas representan el 30% del costo total del producto vendido”; en algunos sectores económicos, como el de alimentos, el costo logístico supera el 50% del valor del producto.

El Banco Mundial; en su reporte de 2012 indica que México está situado en el lugar 47 de un total de 155 países encuestados con un desempeño global logístico del 3.06 equivalente al 66%, esta medición de desempeño consiste en una escala de 1 a 5, donde 1 es el nivel menos eficiente y 5 el nivel más eficiente, en México existen oportunidades de mejora en las diferentes áreas de la logística, mismas que de ser corregidas, permitirán elevar en alguna medida la competitividad del país (Olivos et al., 2015). Las TIC (Tecnologías de Información y Comunicación) se han convertido en un medio facilitador para que la GCS cumpla sus objetivos, debido que estas permiten el almacenamiento y transmisión de información logística, que posteriormente se convierte en la base para la toma de decisiones (Espinal & Andrés, Montoya, 2017), una gestión eficiente de la cadena de suministro permite a las organizaciones alcanzar sus metas a un costo menor, pero, tal como ya se mencionó para lograr ambos objetivos es necesario el uso de herramientas y técnicas que permitan hacer más eficiente la gestión de la CS, en los últimos años las áreas de interés se han ampliado, se

propone gestionar el conocimiento para coadyuvar al logro de los objetivos en la gestión de la cadena de suministro.

El conocimiento ha marcado el desarrollo de la humanidad, y en la actualidad se considera un factor importante que condiciona la competitividad en las empresas (Capó-Vicedo et al., 2007). Para una adecuada gestión del conocimiento es necesario tener claridad sobre los facilitadores y la funcionalidad del proceso de gestión del conocimiento como estrategia para mejorar la competitividad de la cadena (Simanca et al., 2016). La gestión del conocimiento es, pues, un proceso que pretende asegurar el desarrollo y aplicación de todo tipo de conocimientos en una empresa, con objeto de mejorar su capacidad de resolución de problemas y así contribuir a la sostenibilidad de sus ventajas competitivas (Andreu Civit & Sieber, 1999). En el sector industrial y de servicios, el mayor énfasis en relación con la gestión del conocimiento se ha mostrado en las fases de transferencia y replicación, particularmente la transferencia de las mejores prácticas, lo cual contribuye al desarrollo de las capacidades organizativas (Szulanski, 1996).

En la implantación efectiva de la gestión del conocimiento es posible la utilización de una gran variedad de herramientas ello se puede explicar en parte por la diversidad de disciplinas que han favorecido la emergencia de este nuevo enfoque, que van desde las ciencias cognitivas y métodos educacionales hasta las ciencias económicas y de gestión, **la inteligencia artificial** y la gestión de la tecnología y la información. Todo este conjunto de herramientas es lo que se ha venido a denominar Sistemas Organizativos para la Gestión del Conocimiento (Smith & Meso, 2000).

El uso de técnicas de inteligencia artificial para la gestión de la cadena de suministros se ha intensificado con el paso de los años, las cantidad de áreas apoyadas por estas técnicas se hace mayor con las innovaciones tecnológicas, una nueva forma de hacer negocios y de mantener comunicación en tiempo real permite que cada uno de los actores a lo largo de la cadena de suministros se mantenga actualizado en constante comunicación, cumplir con los objetivos es posible; de igual manera la gestión del conocimiento ha echado mano de estas técnicas para desarrollar, captar, y transmitir conocimiento, la combinación de ambos aspectos permite a las organizaciones un mayor control de cada uno de los procesos el uso de las técnicas de inteligencia artificial para gestionar conocimiento en la gestión de la cadena de suministros se presenta como una propuesta en este trabajo, modelada bajo el

enfoque de agentes inteligentes se aplica el sistema de gestión del conocimiento para la gestión de la cadena de suministros a una cadena de suministro de un caso de estudio, una cadena de suministros agrícola, específicamente de limón persa, esto permitirá establecer una arquitectura de agentes funcional para CS de este tipo.

1.2 Definición del problema: cadena de suministro del caso de estudio

La comercialización de productos frescos ha cobrado importancia, toda vez que no se han logrado satisfacer las necesidades de este. Esta condición representa un área de oportunidad de exportación para los productores del campo agrícola, quienes a través del fenómeno de globalización pueden comercializar sus productos en mercados extranjeros en beneficio de su economía. Sin embargo, para aprovechar la oportunidad de negocio que presenta la globalización, se hace necesario un manejo eficaz de los recursos y prácticas del campo agrícola, así como de la sincronización los eslabones que componen su industria agroalimentaria, esta problemática improductiva ha despertado el interés por aumentar la eficiencia en la cadena de suministro agrícola (Fernández Lambert, 2010).

Los productores del cítrico consideran que la problemática principal que los aqueja es la calidad del fruto y los rendimientos de producción de sus huertos además de la necesidad de cumplir las normas y calidad del fruto que el mercado de exportación exige, existiendo también problemáticas muy particulares de cada planta en cuanto a tecnología y prácticas se refiere. Las plantas empacadoras tienen la necesidad de buscar y evaluar a sus potenciales proveedores del fruto, de manera que se asegure el abasto y calidad de fruto en atención a la demanda de sus mercados, es necesario mejorar las prácticas agrícolas con el mismo fin, controlar de una manera más eficiente los procesos internos de la planta, mejorar el flujo de información dentro de ella para mantener actualizados aquellos parámetros en los cuales se basa la toma de decisiones de cada componente de su cadena de suministro, básicamente se requiere una optimización en la gestión de la cadena de suministro, que permita dar solución no solo a estas problemáticas si no a cualquier otra que se presente.

La gestión de la cadena de suministro es un elemento clave para la competitividad de las empresas debido a la importancia que tiene en los resultados empresariales a través del margen de beneficio, de los plazos de entrega, de la calidad del producto/servicio, de la satisfacción del cliente (Pérez & Santos, 2009); la gestión del conocimiento (GC) ha sido

reconocida como una herramienta útil para compartir y utilizar el conocimiento (Alosaimi, 2018), éste trabajo propone la implementación de un Sistema de gestión del conocimiento basado en un modelo multiagentes inteligentes para mejorar el desempeño de los procesos de una cadena de suministro. Algunos autores proponen un enfoque integrador de la cadena agroindustrial y la comparan con el enfoque tradicional; recomiendan en este la necesidad de dimensionar entre los eslabones de la cadena los flujos de información, de producto, y financieros, resaltan la necesidad de dimensionar el flujo de información con el fin de que cada miembro de la cadena tenga la posibilidad de mantener comunicación en tiempo real con cada miembro de esta respecto a información del cliente, así como demandas del mercado (Fernández Lambert, 2010).

Para este propósito es necesario, inicialmente, conocer el estado actual de la cadena de suministro, la simulación es una herramienta que permite el estudio y experimentación con las interacciones, internas de un sistema complejo; los cambios de información, organizacionales o medio ambientales pueden ser simulados, y el efecto de estas alteraciones sobre el comportamiento del modelo puede ser observado es por ello que la modelación de la CS resulta útil para identificar las áreas que generan información, que pueden ser mejoradas través de otro tipo de herramientas, en resumen nos permite identificar las áreas de oportunidad de mejora en la GCS. Se describen a continuación las generalidades de la región de estudio y de la empresa que sirve como caso de estudio para este proyecto.

1.3 Exportadora de cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.

1.3.1 Generalidades de la empresa

Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V. es una empresa 100% mexicana, fundada en 1989 por el Lic. Rolando Olivares Ahumada, que con una gran visión emprendedora decidió crear una compañía para poner dentro del alcance del consumidor internacional y nacional limón persa de la mejor calidad e inocuidad que se produce en Martínez de la Torre-Veracruz en México. Desde entonces, San Gabriel empresa pionera en la exportación de limones persas en México ha continuado creciendo ocupando uno de los primeros lugares de exportación de limón persa en México y el Mundo.

La empresa está ubicada en la ciudad de Martínez de la Torre-Veracruz, se dedica a la producción, selección y empaque para la exportación del limón persa sin semilla con los más

altos estándares de sanidad e inocuidad a mercados como lo son: Estados Unidos de Norteamérica, Unión Europea, Japón y Korea del Sur.

San Gabriel es reconocida como una empresa líder en sus prácticas de buena manufactura, y ha demostrado siempre en todo momento una punta de lanza en la innovación de sus prácticas no sólo productivas sino administrativas y de gestión logística, está conformada por más de 200 personas entusiasmadas por exportar el mejor limón persa que existe en la región a cualquier parte del mundo, ya sea por tierra, mar o aire, trabajando con producción propia de siete huertos de ubicados en la región con una superficie total aproximada de doscientas hectáreas sembradas de limón persa con las cuales abastece el quince por ciento de su exportación; además de ser la principal empresa compradora de limón persa en México (Romero Tagal, 2016).

1.3.2 Misión, visión y objetivos

Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V., establece como Misión: *“Producir, recibir, seleccionar y empacar limón persa con calidad e inocuidad para su exportación mediante el cumplimiento de normas internacionales, normas oficiales mexicanas y normas mexicanas de control de calidad relacionadas, y la participación comprometida de todo el personal de la organización”*.

Con una **Visión** de: *“Constituirse como la planta empacadora y exportadora de limón persa líder en el país a través de la calidad e inocuidad de sus productos que satisfagan los requisitos y necesidades de los clientes nacionales e internacionales”*.

Para el cumplimiento de estos valores, Exportadora de Cítricos *“San Gabriel, S.A. de C.V.”*, establece como **objetivos**:

- *El de consolidarse como uno de los principales proveedores de limón persa en los Estados Unidos y en parte de Europa.*
- *Mejorar la calidad e inocuidad de nuestro producto con la capacitación de nuestro personal en las normas, a fin de satisfacer las necesidades de los clientes.*

Brindar el mejor servicio a nuestros clientes para seguir trabajando con ellos.

1.3.3 Estructura organizacional

La Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V. se encuentra organizada en cuatro niveles funcionales que se describen como director general, gerencia general, responsables de áreas, y funciones operativas. Una gerencia técnica se adjunta al nivel gerencial de la empresa (Figura 1).

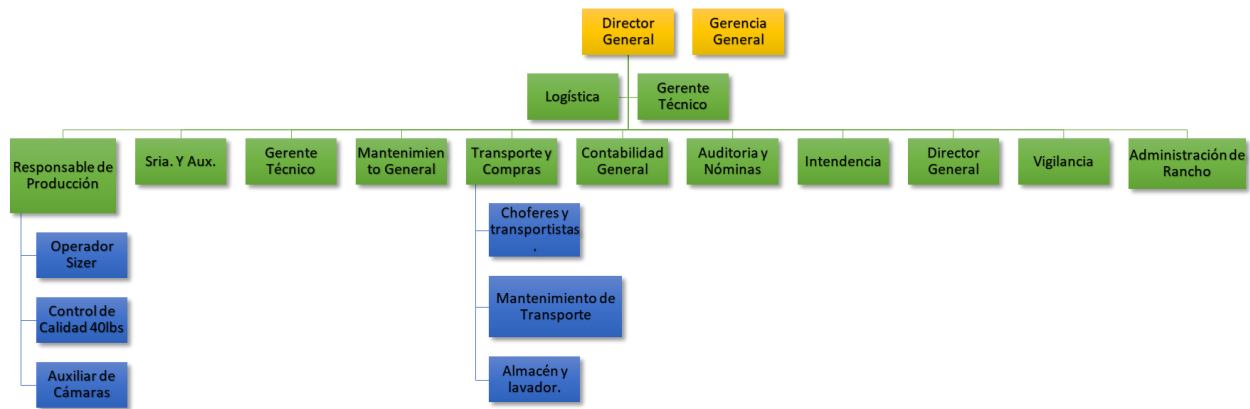


Figura 1 Organigrama Funcional de la empresa Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.

El **director general** se encarga directamente del área de ventas y de las finanzas, de la atención y realización de negociaciones con los clientes, recibe los pedidos, coordina el embarque del producto a su destino final a través del departamento de logística, y aprueba las peticiones de la empresa. El **gerente general** es la persona que dirige y aplica las acciones del consejo de administración y dirección, coordina el cumplimiento de los pedidos con el responsable de Producción; se ocupa de la operación de la empresa en todas sus fases desde la compra del limón hasta su empaque, de las áreas de servicio como los almacenes y la contabilidad, y es el responsable de la productividad de la empresa. El **gerente técnico** es la persona que coordina la implantación y aplicación del sistema de calidad SG-9000 verificando su cumplimiento con los requisitos de las normas ISO-9000, HACCP y GLOBALGAP mediante la coordinación de auditorías internas y juntas de revisión por parte de la Dirección General, con la finalidad de la mejora del sistema de calidad, además de ser la persona responsable de la conexión con partes externas que estén relacionadas con el sistema de calidad. El **responsable de producción** tiene la función de cubrir los pedidos de los clientes, coordina la producción, supervisa los formatos de rendimiento de la fruta, también coordina y dirige el personal para el buen empaque de la fruta, y es el responsable del empaque de la fruta. El responsable de **transporte y compras** controla y coordina las

rutas de transporte; además coordina, supervisa, suple y elabora controles para obtener materia prima, y es responsable de pago justo por calidad en campo.

1.3.4 Localización

El municipio de Martínez de la Torre-Veracruz se encuentra ubicado en la región Centro-Norte del Estado de Veracruz, en las coordenadas 20° 04' de latitud norte y 97° 04' de longitud oeste, a una altura de 151 metros sobre el nivel del mar. Limita al Norte con Tecolutla, al Este con Nautla y Misantla, al Sur con Atzalan y Tlapacoyan, al Oeste con Papantla y con el estado de Puebla.

Su distancia al Norte de la capital del estado por carretera es de 150 Km y tiene una superficie de 815.13 Km²; cifra que representa un 1.12% de la superficie total del estado.

La empresa, se encuentra ubicada en el Km. 1.5 del Libramiento Martínez-Tlapacoyan, de la ciudad y municipio de Martínez de la Torre, Veracruz (Romero Tagal, 2016).

1.3.5 Distribución de planta

En la Figura 2, se muestra la ubicación de cada una de las áreas que conforman a la Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.

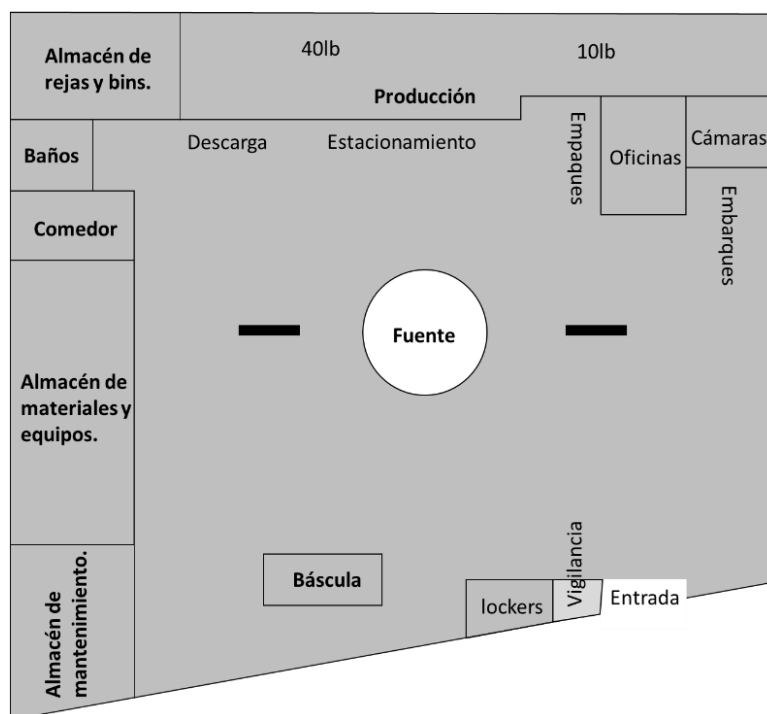


Figura 2 Distribución de la planta de la empresa.

1.3.6 Descripción del proceso de empaque de limón persa

El proceso de empaque de limón persa en la Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V. consta de once operaciones como se muestra en el diagrama de flujo de proceso en la siguiente Figura 3, en la Tabla 1 se describen cada una de las operaciones del proceso de empaque de limón persa.

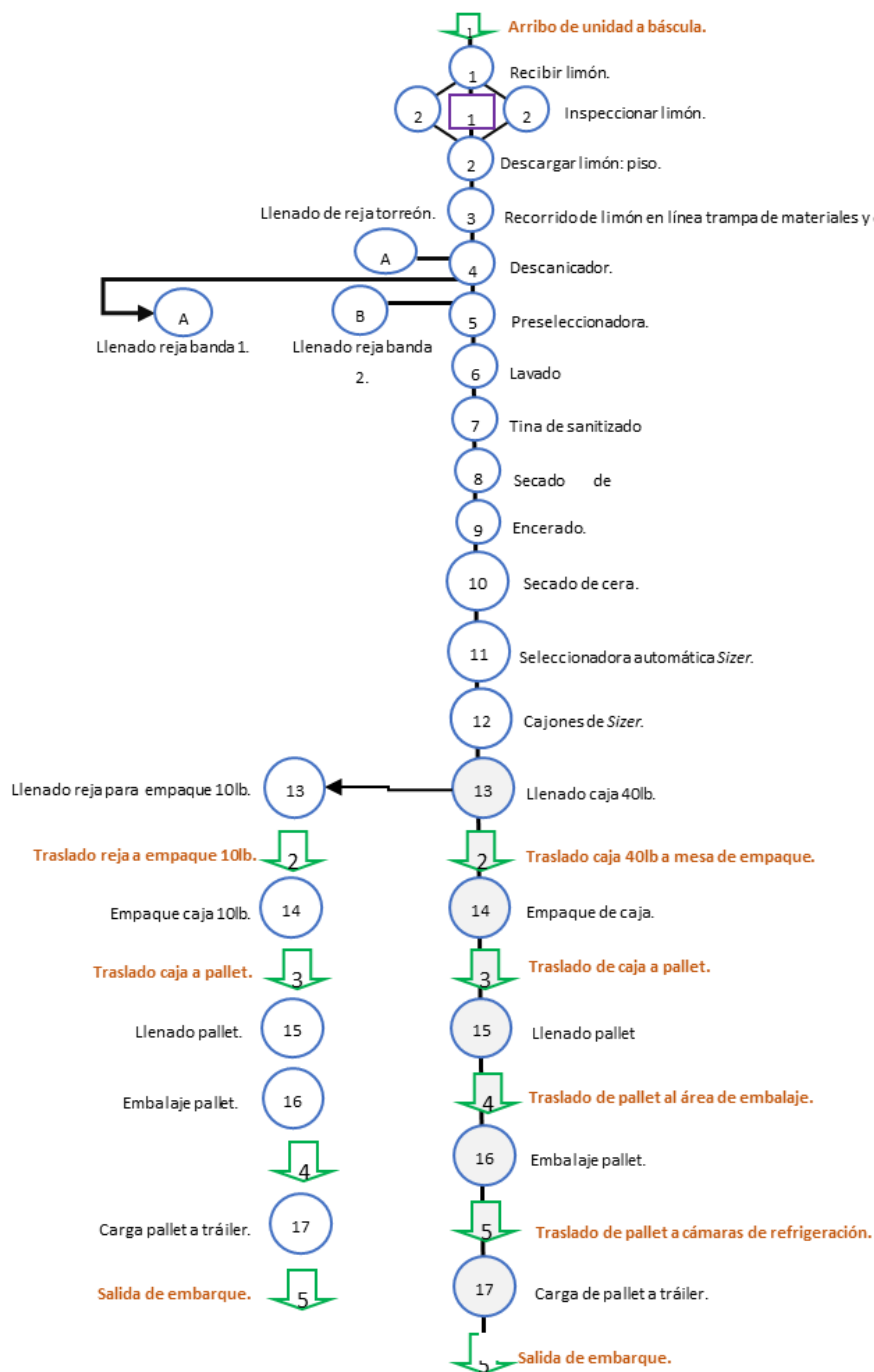


Figura 3 Diagrama de flujo de proceso de empaque de la Exportadora de Cítricos San Gabriel.

Tabla 1 Descripción del proceso de empaque de la Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.

Descripción	
Recepción.	El limón llega en rejas de plástico de veinticinco kilogramos, nunca a granel. Éstas son ordenadas por lotes para tener el control de su origen, obteniendo así su trazabilidad. La fruta que viene de proveedores independientes se les realiza una inspección para determinar su calidad y así mismo su precio.
Volteadora de Bines	En ella se deposita el limón cuando llega en grandes cantidades (tráiler, torton).
Calibrador mecánico.	El limón es seleccionado de forma mecánica el limón calibre 275, el cual por su tamaño no es adecuado para los mercados de exportación, es vendido para mercado nacional. En este paso también se eliminan contaminantes físicos (residuos vegetales, piedra, astillas de madera, etc.) que puedan acompañar al producto.
Lavado.	Es realizado a base de agua potable, cepillos y detergente biodegradable aprobados por EPA (<i>Environmental Protection Agency</i>).
Sanitizado.	Por medio de inmersión en agua con Tsunami 200, que es un aditivo libre de enjuague, para tratamiento de agua y control del crecimiento microbiano en el transporte, almacenaje y procesamiento del limón recién cortado. El cual se monitorea cada 2 horas para asegurar el mantenimiento de los límites requeridos
Secado de agua.	El limón es secado a través de tres cepillos giratorios que escurren el agua, además de dos ventiladores que secan por completo al limón, para estar listo en la etapa que le sigue.
Encerado.	En esta fase del proceso, el limón es roseado de cera con fungicida que mejora su aspecto físico por aumento de brillo y le da mayor vida de anaquel. Este tratamiento ayuda a combatir hongos que afectan la calidad del limón. El fungicida es aplicado bajo los límites permitidos por el país destino.
Secado de cera.	El limón encerado es secado por medio de aire caliente a través de turbinas provistas de calor con gas LP que calientan el aire a una temperatura de 40 a 50°C., lo que permite un secado uniforme.
Seleccionadora Sizer.	El limón tiene su recorrido a través de tres bandas, que a su vez pasan por tres cámaras que son manipuladas a través de un centro de control que determina las características y el lugar donde será depositado cada limón (tamaño 110, 150, 170, 200, 230,250) y también en esta misma son llenadas las cajas de producto para posteriormente pasar a empaque.
Empaque (40 lb).	Las cajas de producto son pesadas y empacadas para depositarlas en pallet, ser flejados, y posteriormente, acomodados en los contenedores.
Empaque (10 lb).	Las cajas de producto son llenadas, etiquetadas y empacadas manualmente, para depositarlas en pallets, ser flejados y posteriormente, acomodados en los contenedores.

1.3.7 Productos y mercado de la cadena de suministros de la Exportadora San Gabriel S.A. de C.V.

Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A de C.V. adapta sus productos de acuerdo con las necesidades y especificaciones de sus clientes. Actualmente sus presentaciones de empaque son en 10 y 40 libras (Figura 4).

- **Caja de 10 libras** para mercado de Estados Unidos de Norteamérica, empacada manualmente pieza por pieza para garantizar el 100% de la calidad, con etiqueta para cada limón en calibres de 54, 48, 42 y 36, en pallets de 180 cajas almacenado a temperatura ambiente.
- **Caja de 40 libras** para mercado de Estados Unidos de Norteamérica. Fruta con o sin etiqueta envasado a granel, en calibres de 110, 150, 175, 200, 230 y 250 en pallets de 54 y 60 unidades.
- **Caja de 10 libras** para el mercado de Japón, fruta con o sin etiqueta, empacada manualmente unidad por unidad, caja con fondo y tapa, en calibres de 44, 42, 40 y 36, pallets de 120 y 180 cajas.
- **Caja de 10 libras** para el mercado de Europa, caja de una sola pieza, empacado manualmente limón por limón con o sin etiqueta con grado de maduración $\frac{3}{4}$ color verde 90% uniforme, cáscara rugosa, calibres; 63, 54, 48, 42 y 36, en pallets de 216 piezas.



Figura 4 Productos de la Exportadora San Gabriel.

- El calibre se refiere a la cantidad de limones que contiene una caja de 10 y 40 libras; en el caso de las cajas de 10 libras existe tolerancia de ± 300 gramos y en las cajas de 40 libras se tiene una tolerancia de ± 10 limones.
- Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V. cuenta con mercado local e internacional. En el mercado local el limón persa es vendido a granel para la industria del jugo y derivados; en el mercado internacional exportando a Estados Unidos de Norteamérica-Canadá vía terrestre, con la marca San Gabriel y genéricas; Europa vía terrestre-marítima con marca San Gabriel y genéricas; y Asia vía terrestre – aérea con la marca de Neo Lime.

1.4 Región de estudio

El Estado de Veracruz está dividido en tres distritos citrícolas: 001 de fortín, 002 de Álamo, 003 de Martínez de la Torre. Para esta investigación, se estableció como región de estudio al Distrito de Martínez de la Torre, dado que es la principal zona productora de limón persa en México, y es ahí donde se encuentra una de las principales empresas exportadoras de limón persa del país que atienden los mayores mercados internacionales que demandan el cítrico.

En México, la mayor producción de limón persa (*Citrusxlatifolia* Tanaka ex Q. Jiménez) ocurre entre los meses de mayo a octubre, lo que coincide con los precios bajos de los mercados nacionales e internacionales (Rivera-Cabrera *et al.*, 2010). De diciembre a abril se obtiene baja producción y se alcanzan los precios más altos (Almaguer-Vargas *et al.*, 2011); específicamente en el estado de Veracruz se presentan dos periodos de producción: baja oferta: marzo-abril y alta oferta agosto-noviembre. El resto del año se mantiene en niveles de producción que atienden desequilibradamente la demanda del mercado. Esta dinámica de cultivo, especialmente en lo que se refiere a naranjas y lima persa, asientan una base agroindustrial de 70 empresas limoneras acopiadores del fruto para su comercialización nacional en centrales de abastos, cadenas comerciales, y suministro a plantas extractoras; 70 exportadoras de limón persa en fruto fresco, las cuales atienden cuatro mercados internacionales: Estados Unidos de Norte América, Canadá, Japón, la Comunidad Europea en países como lo son Francia, Alemania, Italia, Holanda, Inglaterra, entre otros; 9 plantas extractoras las cuales acopian fruto fresco de diversos cítricos; 3 gajeras abocadas

principalmente a cítricos dulces como la naranja, pomelo, y la tangerina: 99 plantas enceradoras las cuales prestan servicio de encerado de fruta a comercializadoras de cítricos; 6 viveros certificados (INVEDERP, 2008; Castellanos, 2009; y Becerra et al. 2009)

1.5 Unidad de análisis

La investigación se realiza en el huerto de producción de limón persa (temporal, y de riego) y la empresa empacadora. Esta cadena de suministro enmarca, en su forma más básica, tres elementos de gestión (Figura 5): el huerto productor del fruto (proveedores), la empresa empacadora-exportadora, y el mercado al cual se dirige el producto en fresco (demanda), estos elementos requieren una sincronización eficiente de la cadena de suministros. Los primeros dos elementos representan la unidad de análisis principal.

El huerto (en adelante descrito como proveedor) es quien contribuye en el volumen de fruta en cantidad y calidad a través de la cadena, y la empresa empacadora es quien demanda el producto del huerto en atención a su propia demanda de los mercados internacionales, de que la producción del fruto está ligada a la capacidad de producción del productor, la cual puede tener dos esquemas de producción en huerto: huerto de temporal, o en un huerto de riego.



Figura 5 Cadena productiva de limón persa.

En el huerto de temporal el productor se apoya básicamente de sus prácticas y de equipo mecánico especializado o no, para el financiamiento de este; mientras que, en el huerto de riego, se cuenta con tecnología propiamente para el riego, con la cual se espera que una

misma superficie de plantación en un huerto de temporal, la respuesta en rendimiento de producción y calidad de fruto sea mucho mayor. En ambos sistemas de producción, el productor puede ser acopio tanto de productos químicos y/agroquímicos -permitidos por los mercados-, como de “buenas prácticas agrícolas” para gestionar su producción (Becerra et al. 2009).

1.6 Sujeto de estudio

Para el desarrollo de esta investigación se contó con el apoyo y apertura para proporcionar información para el proyecto de una empresa empacadora de limón persa. Se considero importante estudiar al mediano productor de limón persa, dado que en este estrato de productores se encuentran los dos sistemas de producción (temporal, y riego); y el interés principal de este tipo de productor está en el mercado de exportación, este tipo de productores logran en promedio producciones de 16 ton/ha en huertos de temporal y 22 ton/ha en huertos de riego (INVEDERP, 2008), en los cuales, para su mantenimiento (limpieza, poda, combate a plagas, aplicación de nutrientes) tienen en promedio 4 trabajadores (Lopez, 2009).

1.7 Cadena de suministros de los cítricos del estado de Veracruz

En un contexto, general el primer eslabón de la cadena de suministros de los cítricos (limón persa, naranja, toronja, mandarina y tangerina) identificado como “eslabón de huerto” tiene una proveeduría relacionada con asesoría técnica; Viveristas; Proveedores de insumo; Proveedores de Maquinarias, equipo e implementos; y organismos de investigación y tecnología (Fernández Lambert, 2010).

(Fernández Lambert et al., 2015) reportan, desde el enfoque de la cadena de suministro, tres eslabones importantes: producción en huerto, Industrias Procesadoras, Distribuidores, y clientes finales definidos por el Mercado Nacional e Internacional (Figura 6).

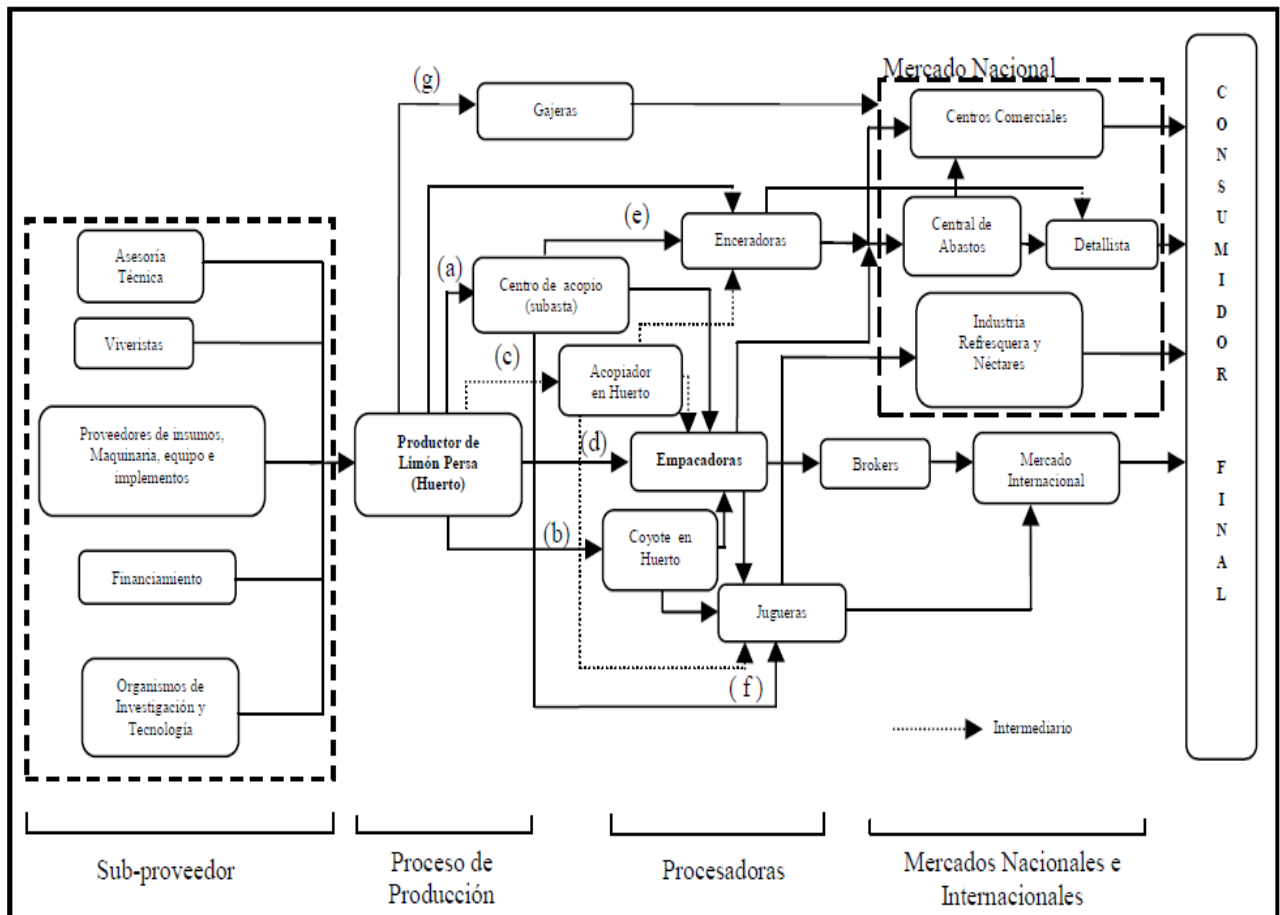


Figura 6 Cadena de suministros de los cítricos en el Estado de Veracruz, 2009. Fuente: (Fernández Lambert et al., 2015)

1.7.1 Primer eslabón (huertos proveedores)

El eslabón de producción en huerto (Figura 5) está integrado por los productores del cítrico quienes juegan el papel determinante de proveedores en la cadena productiva, al ser ellos los responsables de generar el volumen de producción y la calidad del cítrico que atienda las necesidades del mercado, quienes con independencia del tamaño del productor (pequeño, mediano, o grande) realizan las mismas prácticas cultivo. La diferencia de cada cítrico, se hace notar en la forma y capacidad de atender sus huertos, como lo pueden ser los conocimientos implicados, el nivel tecnología utilizada, y principalmente la capacidad económica para invertir en ellos (Fernández Lambert, 2010).

Tabla 2 Caracterización de las cadenas productivas de los cítricos, 2009.

Eslabón	Cítrico			
	Mandarina Tangerina	Limón Persa	Pomelo	Naranja
Huerto	1	1,2	1	1,2
Industria	4	3,4,5	4,5	4,5
Mercado/Distribución	6,7	6,7,8,9,10	6,7,8	6,7,8

Huerto: (1) Temporal, (2) Tecnificado. **Procesadora:** (3) Empacadora, (4) Jugueras, (5) Enceradoras.

Mercado Nacional: (6) Centras de abastos, (7) Centros comerciales, fruterías.

Mercado Internacional: (8) USA-Canadá, (9) Europa, (10) Asia, (11) Oceanía, (12) África

Fuente:(Fernández Lambert, 2010)

Las prácticas de cultivo que realizan los productores en sus huertos son por lo general el mantenimiento de huerto, el corte, y la manipulación del fruto. Las actividades del mantenimiento de huerto se relacionan con la limpieza y poda de árboles, aplicación de abonos o fertilizantes, y aplicación de fungicidas.

1.7.2 Segundo eslabón (procesadora)

El segundo eslabón de la cadena de suministro de los cítricos está conformado por las procesadoras que son las encargadas de darle un valor agregado al producto cítrico de acuerdo al interés del mismo. Los tipos de procesadoras localizadas en el Estado de Veracruz son (INVEDERP, 2008): Empacadoras, Jugueras, Enceradoras, y Gajeras (Figura 7).



Figura 7 Aprovechamiento industrial del cítrico, Veracruz-2009.

Las procesadoras tienen dos tipos de proveedores: de materia prima; productores del campo que abastecen del cítrico según las necesidades; y de insumos; los que proveen a la empresa de materiales, equipos y servicios que son necesarios para el funcionamiento de la empacadora.

3.3.2.1 Extractoras

Las extractoras conforman un complejo industrial establecidas para el aprovechamiento de los cítricos y frutos en la elaboración de concentrados, estas son abastecidas por productores del Estado Veracruz, y de otros como lo son Chiapas, Tabasco, Puebla, Oaxaca, y Tamaulipas. Regionalmente al Distrito de Martínez de la Torre, el cítrico que alimenta a estas plantas tiene dos fuentes principales: el acopiado en las centrales de abasto con productores de baja escala de producción y/o producto del “coyotaje” en huerto, o bien de productores de gran escala. Tecnológicamente las extractoras se encuentran en una dinámica de actualización tratando de mantener y mejorar rendimientos en sus procesos.

3.3.2.2 Gajeras

Las Gajeras son unidades económicas que han surgido como una alternativa para la diversificación en el aprovechamiento especialmente de la naranja y los pomelos. Su proveeduría de cítrico es local, y la comercialización de su producto nacional en un mercado de dulcería, fruta cristalizada, y conservas. Carecen de una red de distribución formal, delimitan sus medios de transporte al centro de la república, y terciarizan su distribución a mercados nacionales (Becerra et al. 2009).

3.3.2.3 Empacadoras

Las empacadoras se enfocan al empaque de limón persa con fines de exportación, y ellas resaltan por su impacto y derrame económico en sus regiones. Cada operación del proceso de empaque de limón persa ha sido atendida con el propósito de incrementar tanto la velocidad de clasificación como empaque del fruto. Entre algunas acciones esta la inserción de maquinaria de diferente tecnología entre operaciones, adaptaciones “hechizas” a las ya existentes, o modificaciones en su velocidad; lo que ha permitido incrementar la velocidad de la operación de manera local, aun cuando se ha perdido sincronización operaciones, traduciéndose en paros de proceso entre operaciones, sin mejora alguna en la velocidad global del sistema (Becerra et al. 2009).

1.7.3 Comercialización - distribución

Los productores y/o procesadoras destinan su producto al mercado nacional o de exportación, como producto fresco o industrializado. Todos los cítricos, como producto fresco se encuentran en el mercado nacional, mientras que los jugos concentrados, el aceite esencial, y el limón persa en fruto fresco son exportados a mercados como es Inglaterra, Francia, Holanda, Bélgica, Holanda, Suiza, Alemania, Australia, Italia, Japón, Estados Unidos y Canadá (ver Figura 8). Sus redes de distribución están terciarizadas a comercializadoras nacionales y transnacionales (CONCITVER, 2009).



Figura 8 Productos derivados de las procesadoras en el Estado de Veracruz, 2009

Para satisfacer la demanda del mercado nacional, los productores de gran escala o comercializadoras nacionales, transportan, según el fruto fresco, a granel, enrejadas, o empacadas en camiones abiertos a las principales centrales de abasto y cadenas comerciales del País (Schwentesius Riderman & Gómez Cruz, 2005). Los tractocamiones con cámaras frías son utilizados vía terrestre por las Jugueras y Empacadoras para atender el mercado de Estados Unidos y Canadá. El jugo concentrado, aceite esencial, y lima persa, es transportado al mercado europeo mediante tercerización con comercializadoras transnacionales quienes transportan el producto en cámaras frías al puerto de Altamira, Tamaulipas., para embarcarlo y arribarlo a puertos en Europa según el destino. Especialmente al mercado de Japón se envía el limón persa vía aérea Cd. de México a Japón con escala en los Ángeles California, USA (Becerra et al. 2009).

1.8 Conclusiones

Las empresas empacadoras y exportadores enfrentan un desafío significativo en la gestión de su cadena de suministro, impactando su eficiencia operativa y competitividad en el mercado. En este Capítulo 1 ha detallado los aspectos críticos del problema y ha proporcionado una visión general de la empresa, destacando cómo estos factores interrelacionan. Al comprender las implicaciones de este problema, se han establecido los objetivos del estudio, que buscan no solo identificar soluciones viables sino también medir su efectividad a través de indicadores clave como el rendimiento del fruto en la cosecha, la mejora de la calidad del fruto, la predicción del rendimiento y el balance entre producción y demanda. En el Capítulo 2 profundizará en el análisis del estado del arte que sustentará la metodología propuesta para el desarrollo de propuestas de soluciones estratégicas.

Capítulo 2. Estado del arte

2.1 Introducción

La aplicación de técnicas de IA en la GCS se ha analizado ya desde hace años, el uso de Agentes Inteligentes (AI) y SMA se remonta a los años 80's; la tecnología de agente y, en particular, los sistemas multiagente se diseñaron para capturar muchos de los desafíos involucrados en el apoyo a las prácticas cambiantes de la cadena de suministro (Lei et al., 2006).

Se presenta, a continuación, un breve estado del arte de los trabajos que hacen referencia a los temas inherentes a la temática de esta propuesta de tesis, subdivididos por ámbito de aplicación, se inicia con la Gestión del Conocimiento para posteriormente analizar los trabajos que se han desarrollado con la aplicación de la GC en la Cadena de Suministro (CS) y específicamente en la Gestión de la Cadena de Suministro (GCS), posterior a ello sea analiza el uso de técnicas de diversas técnicas de inteligencia artificial en ambas áreas, para finalizar con un estudio más específico y actualizado sobre el uso de los Agentes Inteligentes, Sistemas Multi Agentes en particular, en la Gestión del Conocimiento para la Gestión de la Cadena de Suministro y en la producción agrícola.

2.2 Metodología del estado del arte

La búsqueda bibliográfica empleó las siguientes bases de datos: ABI / INFORM (BuscaRE), Science Direct, Publons, ScholarGoogle®; se limita a artículos publicados en revistas internacionales revisadas por pares que se escribieron en inglés y se publicaron entre 2016 y 2020 (antes del mes de marzo). Las palabras clave utilizadas en la búsqueda bibliográfica y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3. La búsqueda de palabras clave se aplicó al título y contenido de los artículos, se omitieron artículos review, y únicamente se incluyen aquellos en los que se modela y aplica un SMA en algún eslabón de la CS.

Tabla 3 Keywords usadas en el buscador de la base de datos y número de resultados hallados.

Código	Keywords	ABI/INFORM (BuscaRE)	Science direct	Publons	ScholarGoogle
A	Multi Agent Based System	458713	7216	1707202	5330000
B	Supply Chain	2366635	525986	138853	4230000
C	kNowledge Management	4063871	999561	369728	4870000
D	Encadenamiento A, B Y C	52048	474	2154582	535000

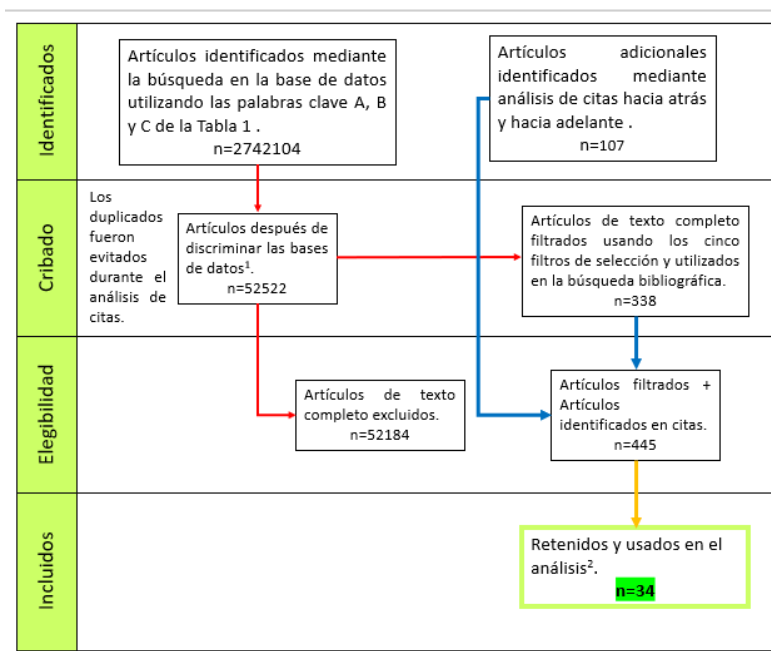
A los resultados del encadenamiento de Keywords de Código D, se les aplicaron los filtros mencionados en la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 4 Filtros aplicados a los resultados de búsqueda en las 4 bases de datos/motor de búsqueda.

Filtros				
	ABI/INFORM (BuscaRE)	Science direct	Publons	ScholarGoogle
Artículos	341		Sin Opción	Sin Opción
Materia: (A. B y C), Conference Extrac, Research Articles	263	75	Sin Opción	Sin Opción
Año (2016-2020)	Sin Opción	140	Sin Opción	46400
Área (Ingeniería)	Sin Opción	Sin Opción	377730	Sin Opción
Sin Citas, Sin Patentes	Sin Opción	Sin Opción	Sin Opción	45800

El enfoque adoptado para la revisión de la literatura se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** usando un diagrama de flujo de cuatro fases PRISMA (Moher et al., 2009).

Tabla 5 Proceso de recopilación de artículos. Fuente: Elaboración Propia a partir de (Moher et al., 2009)



En este proceso de recopilación de datos descrito en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestran cuatro filas de criterios para recopilación de artículos: Identificados, Mostrados en Pantalla, Elegibles e Incluidos.

Mediante Keywords del Código A, B, C; se identificaron 2,742,104 artículos sobre SMA en la CS, mientras que, mediante cita, se identifican 107 artículos. De los 2,742,104 artículos se eliminaron artículos duplicados llegando a 52,522, a los cuales se aplicaron los filtros descritos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, restando 338 artículos. De los artículos filtrados e identificados mediante análisis de citas, se redujeron a 445 artículos elegidos. Los artículos elegidos se limitaron a los encontrados en las bases de datos ScienceDirect y ABI/INFORM (BuscaRE), los cuales se examinaron individualmente para garantizar su relevancia y se usaron los siguientes criterios de inclusión:

- El documento debe ser específicamente Artículo.
- El artículo debe ser accesible para la comunidad académica en general.
- El artículo debe presentar un modelo o sistema multi agentes completo en lugar de simplemente un modelo ABS conceptual no implementado (Casos de Estudio).
- Debe haberse publicado entre 2016 y 2020.

- Se excluyeron los trabajos de revisión de literatura.
- Finalmente, los artículos deben abordar las preguntas de investigación relacionadas con los temas de la investigación que se muestran a continuación.

Estos criterios de inclusión retuvieron 34 artículos para su análisis basado en lo especificado en las preguntas de investigación descritas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que se han diseñado teniendo en consideración el trabajo propuesto.

Resulta valioso para la gestión identificar para qué eslabones de la CS se han diseñado sistemas multi agentes, específicamente “Sistemas de Gestión del Conocimiento para la Gestión de la Cadena de Suministro” no presentó en una búsqueda previa resultados significativos por lo que la búsqueda se limitó a sistemas multi agentes aplicados en la GCS, dado que se trata del desarrollo de un sistema de GCS bajo el enfoque de AI es necesario conocer algunos datos técnicos específicos por lo que desde ahora se extraen durante el estudio del Estado del Arte.

Tabla 6 Preguntas de Investigación para Criterio de Selección de Artículos. Fuente: Elaboración Propia.

ID	Pregunta	Objetivo
P11	Específicamente en cuanto a Agentes Inteligentes y Agentes Inteligentes aplicados a la Cadena de Suministro (2016-2020): ¿Qué eslabones de la cadena de suministros han sido considerados para su aplicación?	Identificar los eslabones de la cadena de suministro que han sido prioritarios para la atención mediante sistemas inteligentes con un enfoque multi agentes.
P12	Dentro de estos trabajos, en cuánto a Agentes Inteligentes: ¿Qué tipo de arquitectura son las que se han aplicado?	Identificar las arquitecturas de mayor uso.
P13	¿Qué agente innovador se ha desarrollado?	Conocer que innovaciones se han realizado con respecto a los agentes comúnmente utilizados.
P14	¿Qué aportaciones a las arquitecturas de Agentes Inteligentes previas se han hecho?	Conocer que innovaciones se han realizado con respecto a las arquitecturas comúnmente utilizados.
P15	¿Qué software o lenguaje se ha utilizado para dichos trabajos y qué ventajas aporta?	Identificar el software de mayor uso para la modelación de CS con AI.

2.2.1 Gestión del conocimiento

El estudio del concepto, la vinculación y los marcos de la gestión del conocimiento, el aprendizaje organizacional y la memoria, se ha abordado por autores como (Lahaba & Santos, 2001, Antunes & Pinheiro, 2019, Heisig, 2009, Chouikha Zouari & Dhaou Dakhli, 2018, Fernando & Meleán, 2005, y Rubenstein-Montano, Liebowitz, Buchwalter, Mccaw, et

al., 2001), destacando de todos los trabajos que es necesario unificar la conceptualización de la GC y que existen cinco categorías amplias más frecuentemente mencionadas de actividades de gestión del conocimiento, que son: compartir, crear, aplicar, almacenar e identificar conocimiento. Las aplicaciones de la GC son tan numerosas como diversas, se pueden encontrar aplicaciones que van desde el diseño de productos, hasta algo más como el realizado por (Chandra & Kamrani, 2003a) y más recientemente (Lin & Yang, 2019) aplicando este enfoque a la minería de datos en la tecnología 5G de la nube e internet. Los autores se han dado cuenta de que la gestión del conocimiento es la clave para el desempeño organizacional y la supervivencia en un entorno económico, tecnológico, político y social en constante cambio.

2.2.2 Gestión de la cadena de suministro

La Gestión de la Cadena de Suministro (GCS) es un tema que ha recibido una considerable atención por parte de investigadores, académicos y el mundo empresarial (Alba Cabañas & Herrera Lemus, 2016), muestra de ello son los trabajos realizados por (Alomoto et al., 2015) quienes se enfocan en el análisis de la GCS de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) ecuatorianas, sus resultados demuestran que el enfoque estratégico de las empresas se relaciona con las prácticas implementadas, por ejemplo, empresas con enfoque en costos/eficiencia tienen innovaciones que reducen sus costos.

2.2.3 Gestión del conocimiento en la cadena de suministro

La gestión del conocimiento resulta ser tendencia en los últimos años, cobra una mayor importancia, y su aplicación a la cadena de suministro es una combinación que permite incrementar la eficiencia y optimizar los procesos de comunicación entre los eslabones de la cadena de suministro.

La mayoría de la literatura existente sobre gestión del conocimiento en un entorno interorganizativo, se centra en las alianzas de tipo horizontal entre dos o más socios, mientras que son pocos los autores que se centran en las alianzas de tipo vertical, entre proveedores y clientes, es decir, en la cadena de suministro (Capó Vicedo et al., 2005, Pérez & Santos, 2009, Duan et al., 2013, Alba Cabañas & Herrera Lemus, 2016, M. D. R. Pérez-Salazar et al., 2017, Aminzadegan et al., 2019, y Schniederjans et al., 2020) identifican el área de oportunidad que representa la digitalización de la cadena de suministro, así como las áreas de crecimiento

para explicar cómo la dimensión humana de la gestión de la cadena de suministro se puede explorar más a fondo y exponen diferentes casos de estudio exitosos en los cuales se da prioridad a la gestión de la cadena de suministro, determinándose que es un elemento clave para la competitividad de las empresas, (Capó-Vicedo et al., 2007) concluyen que la estructura organizativa conocida como Empresa Virtual es la más apropiada para gestionar el conocimiento en una cadena de suministro, por sus características intrínsecas de confianza mutua entre sus miembros, así como por el dinamismo en su creación y operación.

2.2.4 Agentes inteligentes en la cadena de suministro

Los agentes inteligentes tienen la capacidad de mejorar la comunicación en diferentes procesos optimizando de esta manera la toma de decisiones, a continuación, se describen algunos de los trabajos que se han realizado con esta técnica en diferentes áreas a fin de mostrar la versatilidad y amplia área de aplicación de la herramienta.

(Peng et al., 1999) propusieron un sistema multiagente para la integración empresarial inteligente mediante un conjunto de agentes con experiencia especializada para ayudar con la recopilación de información y conocimiento relevante, para cooperar entre sí y con otras partes del sistema de gestión de producción y humanos para llegar a decisiones oportunas al tratar con diversos escenarios empresariales; más adelante (Janssen, 2005 y Min, 2010) exploran varios subcampos de IA, entre ellos los sistemas multi agentes, que son más adecuados para resolver problemas prácticos relevantes para la gestión de la cadena de suministro, aumenta el nivel de flexibilidad en la cadena y permite que los miembros sean más receptivos. (Avédissian & Valverde, 2015) proponen el uso de agentes para comparar-representar la colaboración impulsada por el ser humano en los procesos de la cadena de suministro, mientras que (Puche et al., 2019) analizan el desempeño de la cadena de suministro desde el enfoque de Kanban. El estado del arte de estas aplicaciones es variado en cuanto al área dentro de la cadena de suministro que es atendida bajo este enfoque.

El uso de Sistemas Multi Agentes para gestionar la Cadena de Suministro tuvo una mayor publicación en el año 2018 y 2019 tal como puede observarse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Estos artículos se publican en el campo de la ingeniería, la

informática y la investigación operativa, atendiendo problemas diversos propios de la gestión de la CS en sus diferentes eslabones.

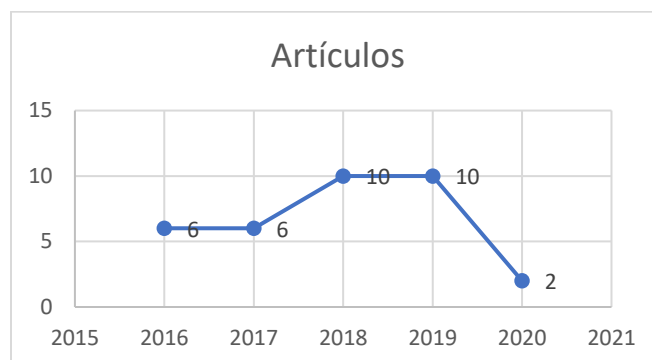


Figura 9 Artículos SMA en la GCS Publicados entre 2016 y marzo de 2020.

La discusión más activa de este tema se realiza en revistas sobre Logística y Sistemas Computacionales. Aún y cuando los SMA han demostrado su aplicación en la gestión de la cadena de suministro, el número de publicaciones en revistas de la cadena de suministro han sido de 10 o menos entre los años 2016 a 2020.

El uso de la técnica de inteligencia artificial, agentes inteligentes en los procesos propios de la cadena de suministros se ha extendido y ha ganado popularidad debido a su eficiencia a través de los años, se puede observar que los trabajos recientes que se basan en la aplicación de enfoques basados en multiagentes para el manejo de inventarios, tal como lo propone (Wang et al., 2019a) en su artículo, o los marcos y sistemas propuestos por (Giret et al., 2017, Ju et al., 2018, Sarkar & Šormaz, 2018, Lu et al., 2019, Lee & Kim, 2019, Lu et al., 2019, de Souza Henriques, 2019 y Guizzi et al., 2019) basados también en sistemas multiagentes para la programación de la logística de producción y otras actividades relacionadas a las operaciones; otro proceso importante es la selección de proveedores y dicha área también ha sido analizada bajo el enfoque de multiagentes y su la aplicación en cadenas de suministro de la industria 4.0; un ejemplos de ello son trabajos como los realizados por (Li et al., 2018 y Ghadimi et al., 2019); y su aplicación no se limita a las cadenas de suministro del sector de producción únicamente, en el trabajo presentado por (Ben Othman et al., 2017 y Drakaki et al., 2018) que han propuesto arquitecturas basadas en multiagentes para la gestión de CS de emergencia para la entrega de recursos en zonas de desastre y el establecimiento de zonas para refugiados.

Belykh & Botvin, 2018ndres et al., 2016, Belykh & Botvin, 2018, Gumzej & Čišić, 2018, M. Pérez-Salazar et al., 2019 y Fierro et al., 2020) proponen modelación multi agentes y simulación para mejorar la gestión de la cadena de suministro. Los autores (Bakhtadze et al., 2016, Jabeur et al., 2017 e Ivashkin & Nikitina, 2019) proponen modelos de simulación orientados a agentes del sistema logístico para tratar los problemas de colaboración entre objetos logísticos; con el objetivo planificar, implementar y controlar de manera efectiva el flujo de servicios y bienes entre un punto de origen y un punto de destino.

Existen también trabajos más específicos de la aplicación del enfoque multiagente en procesos tales como coordinación de la CS, mapeo de la CS, planeación y control de inventarios, medición de nivel de servicio (Helo et al., 2018), así como el manejo de interrupciones en la cadena de suministro (Behdani et al., 2019), negociaciones (Chen & Xu, 2018) y comercio electrónico (Barenji et al., 2019), cotizaciones, por mencionar sólo algunos de los procesos en los cuáles se ha demostrado la eficiencia de la técnica y el enfoque de agentes, que muestra estar en tendencia y se perfila para ser una de las principales herramientas que permitan la evolución de las empresas a empresas 4.0.

2.2.5 Agricultura de precisión

Ante la variabilidad de los cultivos la agricultura de precisión ha contribuido a la productividad agrícola, apoyada en tecnologías y técnicas de inteligencia artificial; hoy en día la agricultura mundial se encuentra ante grandes desafíos como el cambio climático, la escasez de agua y la necesidad de aumentar la producción de alimentos para satisfacer la creciente demanda global. Existen herramientas y sistemas de apoyo basados en técnicas como las que enlistan anteriormente que se posicionan como una solución alternativa para dar certeza a la toma de decisiones para la producción de alimentos (Khaki & Wang, 2019;Nevavuori et al., 2019), sin embargo, el campo citrícola mexicano, se caracteriza por un bajo uso de tecnologías y escaso control de las buenas prácticas agrícolas.

Recientemente, los investigadores agrícolas de distintas partes del mundo han estado utilizando técnicas de *machine learning* para predecir el rendimiento de diversos cultivos, predominando el estudio del rendimiento en cultivos como maíz, avena, arroz, y soya; trabajos como los (Babaie Sarijaloo et al., 2021)(Batool et al., 2022) (Cao et al., 2022a) (Choudhary et al., 2020) (Deshmukh et al., 2022) (Hazra et al., 2023) y (Kulpanich et al.,

2023), solo por mencionar algunos, se enfocan en la predicción del rendimiento a partir de diferentes características físicas y climatológicas. Lo que destaca de estas investigaciones en la búsqueda de mejores herramientas que permitan hacer eficiente la producción de alimentos y el desarrollo de estas basado en la gestión de información, datos, imágenes, combinado con características físicas.

Cada uno de los trabajos mencionados en esta sección, así como los resultados completos de la metodología del estado del arte se encuentra descrito a detalle en la sección de Anexos, Anexo A.

2.3 Conclusiones

Es evidente el incremento en el uso de los SMA en la GCS, de manera particular, en algunos de sus eslabones; así como el desarrollo de SMA para la gestión de su totalidad. Los temas que más se abordan son aquellos que dan solución a problemáticas de Producción, Manufactura y Sistemas de manufactura; seguido de aquellos que abordan la gestión de toda la cadena de suministro. Otra parte importante también se enfoca en la Negociación y Selección de proveedores, temáticas ampliamente estudiadas bajo un enfoque de múltiples agentes en la CS. Esta revisión de la literatura resalta la aplicación de los SMA en el estudio y evaluación de la eficiencia de la CS; así como, más recientemente, la aplicación de técnicas de machine learning para predecir rendimiento en distintos cultivos alrededor del mundo; y a su vez, permite identificar áreas no exploradas en la aplicación de dichos sistemas; áreas tales como la gestión del conocimiento. La tecnología desarrollada con Agentes Inteligentes está demostrando ser una alternativa tecnológica para satisfacer y solucionar problemáticas generadas por la complejidad creciente de las Cadenas de Suministro 4.0. El uso de SMA combinado con otras técnicas puede conducir a una mayor agilidad en el flujo de la CS, la herramienta tiene el potencial para ir de la mano con la evolución de la Industria 4.0.

El análisis del estado del arte es una actividad continua durante el desarrollo del presente trabajo de investigación, y durante este periodo se determinó que el mayor impacto para la obtención de una gestión eficiente de la cadena de suministro agrícola del caso de estudio está dado por la cantidad de producto que se cosecha, siendo este el principal interés del sistema de gestión de la CS que aquí se desarrolla; por lo que el análisis posterior al periodo

de 2020 se enfoca en los trabajos más recientes aplicados específicamente en la predicción de rendimiento de diferentes cultivos.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Introducción

El uso de agentes inteligentes en los procesos propios de la cadena de suministros se ha extendido y ha ganado popularidad debido a su eficiencia a través de los años, esto puede observarse en los trabajos recientes (ANEXO A) que se basan en la aplicación de enfoques basados en multiagentes para el manejo de inventarios, tal como lo propone (Wang et al., 2019a) en su artículo, o el marco de sistema propuesto por (Lu et al., 2019) basado también en un sistema multiagente para la programación de la logística de producción, otro proceso importante de la cadena de suministros es la selección de proveedores y dicha área también ha sido analizada bajo el enfoque de multiagentes y su la aplicación en cadenas de suministro de la industria 4.0.

En este Capítulo 3 se aborda la metodología para el desarrollo de un SGC, propuesta a partir de la revisión del estado del arte y fundamentada en un enfoque multi agentes inteligentes, técnica de Inteligencia Artificial, se proponen cinco etapas, estas se especifican en la siguiente sección y el desarrollo de cada una de estas actividades se describe de manera detallada en la el Capítulo 4.

3.2 Metodología propuesta

La metodología propuesta para el trabajo de tesis puede ser descrita de manera muy general en los siguientes pasos y el gráfico que la representa, y su avance actual, se puede observar en la Figura 10.

1. **Revisión del estado del arte.**

- Analizar de manera continua la literatura de la aplicación de teoría de la gestión del conocimiento y el enfoque de sistemas basados en agentes en la gestión de la CS para de esta manera entrar en contexto con el estado actual y aplicación de estas técnicas en el área de interés.

2. **Determinación de las problemáticas en el flujo de conocimiento de la CS e Identificación de Áreas de Oportunidad.**

- Identificar los procesos estándar clave para la gestión del conocimiento y determinar las barreras para la adopción de la gestión del conocimiento en la CS del caso de estudio específico, cadena de suministro del limón persa, a través del desarrollo de un **modelo de simulación de eventos discretos** que permita hacer esta identificación de las áreas de oportunidad en el flujo de la CS y a su vez muestre el comportamiento de ésta.

3. **Modelación de la cadena de suministro del caso de estudio con el enfoque de agentes inteligentes.**

- Determinar un esquema para modelar la CS utilizando el enfoque de agentes inteligentes a través del desarrollo de un **Modelo Conceptual de la CS Agrícola** y seleccionar la herramienta de tecnología de agentes para la construcción de los modelos inherentes a ella.

4. **Determinación de la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes.**

- Determinar la taxonomía para organizar la información del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes para asegurar el ingreso y extracción eficiente de información por parte de los miembros de la CS, y la arquitectura del sistema.

5. **Desarrollo del Modelo de Agentes y Módulos de Apoyo a la Decisión.**

- Desarrollar el modelo de agentes de la CS del caso de estudio y los módulos de apoyo a la decisión que se hayan determinado durante la modelación de la CS.
6. **Construcción y validación del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes.**
- Determinar la infraestructura tecnológica, organizacional, cultural y de recursos humanos, para la implementación del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes en la cadena de suministro caso de estudio. Validar la funcionalidad del sistema de gestión de conocimiento basado en agentes mediante la evaluación de métricas de desempeño.

La Figura 10;Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra un esquema de la metodología implementada.

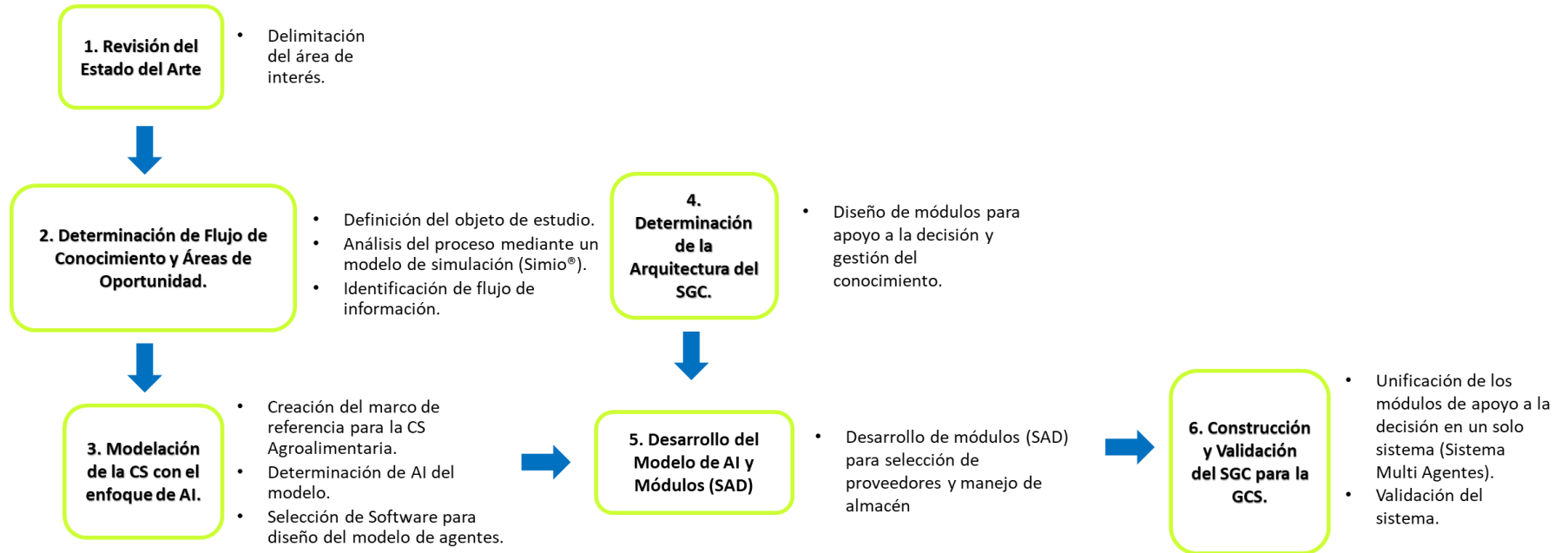


Figura 10 Metodología Aplicada.

El Sistema de Gestión del Conocimiento propuesto debe integrar un Sistema Gestión del Conocimiento con el enfoque de Agentes Inteligentes. El sistema está basado en el modelo de la CS desarrollado con el software AnyLogic®, y los módulos se programan con herramientas de *Código abierto*, para presentarse como una alternativa libre de licencia a la empresa, el desarrollo de los módulos de Apoyo a la Decisión, se realiza en lenguaje Python, el cual es el lenguaje más usado en los campos de Inteligencia Artificial; se muestra a continuación en la Figura 11 un esquema basado en el Marco de Referencia para la CS Agroalimentaria (Sección 4.4), con la ubicación de los Módulos de apoyo a la decisión propuestos.

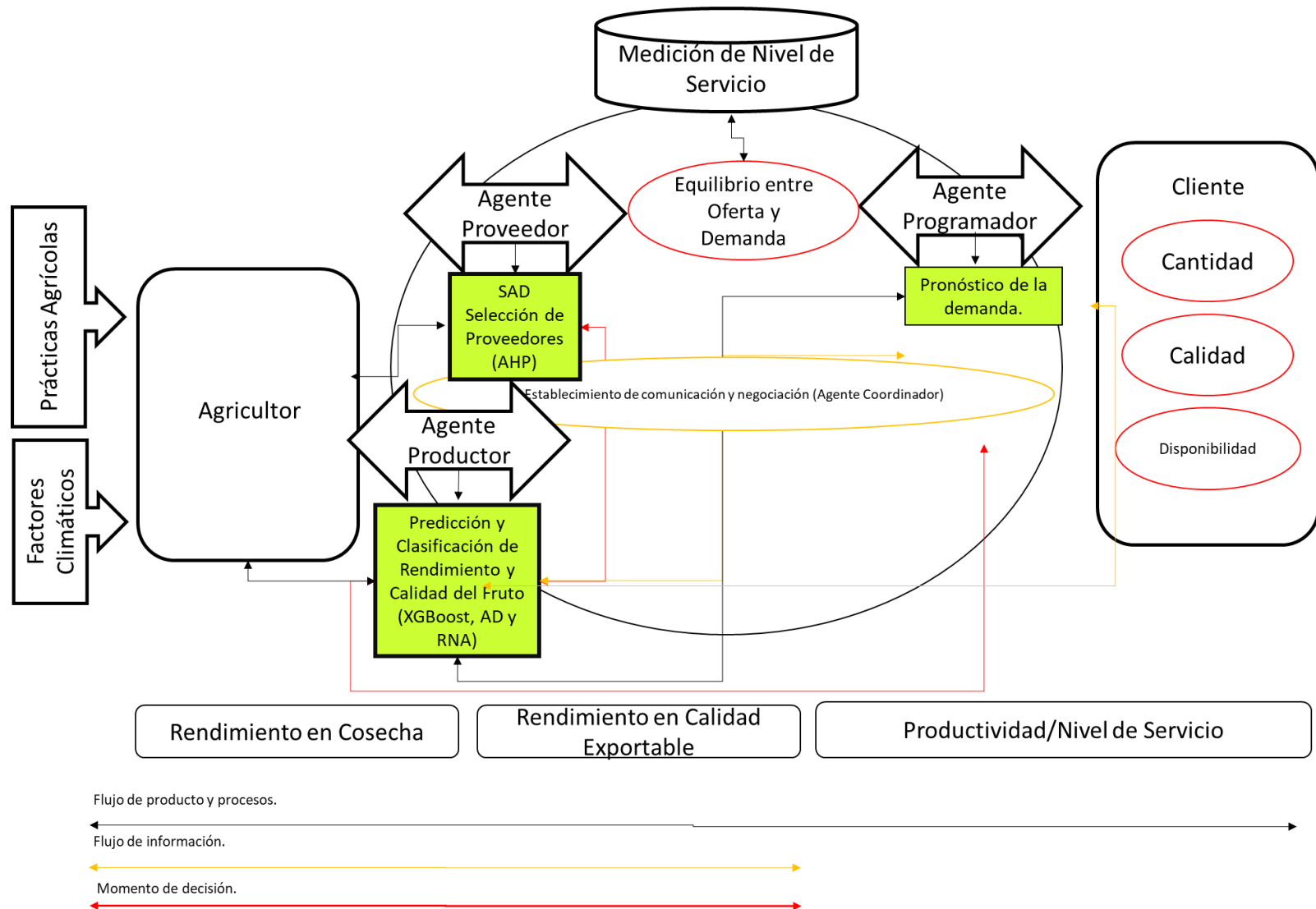


Figura 11 Módulos de Apoyo a la Decisión Propuestos (por Agente).

3.3 Etapa 1 Revisión del estado del arte

Dada la importancia de la revisión del estado del arte y su impacto en el desarrollo del sistema, la metodología del estado del Arte se ha descrito de manera detallada en el Capítulo 2 de este documento, sus resultados se comentan en el Capítulo 4 también y la información se complementa además en la Sección de Anexos A.

3.4 Etapa 2 Determinación de las problemáticas en el flujo de conocimiento de la CS e identificación de áreas de oportunidad

Para la Etapa 2, la determinación de las problemáticas en el flujo de conocimiento y la identificación de las áreas de oportunidad se realiza a través de la modelación del proceso con una simulación de eventos discretos, el software que se ha elegido para ello es Simio®.

Simio representa un marco de modelos de simulación basado en objetos inteligentes, esto es diferente de otros paquetes de simulación tradicionales. El software se integra al paradigma del modelado con objetos para sistemas discretos, sistemas continuos y modelado basado en agentes (Marín Amador, 2019). Simular el proceso paso por paso, desde la llegada de producto, los proveedores, hasta la salida del producto, permitirá identificar dónde es que surge la información más relevante, y qué partes del proceso pueden ser explotadas en cuanto a capitalización y distribución del conocimiento.

Se describe a continuación de manera secuencial el desarrollo del modelo de simulación de eventos discretos, cabe resaltar que esta modelación tiene su propia metodología descrita de manera breve a continuación.

3.4.1 Modelación de la cadena de suministro

La metodología propuesta para el desarrollo del modelo de simulación de eventos discretos se basa en la propuesta por Law & Kelton, Las etapas que se desarrollaron son las siguientes:

- Etapa 1. Recolección de Información
- Etapa 2. Selección de huertos en estudio
- Etapa 3. Caracterización de los huertos
- Etapa 4. Variables y factores inciertos

- Etapa 5. Construcción del modelo de simulación.

3.4.1.1 Recolección de información

La recolección de información se centró en dos categorías de datos de interés: datos históricos de prácticas agrícolas de cuatro tipos de huerto, propiedad de la Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V., y proveedores externos; y datos sobre el proceso de selección y empaque, tales como: tiempos de arribo de fruta a planta, tiempos de proceso, tiempos de descarga, capacidad de máquinas, distancias de recorrido, entre otras correspondiente a cada lote de limón persa. La información fue facilitada por la empresa misma, se hizo entrega de información de análisis y estudios previos realizados.

3.4.1.2 Selección de huertos en estudio

La elección de los huertos para la simulación incluye los principales huertos proveedores y se considera un proveedor “Compra” donde se incluye la cantidad de limón que es obtenida de centrales de abasto externas, el objetivo de la simulación es comprender el flujo de la cadena de suministro pero también determinar el estado actual de nivel de servicio, y el proceso en sí para poder identificar las áreas de oportunidad que pueden ser mejoradas con la aplicación de técnicas de IA que optimicen la GC.

La Tabla 7 registra cuatro de los huertos proveedores de fruto propiedad de la exportadora, de los cuales se obtendrá información pertinente para otros módulos de este trabajo; se seleccionan el huerto Huasteco, Bocol, San Gabriel y Juan Carlos; sin embargo, para la simulación se considera el producto que llega de todos los proveedores externos y compras, además de los descritos a continuación.

Tabla 7 Huertos (Proveedores) seleccionados para la simulación.

Huerto	Superficie (hectáreas)	Hectáreas sembradas	Número de árboles por hectárea.	Edad (años)	Riego	Tipo de riego
HUASTECO I	36	33.6	285	11	Si	Microaspersión
SAN GABRIEL	124	38.7	357	11	Si	Microaspersión
JUAN CARLOS	11	11	-----	-----	-----	-----
BOCOL	16	14.3	285	12	No	-----

El huerto Huasteco, tiene 33.6 hectáreas sembradas, el Bocol tiene 14.3 ha sembradas. La elección de los huertos proveedores de información, entre una opción de dieciocho huertos de temporal y de riego que proveen a la exportadora, estuvo en función de la disposición y calidad de información que aportaba cada uno de ellos y de la cual la empresa mantiene registros.

3.4.1.3 Caracterización de los huertos

La caracterización describe detalladamente el escenario del huerto, por ejemplo: la edad del huerto, el tipo de porta-injerto, el sistema de plantación, número de hectáreas sembradas, tipo de suelo, tipo de huerto, prácticas agrícolas que son aplicadas a cada uno de los huertos sujetos a investigación. Para fines de esta investigación, esta información no es prioritaria, sin embargo, **se ejemplifica la caracterización de dos de los huertos** elegidos a fin de brindar un panorama general sobre los tipos de proveedores que la exportadora tiene.

El huerto BOCOL es un huerto de temporal, que en el periodo de estudio tiene una edad de entre 9 a 11 años, con una altitud media es de 57.7 msnm, longitud de 96.951724° oeste y latitud de 20.070391°, con una extensión territorial de 16 hectáreas de las cuales solo **14.3 hectáreas tienen sembrado árboles de limón persa**, con una distancia de plantación de **7 x 5 metros** le da un número de **árboles por hectárea de 285**, dando una densidad de población de 4,076 árboles de limón persa distribuidos en todo el huerto, se encuentra dividido en dos tipos de porta injertos: Macrofila con 3,057 árboles, y Agrio con 1,019 árboles. Tiene un tipo de terreno es 100% plano, con un tipo de suelo es luvisol ÓRTICO los cuales presentan una fertilidad moderada, con una altura a nivel del mar de 58.9 m a 56 m (msnm), en este huerto se realizan prácticas agrícolas como **podas**, control de maleza que hacen las aplicaciones mecánicamente con agroquímicos o chapeos con tractor, **control de plagas y enfermedades**. El huerto HUASTECO 1 es un huerto de riego o tecnificado, que en el periodo de estudio tiene una edad de entre 8 a 10 años, con una altitud media es de 83.8 msnm, con una extensión territorial de 36 hectáreas de las cuales solo **33.6 hectáreas tienen sembrado** árboles de limón persa, con una **distancia de plantación de 7 x 5 metros**, lo que da un número de **285 árboles por hectárea**, dando una densidad de población de 9 576 árboles de limón persa distribuidos en todo el huerto, el 95% de porta injerto corresponde a Macrofila. El tipo de suelo es de tipo feozem haplico el cual es rico en materia orgánica y nutrientes, con una altura a nivel del mar de 88.9 m a 78.7 m (msnm), en este huerto además de realizarse las prácticas

agrícolas (**podas, control de maleza, control de plagas y enfermedades**), también cuenta con un **sistema de riego** el cual permite llevar a cabo la fertirrigación.

3.4.1.4 Variables y factores inciertos

Las variables que se consideran para la modelación se muestran en la siguiente Tabla 8:

Tabla 8 Variables y Factores Inciertos CS Limón Persa.

Nombre	Definición
Cantidad de Producto Llegada	Variable
Cantidad de Órdenes 10Lb EUA/CAN	Variable
Cantidad de Órdenes 40LbEUA/CAN	Variable
Cantidad de Órdenes 10Lb Europa	Variable
Demanda	Factor Incierto
Rendimiento Huerto	Factor Incierto

Dada la naturaleza de la cadena de suministros que se está simulando se encuentran dos factores inciertos de gran impacto, que afectan a las variables con las cuales se ha de medir el desempeño de la CS, variables como la cantidad de producto que llega de los huertos a la empacadora se ven afectadas directamente por el factor incierto del Rendimiento del Huerto, este a su vez es afectado por otros factores no controlables tales como la Lluvia, la cantidad de Viento y otros, estos factores son considerados más adelante en los Módulos de Apoyo a la Decisión desarrollados para el modelo de Agentes, para este modelo de simulación de eventos discretos no se han considerado de manera particular.

3.4.1.5 Construcción del modelo de simulación (Simio®)

La representación del sistema de empaque de la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. se realiza para comprender el flujo de la cadena de suministro, abordar el control de inventarios y medir el desempeño de la CS a través del nivel de servicio. Inicialmente se modela el proceso para identificar las áreas de oportunidad que pueden ser mejoradas con la aplicación de técnicas de IA que optimicen la GC.

3.4.1.5.1 Formulación del problema

De acuerdo a la problemática descrita con anterioridad, la Sección Planteamiento del Problema se propone esta simulación con el objetivo de analizar el flujo de los procesos de la cadena de suministro del limón persa y también determinar su estado actual para poder proponer un escenario que mejore el estado actual de la empresa, en cuanto a satisfacción de la demanda se refiere, para poder identificar las áreas de oportunidad para la implementación de diversas herramientas tecnológicas que ayuden o soporten a las técnicas tradicionales a la búsqueda de una gestión óptima de la cadena de suministro, razón por lo cual se propone el uso de la simulación de eventos discretos en Simio® y posteriormente en el software AnyLogic®.

3.4.1.5.3 Definir objetivos y alcance

Se describen a continuación el objetivo general, específicos y alcances de esta parte de la investigación.

3.4.1.5.4 Objetivo general

Modelar la cadena de suministro del caso de estudio, cadena de suministro del limón persa, para determinar el estado actual de la empresa e identificar áreas de oportunidad para mejora en la gestión de la cadena de suministro y de esta manera mejorar la satisfacción del cliente (distribuidores).

3.4.1.5.5 Objetivos específicos

- Identificar los componentes de la CS del caso de estudio.
- Conocer el proceso de la planta.
- Identificar los parámetros para la simulación.
- Realizar la modelación.
- Verificar y validar la modelación.
- Determinar el estado actual de la empresa a través de la medición del nivel de servicio que funge como medida de desempeño.
- Proponer e identificar los mejores escenarios, y parámetros para optimizar el nivel de servicio.

3.4.1.5.6 Alcances

Los alcances esperados del trabajo se enlistan a continuación:

- Realizar la simulación de eventos discretos de la situación actual de los 3 primeros elementos de la CS del limón persa.
- Identificar áreas de mejora para el flujo de la CS del limón persa.
- Se delimitó la toma de datos al tiempo correspondiente a los turnos que componen un día laboral.
- Se observa como entidad en el modelo 1k de limón persa (11 limones aproximadamente).

3.4.1.6 Desarrollo con Simio®

Esta sección comprende los siguientes subtemas: conceptualización de modelos y recolección de datos y construcción del modelo.

3.4.1.6.1 Conceptualización del modelo

La estructura del modelo de proceso se realizó de acuerdo con las actividades que se llevan a cabo en la exportadora. Importante hacer la mención que cada uno de los diagramas de proceso realizados fue corroborado con la información facilitada por la empresa, en la cual se contaba con modelos anteriores y otro tipo de diagramas del proceso.

3.4.1.6.2 Recolección de datos

En este apartado se observan, en primera instancia, los resultados obtenidos de la recolección de los datos de las máquinas en estudio (y también los procesos que son manuales), con el fin de ser ajustados a través de pruebas de bondad de ajuste para encontrar su distribución de probabilidad (Figura 12), este mismo análisis se hace a los datos referentes a las cantidades de pedidos realizados por los dos principales clientes (que se han simulado) de la empresa; la información fue facilitada por la empresa, se muestran solo algunos de los análisis que se hicieron, sin embargo, se analizó cada subproceso de la planta, incluyendo aquellos que fueron asumidos dentro de otros (sanitización, encerado, y secado).

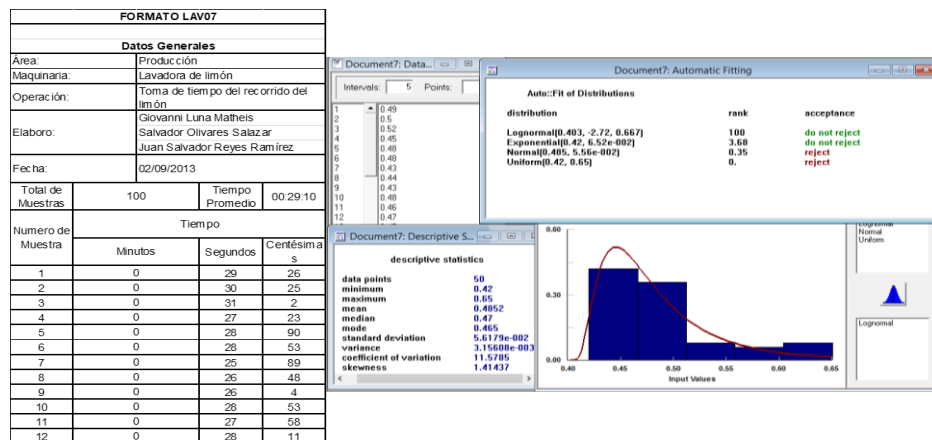


Figura 12 Fragmento del formato de toma de tiempos, y prueba de bondad de ajuste. Subproceso: Lavado de limón.
Fuente: Exportadora San Gabriel S.A. de C.V.

Para la modelación de los pedidos y clientes, se tomaron datos de los registros de pedidos diarios, de un periodo igual a 7 años (2007-9 y 2018-2020) de los dos clientes principales (Estados Unidos y Canadá; Europa), se muestran a continuación algunos fragmentos de dichos reportes en la imagen siguiente (Figura 13); los datos, como ya se mencionó, fueron también analizados con ayuda de un software estadístico para determinar si estos siguen una distribución de probabilidad, sin embargo, no se ajustaron a ninguna, por lo cual para la simulación hubo que introducirlos de una manera especial que será explicada más adelante. Se muestran los resultados de las pruebas de bondad de ajuste

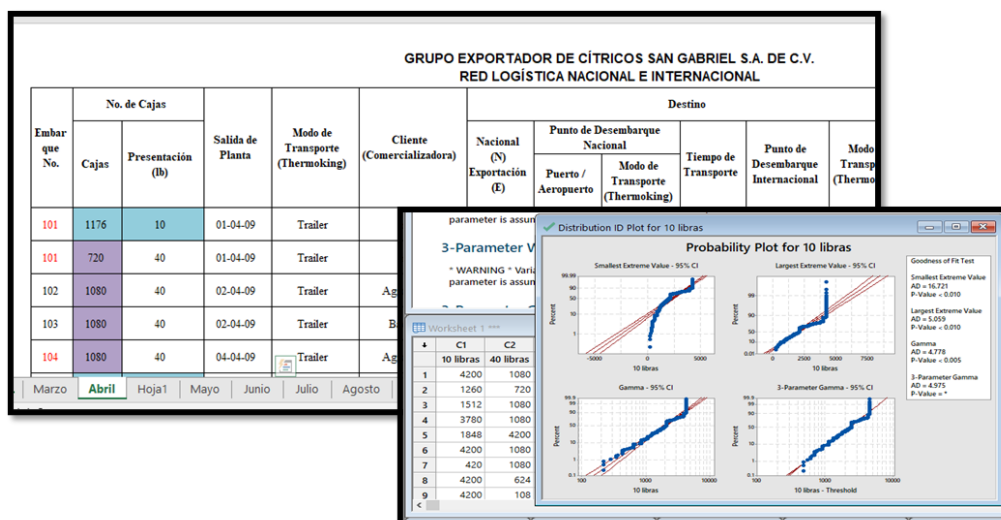


Figura 13 Información de Pedidos E.U.A./Canadá 2009 y Análisis estadístico. Fuente: Exportadora San Gabriel S.A. de C.V.

Estos datos no se ajustan a ninguna distribución de probabilidad, el valor P se encuentra muy por debajo del mínimo requerido. La modelación de esta parte de la simulación se realiza con ayuda de una Table e Input Data, herramientas del software Simio®, que permiten simular eventos basándose directamente en los datos registrados.

3.4.1.6.3 Construcción del modelo

A continuación, se describe la forma en que fue programado el modelo en Simio. Se presenta un resumen de su programación, y este es presentado como se planteó en la sección anterior, el primer y segundo eslabón de la CS: Proveedores y Producción (empacadora) conforman el primer subsistema y posteriormente el tercer eslabón Clientes que conforma el segundo subsistema. La **simulación se reporta en un sistema con dos subsistemas**, el primero corresponde a la **simulación de los Proveedores, y Producción (empacadora)**; los primeros eslabones identificados de la CS, el segundo subsistema corresponde a **los Clientes (tercer eslabón)**, se simula la llegada de pedidos y surtimiento de estos.

3.4.1.6.3.1 Proveedores y producción (empacadora)

Es modelada la llegada de producto de cada proveedor, su clasificación, empaque y almacenamiento, el modelo completo de estos eslabones es mostrado en la siguiente Figura 14.

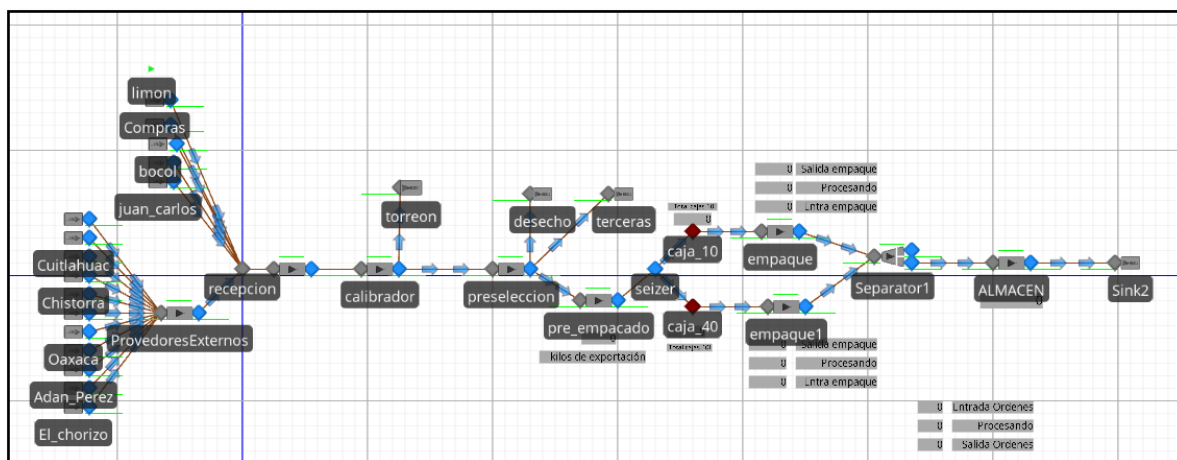


Figura 14 Modelo de la CS de Limón Persa sin Animación. Fuente: Elaboración propia.

Los subprocesos que fueron modelados en Simio® se resumen en la Tabla 9 que también muestra el tipo de distribución que se programó.

Tabla 9 Subprocesos modelado en Simio(R) y distribución de probabilidad programada.

Subproceso	Distribución
Vaciadora	Triangular (11.5,13,14.5)
Calibrador	Triangular (7.5,9,10.5)
Preselección	Triangular (83.5,85,86.5)
Empaque	Triangular (14.5,16,17.5)

En la Tabla 10 se muestra la cantidad de objetos que se utilizaron para la elaboración de este primer modelo.

Tabla 10 Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa (Proveedores y Producción) en Simio(R).

Objetos de Simio®	Cantidad	Uso
Source	16	Para la generación de entidades (kg de limón).
Sink	4	Al final de subproceso de preselección y selección manual, además de la salida de empaque.
Server	8	Un server para cada subproceso de la planta.
Combiner node	2	Para las cajas que se generan en el subproceso de preselección.
Entity	1	La entidad generada son kilos de limón.
Time Path	2	Las trayectorias de traslado de la entidad medidas en tiempo.
Transfer node	1	Para dirigir el recorrido que deben seguir las entidades.
Connector	40	Las trayectorias en donde la entidad puede ser transportada pero no necesitan una mayor programación.
Basic Node	1	Para agrupar varios conectores y facilitar su conexión
Path	1	La trayectoria en que la entidad puede ser transportada
Status label	19	Display que muestra mensajes durante la simulación
Separator	1	Separar las entidades.

En la Tabla 11 se muestran las variables que se declararon en la parte de *Definitions*, así como los elementos y eventos que fueron necesarios para la construcción de este modelo anexándose una breve descripción de su uso.

Tabla 11 Variables utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa en Simio(R).

Objetos de Simio	Cantidad	Uso
Variables	15 enteras	Para contadores.

De manera muy general la estructura del modelo se presenta y puede describirse de la siguiente manera (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); tal cual puede observarse el proceso inicia con la llegada de producto de cualquiera de los dieciséis proveedores que se han simulado, seguido de ello y de manera secuencial la entidad (kilos de limón) transita a lo largo de la cadena de producción, pasando de “llegadas” al calibrador, donde es separado por tamaño en calidad **Torreón** (que es el limón pequeño) y el que continua a lo largo del proceso, posteriormente pasa a la máquina de preselección donde puede ser clasificado como **desecho**; que es el limón con daños o podrido; **Terceras**; que es el limón que se distribuye y consume en México, y finalmente el de **Exportación** que es el limón; que de acuerdo a su tamaño se envía a los mercados de EUA/CAN, Europa y en algunos casos Japón. Posterior a la preselección, se ha simulado un server que contabiliza la cantidad de kilos en proceso, este dato servirá posteriormente para determinar el nivel de servicio, una vez que la entidad pasa por este server el limón (la entidad) es empacado de acuerdo a su tamaño en cajas de 10 y 40lb, el número de cajas de 10 y 40lb es contabilizado también, y en este momento es enviado al almacén (con cámara de enfriamiento) para su salida y envío a los clientes. Una vez programados los procesos de la cadena de suministro se insertan diferentes Status Label, que permiten visualizar las variables mientras el modelo es simulado para poder comprender el estado actual del proceso de producción (Figura 15).

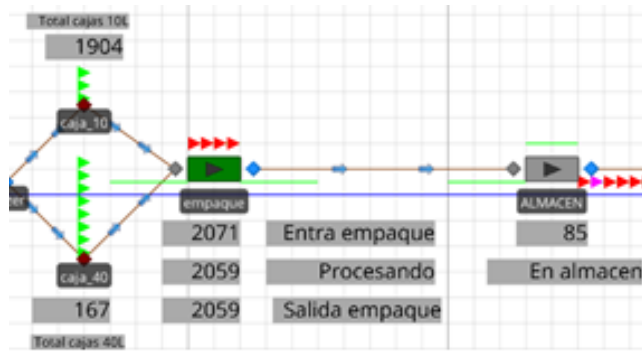


Figura 15 Status Label en el proceso de producción.

3.4.1.6.3.2 Clientes (centros de distribución)

El segundo módulo corresponde a los clientes (tercer eslabón), se simula la llegada de pedidos, es decir la generación de órdenes por parte de los dos principales clientes de exportación, EUA-Canadá y Europa, Figura 16. Se utilizaron dos *Model Entity* para representar la generación las órdenes de los clientes, éstas se originan en los servidores que representan los clientes principales, EUA/CAN y EUR, las órdenes avanzan al servidor para ser procesadas y posteriormente son eliminadas en el *Sink*.

El modelo cuenta con varios Status Label para poder llevar un contador a tiempo real de las órdenes generadas, en proceso, completadas y además contabiliza el número de cajas de 10 y 40lb que han sido enviadas a los clientes.

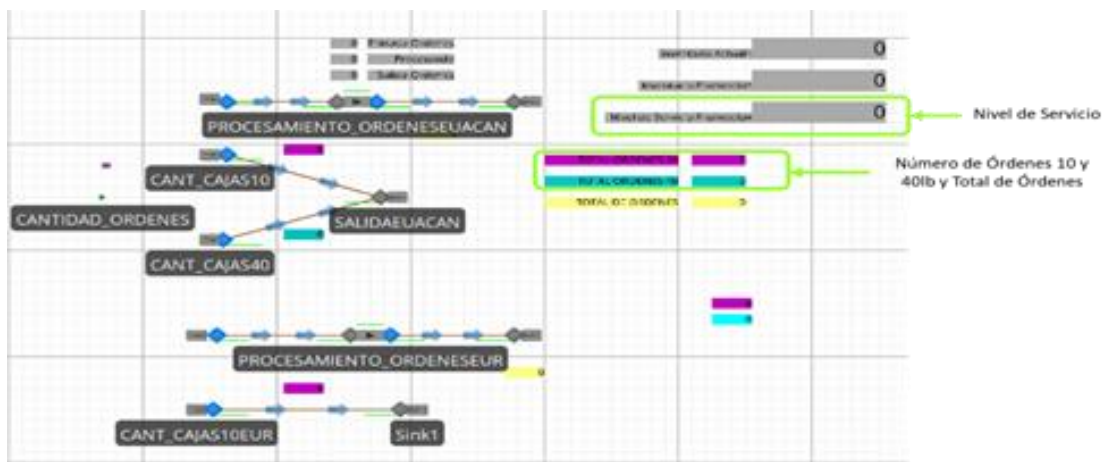


Figura 16 Estructura de los Objetos en la simulación del eslabón Clientes en SIMIO(R).

En este sub modelo al igual que en el anterior se hace uso de objetos y variables, que son mostradas a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12 Objetos utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa (Clientes) en Simio(R).

Objetos de Simio	Cantidad	Uso
Source	5	Para la generación de entidades (kilos de limón) de cada proveedor.
Sink	4	Al final del subproceso de preselección y selección manual, además de la salida de empaque y embalaje.
Entity	2	La entidad del modelo es 1k de limón.
Time Path	3	Las trayectorias de traslado de la entidad medidas en tiempo.
Connector	4	Las trayectorias en que la entidad puede ser transportada que no necesitan una mayor programación.
Server	2	Para el procesamiento de las órdenes.
Status label	29	Etiqueta de estado actual.

Las variables que se declararon en la sección *Definitions*, así como los elementos y eventos que fueron necesarios para la construcción de este modelo anexándose una breve descripción de su uso se muestran en la siguiente Tabla 13:

Tabla 13 Variables utilizados para la modelación de la CS de Limón Persa en Simio®.

Objetos de Simio	Cantidad	Uso
State Variables	4 reales	Para distribuciones.
	11 enteras	Para contadores.

El funcionamiento general, así como detalles de la programación requerida para la ejecución de cada acción son descritos de manera secuencial enseguida:

- En los Source llamados TIENDA1EUACAN y TIENDA1EUR son generadas las entidades CANTIDAD_ORDENES, es decir las órdenes de los clientes EUA/CANADÁ y EUROPA, dichas entidades son generadas bajo una distribución triangular, la programación del Source sigue tres reglas antes de que la entidad salga de él, en este momento se hace la distinción entre si esta orden corresponde a una caja de 10l o de 40lb, así mismo se hace la contabilización de cuántas ordenes son creadas de

cada tipo, con ayuda de dos `StateVariables`. La programación es la misma para el Source que genera órdenes del cliente EUROPA.

- En el nodo de salida de este objeto se encuentra programado un proceso que se asignó en las propiedades y que permite hacer la distinción entre si este orden que se ha generado corresponde a una de 10lb o de 40lb, durante este proceso también se detona el Evento `P10` o `P40` que permite contabilizar cuántas órdenes se generaron de cada una, este proceso es similar para ambos clientes.
- Una vez que se ha generado orden, ya sea de 10lb o 40lb, se detona un evento en el cual está programada la tabla de datos que permite, crear un tamaño de pedido aleatorio basado en esta información, se muestra la programación del Proceso y el enlace con la Tabla de datos.
- En el nodo de salida de cada Source que determina el tamaño de orden (`CANT_CAJAS40EUACAN` o `CANT_CAJAS40EUR`) tiene a su vez programado un proceso que contabiliza el tipo de pedido que se ha generado, y hace la distinción entre si este corresponde a uno de 10lb o 40lb.

3.4.1.6.4 Control de inventario y medición del nivel de servicio

La medición del nivel de servicio será la métrica con la cual se determinará el estado actual de la empresa, para con base en ello establecer parámetros que optimicen algunos procesos de la gestión de la CS y de esta manera impactar positivamente en la satisfacción de la demanda de producto. Se programa un control de inventario básico, que permitirá conocer a el inventario actual, promedio y el nivel de servicio promedio.; el objetivo es monitorear el inventario promedio del para determinar los parámetros adecuados que permitan satisfacer la demanda de producto. Este control de inventario consta de los siguientes parámetros, descritos y mostrados en la Tabla 14:

Tabla 14 Parámetros del control de inventario.

Parámetro	Descripción
Inventario Inicial	Inventario con el cual inicia la planta (se considera un promedio de su capacidad diaria).
Tamaño de Orden	Cantidad en kg solicitada en cada orden.
Periodo de Revisión	Tiempo establecido entre cada revisión del nivel de inventario.
Punto de Reorden (s)	Cantidad debajo de la cual se genera una orden.
Cantidad meta (S)	Cantidad necesaria a alcanzar cuando se genera una orden.

El funcionamiento de este control de inventario se resume así; la tienda envía una orden al día al centro de distribución, diariamente se reciben entre uno y dos órdenes de cada centro de distribución (EUA y Europa); se usa un modelo de inventario de revisión periódica (s,S) en el cual el inventario se revisa cada determinado intervalo de tiempo fijo llamado el periodo (1 día para el almacén de la empacadora en México que es el que se está modelando); s es el punto de reorden, cantidad debajo de la cual se “dispara” una orden y S se determina como la cantidad necesaria a alcanzar al momento de colocar una orden. Se programan los elementos que se necesitan para el control de inventarios en la Tabla 15.

Tabla 15 Elementos programados para el control de inventario de la empacadora.

Objetos de Simio	Cantidad	Uso
State statistic element.	1	Control de Inventario.
Tally statics element.	1	Control de Inventario.
Timer elements.	1	Control de Inventario.

- Se agregan dos variables a la programación; VarInventario y VarWip, las cuales serán utilizadas para realizar el control del inventario.
- Al iniciar la simulación el modelo debe verificar el inventario inicial en la planta, para el modelo se ha considerado como inventario inicial la capacidad promedio diaria de

la planta, 100 toneladas de limón, este dato permite controlar la materia prima al iniciar el proceso de producción y conocer el momento en el que se debe realizar una orden a los proveedores (huertos y/o compras).

- Gráficamente los niveles de Inventario Actual (medido en kilos de limón que entran al almacén), Inventario Promedio (el promedio de kilos de limón en el sistema), pueden observarse en los Status Label que se programaron basados en los procesos de PROCESAMIENTO_ORDENESEUACAN y PROCESAMIENTO_ORDENESEUR descritos en la sección anterior (Figura 17).

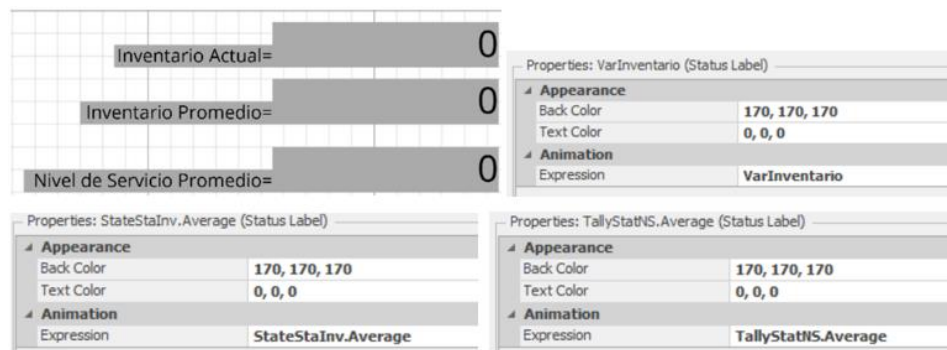


Figura 17 Programación de Status Label de control de inventario.

Con esta información se ha de medir el nivel de servicio promedio, que está programado en el modelo de la siguiente manera:

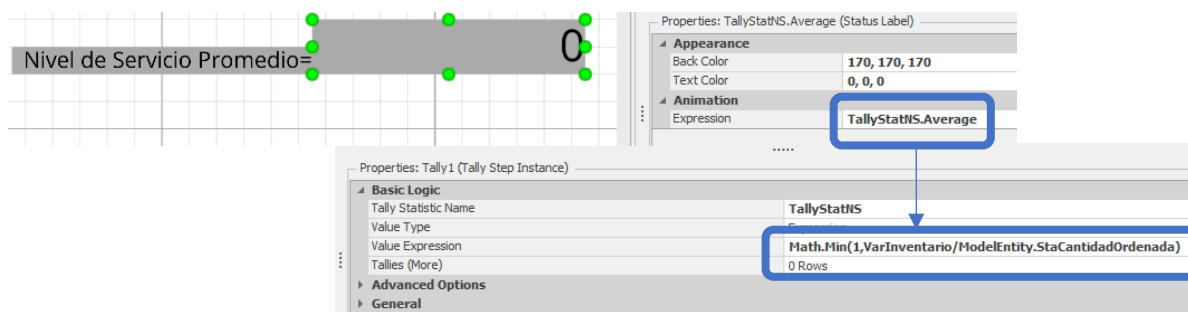


Figura 18 Medición del Nivel de Servicio.

La cantidad de producto que llega al almacén (producto de exportación en ambas presentaciones, cajas 10 y 40lb) es contabilizado y guardado en la variable VarInventario, que posteriormente es dividido entre la cantidad de producto que es solicitado por las órdenes de los centros de distribución de ambos mercados EUA y Europa, guardado en la variable StaCatidadOrdenada.

El valor ideal esperado sería un Nivel de Servicio Promedio igual a 1, puesto que esto indicaría que se está produciendo limón con calidad de exportación suficiente para abastecer la demanda de producto de los centros de distribución. Tomando este valor como referencia para el análisis del estado actual de la empresa.

3.4.1.6.5 Experimentación

A través de dieciséis corridas definitivas del modelo, que fueron determinadas a través de la fórmula $n^*\beta$ (ver Ecuación 1) con un nivel de confianza del 90%, $\alpha=0.10$ y un error $\beta=2500$ kg de limón, los valores generados en las etapas claves del proceso son comparados por los expertos con los valores reales que se presentan normalmente en la planta durante el año.

Ecuación 1 Corridas Óptimas n^β. Fuente: (Law, 2015)*

$$t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{s^2_{(n)}}{i}} \leq \beta$$

Los valores de los parámetros se establecen tomando en cuenta las condiciones actuales de la empresa, es decir el valor actual de inventario inicial, punto de reorden y cantidad meta; este escenario sirve como base para comparar el nivel de servicio de los escenarios propuestos. Se establecen variaciones en los parámetros considerando un aumento 5, 10%, 15%, 20% y, 25% en el inventario inicial, también se prueba una reducción de 5%, 10%, 20% y 30% en este mismo parámetro, en cuanto al punto de reorden de los centros de distribución este se prueba con el valor actual 413,400 y aumentado y disminuido con los mismos porcentajes del inventario inicial, el nivel meta se prueba con las mismos porcentajes aumentados y disminuidos (Figura 19).

File

Project Home

Design

Support

Run

Cancel

Reset

Add Response

Remove Response

Add Constraint

Remove Constraint

Starting Type:

Use current Day

Ending Type:

4 Weeks

Subset Selection

Select Add-In

Clear

Add-Ins

Experiment

Run Setup

Analysis

Design

Response Results

Pivot Grid

Reports

Dashboards Reports

Input Analysis

Scenario		Replications		Inventario - Controls				Responses			
☒	Name	Status	Required	Completed	InventarioInitial	PuntoDeReorden	S	PeriodoDeRevision (Days)	InventarioPromedio	NivelServicio	Inventario_NIS
☒	Scenario1	Comple...	5	5 of 5	100000	413400	1959519	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario2	Comple...	5	5 of 5	110000	454740	2155470	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario3	Comple...	5	5 of 5	120000	496080	2351422	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario4	Comple...	5	5 of 5	105000	434070	2057494	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario5	Comple...	5	5 of 5	115000	475410	2253446	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario6	Comple...	5	5 of 5	125000	413400	2449398	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario7	Comple...	5	5 of 5	90000	372060	1763567	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario8	Comple...	5	5 of 5	80000	330720	1567615	1	1891.69	0.909697	2182.04
☒	Scenario9	Comple...	5	5 of 5	70000	289380	1371663	1	1891.69	0.909697	2182.04

Figura 19 Experimentación.

En los resultados de la experimentación puede observarse que el nivel de servicio se mantiene estable con un valor cercano al 0.90. la estabilidad observada pudiera deberse a que al incrementar el inventario inicial y también se está reduciendo el punto reorden lo que pudiera equilibrar el nivel de servicio, esta resulta ser una de las más obvias debilidades de la experimentación “a prueba y error” por lo cual se hace uso de la herramienta Opt.Quest del software Simio® que permite optimizar con algoritmos genéticos, de esta manera la optimización es mejor. De los resultados de esta experimentación se toman los escenarios cuyas modificaciones (en cuanto a inventario inicial y punto de reorden) se ajustan más a lo posible, y esta será la base sobre la cual se optimiza con la herramienta Opt.Quest de Simio® basada en algoritmos genéticos.

3.4.1.6.6 Optimización Opt.Quest de Simio®

Una vez realizada la experimentación “a prueba y error” se procede a optimizar estos parámetros con ayuda de la herramienta Opt.Quest del software Simio®, el objetivo es obtener los mejores valores para los parámetros del control de inventario que permitan una mejor gestión de estos procesos y por ende una mayor satisfacción de la demanda, optimizando así la gestión de la cadena de suministro en estos eslabones.

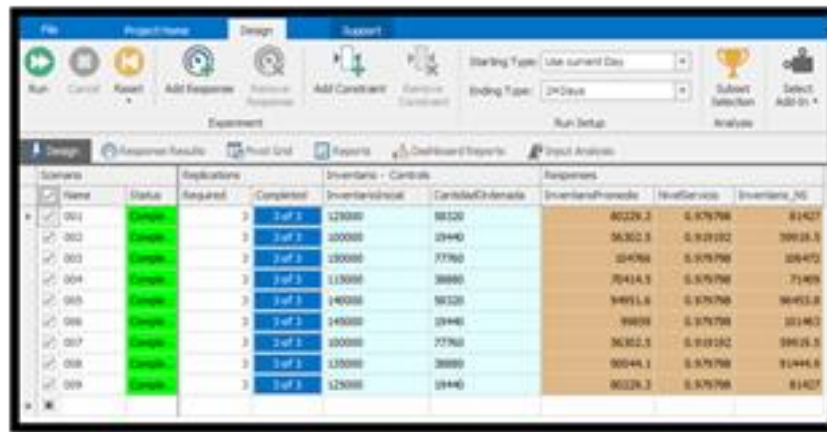


Figura 20 Optimización con Opt.Quest de Simio®.

En la optimización que realiza la herramienta Opt.Quest (Figura 20) resalta que el nivel de servicio más alto obtenido es de 0.979798 y se repite en varios de los escenarios, coincidiendo en que el inventario inicial es mayor al actual, el tamaño de orden parece no afectar el desempeño de la CS en estos casos.

3.4.1.7 Validación y resultados del modelo de simulación de la cadena de suministro

La utilidad de un modelo de simulación consiste en el conocimiento del proceso y la identificación del flujo de conocimiento y áreas de oportunidad de mejora en la gestión, ésta se ha realizado en conjunto durante una reunión de trabajo con los expertos de sistemas de producción, y responsables de la empresa. El producto empacado y exportado es un producto natural, y por lo que el volumen de fruto que es proveído a la empresa tiene una gran variabilidad a lo largo del año, el limón persa (*citrus latifolia*) presenta una temporada de cosecha alta; de mayo a octubre; y una baja; entre noviembre y abril. Durante la temporada alta es posible que la empresa reciba de 130 hasta 300 ton semanales, sin embargo, durante la temporada baja el producto que entra a la empresa suele ser menor a 80 ton semanales. La validación del modelo de simulación se lleva a cabo se ha realizado en conjunto durante una reunión de trabajo con los expertos de sistemas de producción, y responsables de la empresa; ésta es reportada en el Capítulo 4, sección 4.3.

3.5 Etapa 3 Modelación de la cadena de suministro del caso de estudio con el enfoque de agentes inteligentes

La tercera etapa de la metodología propuesta comprende las actividades de Creación del Marco de Referencia para la Cadena de Suministro Agroalimentaria, la Determinación de los Agentes Inteligentes del modelo, y la Selección del Software en que se ha de desarrollar el SGC para la GCS. Dado que para realizar el Marco de Referencia es necesario determinar qué Agentes Inteligentes se verán involucrados se reportan como un solo Resultado. Se describen a continuación dichas actividades y se discuten sus resultados.

3.5.1 Marco de referencia para la cadena de suministro agroalimentaria

La modelación con un enfoque de agentes permite plantear diferentes escenarios con entidades activas y estudiar los posibles estados del sistema objeto de estudio. Los sistemas basados en agentes se caracterizan por contener agentes virtuales que son en mayor o menor grado autónomos, heterogéneos e independientes, y que muestran cada uno sus propias metas y objetivos. Bajo este enfoque de agentes inteligentes, se desarrolla un modelo conceptual que constituye una abstracción del sistema real involucrando a los actores de una cadena de suministro agroalimentaria, la del limón persa.

El marco de referencia propuesto tiene el objetivo de soportar la identificación y el establecimiento de la funcionalidad de los agentes inteligentes que modelan la cadena de suministro del limón persa. Esta arquitectura genérica, es realizada teniendo como base modelo de (Karetsos, Costopoulou, Lambrou, & Zorkadis, 2002) y tiene la capacidad de ofrecer un conjunto de funcionalidades genéricas basado en flujo de la cadena de suministro del limón persa, concentra actores, interacciones, flujos y acciones entre los involucrados, con el propósito de crear un modelo reusable y escalable para el establecimiento de agentes inteligentes que permitan evaluar el nivel de servicio de la cadena.

Los actores de la CS agroalimentaria y el rol que desempeñan en la comercialización de un producto agrícola percedero se describen a continuación y se muestran en la Figura 21:

- **Productor/Proveedor:** Entidad agrícola que puede considerarse como una granja o parcela de donde se obtiene el producto agrícola a analizar y se interesa en la comercialización o venta del producto de una manera eficiente, confiable y sin

retardos, puesto que al ser productos de tipo perecedero tienden a descomponerse (M. D. R. Pérez-Salazar, 2019).

- **Factores climáticos:** Los aspectos medioambientales están presentes en todo tipo de sistemas agrícolas del mundo y no se tiene control sobre ellos, por lo que se le considera como factores inciertos.
- **Prácticas agrícolas:** Son formas de proceder en el cuidado de cultivos de los agricultores. Cada agricultor tiene una serie de actividades que repercute en la calidad y rendimiento del cultivo de producto agrícola como lo son el uso de nutrientes, control de plagas, control de enfermedades, uso de fertilizantes, entre otros.
- **Cliente:** exportadoras se pueden considerar como vendedores. Está interesado en vender los productos agrícolas después de su cosecha y que son provenientes de los productores.

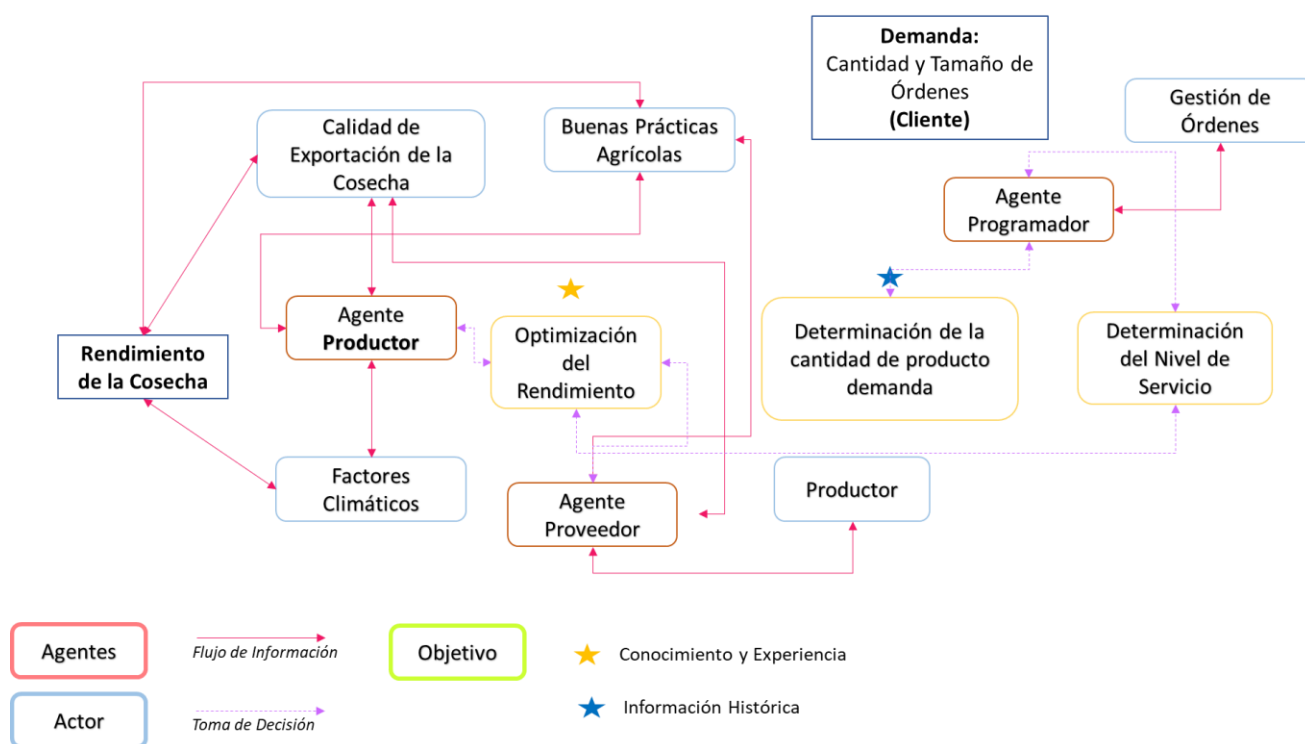


Figura 21 Modelo conceptual de la CSA de Limón basado en un enfoque de AI.

El escenario de la cadena de suministros de las agroindustrias se caracteriza no solo por el flujo de información del cliente en un sentido recursivo al flujo de los materiales, sino por la

particularidad de un flujo continuo de productos perecederos, consumidores preocupados por la procedencia de sus alimentos, y más aún, la condición de una oferta estacional e incertidumbre de los rendimientos de su producción y la calidad del fruto de las cosechas (Garcia y Garcia, 2007).

3.5.1.1 Descripción del marco de referencia de la cadena de suministro agrícola

El marco de referencia tiene como objetivo soportar la definición de un conjunto de funcionalidades genéricas para los actores de la CS agroalimentaria modelada con el enfoque de agentes inteligentes, esto desde una perspectiva independiente e interoperable considerando los atributos de apertura. Los momentos de decisión tiene que ver con el manejo de condiciones climáticas, selección de prácticas agrícolas y en todos los procesos para llegar a obtener una calidad deseada, negociación con proveedores y clientes, selección de procesos productivos para añadir valor agregado al producto.

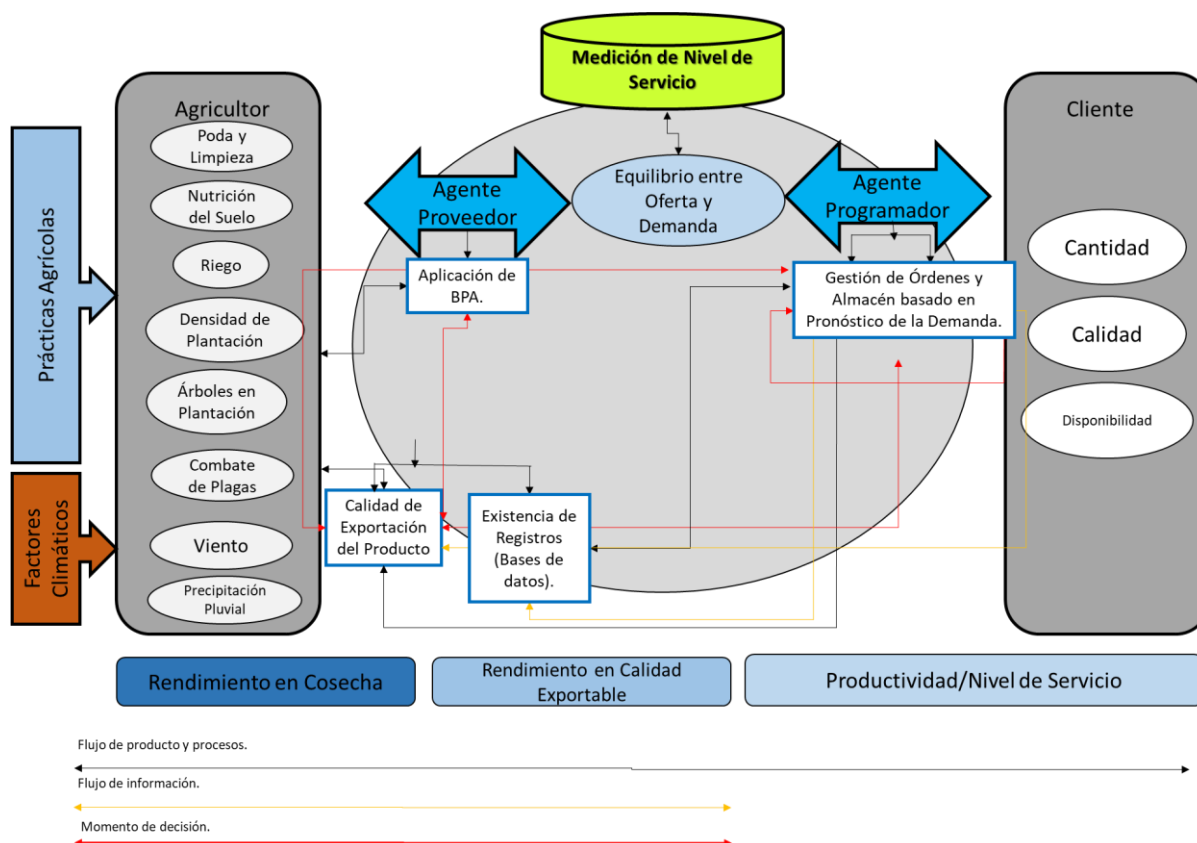


Figura 22 Marco de referencia para el modelado de la cadena agroalimentaria utilizando el enfoque de Agentes

Se aprecia en el marco de referencia (Figura 22) la interacción de agentes y actores en la medición de nivel de servicio de la cadena de suministro del limón persa.

La información fluye en ambos sentidos desde los factores climáticos y las prácticas agrícolas; que determinarán el rendimiento de cada proveedor, tanto en producto como en calidad de producto, igualmente la información fluye en ambos sentidos convirtiéndose en una base de conocimiento. El momento de toma de decisiones es la parte más importante del modelo genérico; la toma de decisiones empieza en la selección de proveedores, basada en el tanto en el rendimiento que es determinado por el manejo de prácticas agrícolas y condiciones climáticas, así como en el cumplimiento, por parte de los proveedores, de ciertos criterios importantes para la empresa, se centra en la interacción de las variables que integran los agentes del sistema para llegar a satisfacer la demanda de los clientes, es decir un buen manejo de inventarios en almacén y cumplimiento de órdenes basado en el pronóstico de la demanda. La medición del nivel de servicio es de suma importancia ya que permite determinar la eficiencia en la gestión de la cadena de suministro, dada por una eficiente gestión de la información a lo largo de ella.

Los agentes del modelo genérico de vulnerabilidad y el rol que desempeñan son mostrados en la siguiente Tabla 16:

Tabla 16 Agentes y roles del modelo de agentes de la CS.

Agente	Rol	Actividades
Agente Productor	Activo	Predicción del Rendimiento, Clasificación de Rendimiento basado en el uso de Fertilizantes, Predicción de Rendimiento por Calidad de Exportación.
Agente Proveedor	Deliberativo, Activo	Selección de Proveedores (AHP).
Agente Programador	Decisión, Reactivo	Determinación de Nivel de Servicio y Optimización del Control de Almacén (Simio® y AnyLogic®). Modelo de Predicción de la Demanda.

Como puede observarse la interacción de las actividades de cada agente promueve la eficiencia en los procesos de la cadena de suministro haciéndola eficiente.

3.5.2 Selección de software para el desarrollo del SGC para la GCS.

El software AnyLogic® es una herramienta de modelado de simulación multi-método desarrollada por *The AnyLogic® Company* (antes XJ Technologies). Esta plataforma soporta tres metodologías: dinámica de sistemas, simulación de eventos discretos, y simulación basada en agentes. El método de dinámica del sistema asume un alto nivel de abstracción y se utiliza principalmente para problemas de nivel estratégico. La simulación de eventos discretos se utiliza principalmente en los niveles operativos y tácticos. Los modelos basados en agentes se utilizan en todos los niveles; los agentes pueden ser empresas competidoras, consumidores, proyectos, ideas, vehículos, peatones o robots (M. D. R. Pérez-Salazar, 2019). Para esta investigación se usa la simulación basada en agentes y se opta por el software AnyLogic® ya que basado en el análisis de la literatura se encontró que es la segunda plataforma, software, más utilizada para el desarrollo de los diferentes SMA propuestos y encontrados durante la investigación, que se hizo considerando un periodo de 2016 a mayo de 2020 (ver Tabla 17), teniendo la ventaja decisiva de contar con una versión de estudiante que puede utilizarse sin el pago de licencia.

Tabla 17 Resultados del Análisis de Artículos de Interés con base a SOFTWARE en el cual se diseña e SMA.

Software	Artículos	Porcentaje
Matlab	5	14.71%
JADE	10	29.41%
Any Logic	7	20.59%
No Menciona	6	17.65%
JADE+Otro	2	5.88%
Repast Symphony (Repas S)	1	2.94%
Proegé 2000	1	2.94%
Simplex3-MDL	1	2.94%
Color Petri Nets	1	2.94%

3.6 Etapa 4 Determinación de la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes

La determinación de la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento se hace de manera paralela a la creación del Marco de Referencia para la CS Agroalimentaria del caso de estudio, se ha determinado la creación de diferentes tipos de agentes que son descritos en la sección anterior 3.5.2 y mostrados en la siguiente Figura 23.

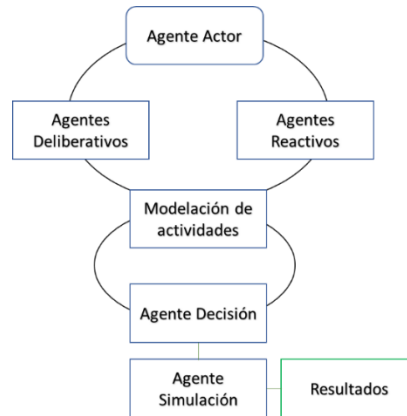


Figura 23 Rol de los agentes inteligentes en el modelo Agente actor.

3.7 Etapa 5 Desarrollo del modelo de agentes y módulos de apoyo a la decisión.

El uso de agentes inteligentes se ha implementado como herramienta idónea para la solución de problemas y sincronización de cadenas de suministro complejas; para ello, entidades computacionales realizan cálculos complejos que permiten ser distribuidos y se basan en la delegación, procesamiento de la información y comunicación. Se inicia con el modelado basado en agentes, usando el software AnyLogic®, tomando como base el modelado de la CS en SIMIO® se adapta al enfoque multiagentes.

El desarrollo de la Metodología para esta etapa se presenta de la siguiente manera, la etapa considera dos actividades principales, el Desarrollo del Modelo de Agentes y el Desarrollo de los Módulos de Apoyo a la Decisión.

3.7.1 Desarrollo del modelo de agentes

Para el desarrollo del modelo de agentes, dado que se trata de la misma cadena de suministro, se ha considerado la misma estructura que el modelo de simulación de Simio®, es decir, se modela por eslabones iniciando con Proveedores, Proceso de Empaque, Almacén y finalmente Distribución.

3.7.1.1 Recolección de datos

Los datos y variables definidas para el primer modelo de simulación de eventos discretos de Simio® mostrados en el Capítulo 3 y Secciones 3.4.2.1 a 3.4.2.4 se utilizan en este modelo basado en agentes. La diferencia de ambas simulaciones es el enfoque bajo el cual es modelado el comportamiento e interacción de los elementos de la cadena de suministros del caso de estudio.

3.7.1.2 Objetos empleados

El modelo de agentes se construye utilizando el software profesional multi-método AnyLogic® en su versión. A continuación se describen de manera breve las bibliotecas y los elementos que se utilizaron para construir el modelo. Dado que se ha desarrollado un modelo multi método, basado en agentes inteligentes, pero con algunos elementos de simulación discreta, se hace uso de la biblioteca *Process Modeling Library*. Los agentes, así como los procesos que realizan se programan con algunas de las herramientas de la biblioteca *Agents*. Es aquí donde son generados y con ayuda de los *Statecharts* es modelado su comportamiento. El monitoreo de la cantidad de producto que está en el sistema se puede observar con ayuda del histograma del modelo, mismo que puede realizarse con algunas de las herramientas de la biblioteca de Análisis (Figura 24a, b y c).

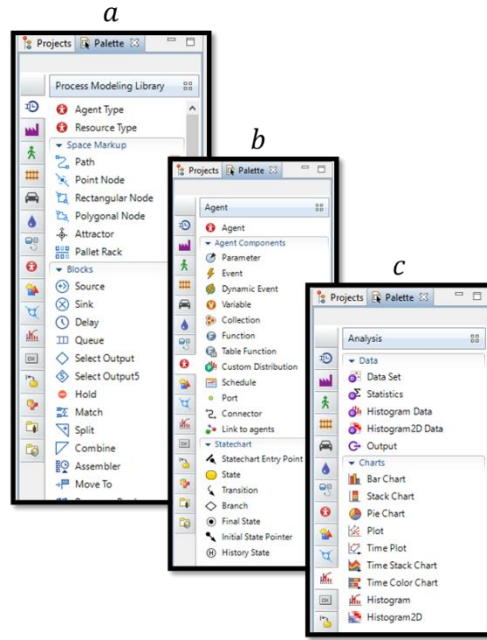


Figura 24 Processing Model Library.

Cada una de estas bibliotecas contiene elementos que permiten el desarrollo del modelo basado en agentes y la programación de la interacción entre ellos. Se detalla en las siguientes Tabla 18 y Tabla 19 alguna de las funciones de los objetos utilizados para la modelación.

Tabla 18 Objetos utilizados en la modelación de la CS en AnyLogic®.

Objeto	Cantidad	Descripción	Biblioteca
Agent main	1	Es el agente principal que contiene a los proveedores y la planta, su función es coordinar y modelar los eventos que ocurren durante el tiempo que dura la simulación, gestiona la comunicación y permite interactuar con los controles del modelo.	Agent
Agent type	2	Es una unidad de diseño de modelo que puede tener comportamiento, memoria (historia), tiempo, contactos, etc., se pueden definir variables, eventos, parámetros en él. El modelo con enfoque de agentes tiene dos tipos de agentes: 'I' (kilos de limón que entran y son procesados en la planta, y 'o' que son las órdenes que entran y se procesan en la planta.	Agent
Variable	10	Una variable representa un estado del modelo, y puede cambiar durante la simulación, pudiendo ser variables locales o globales.	Agent

Tabla 19 Objetos utilizados en la modelación de la CS en AnyLogic®.

Objeto	Cantidad	Descripción	Biblioteca
Conector	37	Sirve para unir objetos del modelo, teniendo en cuenta que no ocupan tiempo ni distancia.	Agent
Source	17	Generan agentes de ambos tipos, limones y órdenes, son el inicio de cada uno de los procesos, siendo estos: el proceso de llegada y empackado, y la generación de órdenes.	Modelling Process
Sink	5	Este objeto se encarga de retirar los agentes tipo del modelo, para este modelo, no sólo indican el fin de cada uno de los procesos y sub procesos, sino que además también se encarga de sacar del sistema todo el limón que es clasificado como torreón, terceras y desecho.	Modelling Process
Delay	8	Representa estaciones de trabajo que procesan agentes en un tiempo establecido.	Modelling Process
Select Output	2	Su función es encaminar agentes al objeto siguiente dependiendo de las probabilidades, o condiciones que le sean programadas. En el modelo se utilizan para direccionar el limón clasificado como torreón y el que continúa en el proceso, así como el tipo de orden.	Modelling Process
Select Output5	1	Su función es encaminar agentes a 5 posibles objetos siguientes dependiendo de las probabilidades o condiciones que le sean programadas. En el modelo se utilizan para direccionar el limón clasificado como terceras, desecho y el de exportación que continúa en el proceso.	

La modelación, como se ha mencionado en secciones anteriores, se hace basada en tres eslabones principales de la CS del caso de estudio, el modelo de agentes toma como base el modelo realizado en Simio®, es por ello que se consideran dos subsistemas, su modelación es descrita a continuación.

3.7.1.3 Proveedores

Existen múltiples huertos que surten a la empacadora San Gabriel S.A. de C.V., cada uno de ellos tienen diferentes dimensiones, características físicas y ejecución de prácticas agrícolas, por tal motivo el rendimiento de cosecha, es decir el producto que entra a la empresa, es altamente variante. El desarrollo del modelo de agentes, como se mencionó previamente,

tiene una estructura similar al modelo desarrollado en Simio®, también se reporta por eslabones, se muestra el primer sub modelo (Figura 25).

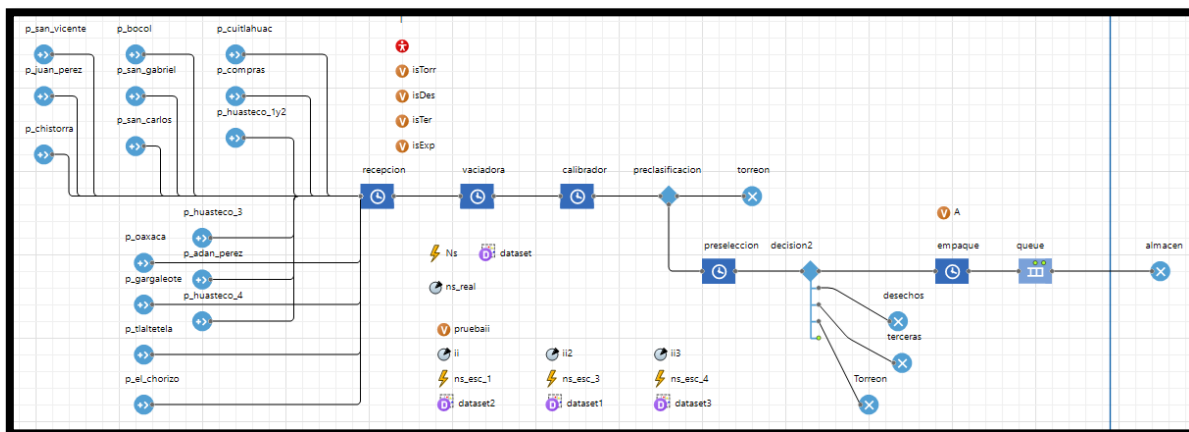


Figura 25 Modelo de Agentes Proveedores-Planta-Almacén.

Para esta parte del proceso se programan 16 *source* que emulan el comportamiento de los HUERTOS PROVEEDORES, cada uno ha sido configurado, con respecto a la tasa de llegada de producto, tal cual se ha hecho en el modelo de SIMIO®, basándose en la Tabla 9 de distribuciones mostrada en la sección 3.4.1.6.3.1

El source *p_san_vicente* (Figura 26), por ejemplificar uno de los 16 *source* de generación de entidades programados, emula al huerto proveedor San Vicente, este tiene una tasa de llegada que sigue una distribución Geométrica, programada internamente como “geometric(0.081)”, por día. Cada uno de estos eventos genera agentes ‘1’ que fungen en este modelo como entidades a ser procesadas a lo largo de la cadena de producción, los kilos de limón.

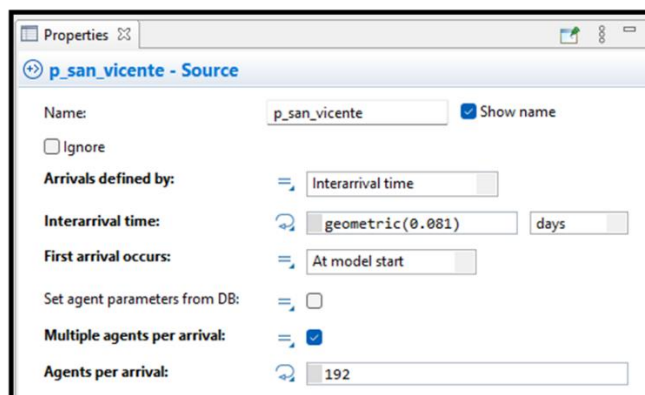


Figura 26 Propiedades de los proveedores programado en el modelo de agentes.

. De manera similar se comportan los otros *source*, cada uno siguiendo la distribución de probabilidad que define su comportamiento.

3.7.1.4 Proceso de la empacadora

Los agentes '1' irán procesando a lo largo del modelo representando su paso por los sub procesos de la empacadora, estos agentes se configuran como una Unidad de Recurso ya que, en términos de la simulación, fungen como Entidades.

El proceso inicia con la llegada de producto a través de los *source*, el producto llega a la Recepción (distribución triangular (11.5,13,14.5) minutos), el siguiente paso del proceso de la empacadora es el Calibrador, este equipo separa las entidades que tienen un tamaño por debajo del de calidad de exportación, catalogado como Limón Torreón, este proceso tiene un tiempo de duración que puede tardar entre 7.5 y 10.5 minutos, para modelar este sub proceso se han creado dos variables de tipo booleana con un valor inicial "false", la entidad desde que es creada tiene una probabilidad de 0.05713 de ser clasificada como limón Torreón, y se ha programado la probabilidad de que el agente tenga este valor al salir de recepción (Figura 27), el limón que no es clasificado de esta manera avanza en el proceso.

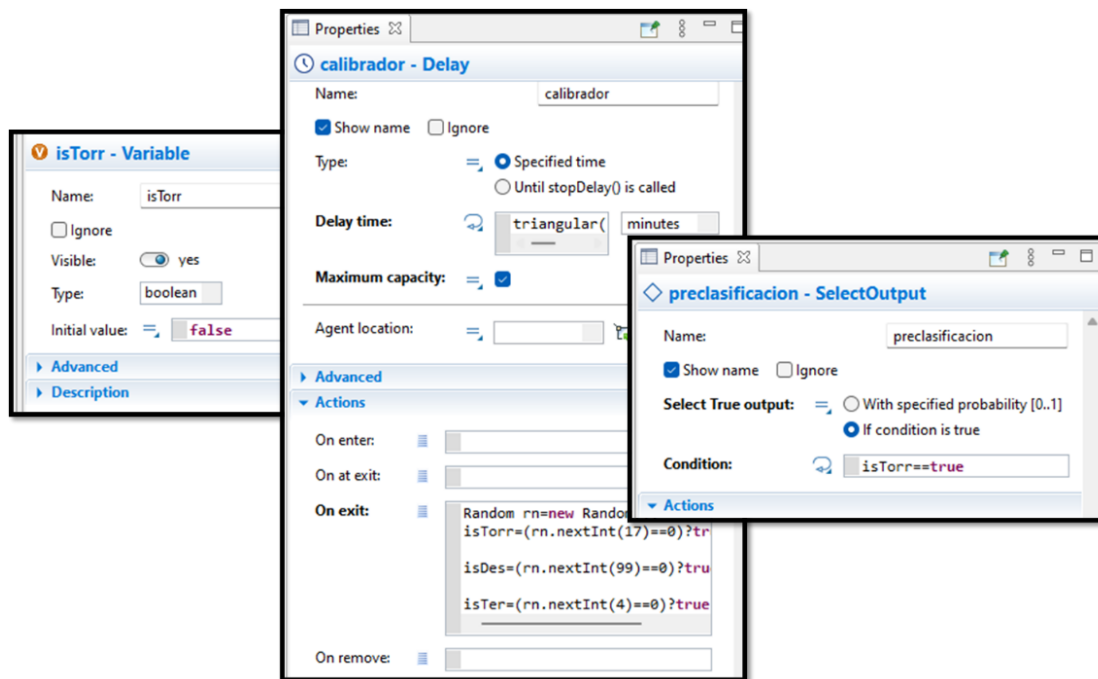


Figura 27 Variable "isTorr" y asignación de probabilidad de clasificación como limón Torreón.

El subproceso de Preselección, en esta parte del proceso el limón es clasificado como limón de desecho (limón dañado), limón de terceras (que es distribuido en el país) y el limón de exportación que sigue en el proceso. Al crearse el agente tiene una probabilidad de 0.01 de ser desecho, 0.24 de ser clasificado como terceras y el complemento de esta probabilidad de ser clasificado como limón con calidad exportable, esta probabilidad está determinada por las variables creadas y se usa un `selectOutput5` para separar los agentes que continúan en el proceso y los que son clasificados como desechos y terceras que serán eliminados.

El siguiente subproceso es empaquetado y finalmente almacén, donde el producto permanece un tiempo antes de ser distribuido en atención a las órdenes que llegan de los clientes.

3.7.1.5 Centros de distribución

Para este eslabón se considera la modelación de la generación de órdenes, el tiempo de procesamiento de estas y la salida del producto de la planta para el cumplimiento de la orden. La empresa cuenta con clientes tanto nacionales como extranjeros, el cliente principal es Estados Unidos y Canadá, seguido de Europa. En ambos la empresa cuenta con un centro de distribución, cabe destacar que los envíos de producto son realizados por una empresa externa por lo que este modelo no cubre esa parte.

3.7.1.5.1 Generación de Órdenes

El proceso inicia con la generación de órdenes, agentes tipo ‘o’, que pueden ser órdenes de Estados Unidos - Canadá, o Europa. Para lo cual se han creado dos variables tipo booleanas que dan al agente esta característica que permite distinguirlo (Figura 28).

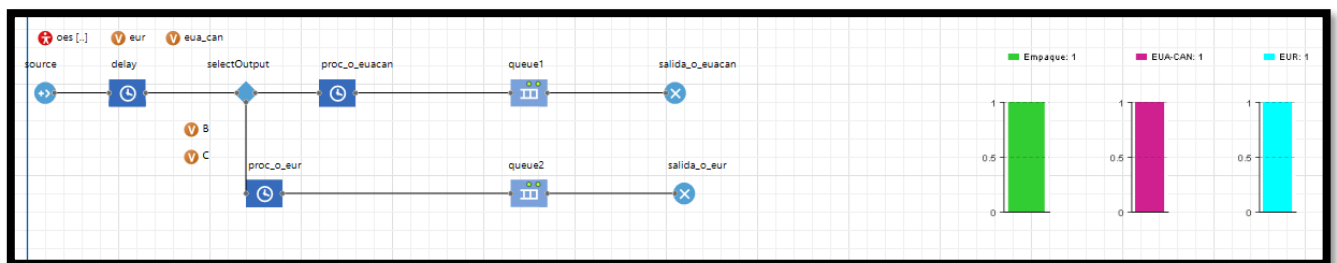


Figura 28 Modelo de Agentes Generación y Procesamiento de Órdenes.

Al igual que en el modelo correspondiente a la planta, se hace la programación de la tasa de llegadas dentro de los Source (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) con

ayuda del selectOutput se distingue entre agentes ‘o’ tipo ‘eua_can’ o agentes ‘eur’, además del tiempo de procesamiento.

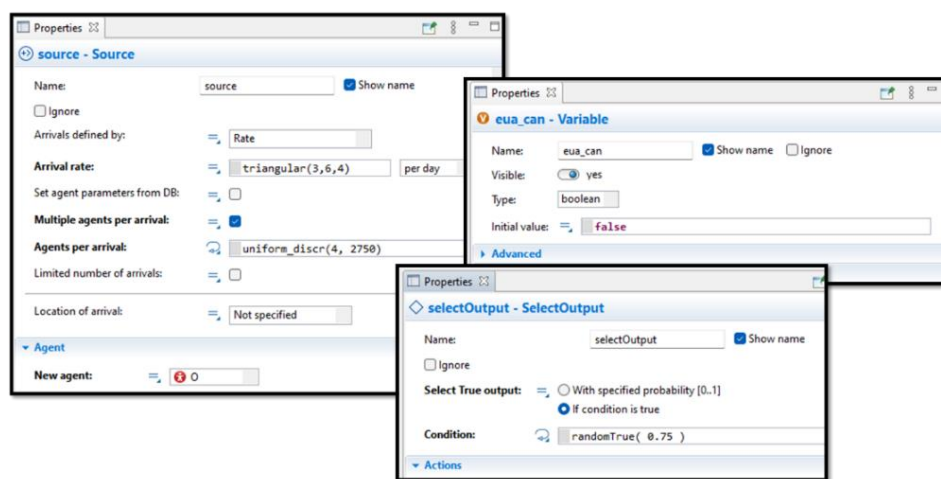


Figura 29 Propiedades de la generación de órdenes, y variables.

El proceso del modelo es simple, se generan órdenes que pueden ser de cualquiera de los dos clientes de la empresa, cada orden puede tener un tamaño que va entre 408 y 274650kg por cada una de las 2 a 6 que se generan al día.

3.7.2 Desarrollo de módulos de apoyo a la decisión

El sistema para gestión del conocimiento que permitirá optimizar la gestión de la cadena de suministros está basado en, pero no se limita, al modelo de agentes inteligentes, se han desarrollado módulos de apoyo a la decisión que gestionan la información y conocimiento de manera efectiva. Se desarrollan en un lenguaje libre con la finalidad de que puedan ser utilizados por la empresa y sus proveedores sin la necesidad de un pago de licencia o del manejo complejo de un software de simulación. A continuación, se describe de manera general el desarrollo de estos módulos y su función.

3.7.2.1 Módulos para selección de proveedores

El conocimiento es una mezcla de experiencia, valores, información y “saber hacer” interpretado adecuadamente en un contexto determinado, se deriva de la información, ya que es información unida a experiencia, contextualizada en un entorno y tiempo determinados y orientada a la acción (Yousef Obeidat et al., 2017).

Se desarrolla un módulo para la Evaluación de Proveedores, a través de una aplicación: Evaluación_de_Proveedores_AHP_Dred, que al igual que los módulos de predicción de rendimiento, descritos en la siguiente sección, es un programa concebido para evaluar proveedores basado en cuatro criterios establecidos con base en un análisis de importancia de variables que impactan el rendimiento por hectárea del limón persa y la opinión de los expertos. La posesión de conocimientos, experiencia aplicada, tecnología organizacional, relaciones con clientes y destrezas profesionales generan o valor para la empresa, por lo tanto, seleccionar proveedores expertos y conocedores de la producción de limón persa resulta una excelente inversión para la empresa.

3.7.2.1.1 Técnica de evaluación

Este módulo se diseña basado en el método Analytic Hierarchy Process (AHP) desarrollada por el profesor Thomas L. Saaty, éste es un método de decisión multicriterio ayuda a seleccionar entre distintas alternativas en función de una serie de criterios o variables de selección, normalmente jerarquizadas, y que suelen entrar en conflicto entre sí. La estructura jerárquica de arriba a abajo se puede entender como: objetivo final, criterios y subcriterios (si aplica) y finalmente las alternativas a comparar (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Uno de los aspectos fundamentales del método es elegir bien los criterios y subcriterios de selección, definirlos adecuadamente y que sean mutuamente excluyentes. Para el caso de estudio de esta investigación se evalúan tres posibles proveedores, Proveedor 1, Proveedor 2 y Proveedor 3, en función de cuatro criterios: **Edad de Huertos, Aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), Rendimiento por Hectárea y Años de Colaboración**. Para realizar este proceso, el método AHP comienza estructurando el problema a modo de jerarquía, el siguiente diagrama describe la estructura jerárquica para la selección de proveedores de Limón Persa (Figura 30):

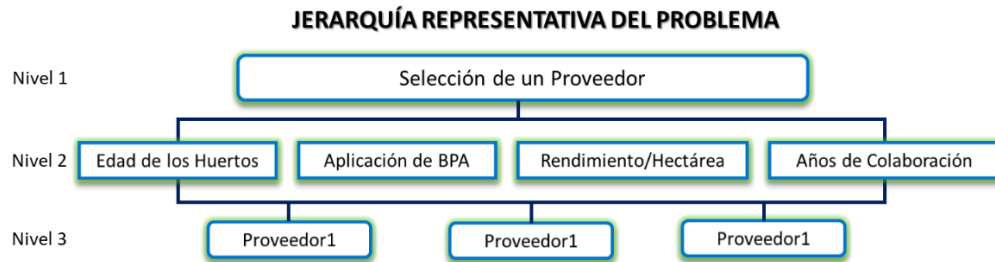


Figura 30 Jerarquía Representativa de la Selección de Proveedores.

Para realizar la comparación entre los criterios se utiliza la Escala Fundamental de Saaty (Saaty, 1977), ver Tabla 20, ésta permite transformar aspectos cualitativos en cuantitativos, facilitando notablemente la comparación entre las distintas alternativas y dando lugar a resultados más objetivos y fiables.

Tabla 20 Escala fundamental de Saaty.

Escala de Medida		
Valor numérico	Definición (Sistema)	Comentarios
1	Igual de importancia de los dos elementos.	El criterio A es igual de importante que el criterio B.
3	Importancia moderada de un elemento frente al otro.	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B.
5	Importancia fuerte de un elemento frente al otro.	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente al criterio A sobre el B.
7	Importancia muy fuerte de un elemento frente al otro.	El criterio A es mucho más importante que el B.
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro.	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de duda.
2, 4, 6, 8	Valores intermedio entre dos de los anteriores.	
Recíprocos de los anteriores	Si un elemento <i> tiene un valor concreto, por ejemplo 3, cuando se le compara con un valor <j>, entonces éste tiene el valor recíproco, es decir 1/3, cuando se le compara con <i>.	

Para el desarrollo del módulo estos criterios son establecidos específicamente para el caso de estudio y son descritos en la siguiente sección.

3.7.2.1.2 Criterios de evaluación de proveedores

Se establecen cuatro criterios basados en las prioridades que los expertos consideran elegibles al momento de seleccionar a los huertos proveedores, estos criterios se describen brevemente a continuación.

Edad de los huertos

La edad de los huertos es un factor importante para los expertos, en el caso de la Lima Tahití (*Citrus latifolia* Tanaka) la producción se inicia a los dos años de trasplantado el injerto, y puede durar de 30 a 50 años con rendimientos de máxima producción entre los 8 y 15 años, es por ello que la edad es importante para la elección de los huertos proveedores.

Aplicación de las buenas prácticas agrícolas (BPA)

Las prácticas de cultivo que realizan los productores en sus huertos son, por lo general, el mantenimiento de huerto tales como; la limpieza y poda de los árboles, así como la aplicación de fertilizantes y/o fungicidas; el corte, y la manipulación del fruto. Estas prácticas tienen un impacto positivo en el rendimiento por hectárea de los huertos y solo un proveedor experto reconoce y aplica las BPA para obtener beneficios por lo que su aplicación es de suma importancia.

Rendimiento por hectárea del proveedor

El rendimiento por hectárea se refiere a los kilogramos de limón que en promedio obtiene el huerto proveedor por hectárea sembrada, un mayor rendimiento asegura una mayor cantidad de producto entrante a la empacadora lo que permitirá satisfacer los pedidos en tiempo en forma.

Años de colaboración del proveedor con la empresa

Algunos proveedores, sobre todo los cercanos a la región de ubicación de la empresa, han surtido en algún momento o tienen varios años surtiendo a la planta, el cumplimiento de los criterios anteriores puede variar con el tiempo, dado que los huertos aumentan de edad, la aplicación de BPA también cambia con el tiempo, sin embargo, la seguridad que le da a la empresa contar con un proveedor experto, confiable y con buen historial es de gran importancia para seleccionar al mejor.

3.7.2.1.3 Desarrollo del módulo

El sistema fue desarrollado en un lenguaje de programación de código abierto, Python, que está disponible para Windows, Linux y macOS; con ayuda de la biblioteca AHPy. Se desarrolló un ejecutable que funciona sin necesidad de instalar ningún otro software, sin embargo, dependiendo del equipo podría ser necesario instalar Python, este software puede ser utilizado en cualquier equipo de cómputo, no requiere de características especiales para su desempeño y se describe a continuación la instalación.

AHPy es una implementación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), un método utilizado para estructurar, sintetizar y evaluar los elementos de un problema de decisión. Desarrollado por Thomas Saaty en la década de 1970. AHPy proporciona una biblioteca fácil de usar y capaz de trabajar intuitivamente dentro de los numerosos marcos conceptuales a los que se puede aplicar el AHP.

3.7.2.1.3.1 Modelo AHPy

El modelo se desarrolla con la biblioteca AHPy en el cual se programan cuatro criterios principales para evaluar a tres potenciales proveedores (Figura 31).

```
#aquí
edad_huertos_comparisons = {('P1', 'P2'): p12eh, ('P1', 'P3'): p13eh, ('P2', 'P3'): p23eh}
bpa_comparisons = {('P1', 'P2'): p12bpa, ('P1', 'P3'): p13bpa, ('P2', 'P3'): p23bpa}
rend_ha_comparisons = {('P1', 'P2'): p12rh, ('P1', 'P3'): p13rh, ('P2', 'P3'): p23rh}
colab_comparisons = {('P1', 'P2'): p12ac, ('P1', 'P3'): p13ac, ('P2', 'P3'): p23ac}

criterias_comparisons = {('Experience', 'Education'): dp, ('Experience', 'Charisma'): ap, ('Experience', 'Age'): pl,
('Education', 'Charisma'): ns, ('Education', 'Age'): ll,
('Charisma', 'Age'): 5}

edad_huertos = ahpy.Compare('Experience', edad_huertos_comparisons, precision=3, random_index='saaty')
bpa = ahpy.Compare('Education', bpa_comparisons, precision=3, random_index='saaty')
rend_ha = ahpy.Compare('Charisma', rend_ha_comparisons, precision=3, random_index='saaty')
colab = ahpy.Compare('Age', colab_comparisons, precision=3, random_index='saaty')
criterias = ahpy.Compare('Criterias', criterias_comparisons, precision=3, random_index='saaty')
criterias.add_child(edad_huertos)
criterias.add_child(bpa)
criterias.add_child(rend_ha)
criterias.add_child(colab)

#Resultado.toList()
report = criterias.report(show=True)
l = ["target_weights"]
result = list(map(report.get, l))

ev_individual = report['target_weights']['P1']
print(ev_individual)
```

Figura 31 Programación del Modelo AHPy.

Una vez desarrollado el modelo se crea la interfaz gráfica con la cual el usuario interactúa para realizar la evaluación de los proveedores.

3.7.2.1.3.2 Desarrollo y uso de la interfaz

Además de la interfaz (Figura 32) se crea un ejecutable que permite abrir la aplicación en cualquier computadora sin necesidad de instalar ningún otro software ni pagar licencia

alguna, lo cual representa una ventaja en el manejo e implementación de todo el sistema de gestión del conocimiento para la gestión de la cadena de suministro agrícola del limón persa, ambos procesos se describen de manera breve a continuación.

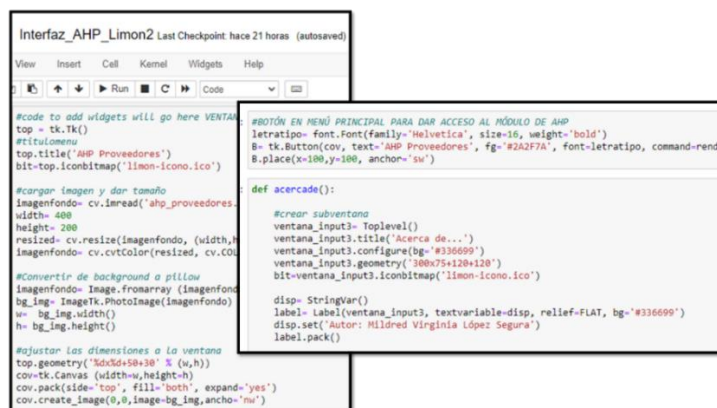


Figura 32 Código interfaz del módulo de evaluación de proveedores.

El resultado final de la interfaz se muestra en la siguiente Figura 33, la aplicación cuenta además del módulo de AHP con un manual de usuario, documentación sobre la técnica AHP (Saaty, 1977), además de un artículo cuyo contenido detalla la aplicación de la técnica en un ejemplo (José et al., n.d.). La ventana principal da acceso a la sub ventana donde se califica a los proveedores basado en los criterios de selección, mismos que también son evaluados por prioridad.

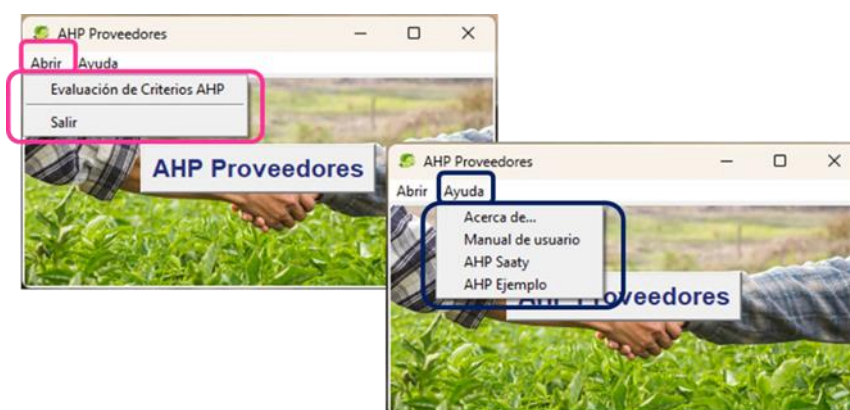


Figura 33 Pantalla principal del módulo de evaluación de proveedores.

Con la finalidad de que la aplicación sea sencilla para el usuario, en el sistema no se visualizan los valores numéricos, sino sus definiciones (resaltadas en amarillo en la Figura 34), de ésta manera el usuario califica de manera cualitativa, tal como el lenguaje natural lo

entiende, y el sistema se encarga internamente de hacer las conversiones de estas calificaciones a numéricas para finalmente obtener una calificación por Proveedor y que el usuario pueda determinar cuál es el mayormente elegible.

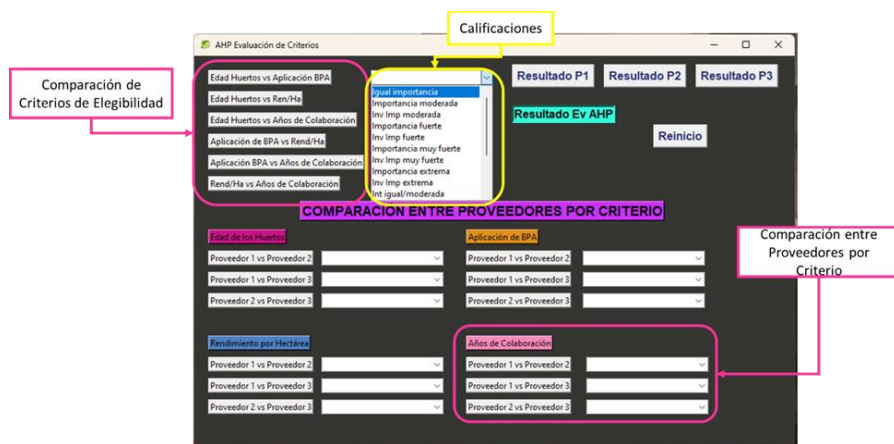


Figura 34 Ventana de Evaluación de Proveedores por Criterios.

Finalmente, la última etapa consiste en la obtención de resultados finales, bastando solo un clic sobre el botón de Resultado P1, para el proveedor 1, Resultado P2 para el proveedor 2 y así respectivamente (resaltados en rosa en la Figura 35). En la etiqueta de resultado se irá mostrando el resultado de la evaluación por proveedor conforme se haga clic en el botón de Resultado correspondiente.



Figura 35 Resultado, Reinicio.

Para reiniciar todas las selecciones y ventana de resultado es necesario presionar el botón de Reinicio (resaltado en azul).

3.7.2.2 Módulo de predicción de rendimiento (proveedores)

Dado que la atención principal del huerto seleccionado como proveedor se enfoca al rendimiento de la producción y la calidad del fruto generado este módulo atiende el rendimiento y calidad de estos; el módulo consiste en tres modelos XGBoost que permiten predecir el rendimiento de limón de los proveedores, en cada una de las etapas de la producción, floración, brote y fruto.

Los modelos XGBoost fueron construidas con información proporcionada por la empacadora, cabe señalar que los datos son limitados y están restringidos a los proveedores que la misma empresa ha clasificado como los principales (en su mayoría huertos propios), estos principales proveedores hidratan sus cultivos por temporal, por lo cual las variables de los modelos fueron diseñadas considerando estas características. Para la programación de los algoritmos XGBoost se trabajó con el lenguaje Python; el sistema consta de tres modelos secuenciales, el primero para predecir el rendimiento de floración, el segunda para predecir el brote (canica) del limón, y por último el tercer modelo que calcula el rendimiento del fruto.

3.7.2.2.1 Presentación del módulo de modelos XGBoost de predicción del rendimiento de limón persa

El objetivo de la creación de estos modelos XGBoost es desarrollar un Módulo para la selección de proveedores conformado por tres Modelos XGBoost secuenciales, el resultado de uno alimenta al siguiente (Figura 36), para identificar a los mejores proveedores, la finalidad del módulo es asegurar que el producto sea suficiente y de calidad exportable (módulo de redes de calidad), disminuir el riesgo de limón de terceras y daños para de esta manera minimizar las pérdidas en producto no conforme a las normas de exportación, asegurando de esta manera el cumplimiento de pedidos de los clientes.

El módulo de modelos XGBoost predice los rendimientos en cada etapa de la producción del limón, para ello, fue necesario antes determinar las variables que conforman al sistema. Los criterios definidos para la selección del productor-proveedor son aquellas variables dadas por la naturaleza del cultivo y prácticas agrícolas para la producción de limón persa, a las que se incluyen los eventos inciertos como lo son los fenómenos meteorológicos y condiciones hidroclimatológicas, más del 90% de los huertos proveedores, propios de la empresa y

externos, son de riesgo por Temporal por lo que se consideran las variables que impactan directamente en el rendimiento bajo esas condiciones.

A continuación, se muestra un esquema que permite visualizar el diseño de las redes neuronales de predicción de rendimiento, las variables del sistema y cómo fueron tratados para el desarrollo de los modelos XGBoost.

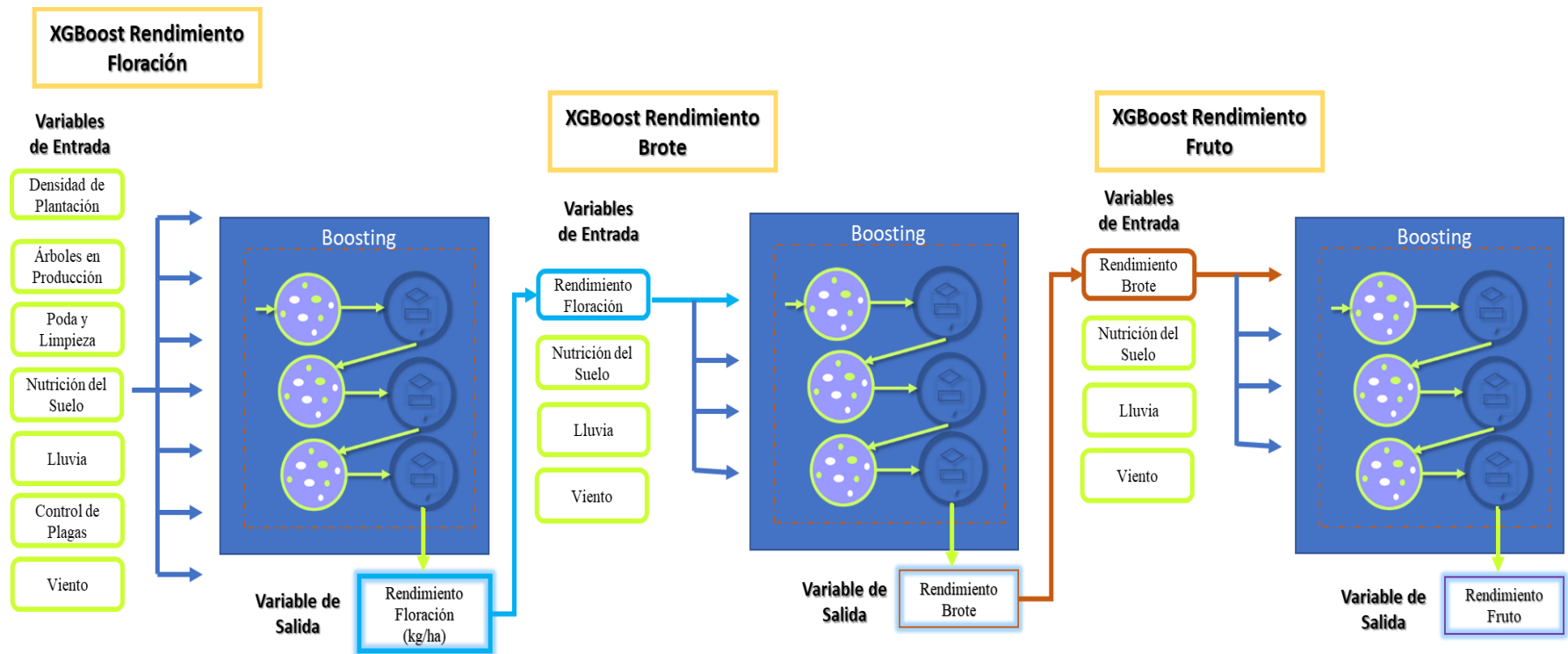


Figura 36 Variables Modelos XGBoost Rendimiento Floración, Brote y Fruto

3.7.2.2.1.1 Recolección de datos para los modelos XGBoost

Los criterios definidos son aquellas variables dadas por la naturaleza del cultivo y prácticas agrícolas para la producción de limón persa, a las que se incluyen los eventos inciertos como lo son los fenómenos meteorológicos y condiciones hidro climatológicas. Las **variables de entrada (E)** que alimentan los algoritmos son aquellas prácticas agrícolas que impactan positiva o negativamente el rendimiento de la producción de limón persa en el huerto, así como aquellos factores del sistema e inciertas que también ejercen influencia en el rendimiento en las tres etapas de desarrollo, floración, brote y fruto. La **variable de salida (S)** queda definida como “Rendimiento” para cada etapa, floración, brote y fruto, identificada tanto por productores como exportadores del limón persa, ésta variable se expresó dimensionalmente en el **total de kilos producidos por cada huerto**; ambas, variables de entrada y salida, son descritas en las siguientes Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23. Para el desarrollo de los modelos XGBoost es necesario hacer adecuaciones a los datos por lo que su codificación se muestra en la columna ‘**Codificación en el Modelo XGBoost en Python**’.

Tabla 21 Variables, Descripción, Unidades y Codificación de las Variables Entrada/Salida en los modelos XGBoost.

Etapa	Variable	Descripción	Dimensiones/Unidades	Codificación en el Modelo XGBoost en Python
Floración	Densidad de Plantación (I)	Se refiere al número de árboles plantados y su efecto esperado debido al volumen de producción por hectárea de cultivo.	Ton/ha	Toma valores entre 1 y 32.
	Árboles en Producción (I)	Se entiende como el número de árboles en producción de limón en el huerto y su efecto esperado debido al volumen de producción por hectárea de cultivo.	Ton/ha	Toma valores entre 1 y 100.
	Tipo de Poda (I)	Es la eliminación de algunas partes del árbol; en citricultura los objetivos que se buscan con la poda del árbol son la formación del árbol, la regulación de la cosecha y la mejora de su calidad.	No se realiza	No se realiza (pruning_and_cleaning_0)
			Poda estética	Poda estética (pruning_and_cleaning_1)
			Poda estresante	Poda estresante (pruning_and_cleaning_2)

Tabla 22 Variables, Descripción, Unidades y Codificación de las Variables Entrada/Salida en los modelos XGBoost.

Etapa	Variable	Descripción	Dimensiones/Unidades	Codificación XGBoost
Floración	Nutrición del Suelo (I)	Práctica agrícola consistente en la aplicación de nutrientes al suelo.	Baja (solo cuando se considere necesario).	Baja (nutrition_soil_0)
			Oportuno (regularmente).	Oportuno (nutrition_soil_1)
			Correctivo (cuando no existen condiciones adecuadas).	Correctivo (nutrition_soil_2)
	Lluvia (I)	Precipitación, en escasez de lluvia el fruto no se desarrolla correctamente, y si la intensidad de la lluvia es de 200mm por más de tres semanas provoca la caída del fruto del árbol.	Los milímetros medios de lluvia están presentes en los cuatro meses anteriores al mes de la cosecha.	Toma valores entre 1 y 170 .
	Control de Plagas (I)	Práctica agrícola para el control de plagas que afectan el cultivo.	Nulo-Mínimo	Nulo-Mínimo (pest_control_0)
			Protección	Protection (pest_control_1)
	Viento (I)	Velocidad media del viento. El evento incierto afecta directamente el desempeño de la producción debido a la pérdida de flores, capullos o frutos del árbol.	Km/hr	Toma valores entre 1 y 100 .
	Rendimiento Floración(O)	Se refiere a la cantidad de kilos que produce cada huerto.	K	Toma valores entre 1 y 32 .
Etapa	Variable	Descripción	Dimensiones/Unidades	Codificación en XGBoost
Brote	Rendimiento Floración (I)	Se refiere a la cantidad de kilos que produce cada huerto.	K	Toma valores entre 1 y 32 .
	Nutrición del Suelo (I)	Práctica agrícola consistente en la aplicación de nutrientes al suelo.	Baja (solo cuando se considere necesario).	Low (nutrition_soil_0)
			Oportuno (regularmente).	Timely (nutrition_soil_1)
	Lluvia (I)	Precipitación, en escasez de lluvia el fruto no se desarrolla correctamente, y si la intensidad de la lluvia es de 200mm por más de tres semanas provoca la caída del fruto del árbol.	Los milímetros medios de lluvia están presentes en los cuatro meses anteriores al mes de la cosecha.	Toma valores entre 1 y 170 .
	Viento (I)	Velocidad media del viento. El evento incierto afecta directamente el desempeño de la producción debido a la pérdida de flores, capullos o frutos del árbol.	Km/hr	Toma valores entre 1 y 100 .
	Rendimiento Brote (O)	Se refiere a la cantidad de kilos que produce cada huerto.	K	Toma valores entre 1 y 32 .

Tabla 23 Variables, Descripción, Unidades y Codificación de las Variables Entrada/Salida en los modelos XGBoost.

Etapa	Variable	Descripción	Dimensiones/Unidades	Codificación en el Modelo XGBoost en Python
Fruto	Rendimiento Brote (I)	Se refiere a la cantidad de kilos que produce cada huerto.	K	Toma valores entre 1 y 32
	Nutrición del Suelo (I)	Agricultural practice consisting of application of nutrients to the soil.	Baja (solo cuando se considere necesario).	Baja (nutrition_soil_0).
			Oportuno (regularmente).	Oportuno (nutrition_soil_1).
	Lluvia (I)	Precipitación. Si hay escasez de lluvia el fruto no se desarrolla correctamente, y si la intensidad de la lluvia es copiosa con un valor de 200 mm en un tiempo mayor a tres semanas provoca la caída del fruto del árbol.	Los milímetros medios de lluvia están presentes en los cuatro meses anteriores al mes de la cosecha.	Toma valores entre 1 y 170 .
	Viento (I)	Velocidad media del viento. El evento incierto afecta directamente el desempeño de la producción debido a la pérdida de flores, capullos o frutos del árbol.	Km/hr	Toma valores entre 1 y 100 .
	Rendimiento Fruto (O)	Se refiere a la cantidad de kilos que produce cada huerto.	K	Toma valores entre 1 y 32 .

El impacto de estas variables trata de ser reducido con el uso de los sistemas de apoyo a la decisión que se desarrollan para la gestión de los eslabones de la CS del caso de estudio.

3.7.2.2.1.2 Generación del conjunto de datos

La recolección de la información se centró en los datos de cuatro de los huertos de temporal, dado que representan la mayoría del tipo de sistema de hidratación usado a nivel no solo regional, sino nacional y para la mayoría de los cultivos en México; estos son datos históricos de prácticas agrícolas de los huertos seleccionados; y corresponde a huertos proveedores del fruto tanto externos como propiedad de la Exportadora de Cítricos. El periodo de análisis de datos para los modelos XGBoost, se realizó para los años 2016 al 2019.

El dataset, contiene variables categóricas (resaltadas en lila y amarillo) por lo cual al conjunto de datos se le realiza una codificación One Hot Encoding, en Python, una vez realizado esto escaló de 7 a 12 variables de entrada con 220 registros para el conjunto de datos perteneciente a la etapa Floración, de 4 a 5 variables para el conjunto de datos de la etapa Brote y Fruto,

ambos con 220 y 214 registros respectivamente. Un ejemplo de la modificación al conjunto de datos se muestra en la siguiente Figura 37.

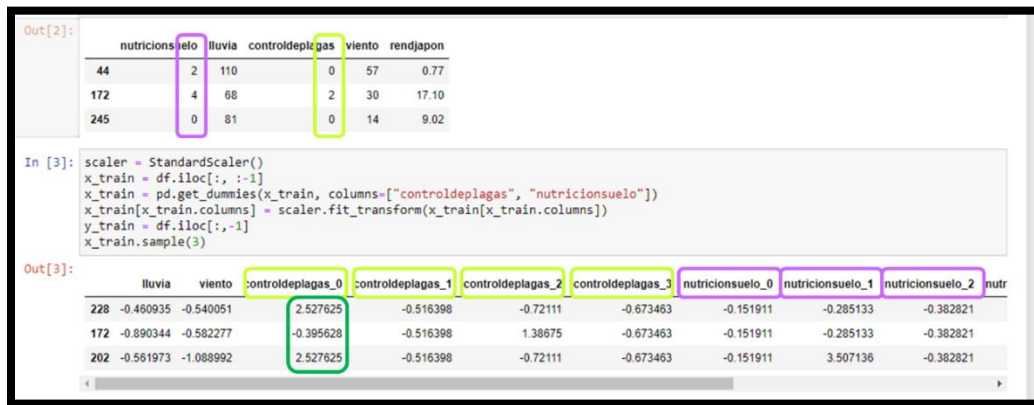


Figura 37 Aplicación de One Hot Encoding al conjunto de datos de la etapa Floración.

Para evitar que alguna de las variables tuviera más peso que el resto, se usa la estandarización de los datos, la estandarización de un conjunto de datos es un requisito común para muchos estimadores de aprendizaje automático; si una característica tiene una varianza de órdenes de magnitud mayor que otras, podría dominar la función objetivo y hacer que el estimador no pueda aprender de otras características correctamente como se esperaba, es posible también que se comporten mal si las características individuales no se parecen más o menos a los datos estándar distribuidos normalmente (por ejemplo, gaussiana con media 0 y varianza unitaria).

La puntuación estándar de una muestra x se calcula con la fórmula mostrada a continuación en la Ecuación 2:

Ecuación 2 Fórmula para estandarización del conjunto de datos. Fuente: (Buitinck et al., 2013)

$$Z = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

donde μ es la media de las muestras de entrenamiento o cero si `with_mean=False`, y σ es la desviación estándar de las muestras de entrenamiento o uno si `with_std=False` (Buitinck et al., 2013). La estandarización se hace con la función *StandardScaler* de la biblioteca *Scikit Learn* de Python, (resaltado en verde) en la Figura 37.

3.7.2.2.1.3 Generalidades del desarrollo de los modelos XGBoost

Extreme Gradient Boosting o XGBoost, es un algoritmo de machine learning supervisado que actualmente es de los más utilizados en el entorno de los modelos de aprendizaje automático, es un método de aprendizaje automático supervisado para clasificación y regresión, el algoritmo obtiene predicciones realmente buenas sin necesidad de grandes esfuerzos computacionales, este método está formado por un conjunto de árboles de decisión individuales, entrenados de forma secuencial, de forma que cada nuevo árbol trata de mejorar los errores de los árboles anteriores. La predicción de una nueva observación se obtiene agregando las predicciones de todos los árboles individuales que forman el modelo. En general, los métodos de ensamble como el XGBoost combinan múltiples modelos en uno nuevo con el objetivo de lograr un equilibrio entre bias (cuánto se alejan en promedio las predicciones de un modelo respecto a los valores reales) y varianza (cuánto cambia el modelo dependiendo de los datos utilizados en su entrenamiento), consiguiendo así mejores predicciones que cualquiera de los modelos individuales originales.

Para ajustar un dataset de entrenamiento utilizando XGBoost, se realiza una predicción inicial. Los residuales se calculan en función del valor predicho y de los valores observados, con estos se crea un árbol de decisión utilizando una puntuación de similitud de los residuales. Se calcula la similitud de los datos de una hoja, así como la ganancia de similitud de la división posterior. Se comparan las ganancias para determinar una entidad y un umbral para un nodo. El valor de salida de cada hoja también se calcula mediante los residuales. Para la clasificación, los valores se calculan generalmente utilizando el registro de momios y probabilidades. La salida del árbol se convierte en el nuevo residual para el dataset, que se utiliza para construir otro árbol. Este proceso se repite hasta que los residuales dejan de reducirse, o bien el número de veces especificado. Cada árbol subsiguiente aprende a partir de los árboles anteriores y no tiene asignado el mismo peso, a diferencia de cómo funciona Bosque aleatorio (Arcgis Pro 3.0, 2020).

Para la programación de estos algoritmos se usa la API de la biblioteca *XGBoost*, la biblioteca de *SKLearn*, y se hace en lenguaje Python. *XGBRegressor* de la biblioteca *XGBoost* permite entrenar modelos Gradient Boosting para problemas de regresión. Los parámetros e hiperparámetros empleados por defecto son los siguientes, en la práctica, cabe prestar especial atención a aquellos que controlan el crecimiento de los árboles

(subrayados), la velocidad de aprendizaje del modelo, y los que gestionan la parada temprana para evitar *overfitting* (Pedregosa et al., 2011):

- `loss='ls'`; es la función de pérdida a optimizar.
- `learning_rate=0.1`; La tasa de aprendizaje reduce la contribución de cada árbol.
- `n_estimators=100`; es el número de etapas de refuerzo a realizar.
- `subsample=1.0`; La fracción de muestras que se usará para ajustar a los alumnos (modelos sencillos) bases individuales.
- `criterion='friedman_mse'`; La función para medir la calidad de una división
- `min_samples_split=2`; es el número mínimo de muestras requeridas para dividir un nodo interno.
- `min_samples_leaf=1`; es el número mínimo de muestras requeridas para estar en un nodo hoja.
- `min_weight_fraction_leaf=0.0`; es la fracción ponderada mínima de la suma total de pesos (de todas las muestras de entrada) requerida para estar en un nodo hoja.
- `max_depth=3`; Profundidad máxima de los estimadores de regresión individuales.
- `min_impurity_decrease=0.0`; Un nodo se dividirá si esta división induce una disminución de la impureza mayor o igual a este valor. Los valores deben estar en el rango $[0.0, \infty)$.
- `min_impurity_split=None`
- `init=None`; se utiliza para calcular las predicciones iniciales, `init` tiene que proporcionar ajuste y predicción, se usa un `DummyEstimator`, que predice el valor objetivo promedio (para `loss='squared_error'`), o un cuantil para las otras pérdidas.
- `random_state=None`; Controla la semilla aleatoria dada a cada estimador de árbol en cada iteración de impulso.
- `max_features=None`; es el número de características a tener en cuenta al buscar la mejor división.
- `alpha=0.9`; es el cuantil alfa de la función de pérdida de Huber y la función de pérdida cuantil. Los valores deben estar en el rango $(0.0, 1.0)$.
- `verbose=0`; Habilita la salida detallada. Si es 1, muestra el progreso y el rendimiento de vez en cuando (cuantos más árboles, menor es la frecuencia).

- `max_leaf_nodes=None`; Cultiva árboles con `max_leaf_nodes` de la mejor manera. Los mejores nodos se definen como una reducción relativa de la impureza. Los valores deben estar en el rango $[2, \infty)$. Si es Ninguno, entonces un número ilimitado de nodos hoja.
- `warm_start=False`; Cuando se establece en `True`, reutiliza la solución de la llamada anterior para ajustar y agregar más estimadores al conjunto; de lo contrario, simplemente borra la solución anterior.
- `presort='deprecated'`
- `validation_fraction=0.1`; La proporción de datos de entrenamiento para reservar como conjunto de validación para la detención temprana. Los valores deben estar en el rango $(0.0, 1.0)$. Solo se usa si `n_iter_no_change` se establece en un número entero.
- `n_iter_no_change=None`; `n_iter_no_change` se usa para decidir si se usará la detención anticipada para finalizar el entrenamiento cuando la puntuación de validación no mejor, de forma predeterminada, se establece en Ninguno para deshabilitar la detención anticipada.
- `tol=0.0001`; Cuando la pérdida no mejora al menos en `tol` para iteraciones `n_iter_no_change` (si se establece en un número), el entrenamiento se detiene.
- `ccp_alpha=0.0`; Se elegirá el subárbol con la mayor complejidad de costos que sea menor que `ccp_alpha`.
- `subsample`: proporción de observaciones utilizadas para el ajuste de cada árbol. Si su valor es inferior a 1, se está aplicando *Stochastic Gradient Boosting*.
- `Colsample_bytree=0.0`; número de características utilizadas en cada árbol.

3.7.2.2.1.4 Modelo XGBoost 1: Rendimiento floración

La Floración del limón persa se presenta a lo largo de todo el año, la condición de clima frío o clima seco pueden traer como consecuencia un retardo del crecimiento vegetativo, por lo que la floración ocurre mayormente al final de esta temporada (Fernández Lambert, 2010).

Para la construcción del primer modelo XGBoost se consideran 7 variables de entrada. Las primeras dos corresponden a la cantidad y forma de plantación, cuatro de las variables son actividades correspondientes a lo que se conoce como Buenas Prácticas Agrícolas, variables relacionadas con la calidad del suelo, mantenimiento de las plantas, control de plagas y dos de las variables corresponden a variables no controlables, características propias del clima de la región.

3.7.2.2.1.5 Modelo XGBoost 2: Rendimiento brote

La Fructificación (Brote) se inicia a partir del segundo año del trasplante del injerto y se produce alrededor de 30 a 45 días después de la plena floración de la planta. La Maduración (Fruto), depende de la variedad, cuidados y el clima prevaleciente. Los frutos pueden estar listos para la cosecha a los 6 u 8 meses de la Floración (COVECA, 2005).

Para la construcción del segundo modelo XGBoost se consideran únicamente 4 variables de entrada. Cabe mencionar que estos modelos son secuenciales, es decir en rendimiento de la etapa anterior será una de las variables que alimente a este segundo modelo se considera la Nutrición del Suelo y la cantidad de Lluvia que reciben las plantas para esta segunda red.

3.7.2.2.1.6 Modelo XGBoost 3: Rendimiento fruto

El tercer modelo considera también 4 variables de entrada; para este modelo el rendimiento de la etapa anterior será una de las variables que lo alimente, se considera la Nutrición del Suelo y la cantidad de Lluvia que reciben las plantas para este tercer modelo.

3.7.2.2.1.7 Construcción de los modelos XGBoost

El entrenamiento de los modelos se realizó tomando en cuenta 7, 4 y 4 variables de entrada para los huertos seleccionados, respectivamente. La programación de los modelos XGBoost se hace en lenguaje Python con ayuda de la biblioteca XGBoost. Se establecen los siguientes hiperparámetros para cada modelo, con base a los rangos recomendados en las descripciones anteriores:

- datos de prueba de 25%
- `random_state=1`
- `n_estimators=1000`
- `max_depth=7`
- `subsample=0.7`
- `colsample_bytree=0.8`

Se determinan estos hiperparámetros para asegurarse de que no exista *overfitting* en los árboles generados, el resto se deja por default, una estructura general del modelo, como ejemplo, en este caso el modelo de floración, se muestra en la siguiente Figura 38.

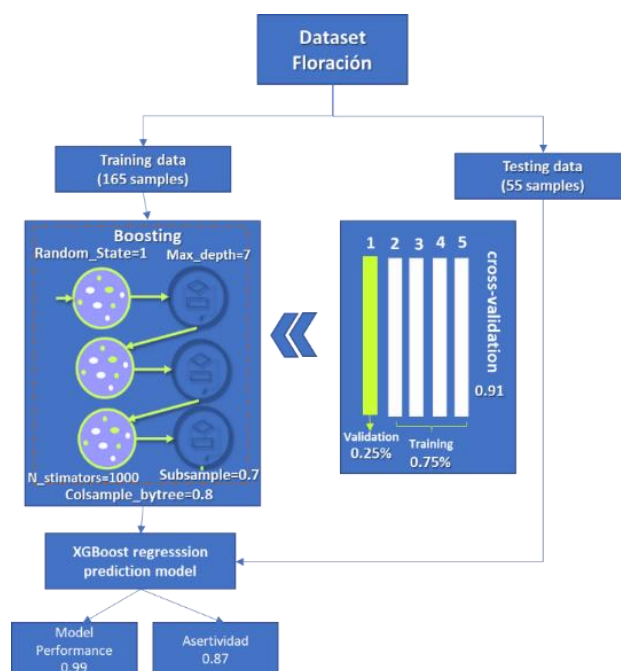


Figura 38 Diagrama del Modelo XGBoost para la etapa Floración.

Los tres modelos, el de floración, brote y fruto, presentan un rendimiento de entrenamiento de 0.99% respectivamente. Python realiza internamente una validación comparando los datos que simula con los resultados reales (25% del total de los datos que se introdujeron en el dataset para su entrenamiento) con un porcentaje rendimiento en prueba de 0.87, 0.93 y 0.97, respectivamente. Estos modelos son validados posteriormente, el resultado se muestra en la sección de Resultados.

Python posibilita también hacer una validación cruzada, una técnica muy utilizada para evaluar los resultados de un análisis estadístico y garantizar que son independientes de la partición entre los datos de entrenamiento y prueba, de esta manera se valida que el modelo de aprendizaje automático elegido es correcto y ayuda también a evitar el *overfitting*, los modelos de floración, brote y fruto obtienen un score de 0.91, 0.87 y 0.87 respectivamente en esta validación.

3.7.2.2.1.8 Programación de los modelos XGBoost para predicción de rendimiento por etapas

Datos de entrada

Se programan los modelos con una base de datos históricos proporcionada por la empresa, la base de datos inicial para cada etapa de producción del limón persa es de 220 datos para los modelos de Floración y Brote, y 114 para el modelo de la etapa Fruto.

Programación en Python®

Cómo ya se mencionó la programación en Python® se hace con la biblioteca XGBoost, se muestran a continuación fragmentos de la codificación de los tres modelos (Figura 39):

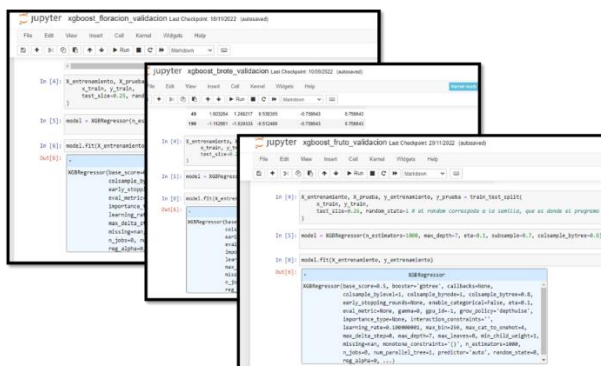


Figura 39 Programación Red Rendimiento Floración, Base de Datos.

Como se menciona en la sección anterior las pruebas se entrenan y muestran una eficiencia de entrenamiento de 0.99 cada una, e internamente los modelos prueban su capacidad de predicción con el porcentaje de datos establecido para ello (25% en este caso para los tres modelos), mostrando una eficiencia de 0.87, 0.93 y 0.97 (Figura 40).



Figura 40 Entrenamiento y Prueba de las RNA's.

3.7.2.2.2 Red neuronal para predicción del rendimiento de calidad exportación

La red fue construida con información proporcionada por la empaquera, extraída del control de producción interno (Figura 41).

DATOS DE PROCESAMIENTO: LLEGADA DE LIMÓN A LA EXPORTADORA Y MOVIMIENTOS EN EL PROCESO																					
LOTE	Proveedor	FRECUENCIA DE LLEGADA	PROMEDIO	PROMEDIO DE FRUTA POR LLEGADA A EMPACADORA (KILOS)	Entró	Desenrolló	Seguó	Preselección	Preselección	Seguó	Clasificadora	Calon-1	Calon-2	Calon-3	Calon-4	Calon-5	Calon-6	Calon-7	Calon-8	Banda-1	
					LIMÓN	TOPPEON					FANTASMA PRESELECCIÓN										
											Tercera	Desecho									
7	COMFRA	P(1.51)	86	2154	24673127	7334	24671733	51621	431	24619741	1936242	444552.2	319360.5	1362517	2632945	3553190	3567626	2553743	446884.8		
					86.16	100	0.0003	0.9997	0.00211	0.99172	0.00209	1.747E-05	0.99789	0.0811	0.0181	0.013	0.0553	0.1093	0.1443	0.104	0.0182
13	ADAN PERE	GEOIO.165	342	8522.609	CAMONET	3443134	1546	3441588	12321	635	3428632	372684.8	65271.06	84536.5	240032.5	336964.5	365371.1	313365.2	227760.3	309743.2	
					342	100	0.000443	0.999551	0.003785	0.950368	0.00359	0.000194508	0.996235	0.1087	0.019	0.0247	0.070026	0.09328	0.106565	0.091937	0.066429
4	GARCIA LEV	GEOIO.063	160	3369.72	GAR	674262.7	721	673541.7	2123	38	671580	7608.64	17768.15	12930	34676.88	53781.2	87856.27	82481	74344.13	10786.5	
					159.5888	100	0.001069	0.998931	0.003208	0.982416	0.003152	5.64162E-05	0.996793	0.113212	0.026465	0.019199	0.051948	0.095	0.130859	0.122853	0.11628
12	CUTILAHUM	P(2.87)	575	14369.16		0	445444.1	553	444891.1	1127	18	443746.1	23407.09	21540.63	1001167	4197.375	5300.9	6804.638	5862.615	7233.533	18764.83
					574.7665	100	0.001241	0.998759	0.002574	0.984279	0.002533	4.04593E-05	0.997428	0.052749	0.048543	0.002256	0.009459	0.011946	0.015335	0.013212	0.016301
21	TLALITETEL	P(3)	273	6814.781		0	306685.2	662	306003.2	712	5	305286.2	33732.311	17542.5	1800.167	11010.88	89579.8	28699.64	28507.15	35108.33	6152.333
					272.5313	100	0.002163	0.997834	0.002343	0.993026	0.002327	1.63397E-05	0.997657	0.110438	0.057462	0.005937	0.03706	0.06088	0.087458	0.053378	0.116001
3	San Vicen	GEOIO.0811	192	4792.984		0	800428.3	650	799776.3	2136	87	797555.3	37031.82	11283.25	10594.33	32842.25	64637.9	87876.91	84036.63	79313.13	12553.5
					191.7194	100	0.000812	0.999188	0.00278	0.960864	0.002671	0.00010878	0.99722	0.121662	0.014147	0.013284	0.041179	0.081045	0.1101	0.105368	0.099445
16	Juan Perez	GEOIO.234	114	2845.636		0	381745.3	270	381475.3	1859	49	379667.3	77285.55	10590.38	15415.17	50240.63	79152.3	91363.45	72566.92	46128.33	67532.33
					113.8259	100	0.000275	0.999725	0.001638	0.963527	0.001688	4.93248E-05	0.995363	0.078873	0.010088	0.015732	0.051273	0.080779	0.093241	0.074058	0.047076
9	Huasteco 4	GEOIO.060	241	6017.804		0	565673.5	207	565466.5	1407	19	564040.5	72472	7375.063	20340.17	44253.63	97797.2	59887.64	52968.54	47765.47	19419.39
					240.7121	100	0.000366	0.999634	0.002522	0.986676	0.002488	3.36006E-05	0.997478	0.128487	0.013075	0.036062	0.078458	0.102399	0.106141	0.093945	0.08472
2	Huasteco 3	GEOIO.173	269	7223.264		0	1191839	349	1191430	887	16	1190587	156175.5	33323.44	27370.67	61253.13	95398.1	128530.1	128136.8	99042.53	23065.5
					288.9305	100	0.000293	0.999707	0.000758	0.982281	0.000744	1.34286E-05	0.995042	0.131175	0.027989	0.022369	0.051453	0.080127	0.107625	0.083188	0.019373
17	Chistara	GEOIO.2811	197	4680.679		0	1544624	154	1543370	3101	76	153993	179095.1	28368.81	23200.83	65916	14230.7	141336	134191	98955.2	40128.17
					187.2271	100	0.000812	0.999188	0.002447	0.979878	0.002398	4.92429E-05	0.997553	0.116326	0.018426	0.018912	0.042745	0.074195	0.091801	0.08716	0.064728
14	Oaxaca	P(2.03)	616	15411.69		0	1880226	556	1879670	3887	121	1875662	19102.31	81738.82	16366	108481.6	219183.6	259758.5	230253.5	138933.5	37949

Figura 41 Datos Procesamiento y Registro de llegada de limón.

3.7.2.2.2.1 Presentación del módulo de redes neuronales artificiales

El objetivo de la creación de esta red es complementar el Módulo para la selección de proveedores conformado por tres Redes Neuronales predictoras del rendimiento por calidad de exportación, y de esta manera tratar de asegurar que el producto de calidad exportable sea suficiente, disminuir el riesgo de limón de terceras y daños para de esta manera minimizar las pérdidas en producto no conforme a las normas de exportación, asegurando de esta manera el cumplimiento de pedidos de los clientes.

Esta red predice los rendimientos esperados de cada calidad requerida, Calidad Japón (para el mercado asiático), Calidad Europa y el rendimiento de limón de desecho, para ello, fue necesario antes determinar las variables que conforman al sistema, la descripción de estas variables se hace de manera detallada en la Tabla 24; se describen los principales elementos del sistema y cómo fueron tratados para la elaboración de la red neuronal artificial, su estructura se muestra en la Figura 42.

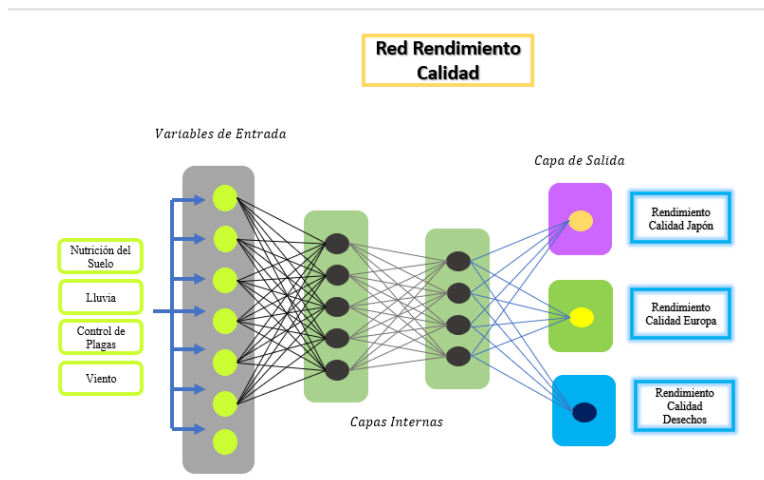


Figura 42 Red Neuronal Calidad.

3.7.2.2.2 Variables

Las **variables de entrada y salida** que se consideran son mostradas en la siguiente Tabla 24 y descritas en las Tabla 21 a Tabla 23 de la sección 3.7.2.1.1.

Tabla 24 Variables para la Red de Calidad. Fuente: Elaboración propia.

Variable	Descripción
Lluvia (E)	1 a 170mm/cm ³
Nutrición del Suelo (E)	Baja, Oportuna y Correctiva
Control de Plagas (E)	Nulo-Mínimo, Protección
Viento (E)	1 – 100km/hr
Rendimiento (S)	K/ha

La recolección de datos se centró en los registros de la planta sobre la llegada de producto y su clasificación una vez procesada, se centra en los huertos de Temporal que se tomaron para las modelaciones anteriores, esta información corresponde a huertos, proveedores del fruto, y propiedad de la Exportadora de Cítricos San Gabriel, S.A. de C.V.

3.7.2.2.3 Desarrollo de la arquitectura

El entrenamiento de la RNA se realizó tomando en cuenta 4 variables de entrada para los huertos seleccionados, respectivamente. La programación de la red se hace en lenguaje Python con biblioteca *sklearn.neural_network*. Se programa con un tamaño de datos de prueba de 25%, un `random_state=1` (semilla de la red). El algoritmo de entrenamiento usa el esquema one-vs-rest (OvR), esta clase implementa la regresión logística regularizada utilizando la biblioteca "liblinear", los solucionadores "newton-cg", "sag", "saga" y "lbfgs". El algoritmo a utilizar en el problema de optimización para estas redes es el valor predeterminado: "lbfgs" ideal para conjuntos pequeños (Pedregosa et al., 2011). La red presenta una eficiencia de 0.94. La validación de la red se hace por ahora con una prueba interna (25% del total de los datos que se introdujeron a la red para su entrenamiento) de Python con un porcentaje de coincidencia de 78%.

3.7.2.2.4 Datos de entrada

Se programan las redes con una base de datos inicial, la base de datos inicial para cada etapa de producción del limón persa es de 175 datos. Dado que el dataset, contiene

variables categóricas es necesario pasar el conjunto de datos por el proceso *One Hot Encoding*, en Python®, una vez realizado esto escaló de 4 a 13 variables de entrada con 266 registros. Para evitar que alguna de las variables tuviera más peso que el resto, se usa la estandarización de los datos, la estandarización de un conjunto de datos es un requisito común para muchos estimadores de aprendizaje automático, y el proceso es mencionado detalladamente en la sección 3.7.2.1.1.2, se muestra en la Figura 43 (recuadro verde) un fragmento de la tabla que muestra los datos escalados y previamente procesados con el método One Hot Encoding.

The screenshot shows a Jupyter Notebook interface. The top part displays the output of a data selection operation, showing a subset of the dataset with columns: `nutricionsuelo`, `lluvia`, `controldeplagas`, `gas`, `viento`, and `rendjapon`. The bottom part shows the code for creating a `StandardScaler` and applying it to the data after One-Hot encoding the categorical variables `controldeplagas` and `nutricionsuelo`. The final output is a data matrix where the original categorical columns have been replaced by their corresponding one-hot encoded columns (e.g., `controldeplagas_0`, `controldeplagas_1`, etc.) and the numerical columns have been scaled.

	lluvia	viento	controldeplagas_0	controldeplagas_1	controldeplagas_2	controldeplagas_3	nutricionsuelo_0	nutricionsuelo_1	nutricionsuelo_2	nutr
228	-0.460935	-0.540051	2.527625	-0.516398	-0.72111	-0.673463	-0.151911	-0.285133	-0.382821	
172	-0.890344	-0.582277	-0.395628	-0.516398	1.38675	-0.673463	-0.151911	-0.285133	-0.382821	
202	-0.561973	-1.088992	2.527625	-0.516398	-0.72111	-0.673463	-0.151911	3.507136	-0.382821	

Figura 43 Aplicación de One Hot Encoding al conjunto de datos de la etapa Floración.

3.7.2.2.2.5 Programación en Python

Cómo ya se mencionó la programación en Python se hace con la biblioteca *sklearn.neural_network*, las redes se entrenan y muestran una eficiencia de 0.99, internamente la red prueba su capacidad de predicción con el porcentaje de datos establecido para ello (25% en este caso). Posterior al entrenamiento, la red predice valores internamente resultando, por ejemplificar, el modelo con eficiencia de 0.74 sobre las predicciones, para la red calidad Europa.

3.7.2.2.3 Clasificación del rendimiento basado en el uso de fertilizantes

Para el tratamiento de los fertilizantes se evaluaron tres métodos, árboles de decisión, regresión logística y gradient boosting (reportado detalladamente en la sección de Anexo B), la técnica seleccionada es el árbol de decisión.

Se consideran 23 variables de entrada, descritas más adelante en la Tabla 25, las primeras nueve variables se engloban las características del huerto y aspectos climatológicos, las variables son: edad huerto, lluvia, temperatura, el tipo de injerto, y tipo de poda realizada en ese huerto; las siguientes variables son el número de aplicaciones de cada uno de los ingredientes activos en los fertilizantes, y herbicidas, se consideran los siguientes

componentes: zinc, Fosetil-al, azoxistrobin, fósforo, boro, sulfato ferroso, oxicloruro de cobre, glufosinato, calcio, azufre, glifosato, hormonas vegetales, magnesio, potasio, nitrógeno-fósforo-potasio, nitrógeno, y Suflafenacil.

3.7.2.2.3.1. Variables

Para la selección de variables se consultan las bases de datos proporcionados por la empresa correspondientes a un periodo de análisis de 4 años, 2016-2019; durante estos años se fue registrando la información de los cuatro huertos de estudio, se muestra a continuación en la Figura 44 uno de los formatos. Y posteriormente, en la Tabla 25 se describe cada una de las variables que se consideraron para esta segunda red.

The figure shows two overlapping screenshots of a data capture form. The form is titled 'Datos Históricos de Huerto, Aplicación de Follares, Herbicidas y Podas' and includes logos for 'TECHM MEXICO' and 'CONACYT'. It contains several sections for data entry, including 'Proyecto', 'Tipo de suelo', 'Corte de fruta', 'Calidad', 'Herbicidas', and 'Fertilizantes'. The form is designed to capture detailed information about agricultural practices and tree health over time.

Figura 44 Formato de Captura de Datos Históricos. Fuente: Empacadora.

Se incluyen 23 variables de entrada (Tabla 25), algunas de las cuales son descritas al calce de la siguiente tabla, y una variable de salida que clasifica el rendimiento como bajo o medio.

Tabla 25 Variables de Entrada de la RNA basada en Fertilizantes y Fungicidas.

Variables	
No Controlables	Controlables
Edad del huerto	Tipo de Poda
Lluvia	Injerto (Swingle o Macrophila&Swingle)
Temperatura promedio	Elemento Activo en Fertilizantes y Fungicidas
	Zinc
	Fosetil-Al
	Azoxistrobin
	Fósforo
	Boro
	Sulfato Ferroso

Oxicloruro de Cobre
Glufosinato
Suflafenacil
Calcio
Azufre
Glifosato
Hormonas Vegetales
Magnesio
Potasio
Sodio-Fósforo-Potasio
Nitrógeno
Sulfato de Amonio

La edad del huerto fue considerada debido a que está directamente relacionada con la capacidad de los árboles. Para los huertos de este estudio se realizan dos podas por temporada; Poda Estética (abril) y Poda Estresante (noviembre) a fin de propiciar la floración. Los huertos se trabajan con dos tipos de Injerto, el injerto Swingle y el Macrophila & Swingle.

La aplicación de fertilizantes y pesticidas estimula el rendimiento de árbol, el cultivo del limón requiere de un gran número de fertilizantes y pesticidas, actualmente existe una gran diversidad de productos y marcas comerciales, por lo cual sólo se consideran los componentes activos de los productos como variables de entrada. El azufre es aplicado al suelo y una vez que es atacado por las bacterias se transforma biológicamente en compuestos utilizables por las plantas. El calcio es importante en la formación de pectatos de calcio que actúan en el proceso de absorción de nutrientes. El glifosato es un herbicida de amplio espectro, elimina las hierbas y arbustos, se absorbe por las hojas y no por las raíces. Las hormonas vegetales son sustancias químicas que son producidas por ciertas células vegetales en sitios estratégicos de la planta y que son capaces de regular los fenómenos fisiológicos de las plantas. El magnesio es un nutriente esencial para las plantas, es elemento principal de la molécula de clorofila, por lo tanto, fundamental en la fotosíntesis, además favorece la absorción de fósforo, es activador enzimático. El potasio mejora la resistencia a enfermedades y la calidad de los frutos.

Los cítricos requieren de 16 tipos de nutrientes, tres son tomados del aire y agua, el resto se toman directamente del suelo a través de las raíces, estos elementos son nombrados macro elementos y micro elementos dependiendo de la cantidad que la planta requiera de ellos, dentro de los macroelementos se incluye el **nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre**; los microelementos incluyen al **boro**, cloro, cobalto, **cobre, hierro**, manganeso, molibdeno y **zinc**. El NPK (Nitrógeno-Fósforo-Potasio) es una combinación de componentes muy frecuentemente encontrada en la práctica de fertilización, el productor elige los grados variando proporciones de necesidad de composición del NPK requeridas por el huerto, el NPK posee un alto grado de solubilidad y promueve un pH y conductividad eléctrica adecuada en los suelos, esto permite una mejor asimilación de los nutrientes que son aplicados en el árbol. El nitrógeno es el principal nutriente que debe considerarse en la provisión por el riego, es el más fácil de manejar en fertirriego ya que existen muchas fuentes solubles y económicas, esta sustancia enriquece el suelo, favorece el crecimiento vegetal (las raíces) y aumenta la producción.

3.7.2.2.3.2 Árbol de decisiones

Los árboles de decisión (DT) son un método de aprendizaje supervisado no paramétrico que se utiliza para la clasificación y la regresión. El objetivo es crear un modelo que prediga el valor de una variable de destino mediante el aprendizaje de reglas de decisión simples deducidas de las características de los datos. Un árbol puede verse como una aproximación constante por partes (Pedregosa et al., 2011), existen los árboles de regresión y los árboles de clasificación, para este trabajo se opta por el árbol de clasificación, ya que se busca clasificar el rendimiento.

Los modelos basados en árboles de decisión son capaces de utilizar predictores categóricos en su forma natural sin necesidad de convertirlos en variables dummy mediante one-hot-encoding, en scikit-learn, sin embargo, aún es necesario hacer one-hot-encoding para convertir las variables categóricas en variables dummy, por lo que esta codificación se aplica para la construcción del árbol (Rodrigo, 2020).

Para el desarrollo del árbol de decisiones (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se hace uso de la biblioteca `scikit-learn 1.02` disponible en lenguaje Python. Se programa el árbol de decisiones con una profundidad máxima de 3 niveles, el modelo obtiene un score de 0.82, posteriormente se realizan las predicciones y la validación

cruzada obteniendo un porcentaje de asertividad del 87% (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

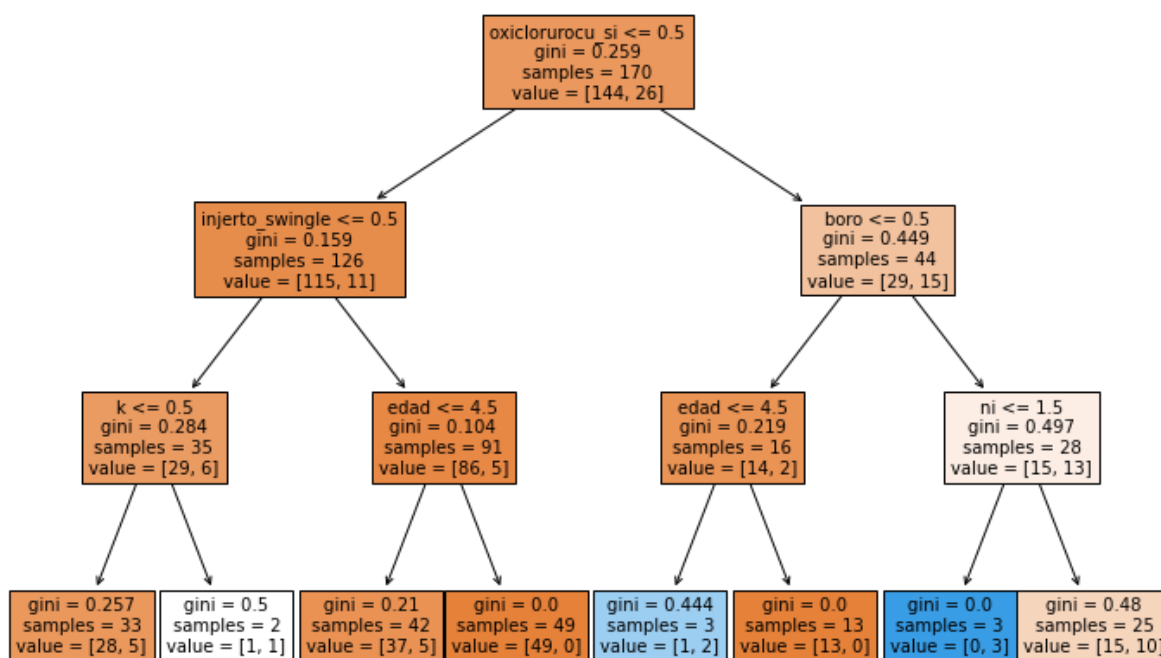


Figura 45 Árbol de Decisiones para Clasificación del Rendimiento basado en el uso de Fertilizantes.

Puede visualizarse en el árbol de decisiones que la variable de mayor peso es la aplicación de Oxicloruro de Cu, si existe una aplicación la segunda variable de decisión es el tipo de Injerto, en este caso el tipo Swingle, de no haber aplicación de Oxicloruro de Cobre la siguiente variable de decisión es la aplicación Boro, en importancia, las siguientes variables consideradas son la aplicación de Potasio, la Edad del huerto, y la aplicación de Nitrógeno.

Para la validación del árbol se hacen predicciones con la base de datos, obteniendo 148 predicciones correctas de 170, correspondientes al 87% de asertividad antes mencionado.

3.7.3 Desarrollo de módulos de evaluación de eficiencia de la planta

Uno de los objetivos principales de la creación de todo el modelo de gestión del conocimiento para la gestión de la cadena de suministro basado en agentes inteligentes es mejorar la eficiencia, la métrica seleccionada para medir dicha eficiencia es el nivel de servicio, que se interpreta, para el caso de estudio, como la razón entre lo que se produce y la demanda que se debe cubrir, para esta segunda parte se propone un modelo de pronóstico

de la demanda, para de esta manera con apoyo del modelo de simulación del proceso, determinar si la empresa es capaz de satisfacer los pedidos que se generan. Se describe a continuación el desarrollo del modelo para la predicción de la demanda.

3.7.3.1 Pronóstico de la demanda

Sin demanda, no hay negocio. Y sin un conocimiento profundo de la demanda, las empresas no son capaces de tomar decisiones correctas sobre la producción, el personal, insumos, etc. Cuando se dispone de datos históricos del producto y los patrones son evidentes, las organizaciones suelen emplear la técnica de análisis de series temporales para la previsión de la demanda a fin de detectar variaciones estacionales de demanda, patrones cíclicos y las principales tendencias de ventas.

La previsión de la demanda nunca será precisa al 100%, pero brinda un referente que permite a la empresa tomar medidas para mejorar, en este caso de estudio, el rendimiento de la cosecha para satisfacer esta demanda, y así aumentar la eficiencia operativa, y ahorrar dinero. Ayuda a reducir los riesgos y a tomar decisiones financieras eficientes que repercuten en los márgenes de beneficio, todos los planes estratégicos y operativos se formulan en torno a la previsión de la demanda. Se propone el desarrollo de un modelo para predecir la demanda de limón persa.

3.7.3.1.1 Generación del conjunto de datos para predicción de la demanda

La empresa cuenta con algunos registros históricos de los pedidos mensuales de sus dos clientes principales, USA y Europa, el registro corresponde a los años 2015-2021 (solo el primer semestre este último año). La empresa proporcionó la información referente a los pedidos recibidos mensualmente de sus dos clientes principales Estados Unidos (USA) y Europa, las bases de datos contienen la información sobre la fecha y destino del almacén de la empresa, la cantidad de pedidos se muestra clasificada por presentación 10l y 40lb.

De estas bases de datos se extrae la información de interés para la modelación, en este caso las fechas en que se generan los pedidos y el tamaño de pedido. Previo al desarrollo de este modelo se ha realizado una evaluación de tres diferentes técnicas de pronóstico de la demanda, los modelos que se desarrollaron para la selección se programaron con los datos por presentación, es decir un modelo para la demanda de 10l y uno para la presentación de

40lb de cada técnica. Finalmente se obtienen mejores resultados cuando los datos son analizados en conjunto, es decir por kilos totales y con la técnica de suavizado exponencial.

Se hace un concentrado de los kilos totales de ambos clientes por meses ya que el interés principal es la cantidad total de kilogramos de limón persa que serán necesarios para satisfacer la necesidad de los clientes. Este algoritmo estará alimentado con esta base de datos de 79 registros, el periodo de obtención de los datos es igual que los anteriores 2015-2021.

3.7.3.1.2 Prueba de identificación de distribución de los datos.

Es necesario, previo al desarrollo del modelo de predicción analizar los datos para determinar si son óptimos para alguna de las técnicas disponibles. Los datos son analizados tradicionalmente con una prueba de bondad de ajuste, para determinar si los datos se ajustan a alguna distribución adecuada para estos modelos.

Se realizan pruebas para determinar a qué distribución se aproximan las observaciones, con la idea de conocer si es posible modelar con alguna técnica en específico, los resultados muestran que los datos no se ajustan a las probabilidades Exponencial, Weibull; para las distribuciones Normal, Lognormal, y Lognormal de 3 parámetros. Los datos se ajustan en su mayoría a ambas distribuciones (recuadros amarillos en la Figura 46).

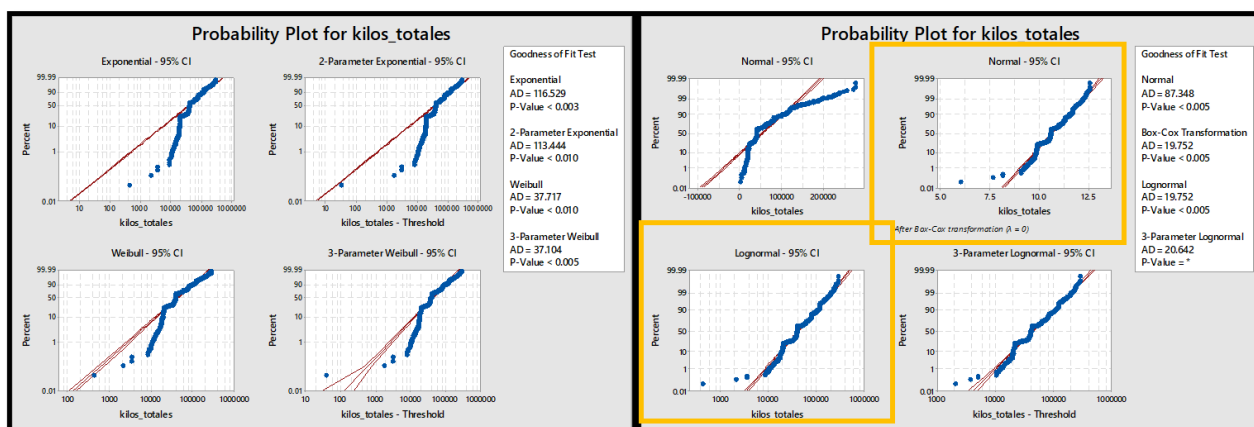


Figura 46 Prueba de Identificación de ajuste de los datos a distribución de probabilidad Exponencial y Weibull.

Puede observarse que la mayoría de los datos se ajustan a una distribución Normal y Lognormal.

3.7.3.1.2 Exponential smoothing

El desarrollo del modelo Exponential Smoothing inicia con la importación de la base de datos, estos se procesan en un archivo de extensión .csv, es decir caracteres separados por comas, se realiza un Plot de los datos para visualizar el comportamiento de estos y visualizar que los periodos se hayan considerado completos (Figura 47).

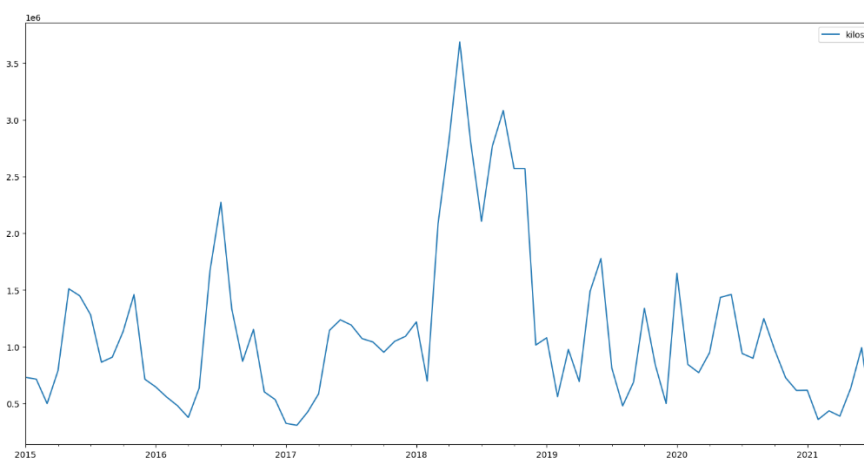


Figura 47 Plot Datos para Exponential Smoothing.

En el gráfico se puede observar que si se consideran los datos de manera agrupada, y no por cliente o presentación, el comportamiento de la demanda puede ser mejor interpretado, son notorios los picos anuales que representan la alta demanda en temporada alta de cosecha, se puede ver también que la demanda de producto se ha mantenido año con año en un rango, a excepción de 2018 cuando hubo un alto incremento, el decremento que se observa en 2021 se debe a que de ese año solo se cuenta con siete meses de información, sin embargo el modelo no se desarrolló por inspección visual únicamente, por lo que se realizan ciertas pruebas a los datos.

Primero se realiza un gráfico de Promedio Móvil que captura los movimientos de la media, para determinar si tiene alguna tendencia, se crea la función con los módulos Pandas y Matplotlib de Python, el gráfico generado es el mostrado en la Figura 48.

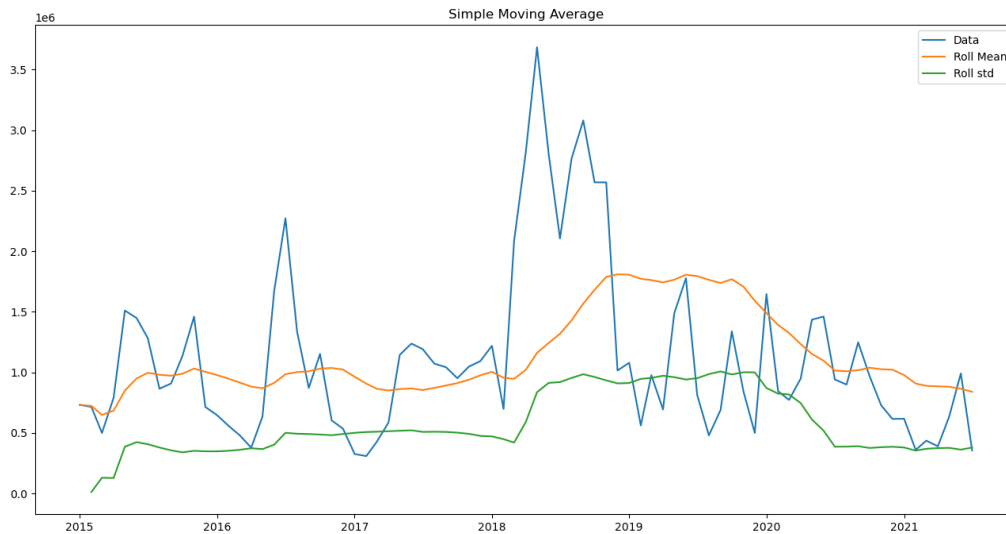


Figura 48 Gráfico de Promedio Móvil.

En el gráfico se puede ver que la serie de datos es estacional con incremento en el periodo correspondiente a 2019-2020. Para confirmar la estacionalidad de la prueba se realiza un test de estacionalidad, se realiza el test de Dickey-Fuller, que básicamente lo que hace es remover las autocorrelaciones de los datos y probar si son estacionarios.

```
Results of Augmented Dickey-Fuller Test:
Test Statistic      -3.241848
P-Value             0.017687
Lags used           0.000000
Number of observations used  78.000000
dtype: float64
```

Figura 49 Resultados Dickey-Fuller Test.

En este caso la hipótesis nula, es que los datos son estacionarios, para ello se tiene que dar que el P-Valor sea menor que 0.05, y que el Test estadístico sea lo más negativo posible, se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que tanto el P-Value como el Test Statistic cumplen con la hipótesis nula, es decir los datos son estacionarios. Una vez analizados los datos se procede a crear el modelo con los hiperparámetros mostrados en la imagen, se usa un Exponential Smoothing de tipo aditivo dada la estacionalidad de los datos, se especifica que la frecuencia será mensual ya que los datos son presentados de esta manera y el periodo será 12 ya que son los meses por año. El modelo se entrena y se hacen predicciones, se genera un gráfico comparativo de ambos datos, los de entrenamiento vs los de la predicción del modelo, además de los datos reales (Figura 50).

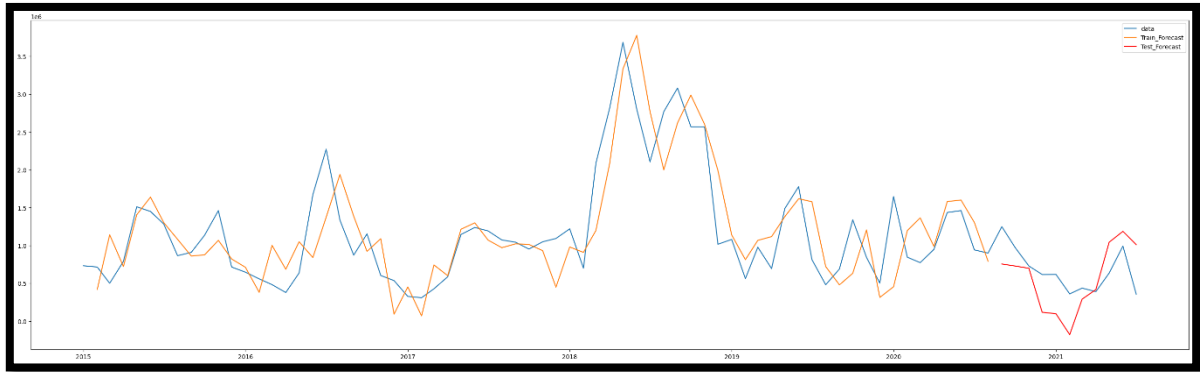


Figura 50 Datos reales, entrenamiento y predicciones.

Una vez que el modelo está entrenado se pueden hacer predicciones (Figura 51).

```
prediccionprueba = exp_model_fit.predict('2021-10-01')

print (prediccionprueba)

2021-10-01    743469.127618
Freq: MS, dtype: float64
```

Figura 51 Predicciones con el modelo.

Con esto concluye el desarrollo del modelo de predicción de la demanda.

3.7.3.1.3 Interfaz del modelo de predicción de la demanda (exponential smoothing)

Al igual que con los módulos anteriores se ha desarrollado una aplicación (interfaz gráfica) para que pueda ser utilizada, en este caso por la empresa, la interfaz se ha desarrollado en el lenguaje de programación Python. El proceso es similar a los anteriores, se muestra a continuación de manera breve, en la Figura 52 y Figura 53, el producto final de este módulo.



Figura 52 Módulo de Predicción de la demanda, ventana principal.

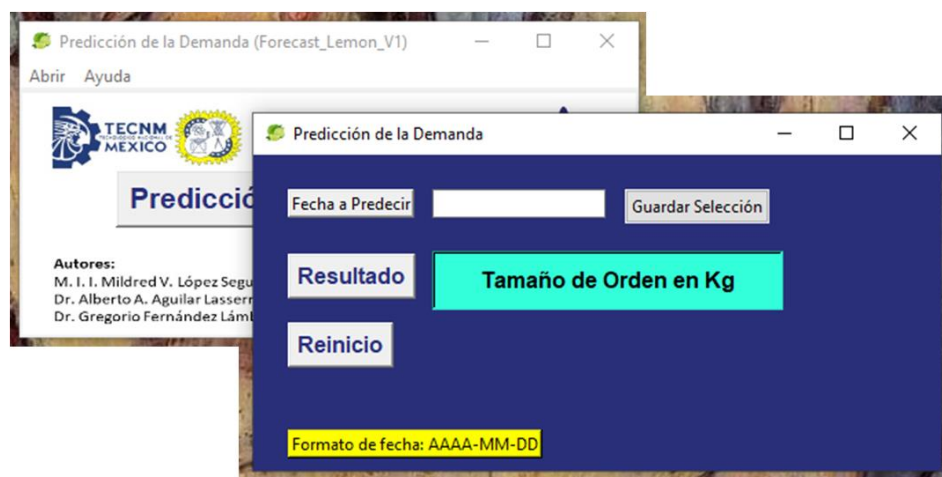


Figura 53 Sub-ventana del módulo de predicción de la demanda.

El funcionamiento de la aplicación se describe en un manual que también ha sido cargado en la aplicación misma. Basta con escribir la fecha que se quiere predecir y presionar el botón de “Resultado”.

3.8 Etapa 6 Construcción y validación del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes

El sistema de gestión del conocimiento está compuesto por el modelo de la cadena de suministro agrícola basado en agentes y el modelo de simulación optimizado y desarrollado en Simio®, además de los módulos de apoyo a la decisión desarrollados en lenguaje libre,

Python, y conjuntados en dos softwares (predicción del rendimiento y selección de proveedores) para proporcionar a la empresa y a los agricultores (Figura 54).

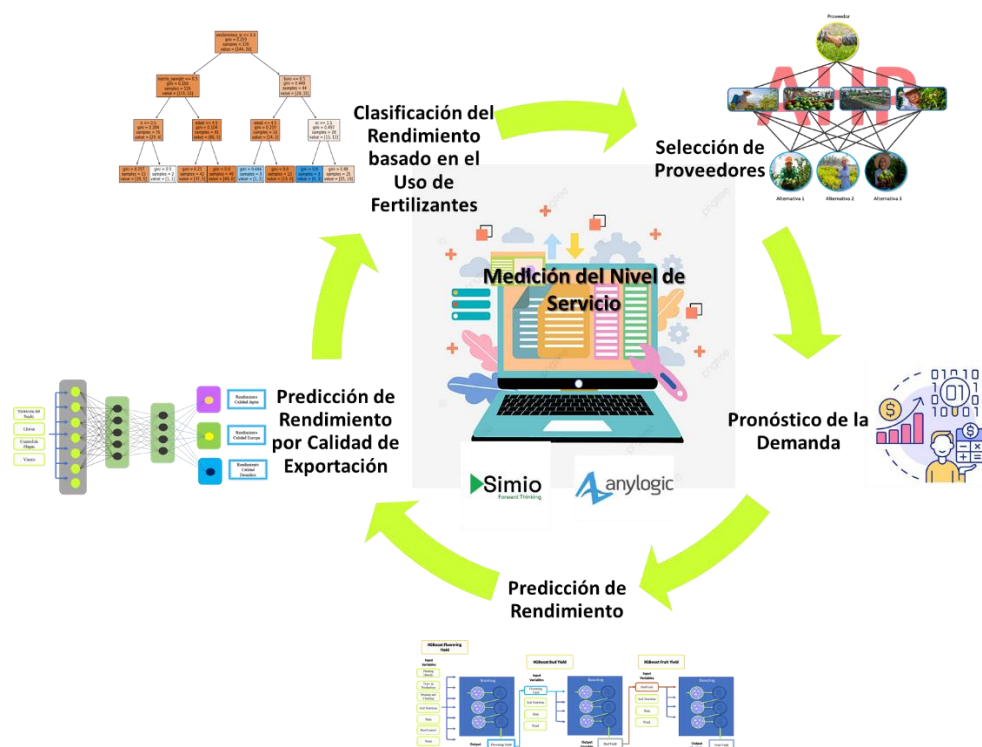


Figura 54 Sistema de Gestión del Conocimiento para la GCS de Limón Persa.

El sistema se ha diseñado y desarrollado de tal manera que capta la información y conocimiento en cada una de los eslabones de la cadena de suministro, asegurando de esta manera que la toma de decisiones en cada parte del proceso sea una toma de decisiones informada y basada en modelos eficientes entrenados con información y dirección de los expertos.

Cada uno de los modelos ha sido validado de manera individual con base a las características propias de estos. El modelo de simulación en Simio® así como el modelo de agentes se valida con los expertos; debe tenerse en consideración que la producción de limón persa, la cadena de suministro del caso de estudio, el limón persa, es un sistema de producción que presenta una gran variabilidad debido a que tiene dos temporadas de cosecha, una alta y una baja, por lo cual una validación cuantitativa no es aplicable, el desempeño de estos modelos se ha validado comparando los resultados con el comportamiento promedio real de empresa en ambas temporadas.

Los modelos de apoyo a la decisión cuantitativos han sido validados con pruebas estadísticas que comparan los valores reales, disponibles en las bases de datos históricos con los predecidos por los modelos.

3.9 Conclusiones

El contenido de este capítulo describe el desarrollo de los modelos que componen el sistema de gestión del conocimiento para la gestión de la cadena de suministro del limón presa; se ha reportado el desarrollo de los modelos de apoyo a la decisión y el modelo de agentes: un modelo de selección de proveedores AHP, los modelos XGBoost secuenciales para predicción de Rendimiento en kg/he, una neuronal para la predicción del rendimiento por Calidad de Exportación, un árbol de decisiones para la clasificación del rendimiento basado en el uso de fertilizantes y/o fungicidas; para todos estos módulos se construyó una interfaz gráfica que será proporcionada a los agricultores para hacer más eficiente la toma de decisiones con respecto a la aplicación de las BPA y de esta manera mejorar las probabilidades de un mejor rendimiento de producto con calidad de exportación y minimizar los desechos. También se ha desarrollado un modelo de pronóstico de la demanda que en combinación con los resultados de los dos modelos de simulación de la cadena de suministro (Simio® y AnyLogic) permitirá a la empresa una toma de decisiones eficiente. La metodología propuesta se fundamenta en la amplia aplicación de la técnica de IA, Agentes Inteligentes, específicamente Sistemas Multi Agentes, dada la naturaleza de la problemática a tratar, la complejidad en la gestión de la cadena de suministro del caso de estudio, una cadena de suministro agrícola cuya funcionalidad se ve ya impactada por la presencia de incertidumbre, variables combinatorias y decisiones multicriterio; la técnica de SMA se presenta como una solución que permitirá optimizar la gestión de la cadena de suministro y hacer manejables estos factores no controlables mediante una correcta gestión del conocimiento que permita realizar las actividades más importantes de gestión de la CS de una manera ágil, y eficiente.

Capítulo 4. Resultados y conclusión

4.1 Introducción

Las cadenas de suministro, están compuestas de distintos procesos que implican la toma constante de decisiones, que impactan de manera positiva o negativa en cada uno de ellos, y que pueden representar grandes pérdidas para la empresa si estas decisiones son tomadas sin el respaldo de información eficiente, es decir con la presencia de incertidumbre. La subjetividad de esta toma de decisiones, la existencia de variables combinatorias y decisiones multiobjetivo; son otras de las características que hacen que la administración de la cadena de suministros pueda ser analizado como un problema semiestructurado, con la implementación en la Gestión del Conocimiento en la Gestión de la Cadena de Suministros el impacto negativo de estas características puede ser reducido y a su vez el proceso de toma de decisiones optimizado.

En este capítulo se documentan el desarrollo de la metodología propuesta para la creación del SGC para la GCS y los resultados de desarrollo de cada etapa, la documentación se encuentra estructurada tomando como base lo descrito en el capítulo anterior, consta de manera general de 6 etapas, para cada una de ellas se muestra primero el desarrollo y una conclusión en la cual se discuten los resultados.

4.2 Resultados: Etapa 1 revisión del estado del arte

El estado del arte se ha revisado teniendo como objetivo conocer el estado actual de la aplicación de la Gestión del Conocimiento en Gestión de la Cadena de Suministro, aplicación de las técnicas de Inteligencia Artificial, y Gestión de la Cadena de Suministro particularmente.

Tal cual se describe en el la sección 2.2, específicamente en la Tabla 6 el enfoque de la revisión del estado del arte es técnico, y busca dar respuesta a preguntas específicas que han servido de apoyo para el desarrollo del Sistema de Gestión del Conocimiento para la Gestión de la Cadena de Suministro propuesto en este trabajo de investigación, se detallan a continuación de manera resumida los resultados del Análisis del Estado del Arte.

La Figura 55 muestra el concentrado de la información relevante del análisis del estado del arte.

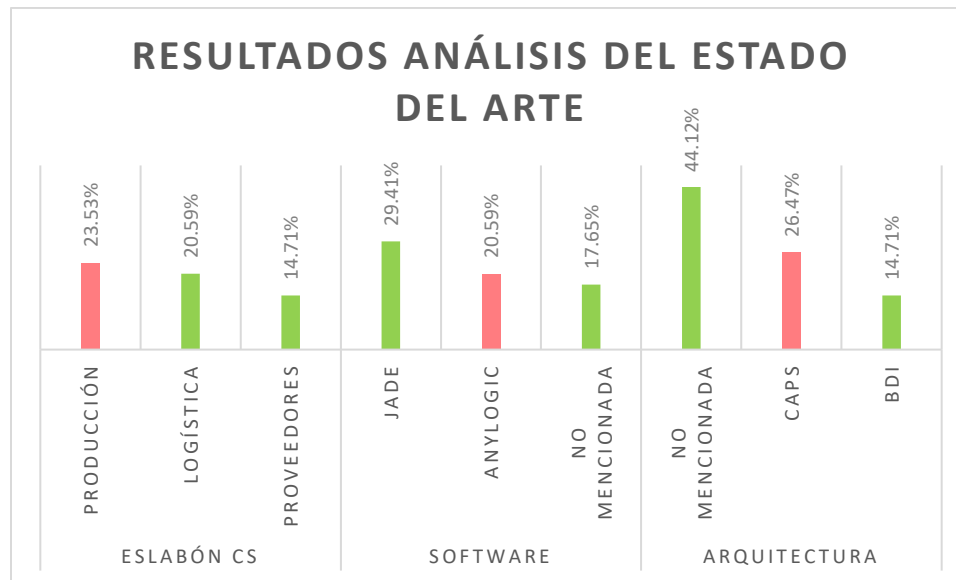


Figura 55 Resultados del Análisis del Estado del Arte.

En el gráfico se concentra la información de interés tal como aquellos procesos de la CS en los cuáles se han enfocado los SMA diseñados, se consideran únicamente los tres más importantes en cada caso, así también se muestra lo referente al software de mayor uso para el desarrollo de estos SMA para GCS, y finalmente el tipo de arquitectura de agentes reportada para estos sistemas.

Se encontró que 23.53% de los sistemas o modelos de múltiples agentes que se han desarrollado de 2016 a 2020 han tenido aplicación en el área de Producción/Manufactura o Sistemas de Manufactura, el software más utilizado con un 29.41% de incidencia es JADE seguido de AnyLogic®, el tipo de arquitectura predominante, sin considerar el hecho de que la mayoría de los trabajos revisados no lo menciona, es la arquitectura en niveles o capas.

Algo que resulta evidente es que no se ha abordado la gestión del conocimiento como tal para la gestión de la cadena de suministro, si bien se han desarrollado sistemas para ciertos eslabones no se ha hecho de la capitalización del conocimiento y experticia la base de estos.

4.3 Resultados: Etapa 2 Determinación de las problemáticas en el flujo de conocimiento de la cadena de suministro e identificación de áreas de oportunidad

En esta etapa se realiza la modelación del proceso de la empacadora, desde proveedores hasta la salida de producto, así como la medición del nivel de servicio y una

optimización de éste; el modelo de simulación se desarrolla en el software Simio® y sirve como base para analizar el flujo del proceso y de esta manera determinar aquellas actividades que están gestionando información, conocimiento, las cuales representan un área de oportunidad de mejora. Se observa qué desde el inicio del proceso con la llegada de producto de diferentes proveedores, existe ya la presencia de incertidumbre, la cantidad y calidad del producto que llega a la empresa no es un valor constante, y depende de muchos factores inciertos, en este eslabón de la CS del limón persa se identifica la posibilidad de crear un SAD que permita gestionar el conocimiento y a su vez reducir la incertidumbre. Se presenta a continuación la validación de los datos obtenidos en el modelo realizados en Simio®, el parámetro de interés en esta simulación es el referente a los proveedores, se realiza con la prueba t-pareada partiendo con los datos que la empresa obtuvo con anterioridad (Figura 56). Para ello, se realiza esta prueba en un software estadístico. La verificación y validación del modelo de simulación, como se muestra en la Tabla 26 y Tabla 27, de donde se obtiene la conclusión con respecto a la generación de llegadas de producto, intervalo de confianza contiene el 0 de manera que no se duda sobre la validez del modelo.

Tabla 26 Llegada de cada proveedor a la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. (kilos) 1 de 2.

Proveedor	FRECUENCIA DE LLEGADA	PROMEDIO DE FRUTA POR LLEGADA (Rejas)	Promedio de Fruta por Llegada Simulada
El Bocol	GEO (0.103)	149	298
San Gabriel (Aotoxco)	P (1.99)	351	351
Huasteco 1 2	GEO (0.26)	340	340
Juan Carlos	GEO (0.337)	377	377
El Bocol	GEO (0.103)	149	149
San Gabriel (Aotoxco)	P (1.99)	351	351
Huasteco 1 2	GEO (0.26)	340	680
Juan Carlos	GEO (0.337)	377	377

Tabla 27 Llegada de cada proveedor a la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. (kilos) 1 de 2.

Proveedor	FRECUENCIA DE LLEGADA	PROMEDIO DE FRUTA POR LLEGADA (Rejas)	Promedio de Fruta por Llegada Simulada
El Bocol	GEO (0.103)	149	149
San Gabriel (Aotoxco)	P (1.99)	351	351
Huasteco 1 2	GEO (0.26)	340	340
Juan Carlos	GEO (0.337)	377	340
El Bocol	GEO (0.103)	149	149
San Gabriel (Aotoxco)	P (1.99)	351	351
Huasteco 1, 2	GEO (0.26)	340	340
Juan Carlos	GEO (0.337)	377	377

Tabla 28 Llegada de cada proveedor a la Exportadora de Cítricos San Gabriel S.A. de C.V. (kilos) 2 de 2.

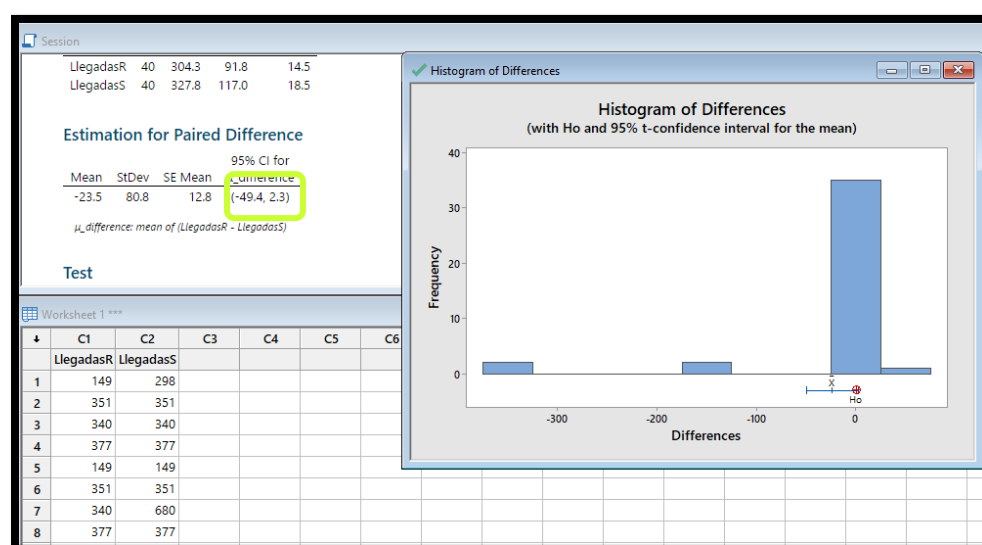


Figura 56 Resultados Prueba t-Pareada, llegada de producto Proveedores.

Para obtener la información simulada y compararla con el promedio de llegadas establecido en la información proporcionada por la empresa se realizaron un total de 16 corridas (Figura 57), se muestra un fragmento de ello con fines ilustrativos, el interés principal se concentra en los resultados de la prueba t-Pareada.

Object Name	Data Source	Category	Data Item	Statistic	Average Total
bocel	Processing	Throughput	NumberEntered	Total	149.0000
huasteco	OutputBuffer	Throughput	NumberEntered	Total	340.0000
huasteco	OutputBuffer	Throughput	NumberExited	Total	340.0000

Figura 57 Corridas del modelo de simulación de la CS en Simio (Fragmento).

Existen al menos tres áreas de oportunidad en cuanto a la gestión de conocimiento para ciertos procesos de la cadena de suministro del limón persa, la llegada de órdenes (pedidos) es una de ellas, la información proporcionada referente a estos pedidos fue analizada para el desarrollo del modelo de simulación y muestra no seguir una distribución de probabilidad, y al observar los reportes salta a la vista que existe una gran variabilidad en cuanto esto, por lo cual trabajar con un pronóstico de la demanda permitirá hacer más eficiente el control del nivel de servicio de la planta, en conjunto a una correcta gestión de inventarios haría más eficiente este eslabón de la CS, permitiendo cumplir con los pedidos y garantizando el abasto, en equilibrio, del almacén. La validación se complementa durante una reunión de trabajo con los expertos de sistemas de producción, y responsables de la empresa.

4.4 Resultados: Etapa 3 Modelación de la cadena de suministro del caso de estudio con el enfoque de agentes inteligentes

Para esta etapa la actividad principal es el desarrollo de un **Modelo Conceptual de la CS Agrícola** y una vez hecho esto también se considera seleccionar la herramienta de tecnología de agentes para la construcción de los modelos inherentes a ella.

El resultado de esta etapa se encuentra ya documentado en la sección 3.5 y 3.6, el modelo desarrollado se explica a detalle en esa sección puesto que se considera que el lector tendrá un mejor entendimiento del desarrollo de los modelos de las etapas siguientes si ha leído ya este modelo, por lo que se muestra desde el Capítulo 3.

En cuanto a la selección de la herramienta para la construcción del modelo de agentes, se ha especificado también en la sección 3.5.3 que el software en el cual se trabaja es AnyLogic®, tal como se menciona en esa sección este software es uno de los más utilizados para el desarrollo de Sistemas Multi Agentes, y durante la revisión de la literatura se pudo ver aplicado su alcance.

4.5 Resultados: Etapa 4 Determinación de la arquitectura del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes

La arquitectura de agentes se muestra en el **Modelo Conceptual de la CS Agrícola** detallado en la sección 3.5.3 del Capítulo 3, para llegar a esto fue necesario el desarrollo y análisis del modelo de simulación. La creación y diseño del Modelo Conceptual de CS Agrícola conlleva la determinación de la arquitectura de agentes por lo cual se muestran detalladamente de manera conjunta en la sección antes mencionada.

4.6 Resultados: Etapa 5 Desarrollo del modelo de agentes y módulos de apoyo a la decisión

La Etapa 5 tiene como actividades el desarrollo del modelo de agentes de la CS del caso de estudio y el desarrollo de los módulos de apoyo a la decisión que se hayan determinado durante la modelación de la CS.

4.6.1 Validación del modelo de agentes

El modelo de agentes se desarrolla posterior al desarrollo del modelo de simulación en Simio® donde se determinó que el parámetro más importante para optimizar el nivel de servicio de la cadena de suministro es el Inventario inicial, que se entiende como la cantidad de limón que llega a la empresa, por lo cual el diseño del modelo cambia con respecto a lo planeado inicialmente.

Se tenía ideado que todos los eslabones se controlaran dentro del modelo de agentes, es decir la información generada por los módulos alimentaran al modelo de agentes, sin embargo, se tiene conocimiento de que precisamente el bajo uso de tecnología por parte de los agricultores es uno de los problemas que impacta negativamente al rendimiento de limón, por lo que se consideró que desarrollar estos módulos como aplicaciones independientes y creadas en lenguaje libre, lo que permite que estas sean compartidas a los agricultores para su uso sin

que esto represente un gasto en pago de licencias, es una mejor opción, y sobre todo permitirá que el sistema sea utilizado realmente en el caso de estudio y que toda la información y conocimiento que se utilizó para el desarrollo de estos módulos de verdad fluya y genere valor a lo largo de la cadena de suministro.

El modelo de agentes se considera como un modelo general que representa, si, a los eslabones importantes de la CS, los proveedores, la planta y los clientes que son representados por los centros de distribución en el extranjero de la empresa, el modelo mide el nivel de servicio que es la métrica de desempeño elegida y pondera diferentes escenarios en los cuales se manipula el inventario inicial para conseguir el mejor nivel de servicio.

4.6.1.1 Análisis de Sensibilidad

Resultados obtenidos en el modelo de AnyLogic:

- a) La consistencia dimensional se utiliza para analizar que las ecuaciones y series de tiempo estén conectados correctamente. En este caso los valores de salida de los submodelos; empacadora y generación de órdenes; utilizan kilogramos de producto (Kg) para determinar el nivel de servicio, que se interpreta como la capacidad-eficiencia de la cadena de suministro para satisfacer la demanda.
- b) La modelación de la cadena de suministro permite identificar posibles escenarios ante posibles variaciones en las condiciones del sistema: para este análisis se toman como base los resultados de la optimización del nivel del servicio del modelo de simulación desarrollado en Simio®, los mejores resultados se alcanzan con la manipulación del parámetro “Inventario Inicial”, y es precisamente este parámetro el que es modificado para observar el comportamiento del modelo de agentes. Este análisis permite estimar la eficiencia de la cadena de suministro y presenta propuestas para mejorar el nivel de servicio que permiten al usuario determinar, en este caso la cantidad de producto que debe ser adquirida a terceros para, en conjunto con el producto ya seleccionado como calidad exportación, satisfacer la demanda de los centros de distribución.

La Tabla 29 muestra los valores de nivel de servicio obtenidos. En el modelo de agentes, una vez que el nivel de servicio cae por debajo de 0.7 el agente reactivo aumenta el “Inventario Inicial” en un 15, 20 y 30%, esto se hace de manera continua y “en tiempo real” y recalcula

el nivel de servicio; para, de esta manera, proponer al usuario una medida para lograr la satisfacción de la demanda. La programación de este evento se realiza considerando la cantidad de producto que está llegando al área de empaque, es decir, aquella que ya fue seleccionada como calidad exportación.

Como puede observarse para un incremento en el nivel de servicio, tal cual se concluyó a través de la modelación en Simio®, es necesario un aumento en el inventario inicial, esto puede lograrse a través de la compra de producto a proveedores externos, sin embargo, durante la temporada baja de cosecha el producto escasea en toda la zona, además de que el costo por tonelada aumenta al adquirir el producto en centrales de abasto; esto hace que el sistema sea vulnerable y lograr la meta a través de esta gestión sea complejo.

Tabla 29 Nivel de Servicio del Modelo de Agentes (muestra).

Ns_Normal	Ns_15	Ns_20	Ns_30	Ns_Normal	Ns_15	Ns_20	Ns_30
1.701	1.701	1.701	1.701	1.032	1.032	1.032	1.032
1.701	1.701	1.701	1.701	1.032	1.032	1.032	1.032
1.685	1.685	1.685	1.685	0.992	2.652	2.724	2.869
1.685	1.685	1.685	1.685	0.992	2.652	2.724	2.869
1.672	1.672	1.672	1.672	0.949	2.535	2.604	2.742
1.672	1.672	1.672	1.672	0.949	2.535	2.604	2.742
1.658	1.658	1.658	1.658	0.901	2.408	2.473	2.604
1.658	1.658	1.658	1.658	0.901	2.408	2.473	2.604
1.628	1.628	1.628	1.628	0.852	2.277	2.339	2.463
1.628	1.628	1.628	1.628	0.852	2.277	2.339	2.463
1.219	1.219	1.219	1.219	0.807	2.158	2.216	2.334
1.219	1.219	1.219	1.219	0.807	2.158	2.216	2.334
1.199	1.199	1.199	1.199	0.764	2.042	2.098	2.209
1.199	1.199	1.199	1.199	0.764	2.042	2.098	2.209
1.173	1.173	1.173	1.173	0.723	1.933	1.986	2.091
1.173	1.173	1.173	1.173	0.723	1.933	1.986	2.091
1.333	1.333	1.333	1.333	0.682	2.282	2.352	2.491
1.333	1.333	1.333	1.333	0.682	2.282	2.352	2.491
1.111	1.111	1.111	1.111	0.909	2.416	2.482	2.613
1.111	1.111	1.111	1.111	0.909	2.416	2.482	2.613
1.071	1.071	1.071	1.071	0.86	2.285	2.347	2.471
1.071	1.071	1.071	1.071				

La Figura 58 muestra el impacto de la variable “Inventario Inicial” sobre comportamiento del nivel de servicio actual, y los escenarios 2, 3 y 4, correspondientes al aumento de volumen de producto.

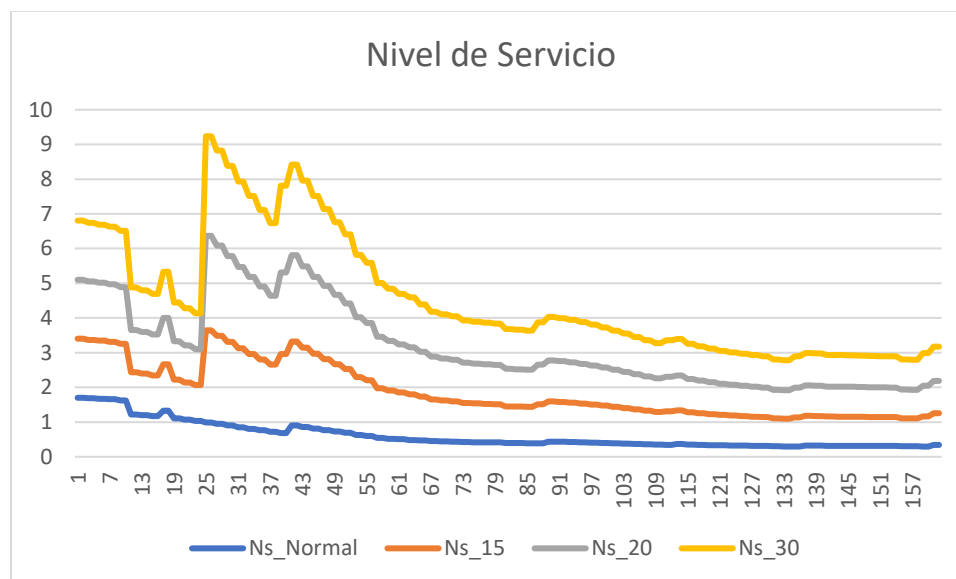


Figura 58 Análisis de sensibilidad del modelo de agentes (variable: inventario inicial).

Los escenarios propuestos resultan eficientes en cuanto al objetivo de aumentar el nivel de servicio. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente la “compra” de producto a externos no resulta idónea, por lo que el desarrollo de modelos que permitan predecir, aumentar y mejorar el rendimiento de la cosecha de los huertos propios y de los proveedores fijos de la empresa resulta de vital importancia y se presenta como una solución real y redituable, para la optimización en la gestión de la cadena de suministro que se puede traducir como la satisfacción de la demanda.

Estos resultados pudieran parecer obvios, sin embargo, durante la simulación de la cadena de suministro no se detectaron deficiencias en los procesos de empaque, o atención de las órdenes. El transporte de producto y la cantidad de producto que se envía no es una variable que pueda manipularse fácilmente ya que los envíos internacionales se hacen a través de contenedores cuya capacidad es una limitante, por lo que trabajar internamente desde la generación de la materia prima, que es el limón persa, es la mejor opción.

4.6.1 Validación de los modelos XGBoost: rendimiento floración, brote y fruto

Se presenta a continuación la validación de los modelos XGBoost que se desarrollaron para formar parte de los Módulos de Apoyo a la Decisión. Se han diseñado modelos XGBoost para predecir el rendimiento esperado del limón persa en sus tres etapas: Floración, Brote y Fruto, se muestra la validación para cada una de ellas.

4.6.1.1 Rendimiento floración, brote y fruto

Para la validación se han tomado datos diferentes a los utilizados para el entrenamiento y prueba del modelo, se consideraron 30 datos sobre diferentes huertos para la validación de las redes, incluyendo los valores para cada variable de entrada con el rendimiento real y el rendimiento simulado.

Estos datos son sometidos a una validación, se les han realizado diversas pruebas para determinar su ajuste al comportamiento real, incluida la prueba t-Pareada, error absoluto correlativo, error absoluto medio, y correlación, ejecutadas con ayuda de un software estadístico y la biblioteca pandas de Python. Se reportan solo algunos de los resultados de las pruebas, el Intervalo de Confianza (prueba t-pareada) incluye al valor 0, lo cual nos lleva a concluir que no hay evidencia estadística que indique que los datos sean estadísticamente diferentes. Los resultados de la prueba RAE, recomendada por (Shravankumar, 2020) para los tres modelos muestra valores cercanos a cero, valor ideal para validar los modelos.

El proceso es similar para la validación de los modelos de las etapas brote y fruto, la siguiente Tabla 30 muestra los resultados por modelo, por prueba.

Tabla 30 Resultados de las pruebas de Validación de los modelos XGBoost.

Etapas	Prueba de Correlación	RAE	MAE
Floración	0.98	0.17	1.26ton/ha
Brote	0.98	0.14	0.63ton/ha
Fruto	0.88	0.37	2.5ton/ha

4.6.2 Validación de la red neuronal para predicción del rendimiento por calidad de exportación

Se presenta a continuación la validación de las Redes Neuronales que se desarrollaron para formar parte de los Módulos de Apoyo a la Decisión. Se muestra en la Tabla 31 una muestra de los datos reales comparados con los rendimientos predichos por las RNA's, posteriormente se muestra en la validación del modelo mediante una prueba t-Pareada realizada en un software estadístico.

Tabla 31 Concentrado de Rendimientos Reales vs. Rendimientos de la Red.

ntcnnsuelo	lluvia	ctrlldplagas	viento	rendREur	rendSEu	rendRJapon	rendSJapon	rendRDaños	rendSDaños
4	169	2	99	0.79	0.44	0.78	0.72	63.1	60.8
3	169	0	49	5.9	9.53	7.2	2.35	56.2	60.47
2	169	3	49	10.2	8.28	11.7	10.32	21.9	51.44
5	170	0	4	6	18.58	7.2	9.19	62.3	44.05
1	170	3	14	25	17.84	21	18.32	0.5	20.37
6	170	3	14	21.1	18.58	25.1	18.29	0.5	54.16
6	170	2	24	18.6	18.56	22.5	18.23	58.9	55.78
5	15	0	0	4.8	16.72	5.9	5.58	64.3	57.87
4	15	1	10	11.9	15.17	14.3	10.73	58.4	37.04

La siguiente Figura 59 muestra una de los resultados de la validación de uno de los modelos.

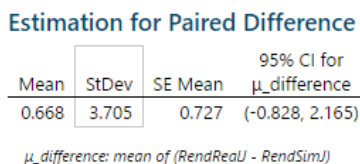


Figura 59 Prueba T-Pareada Rendimiento Japón.

Las tres pruebas contienen en el intervalo al valor 0, por lo que se puede decir que no hay evidencia estadística que indique que los modelos son diferentes del comportamiento real.

4.6.3 Desarrollo de la interfaz gráfica para el usuario (proveedor-agricultor)

Como parte adicional se desarrolla una interfaz gráfica que contiene los modelos XGBoost de predicción del Rendimiento del Limón Persa en sus tres etapas, floración, brote

y fruto, las redes de predicción de rendimiento de calidad de exportación, además del árbol de decisiones de clasificación del rendimiento.

4.6.3.1 Programación de la interfaz

La interfaz se programa en lenguaje de programación Python®, este lenguaje tiene la ventaja de ser un lenguaje libre porque lo que una vez terminada la interfaz se programa el ejecutable y no es necesario que se haga la compra de ningún software para que el agricultor pueda utilizarlo en cualquier computadora.

Python cuenta con una biblioteca llamada Tk/Tcl que ha sido durante mucho tiempo una parte integral de Python, esta proporciona un conjunto de herramientas robusto e independiente de la plataforma para administrar ventanas. Disponible para desarrolladores a través del paquete *tkinter* y sus extensiones, los módulos *tkinter.tix* y *tkinter.ttk*. Las principales virtudes de *tkinter* son que es rápido y que generalmente viene incluido con Python. Aunque su documentación estándar es débil, se dispone de buen material, que incluye: referencias, tutoriales, un libro y otros (Foundation, n.d.).

Se programa una ventana principal en la cual aparecen los botones que dan acceso a la ventana en la cual se ha de introducir la información necesaria para calcular el rendimiento en cada etapa y dentro de cada ventana se programa cada variable de entrada, una etiqueta y una barra desplegable que permite al usuario introducir la información mediante la elección de un valor mostrado (Figura 60).

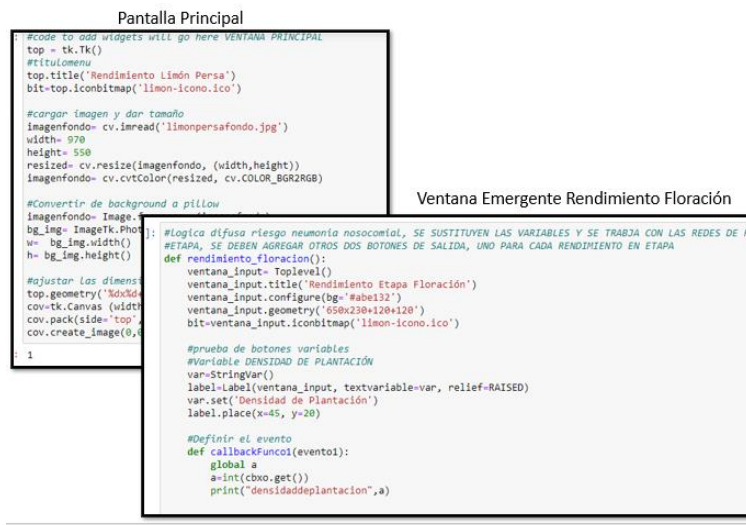


Figura 60 Interfaz Gráfica, programación de la Ventana Principal.

En cada pantalla emergente se carga el modelo correspondiente a la red neuronal asociada al botón de resultado y se programa un botón de reinicio que borra la información capturada y permite predecir un nuevo valor. La programación es similar para cada ventana emergente. Se muestra a continuación la visualización de la interfaz tal cual será para el usuario.

4.6.3.2 Visualización de la interfaz

La interfaz programada se visualiza como se muestra en las siguientes imágenes, la pantalla principal que es la que el usuario entrará directamente se muestra en la siguiente Figura 61, esta pantalla principal cuenta con cuatro botones que dan acceso a las ventanas emergentes que contienen cada modelo, Rendimiento en Etapa Floración, Brote y Fruto, además de los módulos de Clasificación del Rendimiento y el de Predicción de Rendimiento de Limón por Calidad de Exportación.

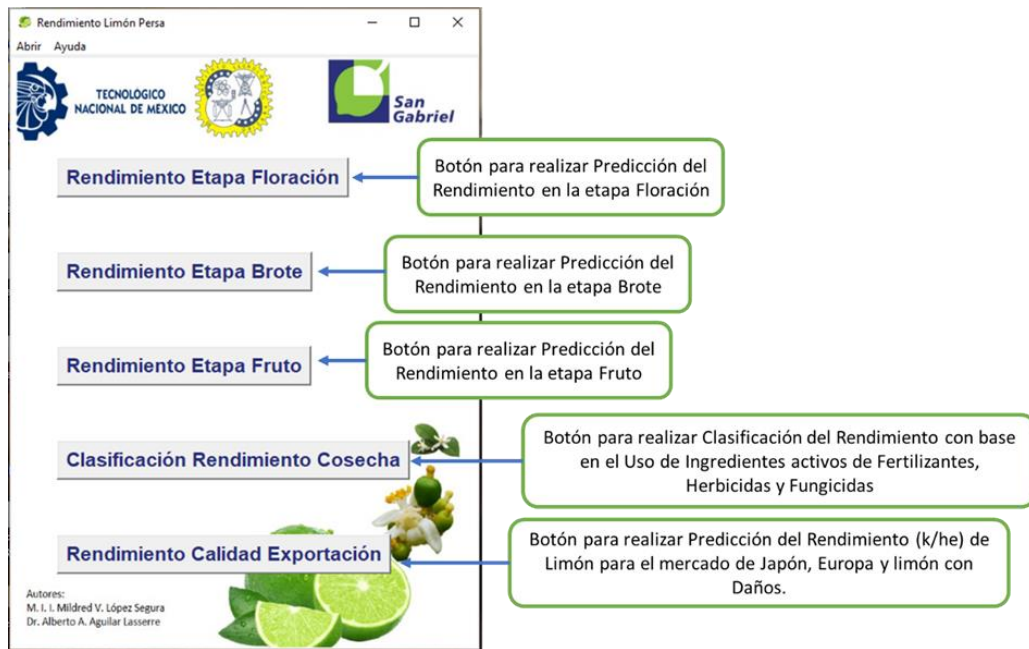


Figura 61 Interfaz Gráfica, Pantalla Principal.

Una vez que el usuario elige qué etapa desea predecir, la ventana emergente se abre y se muestra como en las imágenes siguientes, la primera Rendimiento en etapa Floración consta de 7 etiquetas con sus botones desplegable que permiten al usuario elegir la información correspondiente a las variables de entrada (Figura 62), el botón de Resultado muestra el resultado en la etiqueta posterior y el botón de reinicio borra la información que se introdujo para poder hacer alguna otra predicción.

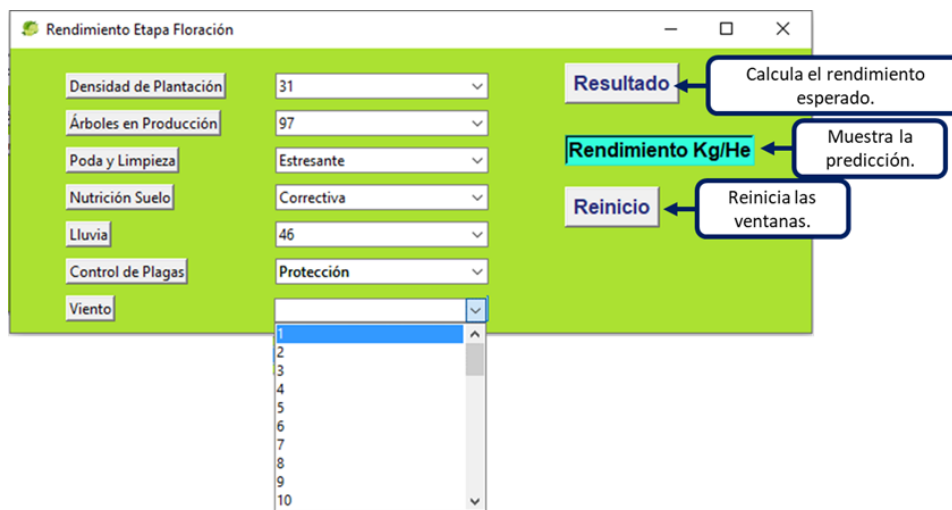


Figura 62 Interfaz Gráfica, sub ventana Rendimiento Etapa Floración con Valor de Predicción.

La sub ventana Rendimiento Etapa Brote, al igual que Rendimiento Etapa Fruto tiene solo cuatro etiquetas con sus botones desplegables (Figura 63) para introducir los valores correspondientes a las variables de entrada, cuenta con el botón de Resultado y el botón de Reinicio. Esto es similar en ambas ventanas.

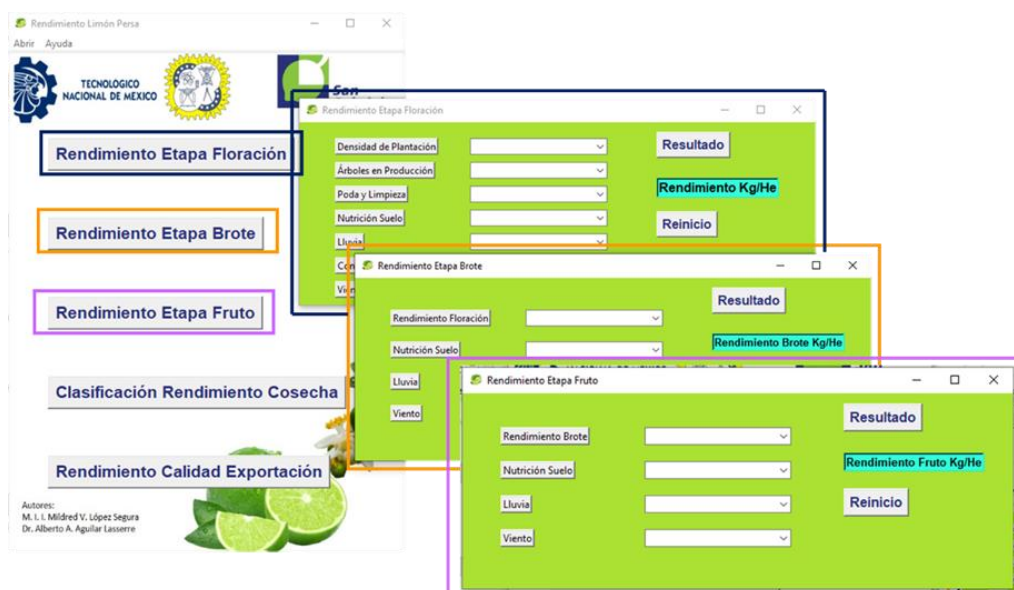


Figura 63 Interfaz Gráfica, sub ventana Rendimiento Etapa Fruto con Valor de Predicción.

La sub ventana de Rendimiento de Calidad de Exportación, al igual que las anteriores cuenta con las pestañas desplegables que permiten introducir la información, el botón de Resultado y el de Reinicio (Figura 64).

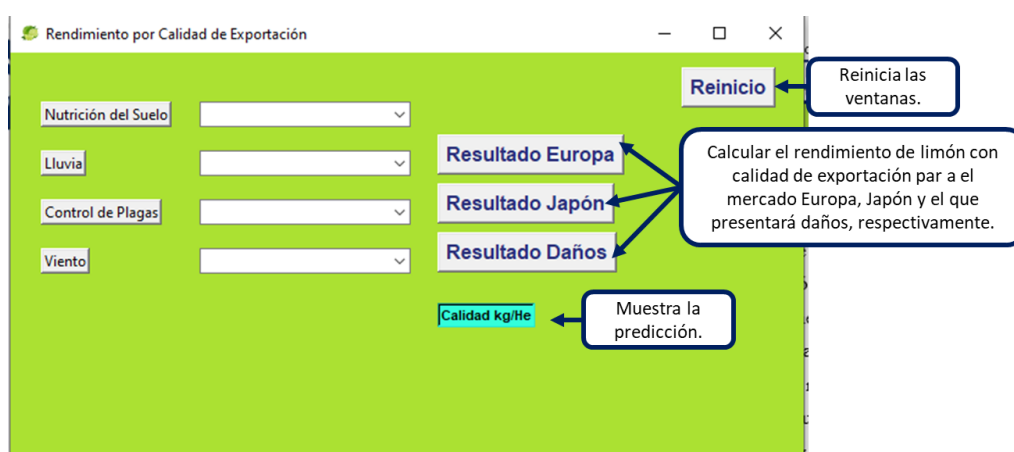


Figura 64 Módulo de Predicción de Rendimiento por Calidad de Exportación.

En esta ventana se puede tener acceso al sistema de Clasificación del Rendimiento Cosecha que clasifica el rendimiento esperado, la sub ventana al igual que las anteriores, contiene las características correspondientes a la información que procesa el árbol de decisiones para hacer la clasificación, se muestra a continuación dicho módulo (Figura 65), Similar a los módulos anteriores, este módulo cuenta con el botón de Resultado (recuadro azul), la ventana de resultado (resaltada en fucsia) y el botón de Reinicio que borra la información introducida anteriormente para hacer una nueva predicción.

Figura 65 Sub ventana Clasificación Rendimiento Cosecha; botones Resultado y Reinicio.

Estos tres modelos con sus respectivas sub ventanas conforman la interfaz diseñada para ser proporcionada al agricultor que es el proveedor de la planta, se espera que, con su uso, diseñado en un ambiente rústico y amigable con el usuario, la aplicación de las Buenas Prácticas Agrícolas y el uso de fertilizantes pueda ser de mayor eficiencia y de manera directa se afecte positivamente en el rendimiento del producto.

4.7 Etapa 6 Construcción y validación del sistema de gestión del conocimiento basado en agentes (AnyLogic®)

El modelo de agentes se desarrolla en la plataforma AnyLogic. El desarrollo se describe en la sección anterior. La validación del modelo se basa en la validación del modelo

en Simio® determinada por conceso en reunión con los expertos, dada la variabilidad de la cosecha (que se da en dos temporadas), se presta atención a la cantidad de entidades generadas por los Source.

4.8 Conclusiones

El conocer el proceso permite identificar las variables que participan, y aquellos factores que impactan en la eficiencia particular de la cadena de suministro, factores no controlables que pueden ser modelados y de esta manera reducir el impacto de ello. El desarrollo de la metodología; modelo de agentes y módulos de apoyo a la decisión es factor clave para la eficiencia del sistema de gestión del conocimiento, toda vez que, además de permitir transmitir conocimiento de los expertos a los usuarios, tendrá impacto positivo sobre el desempeño de los sistemas de producción agrícola, incentivando la aplicación de las buenas prácticas agrícolas y un mejor conocimiento a cerca del impacto de cada aspecto sobre el rendimiento de los huertos, de esta manera, con el uso de éstos módulos, el agricultor manipulará su sistema y prácticas asegurando un mayor rendimiento, no solo en cantidad si no calidad; y por ende la empresa se verá beneficiada al recibir mayor producto con menos probabilidad de desecho, se identifica que de toda la cadena de suministro es el eslabón de proveedores el que debe reforzarse y en cual se genera información de gran valor que no se ha explotado, ya que dada la naturaleza de este producto volumen de llegada a la planta no es constante, la producción de limón es un sistema delicado con gran variabilidad, sin embargo, gracias al conocimiento y experticia de los agricultores se mantiene como una de las principales actividades económicas del país, es precisamente éste conocimiento el que se gestiona con el desarrollo de los módulos dedicados al rendimiento y calidad del fruto.

Discusión de la investigación

Este capítulo discute las contribuciones y la innovación del sistema de gestión del conocimiento basado en un modelo de multiagentes inteligentes para mejorar el desempeño de la cadena de suministro del limón persa.

El sistema de gestión del conocimiento propuesto es una herramienta para mejorar el desempeño de los procesos de la cadena de suministro del limón persa y se distingue por varias aportaciones clave al estado del arte en la gestión de cadenas de suministro agrícolas, tales como: **integración holística**; a diferencia de estudios previos que se enfocan en aspectos individuales de la cadena de suministro (Ghadimi et al., 2018; Li et al., 2018b; Yu et al., 2017), el sistema desarrollado ofrece un enfoque integrador que abarca desde la predicción del rendimiento hasta la optimización de la demanda y el manejo de inventarios; **atención a la subjetividad y la incertidumbre**; se incorporan técnicas avanzadas de inteligencia artificial para manejar la subjetividad en la toma de decisiones y la incertidumbre inherente en la producción agrícola, algo que no ha sido abordado con la misma profundidad en estudios como los de (Khaki & Wang, 2019; Nevavuori et al., 2019); **módulos de apoyo a la decisión innovadores**; se desarrollaron cuatro módulos específicos que abordan aspectos críticos del desempeño de la cadena de suministro:

Módulo de Predicción del Rendimiento: Utiliza características físicas del huerto y prácticas agrícolas para prever el rendimiento en toneladas por hectárea.

Módulo de Calidad de Exportación: Predice el rendimiento clasificado por calidad para los mercados principales.

Módulo de Clasificación del Rendimiento: Introduce un árbol de decisiones que considera una amplia base de datos de factores cuantitativos y cualitativos.

Módulo de Evaluación de Proveedores: Emplea un modelo AHP basado en criterios específicos derivados de las modelaciones.

Aunque se han desarrollado diversos sistemas enfocados en la predicción del rendimiento de cultivos (Babaie Sarijaloo et al., 2021; Batool et al., 2022; Cao et al., 2022b; Choudhary et al., 2020; Deshmukh et al., 2022; Hazra et al., 2023; Kulpanich et al., 2023), el sistema

propuesto no solo predice el rendimiento basado en características físicas, sino que también incorpora la calidad del producto y la incertidumbre en la producción del limón persa. Este enfoque multidimensional y la integración de técnicas avanzadas de IA representan una mejora significativa en comparación con estudios anteriores. Las implicaciones de este sistema son profundas, ya que proporcionan una herramienta integral que puede mejorar significativamente la eficiencia de la cadena de suministro del limón persa, el propósito del modelo de agentes propuesto y los módulos desarrollados es permitir el flujo de información entre los actores principales de la cadena de suministro, emular su comportamiento con el objetivo de identificar aquellos procesos que generan valor y hacen eficiente la gestión de la cadena misma esto ofrece una ventaja competitiva para los actores involucrados, desde agricultores hasta distribuidores. En resumen, este trabajo presenta un sistema de gestión del conocimiento innovador y holístico que aborda múltiples aspectos críticos de la cadena de suministro del limón persa. Las diferencias clave con respecto a trabajos anteriores y las implicaciones prácticas de estas aportaciones subrayan la relevancia de esta investigación para mejorar la eficiencia y efectividad de la gestión de cadenas de suministro agrícolas. Futuras investigaciones podrían explorar la implementación de este sistema en otros contextos agrícolas y su adaptación a diferentes tipos de cultivos.

Aportación del estudio al estado del arte

Esta investigación tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de gestión del conocimiento, a partir del análisis de una cadena de suministro agrícola, específicamente limón persa, usando el enfoque de agentes inteligentes para mejorar la eficiencia de la gestión de la cadena de suministros.

Aportación al conocimiento (agentes inteligentes)

La aportación al conocimiento consiste en el desarrollo un modelo exclusivo de agentes para el sector en estudio y una nueva arquitectura de agentes para gestión del conocimiento aplicado a un caso de estudio específico. La arquitectura incluye dos submodelos, uno referente a proveedores y el segundo a los centros de distribución, que fungen como clientes.

Aportación de desarrollo tecnológico

La aportación al desarrollo tecnológico de esta investigación se establece en dos etapas principales:

1. Desarrollo de un sistema de gestión del conocimiento basado en Agentes Inteligentes que permita la gestión de la cadena de suministros validado en un caso de estudio específico.
2. Desarrollo de módulos de apoyo a la decisión para la gestión de la cadena de suministro. Este sistema y los módulos que lo componen serán registrados como desarrollo tecnológico ante INDAUTOR para obtener los derechos de autor. Este desarrollo será entregado a la empresa San Gabriel S.A. de C.V para que pueda ser utilizado dentro y fuera, con los agricultores.

Los módulos desarrollados en Python se enlistan a continuación:

1. Módulo de predicción del rendimiento (algoritmos xgboost).
2. Módulo de predicción del rendimiento por calidad.
3. Módulo de clasificación del rendimiento basado en el uso de fertilizantes.
4. Módulo de Selección de Proveedores.
5. Módulo de predicción de la demanda.

Productividad

La productividad se resume en la siguiente Tabla 32:

Tabla 32 Productividad.

Tipo	Publicación	Título/DOI
Conferencia Arbitrada	Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro. 12-14 de septiembre de 2023. Guanajuato, Mex.	Modelación de la cadena de suministro agrícola del limón persa basada en eventos discretos con Simio®
Artículo JCR	Crop Science Factor de Impacto 2023: 2.763	XGBoost sequential system for the prediction of Persian lemon crop yield. DOI: 10.1002/csc2.21148
Certificado	Registro Público del Derecho de Autor	SISTEMA XGBOOST DE PREDICCIÓN DE RENDIMIENTO SECUENCIAL DE COSECHA DE LIMÓN PERSA Número de Registro: 03-2023-082509285600-01

Se adjuntan: Carta de aceptación artículo en CILOG (Figura 66), Certificado de Participación (Figura 67), Artículo JCR (Figura 68), y Registro ante INDAUTOR del Software de Predicción del rendimiento (Figura 69 y Figura 70).

CARTA DE ACEPTACIÓN

Nos es grato informar a los autores **Mildred Virginia López Segura, Sergio Javier Acosta Beltrán, Constantino Gerardo Moras Sánchez, Gregorio Fernández Lambert, Magno Ángel González Huerta, Alberto Alfonso Aguilar Lasserre**

Que su artículo titulado: **Modelación de la cadena de suministro agrícola del limón persa basada en eventos discretos con Simio**

Ha sido **ACEPTADO** para ser expuesto durante el Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro [CILOG] en su edición 2023. Su completa aceptación está supeditada a completar su INSCRIPCIÓN en el siguiente enlace: <https://cilog.aml.org.mx/inscripcion.php>

Le pedimos elaborar un video de la presentación de su trabajo de máximo 15 minutos de duración. Dudas o comentarios, pueden ser planteados a través de mensaje al correo electrónico: inscripcion.cilog@gmail.com

Una selección de artículos presentados durante el CILOG 2023 tendrán la oportunidad de ser publicados en alguna de las revistas y libros científicos asociados. Para tal efecto, los trabajos seleccionados se someterán al proceso normal de revisión de cada publicación. En consecuencia, el proceso de evaluación es completa responsabilidad de la publicación, donde la última decisión de aceptación la otorga el editor invitado. Lo invitamos a consultar el programa de conferencias magistrales y paneles con expertos en la página del evento: <https://cilog.aml.org.mx>

Se elabora la presente el día 10 de Agosto de 2023, para los usos y fines que a los interesados convenga.

Atentamente,



DR. MIGUEL GASTÓN CEDILLO CAMPOS

Presidente del Comité Científico del CILOG

Responsable Técnico, Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística

Correo electrónico: gaston.cedillo@imt.mx

Página CILOG: <https://cilog.aml.org.mx>

Página Laboratorio Nacional (SiT-LOG): <https://lab-nacional-logistica.imt.mx/>

Figura 66 Carta de aceptación artículo en CILOG 2023.



MexicoLogístico®
Asociación Mexicana de Logística & Cadena de Suministro, A.C.



CERTIFICADO

MILDRED VIRGINIA LÓPEZ SEGURA

Participó como **PONENTE** del Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro [CiLOG] en la ciudad de Guanajuato los días 12, 13 y 14 de Septiembre de 2023.



Héctor López

Lic. Héctor López
Santillana

Presidencia CILOG 2023
Director General de GTO
Puerto Interior
S.A. de C.V.

Mayra Elizondo

Dr. Mayra Elizondo
Cortés

Presidencia
Asociación Mexicana de
Logística y Cadena de
Suministro A.C

Miguel Gastón Cedillo

Dr. Miguel Gastón
Cedillo Campos

Presidencia Científica
CILOG 2023

Ignacio López

Mtro. Ignacio López
Valdovinos

Rector
Universidad Politécnica
de Guanajuato

Sandra Téllez

Dra. Sandra Téllez
Vázquez

Presidencia
Comité Organizador
Universidad Politécnica de
Guanajuato

Figura 67 Certificado de Participación CILOG 2023.

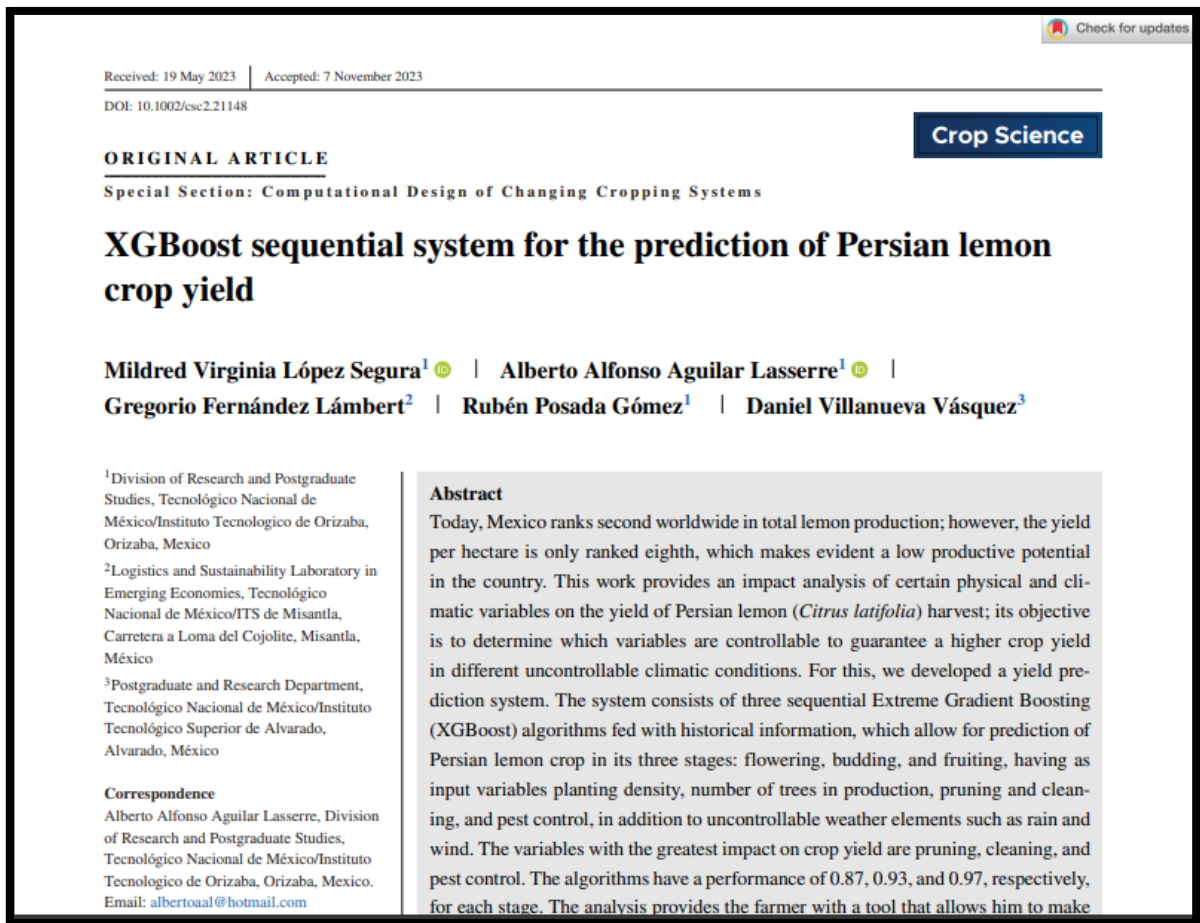


Figura 68 Artículo JCR.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: AGUILAR LASSIERRE ALBERTO ALFONSO
FERNÁNDEZ LAMBERT GREGORIO
GONZÁLEZ HUERTA MAGNO ÁNGEL
LÓPEZ SEGURA MILDRED VIRGINIA
MORAS SÁNCHEZ CONSTANTINO GERARDO
POSADA GÓMEZ RUBÉN

TÍTULO: SISTEMA XIBOOST DE PREDICCIÓN DE RENDIMIENTO SECUENCIAL DE COSECHA DE LIMÓN PERSA

RAMA: PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN

TITULAR: SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA - TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO (CON FUND. EN EL ART 83 DE LA L.F.D.A. EN RELACION CON EL ART. 46 DEL R.L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

El presente certificado se expide con fundamento en el Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, así como de otras leyes para crear la Secretaría de Cultura, publicado el 17 de diciembre de 2015 en el Diario Oficial de la Federación; artículos 26 y 41 Bis, fracción XVIII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; artículos 2, 208, 209 fracción III de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículo 69-C de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo, de aplicación supletoria de acuerdo con lo establecido por la Ley Federal del Derecho de Autor en su artículo 10; artículo 84 de la Ley General de Mejora Regulatoria; artículos 2, apartado B, fracción IV, 26 y 27 del Reglamento Interior de la Secretaría de Cultura; artículos 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 6 fracción I, 9, 16 y 17 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor; ACUERDO por el que se establecen los Lineamientos para el uso de la Firma Electrónica Avanzada en los actos y actuaciones de los servidores públicos del Instituto Nacional del Derecho de Autor, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de mayo del año dos mil veintiuno; y Acuerdo por el que se establecen las reglas para la presentación, subsistencia y resolución de las solicitudes de registro de obras, fonogramas, videogramas y edición de libros en línea ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor, publicado el 8 de diciembre del 2021 en el Diario Oficial de la Federación.

1/2



CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

Figura 69 Registro ante INDAUTOR del Software de Predicción del rendimiento 1 de 2.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9, fracción I, de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.

Número de Registro: 03-2023-082509285600-01

Ciudad de México, a 25 de agosto de 2023

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



MeSjy8T35erWcSkelo9kh66yImEm6TZ08yUd86owK2XChOc9V1U2KaJ4woovKCI+n59Tq8eKPdR8uAe8
 LquP0uxD0Mgu0+5a9hmmLSE51lgh+VAv+UrnN8eplLc0qM7LubKAsel8c78Ejh0k5JHWWaph54gmLpAA
 Un03dR1y/nYwqRaCCST0866d8d8e9Gedicyd1Dr06L71HJ3uuhq2QYQzT3M4yNNicN2Q3nYH0EDivGU8
 75AaakdO5wCKTub8h0adJUndEB7anzgoeThi01e4zuzjYJ1uH+4ZBQ08e5AxpU4BofevwpLLqV5hIC120e==

2/2



CULTURA

SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR

INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

Figura 70 Registro ante INDAUTOR del Software de Predicción del rendimiento 2 de 2.

Referencias bibliográficas

- Alba Cabañas, M., & Herrera Lemus, K. C. (2016). Modelo de gestión del infoconocimiento para cadenas de suministro de ron a granel. *Cofin Habana*, 1(11), 28–38.
- Alomoto, N., Ortiz, J., & Ruiz-torres, A. (2015). LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO EN ECUADOR: CASO DE LAS PyMEs. *Revista Arbitrada Formación Gerencial*, 13(2).
- Alosaimi, M. (2018). The role of knowledge management approaches for enhancing and supporting education. *HAL Archivs Ouvertes, Université Panthéon.Sobornne. Bussines Administration*.
- Aminzadegan, S., Tamannaei, M., & Rasti-Barzoki, M. (2019a). Multi-agent supply chain scheduling problem by considering resource allocation and transportation. *Computers & Industrial Engineering*, 137(October 2018), 106003. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106003>
- Aminzadegan, S., Tamannaei, M., & Rasti-Barzoki, M. (2019b). Multi-agent supply chain scheduling problem by considering resource allocation and transportation. *Computers & Industrial Engineering*, 137(October 2018), 106003. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106003>
- Andres, B., Sanchis, R., & Poler, R. (2016). Modelado y simulación de la cadena de suministro con AnyLogic®. *Modelling in Science Education and Learning*, 9(1), 57. <https://doi.org/10.4995/msel.2016.3520>
- Andreu Civit, R., & Sieber, S. (1999). Andreu La gestión integral del conocimiento y el aprendizaje. *Economía Industrial*, 36, 63–72.
- Antunes, H. de J. G., & Pinheiro, P. G. (2019). Linking knowledge management, organizational learning and memory. *Journal of Innovation & Knowledge*. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2019.04.002>

- Arcgis Pro 3.0, E. (2020). *Cómo funciona el algoritmo XGBoost*. Cómo Funciona El Algoritmo XGBoost. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/geoai/how-xgboost-works.htm>
- Avci, M. G., & Selim, H. (2016). A multi-agent system model for supply chains with lateral preventive transshipments: Application in a multi-national automotive supply chain. *Computers in Industry*, 82, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.005>
- Avédissian, A., & Valverde, R. (2015). An extension proposition for the Agent-Based Language Modeling Ontology for the representation of Human-Driven Collaboration in Supply Chain Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1857–1864. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.357>
- Babaie Sarijaloo, F., Porta, M., Taslimi, B., & Pardalos, P. M. (2021). Yield performance estimation of corn hybrids using machine learning algorithms. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.05.001>
- Bakhtadze, N. N., Karsaev, O. V., Smirnova, G. S., Sabitov, R. A., Morozov, B. M., & Elizarova, N. U. (2016). Multi-agent Simulation of SWAP BODIES application in manufacturing supply chain. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1245–1250. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.683>
- Barenji, A. V., Wang, W. M., Li, Z., & Guerra-Zubiaga, D. A. (2019). Intelligent E-commerce logistics platform using hybrid agent based approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 126(May 2018), 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.04.002>
- Batool, D., Shahbaz, M., Shahzad Asif, H., Shaukat, K., Alam, T. M., Hameed, I. A., Ramzan, Z., Waheed, A., Aljuaid, H., & Luo, S. (2022). A Hybrid Approach to Tea Crop Yield Prediction Using Simulation Models and Machine Learning. *Plants*, 11(15), 1925. <https://doi.org/10.3390/plants11151925>

- Behdani, B., Lukszo, Z., & Srinivasan, R. (2019). Agent-oriented simulation framework for handling disruptions in chemical supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 122, 306–325. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.09.027>
- Bellesteros, P., Restrepo, L., & Estrada, S. (2010). Analisis de los costos logísticos en la administración de la cadena de suministro. *Scientia et Technica*, XVI(45), 272–277.
- Belykh, D. L., & Botvin, G. A. (2018). Multi-agent Framework for Supply Chain Dynamics Modelling with Information Sharing and Demand Forecast. In *Communications in Computer and Information Science* (Vol. 858, pp. 366–374). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02843-5_29
- Ben Mekki, A., Tounsi, J., & Ben Said, L. (2016). Fuzzy BDI agents for supply chain monitoring in an uncertain environment. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 17(2), 109–123. <https://doi.org/10.1080/16258312.2016.1199940>
- Ben Othman, S., Zgaya, H., Dotoli, M., & Hammadi, S. (2017). An agent-based Decision Support System for resources' scheduling in Emergency Supply Chains. *Control Engineering Practice*, 59(November 2016), 27–43. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.11.014>
- Berrocal, J. L., Figuerola, C. G., Zazo, Á. F., & Rodriguez, E. (2003). Agentes inteligentes: recuperación automática de información en la web. *Revista Española de Documentación Científica*, 26(1), 11–20. <https://doi.org/10.3989>
- Buitinck, L., Louppe, G., Blondel, M., Pedregosa, F., Mueller, A., Grisel, O., Niculae, V., Prettenhofer, P., Gramfort, A., Grobler, J., Layton, R., Vanderplas, J., Joly, A., Holt, B., & Varoquaux, G. (2013). *API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project*. 1–15.
- Cao, J., Wang, H., Li, J., Tian, Q., & Niyogi, D. (2022a). Improving the Forecasting of Winter Wheat Yields in Northern China with Machine Learning–Dynamical Hybrid Subseasonal-to-Seasonal Ensemble Prediction. *Remote Sensing*, 14(7), 1707. <https://doi.org/10.3390/rs14071707>

- Cao, J., Wang, H., Li, J., Tian, Q., & Niyogi, D. (2022b). Improving the Forecasting of Winter Wheat Yields in Northern China with Machine Learning–Dynamical Hybrid Subseasonal-to-Seasonal Ensemble Prediction. *Remote Sensing*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/rs14071707>
- Capó Vicedo, J., Exposito Langa, M., & Tomás Miquel, J. V. (2005). La importancia de la gestión del conocimiento en la cadena de suministro de la construcción. In *IX Congreso de Ingeniería de Organización* (Issue 176, pp. 20–28).
- Capó-Vicedo, J., Tomás-Miquel, J. V., & Expósito-Langa, M. (2007). La Gestión del Conocimiento en la Cadena de Suministro: Análisis de la Influencia del Contexto Organizativo. *Información Tecnológica*, 18(1), 127–136. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000100017>
- Chandra, C., & Kamrani, A. K. (2003). Knowledge management for consumer-focused product design. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, 557–580. <https://doi.org/10.1023/A:1027358721819>
- Chen, C., & Xu, C. (2018). A Negotiation Optimization Strategy of Collaborative Procurement with Supply Chain Based on Multi-Agent System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/4653648>
- Cherres, S., & Juárez, L. (2015). ¿Cómo se calcula el costo total de la cadena de suministro ? 2013, 43–48.
- Chopra Sunil, & Peter, M. (2013). *ADMINISTRACION DE LA CADENA DE SUMINISTRO Estrategia, planeación y operación*.
- Choudhary, N. K., Sree Laya Chukkapalli, S., Mittal, S., Gupta, M., Abdelsalam, M., & Joshi, A. (2020). YieldPredict: A Crop Yield Prediction Framework for Smart Farms. *2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2340–2349. <https://doi.org/10.1109/BigData50022.2020.9377832>
- Chouikha Zouari, M. Ben, & Dhaou Dakhli, S. Ben. (2018). A Multi-Faceted Analysis of Knowledge Management Systems. *Procedia Computer Science*, 138, 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.086>

- de Souza Henriques, R. (2019). Multi-agent system approach applied to a manufacturer's supply chain using global objective function and learning concepts. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(3), 1009–1019. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1300-z>
- Deshmukh, M., Jaiswar, A., Joshi, O., & Shedge, R. (2022). Farming Assistance for Soil Fertility Improvement and Crop Prediction using XGBoost. *ITM Web of Conferences*, 44, 03022. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20224403022>
- Drakaki, M., Gören, H. G., & Tzionas, P. (2018). An intelligent multi-agent based decision support system for refugee settlement siting. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 576–588. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.06.013>
- Duan, J. G., Subramanian, N., & Abdulrahman, M. (2013). Knowledge management in the Chinese local beer market: A case study. *2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 58–62. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2013.6962374>
- Eskigun, E., Uzsoy, R., Preckel, P. V., Beaujon, G., Krishnan, S., & Tew, J. D. (2005). Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 182–206. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.029>
- Espinal, A., & Andrés, Montoya, Rodrigo. (2017). Information Technologies in Supply Chain Management. *Año*, 76, 37–48.
- Fernández Lambert, G. (2010). *Selección de proveedores basado en sistemas expertos para la gestión de la cadena de suministro de limón persa*. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.
- Fernández Lambert, G., Aguilar Lasserre, A., Azzaro-Pantel, C., Miranda-Ackerman, M. A., Purroy Vázquez, R., & del Rosario Pérez Salazar, M. (2015). Behavior patterns related to the agricultural practices in the production of Persian lime (*Citrus latifolia tanaka*) in the seasonal orchard. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.007>

- Fernando, C., & Meleán, R. (2005). Análisis de la relación entre la ingeniería del conocimiento y la gestión del conocimiento en base al modelo de Nonaka y Takeuchi. *Intangible Capital*, 1(9), 1–15.
- Fierro, L. H., Cano, R. E., & García, J. I. (2020). Modelling of a multi-agent supply chain management system using Colored Petri Nets. *Procedia Manufacturing*, 42(2019), 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.095>
- For, P., & World, T. H. E. (1999). World development report 1998/99: knowledge for development. In *World development report 1998/99: knowledge for development*.
- Foundation, P. S. (n.d.). *tkinter python.pdf*. Interfaces Gráficas de Usuario Con Tk. <https://docs.python.org/es/3/library/tk.html>
- Ghadimi, P., Ghassemi Toosi, F., & Heavey, C. (2018). A multi-agent systems approach for sustainable supplier selection and order allocation in a partnership supply chain. *European Journal of Operational Research*, 269(1), 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.014>
- Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M. K., & Heavey, C. (2019). Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.050>
- Giret, A., Trentesaux, D., Salido, M. A., Garcia, E., & Adam, E. (2017). A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1370–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.079>
- Guizzi, G., Revetria, R., Vanacore, G., & Vespoli, S. (2019). On the open job-shop scheduling problem: a decentralized multi-agent approach for the manufacturing system performance optimization. *Procedia CIRP*, 79, 192–197. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.045>

- Gumzej, R., & Čišić, D. (2018). Decentralized Agent-based Electronic Marketplace Supply Chain Ecosystem. *Pomorstvo*, 32(1), 21–27. <https://doi.org/10.31217/p.32.1.4>
- Hazra, S., Karforma, S., Bandyopadhyay, A., Chakraborty, S., & Chakraborty, D. (2023). *Prediction of Crop Yield Using Machine Learning Approaches Prediction of Crop Yield Using Machine Learning Approaches for Agricultural Data for Agricultural Data Prediction of Crop Yield Using Machine Learning Approaches for Agricultural Data*. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.23694867.v1>
- Heisig, P. (2009a). Harmonisation of knowledge management – comparing 160 KM frameworks around the globe. *Journal of Knowledge Management*, 13(4), 4–31. <https://doi.org/10.1108/13673270910971798>
- Heisig, P. (2009b). Harmonisation of knowledge management – comparing 160 KM frameworks around the globe. *Journal of Knowledge Management*, 13(4), 4–31. <https://doi.org/10.1108/13673270910971798>
- Helo, P., Rouzafzoon, J., & Gunasekaran, A. (2018). Service Supply Chain Design by Using Agent-Based Simulation. In *Practices and Tools for Servitization* (pp. 387–403). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76517-4_21
- Iglesias, A. (n.d.). *La gestion de la cadena de suministro*. ESIC EDITORIAL.
- Ivashkin, Y. A., & Nikitina, M. A. (2019). Agent-oriented modeling and optimization of material flows of multi-assortment production. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 660–664. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.109>
- Jabeur, N., Al-Belushi, T., Mbarki, M., & Gharrad, H. (2017). Toward Leveraging Smart Logistics Collaboration with a Multi-Agent System Based Solution. *Procedia Computer Science*, 109(2016), 672–679. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.374>

- Janssen, M. (2005). The architecture and business value of a semi-cooperative, agent-based supply chain management system. *Electronic Commerce Research and Applications*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2005.06.003>
- José, J., Machado, G., & Padilla Garrido, N. (n.d.). *A U L A D E F O R M A C I O N*.
- Ju, L., Zhang, Q., Tan, Z., Wang, W., Xin, H., & Zhang, Z. (2018). Multi-agent-system-based coupling control optimization model for micro-grid group intelligent scheduling considering autonomy-cooperative operation strategy. *Energy*, 157, 1035–1052. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.097>
- Khaki, S., & Wang, L. (2019). *Crop Yield Prediction Using Deep Neural Networks*. 10(May), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00621>
- Kovalenko, I., Barton, K., & Tilbury, D. (2017). Design and implementation of an intelligent product agent architecture in manufacturing systems. *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247652>
- Kulpanich, N., Worachairungreung, M., Thanakunwutthirot, K., & Chaiboonrueang, P. (2023). The Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Extreme Gradient Boosting (XGBoost) to Crop Yield Estimation: A Case Study of Don Tum District, Nakhon Pathom, Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 19(2), 65–77. <https://doi.org/10.52939/ijg.v19i2.2569>
- Lahaba, Y. N., & Santos, M. L. (2001). La gestión del conocimiento: Una nueva perspectiva en la gerencia de las organizaciones. *Acimed*, 9(2), 121–126.
- Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis, FIFTH EDITION* (Fifth Edit). Mc Graw Hill.
- Lee, W., & Kim, D. (2019). Dynamic scheduling using a pheromone-based approach in multi-agent systems. *Applied Soft Computing*, 85(xxxx), 105875. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105875>

- Lei, V., Chen, Z., & Nguang, S. K. (2006). *Multiagent based Supply Chain Management Studies in Computational Intelligence , Volume 28* (Prof. Janusz Kacprzyk, Ed.). Springer Berlin Heidelberg.
- Li, J., Sun, M., Han, D., Wu, X., Yang, B., Mao, X., & Zhou, Q. (2018a). Semantic multi-agent system to assist business integration: An application on supplier selection for shipbuilding yards. *Computers in Industry*, 96, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.01.001>
- Li, J., Sun, M., Han, D., Wu, X., Yang, B., Mao, X., & Zhou, Q. (2018b). Semantic multi-agent system to assist business integration: An application on supplier selection for shipbuilding yards. *Computers in Industry*, 96, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.01.001>
- Lin, H.-Y., & Yang, S.-Y. (2019). A cloud-based energy data mining information agent system based on big data analysis technology. *Microelectronics Reliability*, 97(March), 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.03.010>
- Lu, Z., Zhuang, Z., Huang, Z., & Qin, W. (2019). A Framework of Multi-Agent Based Intelligent Production Logistics System. *Procedia CIRP*, 83, 557–562. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.116>
- Malhotra, Y. (2005). Integrating knowledge management technologies in organizational business processes: getting real time enterprises to deliver real business performance. *Journal of Knowledge Management*, 9(1), 7–28. <https://doi.org/10.1108/13673270510582938>
- Marín Amador, J. C. (2019). Incremento de la productividad de la linea de producción mediante simulación en Simio y Witness. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Min, H. (2010). Artificial intelligence in supply chain management: theory and applications. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 13(1), 13–39. <https://doi.org/10.1080/13675560902736537>

- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, T. P. (2009). *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement*. 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Molina, J. L., & Marsal Serra, M. (n.d.). *La gestión del conocimiento en las organizaciones*.
- Muravev, D., Hu, H., Rakhmangulov, A., & Dai, L. (2019). Multi-agent simulation of the balanced main parameters of the logistics centers. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1057–1062. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.335>
- Nevavuori, P., Narra, N., & Lipping, T. (2019). Crop yield prediction with deep convolutional neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104859>
- Olivos, P. C., Carrasco, F. O., Luis, J., Flores, M., Moreno, Y. M., & Nava, G. L. (2015). Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México. Logistics management model for small and medium sized enterprises in Mexico. *Contaduría y Administración*, 60(601), 181–203.
- Pedregosa, F., Varoquax, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R. and Dubourg, V. Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Peng, Y., Finin, T., Labrou, Y., Cost, R. S., Chu, B., Long, J., Tolone, W. J., Boughannam, A., & Raton, B. (1999). *An Agent-Based Approach for Manufacturing Integration* (pp. 1–40). Advanced Technology Program, National Institute of Standards and Technology.
- Pérez, Y., & Santos, K. (2009). Supply Chain Management (SCM) o Gestión de la Cadena de Suministro. *Universidad Central de Venezuela*, 16.
- Pérez-Salazar, M., Aguilar-Lasserre, A., Cedillo-Campos, M., Posada-Gómez, R., del Moral-Argumedo, M., & Hernández-González, J. (2019). An Agent-Based Model

- Driven Decision Support System for Reactive Aggregate Production Scheduling in the Green Coffee Supply Chain. *Applied Sciences*, 9(22), 4903. <https://doi.org/10.3390/app9224903>
- Pérez-Salazar, M. D. R. (2019). *Sistema de gestión del conocimiento basado en la integración del enfoque multi-agente y el modelo SCOR para la administración de la cadena de suministro*. Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Pérez-Salazar, M. D. R., Aguilar Lasserre, A. A., Cedillo-Campos, M. G., & Hernández González, J. C. (2017). The role of knowledge management in supply chain management: A literature review. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 10(4), 711. <https://doi.org/10.3926/jiem.2144>
- Puche, J., Costas, J., Ponte, B., Pino, R., & de la Fuente, D. (2019). The effect of supply chain noise on the financial performance of Kanban and Drum-Buffer-Rope: An agent-based perspective. *Expert Systems with Applications*, 120, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.009>
- Rodrigo, J. A. (2020). *Árboles de decisión con Python: regresión y clasificación, available under a Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)*. https://www.cienciadedatos.net/documentos/py07_arboles_decision_python.html
- Romero Tagal, E. (2016). *GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LA EXPORTADORA SAN GABRIEL, S.A. DE C.V., APOYADA CON LA TECNOLOGÍA RFID*. Instituto Tecnológico Superior de Misantla.
- Rubenstein-Montano, B., Liebowitz, J., Buchwalter, J., Mccaw, D., Newman, B., & Rebeck, K. (2001). A systems thinking framework for knowledge management. In *Decision Support Systems* (Vol. 31). www.elsevier.com/locate/dsw
- Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. In *JOURNAL 01: MATHEMATICAL PSYCHOLOGY* (Vol. 15).
- Sarkar, A., & Šormaz, D. (2018). Multi-agent System for Cloud Manufacturing Process Planning. *Procedia Manufacturing*, 17, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.067>

- Schniederjans, D. G., Curado, C., & Khalajhedayati, M. (2020). Supply chain digitisation trends: An integration of knowledge management. *International Journal of Production Economics*, 220(July), 107439. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.012>
- Schwentesius Rideman, R., & Gómez Cruz, M. Á. (2005). *Limón Persa Tendencias en el mercado mexicano* (Primera). Universidad Autónoma de Chapingo.
- Shravankumar, H. (2020). *Ways to Evaluate Regression Models Towards Data Science*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/ways-to-evaluate-regression-models-77a3ff45ba70>
- Simanca, M. M., Montoya, L. A., & Bernal, C. A. (2016). Gestión del Conocimiento en Cadenas Productivas: El Caso de la Cadena Láctea en Colombia. *Información Tecnológica*, 27(3), 93–106. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000300009>
- Smith, P. M., & Meso, P. (2000). A resource-based view of organizational knowledge management systems. *Journal of Knowledge Management*, 4(3), 224–234.
- Szulanski, G. (1996). Exploring internal stickiness: Impediments to the transfer of best practice within the firm. *Strategic Management Journal*, 17(S2), 27–43. <https://doi.org/10.1002/smj.4250171105>
- Type, I., & Valdivia, S. (2018). *Propuesta de mejora en la gestión de la cadena de suministro (SCM) programación y distribución de producto terminado en una industria cervecera*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Wang, Z., Cui, B., Feng, Q., Huang, B., Ren, Y., Sun, B., Yang, D., & Zuo, Z. (2019a). An agent-based approach for resources' joint planning in a multi-echelon inventory system considering lateral transshipment. *Computers & Industrial Engineering*, 138(July 2018), 106098. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106098>
- Wang, Z., Cui, B., Feng, Q., Huang, B., Ren, Y., Sun, B., Yang, D., & Zuo, Z. (2019b). An agent-based approach for resources' joint planning in a multi-echelon inventory system considering lateral transshipment. *Computers & Industrial Engineering*, 138(July 2018), 106098. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106098>

- Yousef Obeidat, B., Bahjat Abdallah, A., Osama Aqqad, N., Akhoershiedah, A. H. O. M., & Maqableh, M. (2017). The Effect of Intellectual Capital on Organizational Performance: The Mediating Role of Knowledge Sharing. *Communications and Network*, 09(01), 1–27. <https://doi.org/10.4236/cn.2017.91001>
- Yu, C., Wong, T. N., & Li, Z. (2017). A hybrid multi-agent negotiation protocol supporting supplier selection for multiple products with synergy effect. *International Journal of Production Research*, 55(1), 18–37. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1189105>

Anexos

ANEXO A. Estado del arte

Introducción

Esta sección comprende toda la información del análisis del estado del arte, en el Capítulo 2 de este documento se describe la metodología utilizada para dicho análisis, y se destaca brevemente aquella información puntual sobre la temática de la investigación, este Anexo A contiene la información de manera detallada, ya que resulta de interés y sirve al lector para entrar en contexto.

El Anexo está dividido de la siguiente manera, se describen los principales trabajos encontrados, en el periodo 2016-2020, los siguientes temas: Gestión del Conocimiento, Gestión de la Cadena de Suministro, Gestión del Conocimiento en la Cadena de Suministro, Agentes Inteligentes y finalmente Agentes Inteligentes en la Gestión del Conocimiento, de cada investigación se menciona el autor y se describe la aplicación de la técnica en cuestión para dar solución a una problemática también mencionada.

Al final de la sección se encuentran las Tabla 33 a Tabla 37 que concentran la información analizada en el estado del arte, año de emisión de la investigación, nombre del artículo, autores, área de la CS que se aborda, tipo de agente, software utilizado, entre otros.

1. Gestión del conocimiento

En el estudio; Vinculación de la gestión del conocimiento, el aprendizaje organizacional y la memoria, los autores (Antunes & Pinheiro, 2019) desarrollaron una revisión sistemática de la literatura mediante la síntesis de conceptos. De dos bases de datos, se analizaron un total de 2511 artículos científicos entre 1960 y 2017, divididos en dos estudios.

Los autores (Lin & Yang, 2019) establecen como objetivo desarrollar el sistema de agente de información de minería de datos de energía basado en la nube OntoDMA, basado en el entorno de nube WIAS y la tecnología de análisis de Big Data, que está integrado en un sistema activo de múltiples agentes basado en la nube para proporcionar proactivamente tiempo y predicción rápida de información de dominio, se realiza un estudio de caso sobre el sistema de información de ahorro de energía, y los resultados relevantes de I + D se presentan

en detalle. Luego, se ilustran tanto la interfaz de I + D del sistema preliminar como la verificación experimental. Finalmente, el rendimiento de la memoria caché del conjunto de soluciones aumenta en un 19.82%, la carga de trabajo de consulta de las Reglas de predicción se reduce en un 66.51% y el tiempo operativo general se reduce en un 5.21%, lo que alivia de manera efectiva y eficiente la carga de trabajo en la parte posterior. sistema servo final.

El propósito del trabajo realizado por (Heisig, 2009) fue observar cómo la gestión del conocimiento ha entrado en una nueva fase donde se requiere la consolidación y la armonización de conceptos. Algunas primeras normas se han publicado en Europa y Austria para fomentar una comprensión común de los términos y conceptos. El objetivo principal del estudio fue analizar los marcos de gestión del conocimiento de la investigación y la práctica con respecto a los elementos de su modelo e intentar descubrir diferencias y correspondencias. La metodología de estudio del marco se basó en el análisis de contenido cuantitativo y cualitativo de los marcos de gestión del conocimiento existentes, que se publicaron en la literatura científica, se presentaron en conferencias especializadas o se utilizaron en iniciativas de gestión del conocimiento y empresas. Para la adquisición de datos, se investigaron las publicaciones científicas relevantes para el tema Gestión del Conocimiento. Además, se accedió a las documentaciones de conferencias publicadas en conferencias científicas y comerciales relacionadas con gestión del conocimiento en el período de 1998 a 2003, así como a varias fuentes de Internet para identificar los marcos de gestión del conocimiento. **El resultado del análisis muestra que hay cinco categorías amplias más frecuentemente mencionadas de actividades de gestión del conocimiento: compartir, crear, aplicar, almacenar e identificar conocimiento.**

Los autores (Chouikha Zouari & Dhaou Dakhli, 2018) se han dado cuenta de que la gestión del conocimiento es la clave para el desempeño organizacional y la supervivencia en un entorno económico, tecnológico, político y social en constante cambio; y lo plasman en este trabajo donde concluyen que para ser eficaz, la implementación de la gestión del conocimiento dentro de las organizaciones requiere un apoyo materializado por los sistemas de gestión del conocimiento. Sin embargo, a pesar de la riqueza de la literatura sobre sistemas de gestión del conocimiento, las definiciones propuestas para este concepto están en gran medida orientadas a la tecnología; proponen un modelo conceptual, basado en la teoría de la

estructuración, que demuestra que la importancia y las características de las cuatro facetas de los sistemas de gestión del conocimiento dependen de la estrategia de gestión del conocimiento, las actividades de gestión del conocimiento y el entorno externo.

(Fernando & Meleán, 2005) analiza la relación existente entre la Gestión del Conocimiento, un modelo específico de creación de conocimiento, los Knowledge Based System y cómo estas Tecnologías de la Información juegan un rol muy importante en la creación, codificación y transferencia del conocimiento.

Los autores (Rubenstein-Montano, Liebowitz, Buchwalter, Mccaw, et al., 2001) revisan los marcos de gestión del conocimiento existentes y proporciona sugerencias sobre lo que debe incluir un marco general. La característica distintiva de esta investigación es que hace hincapié en colocar la gestión del conocimiento en un contexto más amplio de pensamiento sistémico para que los factores que influyen en su éxito o fracaso puedan ser mejor reconocidos y entendidos.

La realización de estudios basados en la gestión del conocimiento tiene una amplia gama de aplicación y podemos verlo reflejado en la diversidad de áreas en las que se han hecho estudios, que van desde el estudio general de la gestión del conocimiento como los trabajos realizados por (Antunes & Pinheiro, 2019, Rubenstein-Montano, Liebowitz, Buchwalter, Mccaw, et al., 2001, Fernando & Meleán, 2005) y más recientemente (Chouikha Zouari & Dhaou Dakhli, 2018), pasando por su aplicación el diseño de productos, algo ya más específico, como el trabajo realizado por (Chandra & Kamrani, 2003a) y más recientemente (Lin & Yang, 2019) aplicando este enfoque a la minería de datos en la tecnología 5G de la nube e internet.

2. Gestión de la cadena de suministro

La Gestión de la Cadena de Suministro (GCS) es un tema que ha recibido una considerable atención por parte de investigadores, académicos y el mundo empresarial (Alba Cabañas & Herrera Lemus, 2016).

(Alomoto et al., 2015) se enfocan en el análisis de la GCS de las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) ecuatorianas, incluyendo el análisis de las relaciones con sus clientes y proveedores, los procesos de producción y calidad, y la implementación de sistemas “verdes”. Se consideran factores como el enfoque estratégico de la empresa y su tamaño. se

realizó una encuesta presencial a 336 gerentes de PyMEs de la región de Pichincha en Ecuador. Los resultados demuestran que el enfoque estratégico de las empresas se relaciona con las prácticas implementadas, en la mayoría de los casos de la manera esperada, por ejemplo, empresas con enfoque en costos/ eficiencia tienen innovaciones que reducen sus costos.

3. Gestión del conocimiento en la cadena de suministro

Tal como se ha podido ver en los artículos anteriormente mencionados, la gestión del conocimiento resulta ser tendencia en los últimos años, la capitalización del conocimiento como tal cobra una mayor importancia, y su aplicación a la cadena de suministro es una combinación que permite incrementar la eficiencia y optimizar los procesos de comunicación entre los eslabones de la cadena de suministro, a continuación, se muestran algunos trabajos que realizan la modelación de la gestión del conocimiento para cadenas de suministro de diferentes naturalezas. La mayoría de la literatura existente sobre gestión del conocimiento en un entorno interorganizativo, se centra en las alianzas de tipo horizontal entre dos o más socios, mientras que son pocos los autores que se centran en las alianzas de tipo vertical, entre proveedores y clientes, es decir, en la cadena de suministro (Capó Vicedo et al., 2005).

(Schniederjans et al., 2020) tienen como propósito de su investigación comprender las consultas futuras de los académicos para ampliar sus perspectivas y aprovechar la gestión del conocimiento para mejorar el paradigma de investigación de digitalización de la cadena de suministro. Esto se realiza a través **de una revisión bibliográfica a gran escala, así como un análisis textual y pronósticos sobre aplicaciones, tecnologías y temas de la industria y de campo en la digitalización.** Utilizando datos textuales, así como datos de tendencias de Google de 2010 a 2018, las comparaciones se realizan en dos mediciones (prevalencia y crecimiento) para determinar diferencias significativas entre las publicaciones académicas y los medios de profesionales (noticias y videos) para comparar la actividad académica versus profesional en el área de digitalización de la cadena de suministro antes mencionadas. Aplicando el campo de la gestión del conocimiento a la gestión de la cadena de suministro a través de un marco teórico de gestión del conocimiento, este documento proporciona futuras investigaciones sobre cómo los académicos pueden utilizar las áreas ampliamente ignoradas de la digitalización de la cadena de suministro, así como las áreas de crecimiento para

explicar cómo la dimensión humana de La gestión de la cadena de suministro se puede explorar más a fondo para optimizar el rendimiento digital de la cadena de suministro.

En su estudio, los autores (Aminzadegan et al., 2019a), abordan por primera vez simultáneamente los diferentes requisitos de los clientes y los diferentes objetivos del fabricante en un problema integrado de programación de producción, transporte y asignación de recursos. El problema consiste en dos tipos de clientes, considerados como los agentes. El primer agente acepta la tardanza en la entrega de los pedidos siempre que el fabricante pague la penalidad por tardanza; mientras que el segundo agente no acepta las órdenes de retraso. El propósito es minimizar la suma del costo de entrega del lote, la asignación de recursos, el costo de la penalidad por retraso y el costo de venta perdida (el número total de pedidos tardíos). Para resolver el problema, **se proponen dos modelos de programación matemática, que incluyen una programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) y una programación lineal de enteros mixtos (MILP)**. Además, debido a la naturaleza NP-hard del problema, se proponen dos algoritmos metaheurísticos de Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) y Ant Lion Optimization (ALO), así como un algoritmo heurístico. Para evaluar los méritos de los métodos de solución, se diseñan pruebas a pequeña y gran escala. Los resultados indican la superioridad del algoritmo genético adaptativo en comparación con otros algoritmos.

(M. D. R. Pérez-Salazar et al., 2017) examina el estado de la investigación de gestión del conocimiento en la gestión de la cadena de suministro desde tres puntos de vista, enfoque metodológico, área de gestión de la cadena de suministro y procesos de gestión del conocimiento. Los autores reportan los que principales resultados mostraron que la gestión del conocimiento puede verse como un mecanismo de palanca para: (i) integración de la cadena de suministro; (ii) la mejora de las relaciones internas e interrelacionadas en toda la cadena de suministro; (iii) alineación de la estrategia de la cadena de suministro; y (iv) el refuerzo de la transferencia de conocimiento en el desarrollo de productos. Algunas áreas de gestión de la cadena de suministro, como la logística inversa, la gestión de inventario, la previsión / planificación de la demanda, la contratación externa y la gestión de riesgos se han explorado solo hasta cierto punto. Además, la transferencia de conocimiento se está estudiando en la mayoría de los artículos, principalmente por estudio de caso y enfoque de

encuesta; modelos matemáticos y las técnicas de simulación se utilizan en artículos muy limitados, también se describen las perspectivas y los problemas de gestión.

En este artículo se hace un análisis de diferentes casos de estudio exitosos en los cuales se da prioridad a la gestión de la cadena de suministro, determinándose que es un elemento clave para la competitividad de las empresas debido a la importancia que tiene en los resultados empresariales a través del margen de beneficio, de los plazos de entrega, de la calidad del producto/servicio, de la satisfacción del cliente. Las autoras (Pérez & Santos, 2009) concluyen además que con la aparición de las Nuevas Tecnologías y más en concreto de Internet, la gestión de la cadena de suministro ha visto una importante oportunidad para mejorar debido a la disminución de costes de interacción con los proveedores.

(Lahaba & Santos, 2001) exponen un conjunto de conceptos y reflexiones sobre la categoría conocimiento y la gestión del conocimiento, sus ventajas, objetivos y herramientas esenciales. Se expresa, además, la relación que existe con otras herramientas de gestión, así como el papel del gestor del conocimiento y las cualidades de los profesionales de la información para desempeñarse en dicha función.

(Capó-Vicedo et al., 2007) analizan qué estructura o modelo organizativo es el más apropiado para que se dé una verdadera gestión del conocimiento en una cadena de suministro. Para ello se realiza una breve revisión de alguna de las aportaciones más significativas en la literatura existente sobre la relación entre la gestión del conocimiento y el contexto organizativo, así como sobre los requerimientos necesarios para gestionar el conocimiento en un contexto inter organizativo, como es el existente en una cadena de suministro. Del análisis realizado, los autores, concluyen que la estructura organizativa conocida como Empresa Virtual es la más apropiada para gestionar el conocimiento en una cadena de suministro, por sus características intrínsecas de confianza mutua entre sus miembros, así como por el dinamismo en su creación y operación.

(Capó Vicedo et al., 2005) analizan las características principales de la cadena de suministro de los proyectos constructivos, así como la importancia de que se produzca una verdadera gestión del conocimiento en la misma, para aumentar la competitividad de las empresas constructoras. Se han estudiado en este trabajo las principales características de la cadena de

suministro de la construcción, así como las necesidades de gestionar el conocimiento entre sus componentes, en todas las etapas de cada proyecto constructivo.

El modelo de gestión del infoconocimiento para segmentos de cadenas de suministro (GICCS), opera bajo la influencia de la gestión de la información (GI) y la gestión del conocimiento (GC), a partir de articular las variables de mayor impacto que aparecen en los conceptos, modelos y procesos de estos enfoques. El diseño que se presentan los autores (Alba Cabañas & Herrera Lemus, 2016) genera un solo ciclo, la espiral del infoconocimiento, que ofrece la posibilidad de su integración a los procesos de un segmento de cadena de suministro, soporta en la aplicación de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) con un enfoque tecnológico, que se expresa en la concepción de un portal corporativo. Esta herramienta permite la instrumentación del modelo para la gestión de las cadenas de suministro de ron a granel (CS), logra la integración de los enfoques GI y GC expresada en una espiral de infoconocimiento que articula los eslabones y procesos dentro de un segmento de cadena de suministro. Esta propuesta crea las bases para que las organizaciones puedan encadenarse, integra el infoconocimiento por primera vez a un segmento de CS, a la vez que proporciona una plataforma para la integración de todos los actores que componen el segmento de una CS. El modelo GICCS brinda a los segmentos de cadenas de suministro una gestión de su información integrada con todas las áreas de conocimiento necesarias, a la vez que facilita la toma de decisiones, el desarrollo de competencias, el aprendizaje, la simultaneidad de tareas y la anticipación a la demanda, estableciendo mayor conectividad entre los actores.

4. Agentes inteligentes

Los agentes inteligentes son una técnica de inteligencia artificial que desde hace ya varios años ha sido utilizada debido su capacidad de mejorar la comunicación en diferentes procesos optimizando de esta manera la toma de decisiones, a continuación, se describen algunos de los trabajos que se han realizado con esta técnica en diferentes áreas a fin de mostrar la versatilidad y amplia área de aplicación de la herramienta.

(Berrocal et al., 2003) abordan el problema de la recuperación de información en la web que se puede plantear desde diferentes puntos de vista, con mecanismos como la realimentación por relevancia, la utilización de tesauros, el estudio de los hiperenlaces, o la aplicación de redes neuronales, entre otros, proponen otra aproximación al problema que pretende obtener

resultados mucho más precisos, aunque sin perseguir altas tasas de exhaustividad, basándose en el uso de agentes inteligentes que rastreen la red según las necesidades informativas del usuario, indica las características de los agentes y se analizan algunas de las propiedades y habilidades deseables para aquellos agentes dedicados a la recuperación de información en la web. Los autores concluyen, después de analizar los problemas principales de la recuperación de información en la Web, que la mejora de los mecanismos de trabajo actuales y su aplicación en la recuperación de información debería integrarse en el empleo de los agentes, con el fin de conseguir aplicaciones muy precisas en sistemas de usuario.

El sistema de gestión de producción utilizado por la mayoría de los fabricantes hoy en día se compone de procesos desconectados de planificación y ejecución, y carece del soporte para la interoperabilidad y la colaboración necesaria para la integración en toda la empresa. Esta situación a menudo impide que el fabricante explore plenamente las oportunidades de mercado de manera oportuna. Para abordar este problema, se explora un enfoque basado en agentes para la integración empresarial inteligente. En este enfoque, se puede reunir rápidamente un conjunto de agentes con experiencia especializada para ayudar con la recopilación de información y conocimiento relevante, para cooperar entre sí y con otras partes del sistema de gestión de producción y humanos para llegar a decisiones oportunas al tratar con Diversos escenarios empresariales. El sistema multiagente propuesto por (Peng et al., 1999), incluida su arquitectura e implementación, se presenta y demuestra a través de un escenario de integración de ejemplo que involucra sistemas de software de planificación y ejecución reales.

5. Agentes inteligentes en la gestión del conocimiento

El uso de agentes inteligentes en la gestión de la cadena de suministros es otro tema en tendencia, la aplicación de esta técnica es sumamente diversa y es lógico pensar, dada su naturaleza de colaboración, comunicación, reactividad e independencia, que sea de bastante utilidad para el mejoramiento de la gestión de la cadena de suministros, se describen a continuación algunos de los trabajos más recientes en los cuales se ha considerado la aplicación y enfoque de esta técnica de inteligencia artificial para el manejo de gestión de cadenas de suministro.

Administrar eficientemente el flujo de productos a lo largo de la cadena de suministro es esencial para tener éxito en el mercado actual. Se consideran los mecanismos de programación Kanban (de Lean Management) y Drum-Buffer-Rope (DBR, de Theory of Constraints), los autores (Puche et al., 2019) **evalúan su desempeño en una cadena de suministro de cuatro niveles que opera dentro de un escenario de gran ruido. A través de un sistema basado en agentes, que se presenta como un poderoso sistema de soporte de decisiones basado en modelos para gerentes.**

La colaboración impulsada por el ser humano es parte de los procesos comerciales en la cadena de suministro, generalmente se representan en modelos desde una visión abstracta de alto nivel o se incluyen implícitamente en el uso de los mecanismos relacionados con la excepción. Esto **crea la necesidad de una ontología capaz de representar la colaboración impulsada por el ser humano en los procesos de negocios de la cadena de suministro que puede permitir la colaboración.** La ontología Agent Lab Language (TALL) se eligió como una posible solución al problema de investigación propuesto porque se basa en el concepto de un agente y colaboraciones comerciales. Un análisis de representación ontológica de Bunge-Wand-Weber se utilizó para evaluar la integridad ontológica del Agent Language Lab (TALL). A partir de este análisis, se elaboró un conjunto de proposiciones de acuerdo con los requisitos de colaboración impulsados por el ser humano. Siguiendo estas proposiciones y los resultados del análisis, **los autores** (Avédissian & Valverde, 2015) **propusieron construcciones adicionales a la ontología TALL como una solución al problema de investigación.**

(Duan et al., 2013) **analizan el desarrollo y las prácticas de gestión del conocimiento en una empresa cervecera local china**, incluida la incorporación de los miembros de su cadena de suministro en dichas prácticas. Se observa que tener una gran cuota de mercado puede suprimir temporalmente la importancia y la necesidad de prácticas de gestión del conocimiento, especialmente la necesidad de pronosticar la gestión del conocimiento relacionada. El estudio utiliza un método analítico subjetivo, en lugar de estadístico, para sacar sus conclusiones. Utiliza una combinación de entrevistas y cuestionarios extraídos de una extensa revisión de la literatura sobre prácticas de Gestión del conocimiento para revelar fenómenos interesantes e instancias inusuales dentro de la empresa seleccionada y sus socios asociados de la cadena de suministro.

(Min, 2010) explora varios subcampos de IA que son más adecuados para resolver problemas prácticos relevantes para SCM. Al hacerlo, este artículo revisa el historial anterior de éxito en las aplicaciones de IA para SCM e identifica las áreas más fructíferas de SCM en las que aplicar la IA. Se desarrolló una taxonomía en la cual se utilizaron tres esquemas de clasificación amplios: (1) alcance del problema como criterio para medir la amplitud y profundidad de los problemas de SCM que el estudio de IA intentó manejar; (2) la metodología como criterio para evaluar los avances teóricos en los estudios de IA y la idoneidad de subcampos de IA particulares para aplicaciones SCM; y (3) el estado de implementación como criterio para evaluar la practicidad de la tecnología de IA. El autor resume la aplicación de estas técnicas en tres grupos, Sistemas basados en agentes cuya aplicación en la GCS se centra en áreas como: Planeación y pronóstico de la demanda, Gestión de la relación con el cliente, Negociaciones, Preparación de pedidos; Algoritmos genéticos principalmente usados en el Diseño de redes de transporte; Sistemas Expertos en la planeación de inventarios, Decisiones de tipo “hacer-comprar”, y selección de proveedores.

(Janssen, 2005) **diseña un sistema de múltiples agentes que mejora la gestión de la cadena de suministro y se evalúa su valor comercial. Presenta la arquitectura semi-cooperativa y evalúa los beneficios mediante la simulación basada en agentes.** Descubriendo que el sistema de múltiples agentes aumenta el nivel de flexibilidad en la cadena de suministro y permite que los miembros de la cadena de suministro sean más receptivos. Esto tiene un impacto positivo en el tiempo de entrega de pedidos, el tiempo de procesamiento humano, los niveles de inventario y el número de desabastecimientos.

Como puede observarse los agentes inteligentes se han aplicado en diferentes aspectos de la gestión de la cadena de suministro, destacan los trabajos realizados por (Puche et al., 2019) donde se analiza el desempeño de la cadena de suministro desde el enfoque de Kanban, así como el de (Avédissian & Valverde, 2015) que propone el uso de agentes para comparar-representar la colaboración impulsada por el ser humano en los procesos de la cadena de suministro, de manera general el uso de la inteligencia artificial, específicamente la técnica de agentes inteligentes, en la gestión de la cadena de suministros (GCS) es analizada por (Min, 2010) y (Janssen, 2005) quienes estudian la aplicación de estas técnicas en diferentes

áreas de la GCS, y diseñan un sistema multiagente que mejora la GCS evaluando su valor comercial, respectivamente. Esta diversidad nos habla de la efectividad de la aplicación de la Inteligencia Artificial en la toma de decisiones en diferentes áreas.

6. Agentes Inteligentes en la gestión de la cadena de suministro

El crecimiento del sector productivo ha impulsado la evolución de las cadenas de suministro hacia sistemas altamente complejos, dinámicos y concurrentes. En consecuencia, las estructuras emergentes se han desarrollado a través de la integración de los avances en las tecnologías de información y hardware con el objetivo de aumentar la eficacia y la eficiencia, como la Industria 4.0. En este contexto, aunque varias obras utilizan un enfoque de múltiples agentes, ofrecen información limitada sobre el uso de modelos formales para especificar el sistema. Teniendo en cuenta las consecuencias potencialmente graves de la especificación de integración inexacta, se recomienda el uso de herramientas formales para diseñar los procesos para este tipo de sistema. Considerando las cadenas de suministro como un sistema de eventos discretos, las técnicas derivadas de las Redes de Petri se pueden usar para propósitos de modelado. Dichas técnicas incluyen Redes de Petri de colores, que han sido probadas efectivamente en modelos jerárquicos, análisis y control de sistemas distribuidos, características adecuadas para la especificación de un sistema de gestión de la cadena de suministro en un escenario de la industria 4.0. En este contexto, este artículo presenta un procedimiento sistemático que integra un grupo de guías, métodos y técnicas, para desarrollar una representación de un sistema con habilidades para resolver problemas, facilitando así la construcción de un modelo de gestión de la cadena de suministro con una estructura de múltiples agentes, que incorpora mejoras progresivas y permite la especificación del nivel de detalle deseado. Finalmente, las ventajas del modelo propuesto se presentan a través de su aplicación a un estudio de caso de ensamblaje de producto (Fierro et al., 2020).

(Muravev et al., 2019) presenta un enfoque novedoso para determinar los valores equilibrados de los principales parámetros de los centros logísticos. El modelo matemático propuesto por los autores da a entender cómo funciona el modelo de simulación de dinámica de sistemas de múltiples agentes. Calculando los valores equilibrados de los principales parámetros de los centros logísticos, se logra el estado de sostenibilidad y eficiencia del sistema de puerto marítimo-puerto seco. Finalmente, el modelo de dinámica del sistema

multiagente desarrollado ha sido validado en el estudio de caso del puerto seco de Yiwu ubicado en Zhejiang, China. El modelo desarrollado en la plataforma de simulación AnyLogic puede ser utilizado por diferentes partes interesadas, como las autoridades portuarias, organizaciones de proyección para justificar las decisiones de aumentar las capacidades de almacenamiento y rendimiento de las terminales marinas. La aplicación de enfoques combinados basados en agentes y dinámicas del sistema tiene varios beneficios. En primer lugar, el enfoque dinámico del sistema se aplica para estudiar el cambio del parámetro principal de los centros logísticos, dependiendo del cambio de otros parámetros. En segundo lugar, el agente basado se prueba para proporcionar la escalabilidad y la universalidad del modelo desarrollado.

Por su parte, (Bakhtadze et al., 2016) presentan un enfoque sistemático para la organización y gestión de la dinámica de la cadena de suministro de simulación de múltiples agentes del tráfico de vehículos de motor a larga distancia en el caso de un cuerpo de intercambio. Las formas de resolver el problema de la interacción tecnológica entre los participantes de la logística combinada de transporte por carretera se ofrecen en forma de una tecnología de transporte de productos distribuidos, construida sobre la base de la experiencia con el uso de la gestión operativa. Se usaron cuatro tipos de agentes: Agente de Camiones, Agente de Almacenes, Agente de Transportadores y Agente de Almacenes de Proveedores; no se menciona la plataforma de desarrollo ni mayores detalles sobre la arquitectura o agentes que la componen.

En su trabajo los autores (Kovalenko et al., 2017) especifican una arquitectura de agente de producto que se puede utilizar en sistemas de múltiples agentes, aunque el agente del producto se haya utilizado previamente en marcos de múltiples agentes, aún no se había propuesto una arquitectura interna bien definida para este agente, la arquitectura propuesta se prueba utilizando una simulación de sistema de fabricación. Los resultados de la simulación muestran la reactividad, proactividad y autonomía del agente de producto propuesto, se realiza la modelación y prueba del modelo de arquitectura en la plataforma Repast Symphony (Repast S) a través de un caso de estudio.

La autora (de Souza Henriques, 2019) presenta un estudio que tiene como objetivo analizar el enfoque del sistema de múltiples agentes aplicado en la cadena de suministro de un fabricante, considerando un sistema de producción pull, comienza con la revisión de la

literatura sobre sistemas de múltiples agentes y su aplicación a la cadena de suministro, para luego explicar el sistema propuesto, describiendo su arquitectura, organización, objetivos, negociación y aspectos de aprendizaje. El diseño de la negociación se inspiró en el protocolo de concesión monótono y las subastas holandesas. El aspecto de aprendizaje de los agentes es abordado por la heurística ϵ -codiciosa. Finalmente, se presentan los diseños, resultados y conclusiones de los experimentos. Los resultados muestran el comportamiento de los agentes y la evaluación general del sistema.

(Giret et al., 2017) proponen un método de ingeniería que ayuda a los investigadores a diseñar sistemas de fabricación inteligentes sostenibles, este centra en la identificación de los componentes de fabricación y el diseño e integración de mecanismos orientados a la sostenibilidad en la especificación del sistema, proporcionando pautas y herramientas de desarrollo específicas con soporte incorporado para características sostenibles, el enfoque está en los sistemas de fabricación basados en agentes / holónicos (MAS / HMS) como un enfoque poderoso para desarrollar IMS. Un sistema de fabricación MAS / HMS se concibe como un sistema inteligente distribuido en el que cada componente, elemento y / o recurso de fabricación se modela y controla mediante “agentes / holones” de software que pueden cooperar para resolver problemas complejos. Un agente / holon es una entidad computacional autónoma y flexible capaz de interacción social (es decir, es capaz de comunicarse / cooperar con otros agentes), el modelo se desarrolló en la plataforma JADE. Su aportación es la aplicación de la metodología Go Green ANEMONA en su arquitectura, el Go Green Holon, es un holón que considera los mecanismos orientados a la eficiencia (optimización de los medios de sostenibilidad), además de los mecanismos clásicos orientados a la efectividad, para tomar una decisión y / o ejecutar una operación.

(Jabeur et al., 2017) abordan el problema de la colaboración entre objetos logísticos; esta colaboración tiene como objetivo planificar, implementar y controlar de manera efectiva el flujo de servicios y bienes entre un punto de origen y un punto de destino, al tiempo que garantiza su distribución segura, optimizada y eficiente a los consumidores en cualquier momento y en cualquier lugar, ellos proponen una solución basada en múltiples agentes donde la arquitectura de cada agente incluye estructuras concurrentes individuales y colectivas de Creencia-Deseo-Intensidad (BDI) para apoyar y equilibrar objetivos propios y

colaborativos esta solución es adaptada y aplicada al contexto de la logística inteligente, y pone un enfoque especial en el importante tema de la gestión del riesgo logístico, también se incorpora el proceso de toma de decisiones dentro de los agentes individuales mientras se proporciona el mecanismo necesario para decidir sobre sus comportamientos individuales y / o colectivos. Para este fin, el agente asignado a cada LO (Objeto Logístico) está diseñado de acuerdo con una arquitectura de Intención de Creencia-Deseo (BDI).

(Ben Othman et al., 2017) proponen **una arquitectura basada en múltiples agentes para la gestión de las Cadenas de suministro de emergencia (ESC)**, en la que cada zona está controlada por un agente. **Un Sistema de Apoyo a la Decisión (DSS)** establece y resuelve, de manera distribuida, el problema de programación para la entrega de recursos desde las zonas de suministro de ESC a las áreas afectadas por ESC. Gracias a la cooperación de los agentes, el DSS proporciona un plan de programación que garantiza una respuesta efectiva a las emergencias. El enfoque se aplica a dos casos reales: la crisis de Malí y Japón. Las simulaciones se basan en datos reales que han sido validados por un equipo de especialistas en logística de Airbus Defence and Space.

(Sarkar & Šormaz, 2018) describen un nuevo marco de múltiples agentes, donde los agentes se configuran en base al formalismo de Creencia, Deseo e Intención (BDI), los agentes son capaces de descubrir y organizar de manera autónoma los servicios de fabricación en función de su conciencia intrínseca y extrínseca del conocimiento de fabricación en su estado más contemporáneo. La estructura interna de los agentes está construida por las reglas Horn-DL, argumentando que tales reglas DL-safe podrán extraer y analizar bases de conocimiento de fabricación, construidas con OWL-DL, también presentan un método novedoso para seleccionar servicios adecuados, desde la semántica intrínseca en la regla Horn-DL. El marco de agentes propuesto es novedoso de dos maneras: (1) a pesar de que investigaciones anteriores sugirieron el uso de lenguajes semánticos para modelar agentes de BDI, ningún otro marco de BDI utilizó reglas de Horn "DL-safe" para expresar componentes internos¹, lo que permite a los agentes de BDI razonar en un KB OWL-DL; (2) los servicios web semánticos se integran como acciones de agentes basados en un formalismo bien fundado, lo que permite el mapeo automático de E / S del servicio.

Con el objetivo de mejorar las situaciones de subdesarrollo del efecto de aprendizaje auto adaptativo de la negociación de adquisición colaborativa actual, en este documento los autores (Chen & Xu, 2018) construyen un modelo de negociación basado en un sistema de múltiples agentes y propone una estrategia de optimización de negociación combinada con aprendizaje automático. Proporciona una nueva perspectiva para el análisis de SCM inteligente. Los resultados experimentales sugieren que la estrategia propuesta mejora la tasa de éxito del aprendizaje auto adaptativo y la utilidad conjunta de los agentes en comparación con la estrategia de la máquina de aprendizaje individual, y logra una cooperación de beneficio mutuo entre la empresa compradora y el proveedor.

(Li et al., 2018a) proponen un SMA híbrido semánticamente agregado (OMAS), que consta de un Agente de gestión de servicios, un Agente de configuración, un Agente de gestión de miembros, un Módulo dirigido por procesos y un Módulo semántico mejorado. Estos componentes colaboran para integrar datos heterogéneos desprovistos de ambigüedades semánticas, mejorando así la coherencia y la eficiencia de los flujos de trabajo. Una cuadrícula de ontología escalable se inicializa como la base operativa después de analizar los trabajos relacionados. Además, OMAS agrega innovadora asistencia semántica al proceso de selección de proveedores en el que se sugiere un algoritmo de negociación de dos fases. Finalmente, se realiza un ejemplo ilustrativo de una compañía marina para demostrar los beneficios de OMAS.

Los autores (Ju et al., 2018) presentan el sistema de múltiples agentes (MAS) para el modelo de programación inteligente de la operación cooperativa de autonomía de múltiples (Micro red) MG. En primer lugar, las plantas de energía eólica (WPP), generadores fotovoltaicos (PV), turbinas de gas convencionales, sistemas de almacenamiento de energía (ESS) y cargas controlables (CL) se integran en MG con la respuesta a la demanda basada en el precio (PBDR). Luego, un marco de sistema de control de coordenadas de 3 capas está diseñado para MG, a saber, un sistema de gestión de distribución (DMS), un controlador central MG y elementos controlables MG. Además, se discute la influencia de los modos ESS en la operación de MG, a saber, el modo de ciclo de vida más largo (LLC) y el modo óptimo económico eficiente (OEE). Finalmente, el proyecto MORE MICROGRIDS en Europa se toma como plataforma de simulación.

El propósito del trabajo realizado por (Drakaki et al., 2018) es abordar la solución del problema de planificación del sitio de asentamiento de refugiados con un método de modelado de sistema inteligente multiagente (SMA). En particular, los agentes inteligentes utilizan dos métodos conocidos de toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM), el Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP) y el enfoque de diseño axiomático difuso con factores de riesgo (RFAD), para clasificar los sitios alternativos para la ubicación de asentamientos de refugiados. Según el conocimiento de los autores, este estudio es el primero que utiliza enfoques MAS y MCDM en un sistema de apoyo a la decisión para la planificación de asentamientos de refugiados en la literatura. El método propuesto se ha aplicado para evaluar cuatro sitios de alojamiento para refugiados actualmente en funcionamiento en Grecia. Los resultados obtenidos han confirmado y reflejado la situación actual en estos lugares de campamento.

Los autores (Ghadimi et al., 2019) proponen un enfoque de sistemas de múltiples agentes (MAS) para abordar el proceso de evaluación y selección de proveedores sostenibles para proporcionar un canal de comunicación adecuado, intercambio de información estructurada y visibilidad entre proveedores y fabricantes. Además, se investiga en detalle la aplicación de los MAS en este proceso y su aplicabilidad natural como una de las tecnologías que permiten avanzar hacia los SC de la Industria 4.0. Se encuentra que el enfoque propuesto puede ayudar a los tomadores de decisiones dentro de las empresas manufactureras a tomar decisiones rápidas con menos interacciones humanas. El mérito del MAS desarrollado se demuestra a través de una implementación en el mundo real en un fabricante de dispositivos médicos. Finalmente, las limitaciones y ventajas del enfoque propuesto se presentan junto con algunas observaciones para el trabajo futuro.

La contribución del trabajo realizado por (Behdani et al., 2019) es presentar una plataforma de simulación orientada a los agentes para la gestión de la interrupción de la cadena de suministro. Aunque existen otros estudios de simulación para el modelado de la cadena de suministro, el objetivo de este documento es desarrollar un marco de simulación flexible para la gestión de interrupciones en una cadena de suministro (química). De hecho, el marco presentado tiene como objetivo apoyar la toma de decisiones al modelar diferentes interrupciones y políticas de gestión de interrupciones, tanto a nivel social como técnico de la cadena de suministro, para ello los autores utilizaron una visión socio-técnica para

gestionar las interrupciones de la cadena de suministro. Además, el marco de simulación presentado es flexible y puede soportar decisiones tanto antes como después de la interrupción.

El objetivo de la investigación presentada por (Gumzej & Čišić, 2018) es mejorar la calidad general del servicio de la cadena de suministro al permitir que los agentes de las empresas evalúen la calidad del servicio de sus socios a través del historial de sus transacciones, los autores han diseñado una plataforma descentralizada de mercado electrónico basada en agentes.

Los autores (Helo et al., 2018) consideraron un ejemplo de centro de servicio de vehículos, donde el impacto de la estructura de servicio centralizada y descentralizada se puede evaluar en función de la utilización de la capacidad. En este caso, un fabricante de vehículos está expandiendo el negocio para cubrir servicios de ciclo de vida y necesita mantener un cierto nivel de servicio de los activos del cliente para obtener pagos recurrentes. En este ejemplo, los centros de servicio de vehículos son talleres de servicio autorizados que proporcionan operaciones de reparación y servicio después de la compra de un vehículo pesado profesional. La red de servicio puede consistir en varios tipos diferentes de unidades proveedoras de servicios, que tienen ubicación y rendimiento como propiedades de objeto.

(Belykh & Botvin, 2018) analizan los desafíos actuales en la gestión de la cadena de suministro y los autores presentan un modelo para el marco de múltiples agentes a fin de investigar la dinámica de la cadena de suministro, además se hace una discusión sobre la gestión de la cadena de suministro, sus desafíos vitales y las posibles soluciones para superar estos desafíos. Además, discutimos los sistemas multiagente y su aplicación para la gestión de la cadena de suministro. Consideran el modelado de eventos discretos a través de agentes y el modelo propuesto para la simulación de la cadena de suministro. También se exploran las oportunidades de usar métodos de pronóstico para lograr un mejor desempeño en la gestión de la cadena de suministro.

(Muravev et al., 2019) presentan un enfoque novedoso para determinar los valores equilibrados de los principales parámetros de los centros logísticos. El modelo matemático propuesto por los autores da a entender cómo funciona el modelo de simulación de dinámica de sistemas de múltiples agentes. Calculando los valores equilibrados de los principales

parámetros de los centros logísticos, se logra el estado de sostenibilidad y eficiencia del sistema de puerto marítimo-puerto seco. Finalmente, el modelo de dinámica del sistema multiagente desarrollado ha sido validado en el estudio de caso del puerto seco de Yiwu ubicado en Zhejiang, China. El modelo desarrollado en la plataforma de simulación AnyLogic puede ser utilizado por diferentes partes interesadas, como las autoridades portuarias, organizaciones de proyección para justificar las decisiones de aumentar las capacidades de almacenamiento y rendimiento de las terminales marinas.

(Guizzi et al., 2019) en su artículo investigan una integración dinámica del proceso de planificación y programación de operaciones de un típico sistema de fabricación Open Job-Shop. Para este propósito, los autores proponen un protocolo de negociación modificado basado en CNP, a través de un modelado de múltiples agentes para trabajos y máquinas operativas, se introduce por primera vez una nueva tecnología altamente flexible e innovadora, basada en los Sistemas de múltiples agentes (MAS), en los campos de Inteligencia Artificial Distribuida y programación. De esta forma, es posible crear un modelo de programación descentralizado y horizontal para reemplazar el modelo centralizado vertical tradicional. El uso de un modelo centralizado de arriba hacia abajo para la asignación de tareas causa rigidez y limita la capacidad de resolución de problemas en el mundo real.

Los autores (Ivashkin & Nikitina, 2019) proponen el modelo de simulación orientado a agentes del sistema logístico de los flujos de materiales en una empresa de procesamiento de carne de múltiples surtidos del complejo agroindustrial en la esfera del suministro de alimentos desde las granjas y su procesamiento industrial, almacenamiento y realización de productos. La función objetivo de los agentes que interactúan se reduce a la minimización de las desviaciones de la estructura planificada de la variedad de productos multicomponentes y el cumplimiento del tiempo de pedido debido a las restricciones con respecto a la provisión de recursos, el volumen y la variedad de productos manufacturados, así como las restricciones de recetas. El algoritmo de redistribución de material de ramificación fluye como una estrategia intelectual de comportamiento e interacción de agentes en el surtido: se describe la optimización de la receta del sistema de producción del complejo agroindustrial. Se presentan los resultados del modelado de eventos discretos de flujos de material en el sistema de simulación universal Simplex3.

Los autores (Lu et al., 2019) **presentan un marco de sistema de logística de producción basado en múltiples agentes con capacidad inteligente de toma de decisiones en tiempo real.** La toma de decisiones involucra principalmente dos aspectos, uno es el tema del despacho de pedidos y el otro es el problema de selección de ruta de AGV. Basado en el resumen de los modelos y algoritmos existentes, este documento analiza la función de logística de producción y divide el sistema PL (Programación de Logística) en siete agentes, a saber, agente de tareas, agente de base de datos de capacidad, agente de ruta de guía, agente de base de datos de entorno, agente de AGV, agente de supervisión y gestión agente. Este marco simplifica la estructura del sistema PL y reduce la complejidad del control PL.

(Wang et al., 2019a) detallan un enfoque basado en agentes para la planificación conjunta de recursos en un sistema de inventario de múltiples niveles considerando el transbordo lateral. Una planificación conjunta de los repuestos y los trabajadores de mantenimiento en el transbordo transversal y lateral puede reducir el costo total del sistema; sin embargo, solo una parte limitada de la literatura considera esta combinación. Primero, se proporciona un mecanismo de modelado de falla de reloj doble para generar con precisión los requisitos de recursos de mantenimiento. Posteriormente, se describe un proceso de programación de recursos basado en el protocolo neto del contrato. Además, el cambio dinámico en el inventario de repuestos también se analiza considerando si los componentes de falla reemplazados pueden repararse o no. Además, se desarrolla un método de evaluación de costos del sistema para comparar diferentes estrategias de programación y seleccionar la que pueda minimizar el costo total esperado.

En su estudio, los autores (Aminzadegan et al., 2019a), abordan por primera vez simultáneamente los diferentes requisitos de los clientes y los diferentes objetivos del fabricante en un problema integrado de programación de producción, transporte y asignación de recursos. El problema consiste en dos tipos de clientes, considerados como los agentes. El primer agente acepta la tardanza en la entrega de los pedidos siempre que el fabricante pague la penalidad por tardanza; mientras que el segundo agente no acepta las órdenes de retraso. El propósito es minimizar la suma del costo de entrega del lote, la asignación de recursos, el costo de la penalidad por retraso y el costo de venta perdida (el número total de pedidos tardíos). Para resolver el problema, **se proponen dos modelos de programación matemática, que incluyen una programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) y**

una programación lineal de enteros mixtos (MILP). Además, debido a la naturaleza NP-hard del problema, se proponen dos algoritmos metaheurísticos de Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) y Ant Lion Optimization (ALO), así como un algoritmo heurístico. Para evaluar los méritos de los métodos de solución, se diseñan pruebas a pequeña y gran escala. Los resultados indican la superioridad del algoritmo genético adaptativo en comparación con otros algoritmos.

(M. Pérez-Salazar et al., 2019) presenta un sistema de apoyo a la decisión basado en un modelo basado en agentes para la cadena de suministro agroalimentario. Los aportes en esta investigación se toman de un ejemplo de caso de una cadena de suministro de café verde mexicano. En este contexto, el agente de apoyo a la decisión sirve para obtener conocimiento útil para lograr i) la decisión con respecto a la estimación del rendimiento del café Cherry obtenido en la plantación de café, y la decisión de verificación de la muestra de café Parchment, utilizando Fuzzy Logic que involucra un motor de inferencia con Reglas de tipo IF-THEN; ii) la decisión de establecimiento del plan de producción, utilizando un enfoque de reglas de toma de decisiones basado en el acoplamiento de las reglas de inferencia difusa IF-THEN y la representación basada en ecuaciones por medio de una programación entera mixta con el objetivo de maximizar el nivel de servicio al cliente; y iii) la decisión de actualización del plan de producción utilizando ecuaciones matemáticas una vez que el nivel de servicio al cliente cae por debajo del nivel esperado

(Barenji et al., 2019) propone un enfoque híbrido basado en agentes para la programación y sincronización de parques logísticos de comercio electrónico (EcLP). Esto se logra integrando centros de distribución inteligentes dentro del entorno de comercio electrónico. La plataforma propuesta se ha desarrollado sobre la base de una tecnología de agente, que no solo sirve para fines de descentralización y sincronización, sino que también se ha optimizado para el transporte y la logística del sistema en general. Además, se desarrollaron mecanismos de comunicación basados en agentes móviles entre los agentes de hardware y los agentes de software, y la plataforma híbrida propuesta basada en agentes se implementó y probó en base a un estudio de caso. Después de esto, los resultados se compararon con un sistema convencional basado en cuatro indicadores principales.

Los problemas de programación en las aplicaciones de dominio de fábrica generalmente involucran muchas máquinas paralelas, con cada máquina capaz de procesar varias tareas. En la mayoría de los casos, cambiar el estado actual de la máquina a otro estado para procesar una tarea diferente conlleva costos de material y tiempo adicionales. Si el sistema general puede mantener el rendimiento esperado, minimizar estos cambios de estado es muy beneficioso, y los enfoques basados en agentes inspirados en las estrategias de asignación de tareas de varios insectos sociales han ganado una atención creciente como soluciones. El concepto básico se basa en la relación del umbral de estímulo, y un agente individual determina si realiza una tarea determinada o no en función de dos conjuntos de términos, los estímulos externos ambientales para la tarea y los valores de umbral internos de todas las tareas posibles. En este enfoque, la selección de valores umbral apropiados está directamente relacionado con el rendimiento general del sistema, los autores presentan un enfoque basado en feromonas para obtener valores umbral apropiados. Cada agente mantiene una cola de historial de tareas limitada y de tamaño constante de las tareas procesadas recientemente, y la información de cada agente se usa individualmente para calcular los valores umbral de las tareas. Con base en varios resultados experimentales se demuestra que el rendimiento del método propuesto es comparable al de otros métodos convencionales (Lee & Kim, 2019).

Los autores (Aminzadegan et al., 2019a) abordan simultáneamente diferentes requisitos de los clientes y diferentes objetivos del fabricante en un problema integrado de programación de producción, transporte y asignación de recursos. El problema consiste en dos tipos de clientes, considerados como los agentes. El primer agente acepta la tardanza en la entrega de los pedidos siempre que el fabricante pague la penalidad por tardanza; mientras que el segundo agente no acepta las órdenes de retraso. El propósito es minimizar la suma del costo de entrega por lotes, la asignación de recursos, el costo de penalización por tardanza y el costo de venta perdida (el número total de pedidos tardíos). Para resolver el problema, se proponen dos modelos de programación matemática, incluida una programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) y una programación lineal de enteros mixtos (MILP). Además, debido a la naturaleza NP-hard del problema, se proponen dos algoritmos metaheurísticos de Algoritmo Genético Adaptativo (AGA) y Ant Lion Optimization (ALO), así como un algoritmo heurístico. Para evaluar los méritos de los métodos de solución, se diseñan pruebas

a pequeña y gran escala. Los resultados indican la superioridad del algoritmo genético adaptativo en comparación con otros algoritmos.

(Fierro et al., 2020) presenta un procedimiento sistemático que integra un grupo de guías, métodos y técnicas, para desarrollar una representación de un sistema con habilidades para resolver problemas, facilitando así la construcción de un modelo de gestión de la cadena de suministro con una estructura de múltiples agentes, que incorpora mejoras progresivas y permite la especificación del nivel de detalle deseado. Finalmente, las ventajas del modelo propuesto se presentan a través de su aplicación a un estudio de caso de ensamblaje de producto.

El uso de agentes inteligentes para crear sistemas enfocados a la gestión de cadenas de suministro, como se menciona al inicio de esta sección se ha visto aplicado a través de los años a distintas partes del proceso de la cadena de suministros, a continuación (Tabla 33 a Tabla 37), se tabulan algunos ejemplos menos recientes, específicamente realizados durante el periodo 2016-2020:

Tabla 33 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 1 de 5.

Número	Título	Año	Autor	Área	Eslabón CS	Técnica
1	Un sistema basado en múltiples agentes con procesamiento de Big Data para mejorar la agilidad de la cadena de suministro.	2016	Mihalis Giannakis Michalis Louis	Cadena de Suministro	Producción, Pedidos, Compras, Logística, Proveedores	Sistema Multi Agentes
2	Agentes BDI difusos para el monitoreo de la cadena de suministro en un entorno incierto.	2016	Aicha Ben Mekkia, Jihène Tounsib and Lamjed Ben Saidc	Cadena de Suministro	Demanda	Marco Basado en Agentes (Dinámico)
3	Un modelo de sistema de múltiples agentes para cadenas de suministro con transbordos preventivos laterales: aplicación en una cadena de suministro automotriz multinacional.	2016	Mualla Gonca Avci, Hasan Selim	Cadena de Suministro	Demanda	Sistema Multi Agentes
4	Un modelo de negociación basado en restricciones difusas basado en agentes para resolver problemas de planificación y programación de la cadena de suministro.	2016	Chia-Yu Hsu, et al.	Cadena de Suministro	Planeación de la CS	Sistema Multi Agentes
5	Un protocolo de negociación híbrido de múltiples agentes que respalda la selección de proveedores para múltiples productos con efecto de sinergia.	2016	Chunxia Yu, T.N. Wong & Zhi Li	Cadena de Suministro	Proveedores	Modelo de Agentes
6	Simulación de múltiples agentes de la aplicación SWAP BODIES en la cadena de suministro de fabricación.	2016	Nataliya N. Bakhtadze, et al.	Cadena de Suministro	Logística	Modelo de Agentes

Tabla 34 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 2 de 5.

Número	Título	Año	Autor	Área	Eslabón CS	Técnica
7	Análisis de riesgos de las actividades de mantenimiento en una cadena de suministro de GLP con un enfoque de múltiples agentes.	2017	Gallab Margem, et al.	Cadena de Suministro	Riesgo en Mantenimiento	Modelo de Agentes
8	Enfoque de sistema de múltiples agentes aplicado a la cadena de suministro de un fabricante utilizando una función objetivo global y conceptos de aprendizaje.	2017	Rafaella de Souza Henriques	Cadena de Suministro	Todos	Sistema Multi Agentes
9	Un sistema de soporte de decisiones basado en agentes para la programación de recursos en cadenas de suministro de emergencia.	2017	Ben Othman, et al.	Cadena de Suministro de Emergencia	Programación de Recursos	Sistema Multi Agentes
10	Un enfoque de sistemas de múltiples agentes para la selección de proveedores sostenibles y la asignación de pedidos en una cadena de suministro de asociación.	2017	Pezhman Ghadimi et al.	Cadena de Suministro	Proveedores	Sistema Multi Agentes
11	Una metodología holónica de múltiples agentes para diseñar sistemas de control de fabricación inteligentes sostenibles.	2017	Adriana Giret, et al.	Logística y Cadena de Suministro	Sistemas de Manufactura	Sistema Multi Agentes
12	Hacia el aprovechamiento de la colaboración de logística inteligente con una solución basada en un sistema multiagente.	2017	Nafaa Jabeur, et al.	Cadena de Suministro	Logística	Sistema Multi Agentes
13	Diseño e implementación de una arquitectura de agente de producto inteligente en sistemas de fabricación.	2017	Kovalenko Ilya, et al.	Cadena de Suministro	Todos	Sistema Multi Agentes
14	Sistema de múltiples agentes para la planificación del proceso de fabricación en la nube.	2018	Arkopaul Sarkar, Duśan Ćormaz	Cadena de Suministro	Fabricación en la Nube	Sistema Multi Agentes

Tabla 35 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 3 de 5.

Número	Título	Año	Autor	Área	Eslabón CS	Técnica
15	Una estrategia de optimización de negociación de compras colaborativas con la cadena de suministro basada en un sistema de múltiples agentes.	2018	Chouyong Chen and Chao Xu	Cadena de Suministro	Negociación Compras-Proveedores	Sistema Multi Agentes
16	Sistema semántico de múltiples agentes para ayudar a la integración empresarial: una aplicación para la selección de proveedores para astilleros de construcción naval.	2018	Jinghua Li, et al.	Cadena de Suministro	Proveedores	Sistema Multi Agentes
17	Modelo de optimización de control de acoplamiento basado en un sistema de múltiples agentes para la programación inteligente del grupo de microred considerando la estrategia de operación cooperativa de autonomía.	2018	Liwei Ju, Qi Zhang	Logística	Operación	Sistema Multi Agentes
18	Un sistema inteligente de soporte de decisiones basado en múltiples agentes para la ubicación de asentamientos de refugiados.	2018	Drakaki Maria	Logística Humanitaria	Todos	Sistema Multi Agentes
19	Selección inteligente y sostenible de proveedores utilizando tecnología de múltiples agentes: teoría y aplicación para las cadenas de suministro de la Industria 4.0.	2018	Pezhman Ghadimi, Chao Wan	Cadena de Suministro	Proveedores	Sistema Multi Agentes
20	Marco de simulación orientado a agentes para manejar las interrupciones en las cadenas de suministro de productos químicos.	2018	Behzad Behdani	Cadena de Suministro	Todos	Simulación de Agentes
21	Optimización de la cadena de suministro de petróleo y gas mediante la integración de modelado basado en agentes (ABM) con tecnología Big Data.	2018	Jamal Maktoubian	Cadena de Suministro	Todos	Sistema Multi Agentes

Tabla 36 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Tabla 4 de 5.

Número	Título	Año	Autor	Área	Eslabón CS	Técnica
22	Una revisión del enfoque de modelado basado en agentes en el contexto de colaboración de la cadena de suministro.	2018	Arvietrida, N.I.	Cadena de Suministro	Todos	ABM (Modelado Basado en Agentes)
23	Ecosistema de la cadena de suministro del mercado electrónico descentralizado basado en agentes.	2018	Roman Gumzej, Dragan Čišić	Cadena de Suministro	Ventas (e-Commerce)	Marco Basado en Agentes (Ontología)
24	Diseño de la cadena de suministro de servicios mediante la simulación basada en agentes.	2018	Petri Helo et al	Cadena de Suministro	Todos	ABM (Modelado Basado en Agentes)
25	Marco de múltiples agentes para el modelado dinámico de la cadena de suministro con intercambio de información y pronóstico de demanda.	2018	Daria L. Belykh, and Gennady A. Botvin	Cadena de Suministro	Demanda	ABM (Modelado Basado en Agentes)
26	Simulación multiagente de los principales parámetros equilibrados de los centros logísticos.	2019	D. Muravev, H. Hu, A. Rakhmangulov, L. Dai	Cadena de Suministro	Logística	Sistema Multi Agentes
27	Sobre el problema de programación de trabajo abierto: un enfoque descentralizado de múltiples agentes para la optimización del rendimiento del sistema de fabricación.	2019	Guido Guizzia, et al.	Logística y Cadena de Suministro	Manufactura	Sistema Multi Agentes
28	Modelado orientado a agentes y optimización de flujos de materiales de producción de surtido múltiple.	2019	Yuri A. Ivashkin , Marina A. Nikitina	Cadena de Suministro	Todos (Menos Distribución)	Sistema Multi Agentes
29	Un marco de sistema de logística de producción inteligente basado en múltiples agentes.	2019	Zhiyao Lu	Cadena de Suministro	Producción	Sistema Multi Agentes
30	Sistema de soporte de decisiones basado en modelos basado en agentes para la programación de producción agregada reactiva en la cadena de suministro de café verde.	2019	María del Rosario Pérez-Salazar, et al.	Cadena de Suministro	Todos	Sistema Multi Agentes

Tabla 37 Estado del Arte Agentes Inteligentes en GCS. Ta5 de 5.

Número	Título	Año	Autor	Área	Eslabón CS	Técnica
31	Un enfoque basado en agentes para la planificación conjunta de recursos en un sistema de inventario de múltiples niveles considerando el transbordo lateral.	2019	Zili Wang, et al.	Cadena de Suministro	Inventarios	Modelo de Agentes
32	Plataforma logística de comercio electrónico inteligente que utiliza un enfoque basado en agentes híbridos.	2019	Ali Vatankhah Barenji, et al.	Cadena de Suministro	Ventas (e-Commerce)	Sistema Multi Agentes
33	Programación dinámica utilizando un enfoque basado en feromonas en sistemas de múltiples agentes.	2019	Wonki Lee, DaeEun Kim	Cadena de Suministro	Producción	Enfoque Basado en Agentes
34	Problema de programación de la cadena de suministro de múltiples agentes al considerar la asignación de recursos y el transporte.	2019	Sajede Aminzadegan, et al.	Cadena de Suministro	Inventarios	Sistema Multi Agentes
35	Modelado de un sistema de gestión de la cadena de suministro de múltiples agentes utilizando redes de Petri coloreadas.	2010	Luis H. Fierro, et al.	Cadena de Suministro	Modelado de la Gestión de la CS	Sistema Multi Agentes
36	El agente de producto basado en modelos: una arquitectura orientada al control para productos inteligentes en sistemas de fabricación de múltiples agentes.	2020	Kovalenko Ilya	Cadena de Suministro	Producción	Sistema Multi Agentes

ANEXO B. Técnicas para clasificación del rendimiento de limón persa

1. Evaluación de técnicas

Para realizar la clasificación del rendimiento del limón persa basado en el uso de fertilizantes se hace una evaluación de tres diferentes técnicas de clasificación, que pueden ser aplicables al tipo de datos, estas son desarrolladas y probadas en lenguaje Python® con ayuda de las bibliotecas respectivas para cada técnica, la decisión sobre la elección final se hace con base en el porcentaje de eficiencia de cada modelo. El desarrollo de este módulo permite complementar la predicción del rendimiento calculado con el conjunto de algoritmos xgboost secuenciales descritos en la sección anterior, para de esta manera tomar decisiones con un respaldo mayor.

Primero se describen las variables que alimentaran a los modelos desarrollados, para posteriormente describir el desarrollo y eficiencia obtenida para cada modelo.

1.1 Gradient boosting

Un modelo Gradient Boosting está formado por un conjunto de árboles de decisión individuales, entrenados de forma secuencial, de forma que cada nuevo árbol trata de mejorar los errores de los árboles anteriores. Scikit-learn, tiene dos implementaciones nativas GradientBoostingClassifier y GradientBoostingRegressor, se desea clasificar el rendimiento de la producción por lo cual se opta por la aplicación del Gradient Boosting Classifier.

Se programa el modelo, haciendo una optimización de los hiperparámetros, resultando el mejor rendimiento para la siguiente configuración (Tabla 38):

Tabla 38 Configuración del modelo Gradient Boost.

Hiperparámetro	Configuración
Learning_rate	0.001
Max_depth	3
Max_features	“auto”

N_estimators	1000
subsample	0.5
Accuracy	0.97

Se entrena el modelo y se realizan predicciones; y el modelo tiene un porcentaje de asertividad de 74.4% (Figura 71).

```

In [11]: mat_confusion = confusion_matrix(
          y_true = y_test,
          y_pred = predicciones
        )

accuracy = accuracy_score(
          y_true = y_test,
          y_pred = predicciones,
          normalize = True
        )

print("Matriz de confusión")
print(mat_confusion)
print("El accuracy de test es: ", accuracy)

Matriz de confusión
[[ 2  1]
 [ 0  0]]
El accuracy de test es: 74.418040511028

[12]: # Clasificación empleando la clase de mayor probabilidad
# =====
df_predicciones = pd.DataFrame(data=predicciones, columns=["0",
df_predicciones[df_predicciones['clasificacion_default_0.5'] < np.where(df_pred
df_predicciones.head(3)

[13]:
0 0.408444 0.593556
1 0.953082 0.046918
2 0.774021 0.225979

print("Importancia de los predictores en el modelo")
print(importancia_predictores.sort_values("importancia", ascending=False))
Importancia de los predictores en el modelo

Out[14]:
          predicto  importancia
30             s_si  0.242131
28             ca_si  0.175370
29             s_no  0.142631
36      sulfatoam_si  0.040927
32      fosfato_si  0.032353
13             pn_no  0.027755

```

Figura 71 Modelo Gradient Boosting uso de Fertilizantes. Eficiencia, Predicciones e Features Importance. Fuente: Elaboración propia.

El modelo se usa para hacer predicciones y una evaluación de la importancia de las variables que lo alimentan, resultando para esta técnica la aplicación de azufre la variable de mayor importancia.

1.2 Regresión logística

La regresión logística es un método estadístico que trata de modelar la probabilidad de una variable cualitativa binaria (dos posibles valores) en función de una o más variables independientes. La principal aplicación de la regresión logística es la creación de modelos de clasificación binaria. Se llama regresión logística simple cuando solo hay una variable independiente y regresión logística múltiple cuando hay más de una. Dependiendo del contexto, a la variable modelada se le conoce como variable dependiente o variable respuesta, y a las variables independientes como regresores, predictores o features.

Se configura el modelo con un 80% de los datos para entrenamiento y 20% para pruebas; presentando una precisión de 79.4% (Figura 72).

```

# Creación del modelo utilizando matrices como en scikitlearn
# A la matriz de predictores se le tiene que añadir una columna de 1s para el intercept de
X_train = sm.add_constant(X_train, prepend=True)
modelo = sm.Logit(endog=y_train, exog=X_train,)
modelo = modelo.fit()
print(modelo.summary())

Warning: Maximum number of iterations has been exceeded
Current function value: 0.249
Iterations: 35

Logit Regression Summary
Dep. Variable: y
Model: Logit
Method: MLE
Date: Sat, 09 Apr 2022
Time: 23:50:45
converged: False
Covariance Type: nonrobust

=====
coef    std err
-----
const    27.6298    13.205
edad    -1.3812     0.654
temp    -0.5884     0.304
lluvia     0.0037     0.007
p         0.8586     1.438

=====
Possibly complete quasi-separation: A fraction 0.20 of observations can be
perfectly predicted. This might indicate that there is complete
quasi-separation. In this case some parameters will not be identified.

# Predicciones con intervalo de confianza
predicciones = modelo.predict(exog = X_train)

# Clasificación predicha
clasificacion = np.where(predicciones < 0.5, 0, 1)

# Accuracy de test del modelo
X_test = sm.add_constant(X_test, prepend=True)
predicciones = modelo.predict(exog = X_test)
clasificacion = np.where(predicciones < 0.5, 0, 1)
accuracy = accuracy_score(y_true = y_test, y_pred = clasificacion,
                           normalize = True)
print("")
print(f"El accuracy de test es: {100*accuracy}%")

El accuracy de test es: 79.41176470588235%

```

Figura 72 Modelo Regresión Logística uso de Fertilizantes.

Tabla 39 Predicciones del modelo de Regresión Logística.

Predicción	0	1
Real		
0	25	1
1	6	2

Se hace la validación a través de predicciones y se obtiene, de un total de 34 elementos, con 7 errores de clasificación (Tabla 39).

2. Análisis de precisión de los modelos para clasificación del rendimiento basado en el uso de fertilizantes

Se considera como unidad experimental el rendimiento, siendo este clasificado como “poco” o “medio” por cada uno de los modelos, se hace una comparación entre la clasificación real en los casos validados y la clasificación realizada por los modelos, finalmente se compara el porcentaje de asertividad (Tabla 40).

Tabla 40 Porcentaje de Asertividad en Modelos.

Modelo (Técnica)	% de Asertividad
Árbol de Decisiones	87%
Gradient Boosting	74.4%
Regresión Logística	79.4%

Tal cual se observa en la Tabla 40, el modelo con un mayor porcentaje de asertividad es el modelo de Árbol de Decisiones, por lo cual es este el modelo que se elige para reforzar el resultado de las predicciones de rendimiento dadas por el conjunto de redes neuronales artificiales.

ANEXO C. Selección de técnicas de pronóstico de la demanda

1. Análisis de la demanda

Es necesario, previo al desarrollo del modelo de predicción analizar los datos para determinar si son óptimos para alguna de las técnicas disponibles. Con la biblioteca ARIMA de Python® se hace un análisis previo consistente en gráficas y algunos parámetros que determinan si se puede construir un modelo confiable, otro de los métodos que se prueban es el uso del modelo XGBoost para series de tiempo, además de estos dos, los datos son analizados tradicionalmente con una prueba de Bondad de Ajuste, para determinar si los datos se ajustan a alguna distribución adecuada para estos modelos. Antes de mostrar los resultados se hace una breve descripción de cada técnica utilizada.

1.1 ARIMA

ARIMA es una abreviatura que representa AutoRegressive Incorporated Moving Normal. Es una clase de modelos que capta un conjunto de varias estructuras mundanas estándar en la información de la disposición del tiempo. Un modelo ARIMA es una clase de modelos fácticos para descomponer y determinar la información de la disposición del tiempo.

Tiene en cuenta inequívocamente un conjunto de estructuras estándar en la información sobre la ordenación del tiempo, y en esa capacidad ofrece una técnica sencilla pero innovadora para hacer medidores de ordenación del tiempo adecuados. Esta abreviatura es inconfundible, capturando las partes clave del propio modelo. Rápidamente, lo son:

AR: Autoregresión. Un modelo que utiliza la conexión necesaria entre la percepción y un cierto número de percepciones flojas.

I: Incorporado. La utilización de la diferenciación de las percepciones crudas (por ejemplo, restando una percepción de la percepción en el paso de tiempo pasado) para hacer que la disposición temporal sea estacionaria.

MA (q): representa la parte de "Medias Móviles". Como vimos, esto implica que el error del modelo se establece como una combinación lineal de los errores observados en el pasado.

Los parámetros del modelo ARIMA se caracterizan como seguidos:

p: El número de percepciones de holgura incorporadas en el modelo, también llamado petición de holgura.

d: Las ocasiones en que las percepciones crudas se diferencian se llaman también el nivel de diferencia.

q: El tamaño de la ventana de movimiento normal, adicionalmente llamado la solicitud de movimiento normal.

Se elabora un modelo de recaída recta que incluye el número y el tipo de términos predefinidos, y la información se establece por un nivel de diferenciación para hacerla estacionaria, por ejemplo, para expulsar patrones y estructuras regulares que influyen negativamente en el modelo de recaída.

1.1.1 Prueba ARIMA

Para en análisis de los datos con ARIMA de Python®, se analizan los datos clasificados por cliente: USA y Europa, por presentación 10lb y 40l, y finalmente por Kilos Totales que incluye las dos presentaciones de los dos clientes. Python genera una serie con la serie de datos normales, otra con la serie logarítmica y finalmente una con la serie logarítmica diferenciada, las tres son probadas para elegir sobre cuál hacer el modelo y también para elegir los mejores hiperparámetros de él. Se muestra a continuación uno de los gráficos de las tres series para los pedidos, por ejemplificar (Figura 73).

Generación de pedidos 10lb (en kilos) y sus transformaciones a lo largo de los años

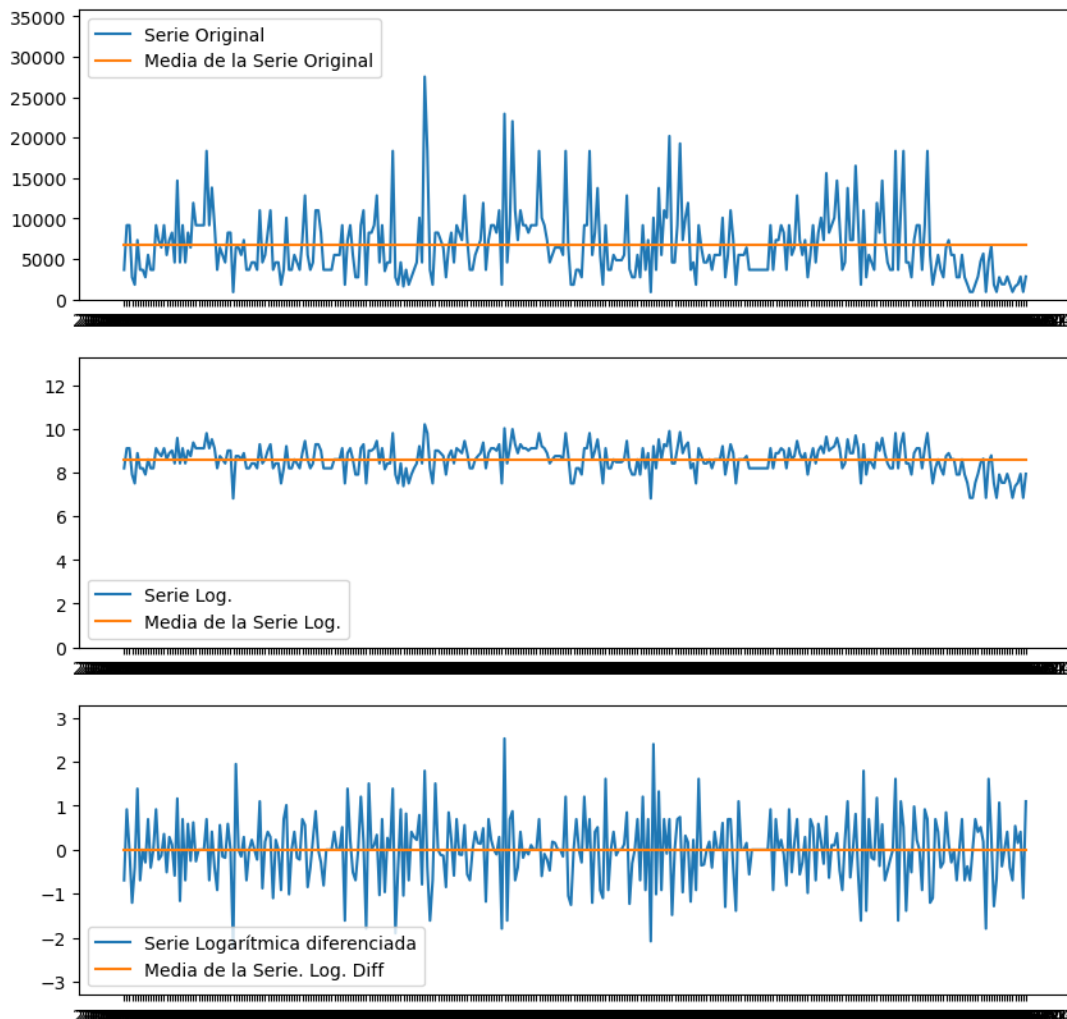


Figura 73 Series normales, logarítmica y logarítmica diferenciada 10lb EUA.

En los gráficos puede observarse que la serie normal no parece seguir una tendencia o normalidad. Para el desarrollo del modelo como primera aproximación se utiliza un modelo autorregresivo que utiliza como predictores valores pasados (lags) de la propia variable respuesta. Dada la elevada cantidad de hiperparámetros que tienen los modelos de gradient boosting, se emplea una estrategia de gridsearch combinada con backtesting para identificar la configuración con la que se obtienen mejores predicciones.

Se utiliza un "Gridsearch" básico para buscar los parámetros óptimos del modelo ARIMA de ambos datos, 10lb y 40lb, cliente: EUA (Figura 74). El modelo que resulta mejor, es aquel cuyo valor de la métrica AIC es menor, en este caso:

Pedidos 10lb, cliente: EUA

```
print("El mejor modelo es {}, \nCon un AIC de {}".format(best_params, best_score))
```

El mejor modelo es (0, 1, 2),
Con un AIC de 536.0974642591452

Pedidos 40lb, cliente: EUA

```
print("El mejor modelo es {}, \nCon un AIC de {}".format(best_params, best_score))
```

El mejor modelo es (0, 1, 2),
Con un AIC de 1912.649564526172

Figura 74 Mejores hiperparámetros para ARIMA, Pedidos EUA presentación 10lb.

Al generar una tabla de coeficientes se observa que a pesar de seleccionar el modelo con el mejor AIC, ninguno de los parámetros son significativos porque su p - valor es superior a 0.05 en el caso de la serie de datos para 10lb (Figura 75).

Pedidos 10lb, cliente: EUA						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ma.L1	-0.8820	10.639	-0.083	0.934	-21.734	19.970
ma.L2	-0.1181	1.253	-0.094	0.925	-2.574	2.338
sigma2	0.3332	3.545	0.094	0.925	-6.614	7.281

Pedidos 40lb, cliente: EUA						
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ma.L1	-0.7380	0.025	-29.225	0.000	-0.788	-0.689
ma.L2	-0.0849	0.026	-3.323	0.001	-0.135	-0.035
sigma2	0.2298	0.009	25.927	0.000	0.212	0.247

Figura 75 Tablas de coeficientes, series de datos 10 y 40l. Cliente: EUA.

Se realizan predicciones con el modelo para comprobar lo interpretado en los gráficos, se hace un gráfico comparativo entre los valores reales y los valores predecidos de ambas presentaciones del cliente EUA (Figura 76), esto confirma que no hay similitud entre ambos valores y el modelo ARIMA para estos datos no sería óptimo, esto sucede para ambas presentaciones: 10 y 40lb.

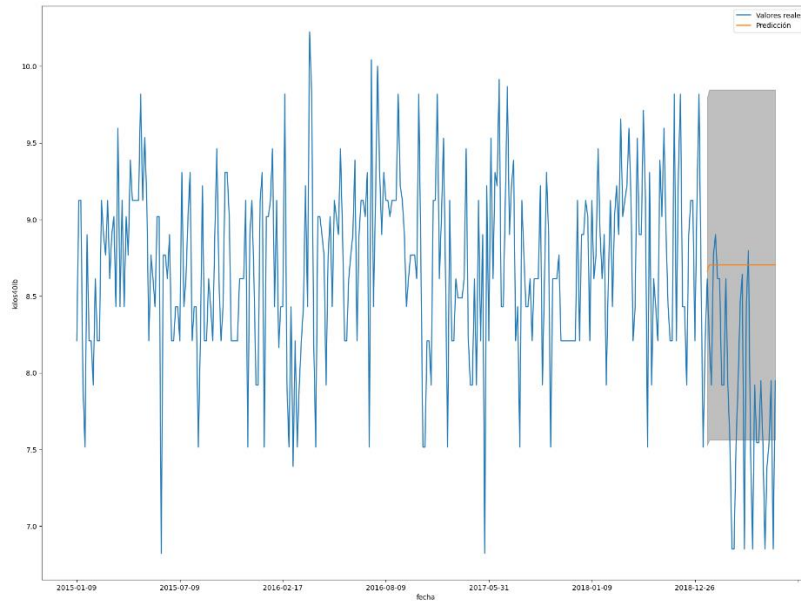


Figura 76 Gráfico comparativo de datos reales vs. Predicidos, presentación 40lb.

Finalmente se hace una prueba de RMSE (Error cuadrático medio), para ambas series de datos (10lb y 40lb) dando como resultado lo mostrado en las Figura 77 y Figura 78:

```
# El RMSE es de 0,7
rmse = sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred))

print("El modelo ARIMA con los parametros {}, ha dado un rmse en test de {}".format(best_params, round(rmse, 2)))

El modelo ARIMA con los parametros (0, 1, 2), ha dado un rmse en test de 0.7
```

Figura 77 Prueba RSME del modelo

```
# El RMSE es de:
rmse = sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred))

print("El modelo ARIMA con los parametros {}, ha dado un rmse en test de {}".format(best_params, round(rmse, 2)))

El modelo ARIMA con los parametros (0, 1, 2), ha dado un rmse en test de 1.57
```

Figura 78 Prueba RSME del modelo, presentación 10lb, Cliente: EUA.

De acuerdo al análisis anterior no resulta adecuado el modelo ARIMA para las series de datos de las presentaciones por separado, por lo cual se analiza la información referente a la totalidad de los datos de ambos clientes y ambas presentaciones, es decir, 10 y 40l del cliente EUA y Europa. El análisis es similar y sigue la misma secuencia. Se prueba el modelo y se hacen predicciones con ello, se realiza un gráfico comparativo para observar el desempeño del modelo con estos hiperparámetros (Figura 79).

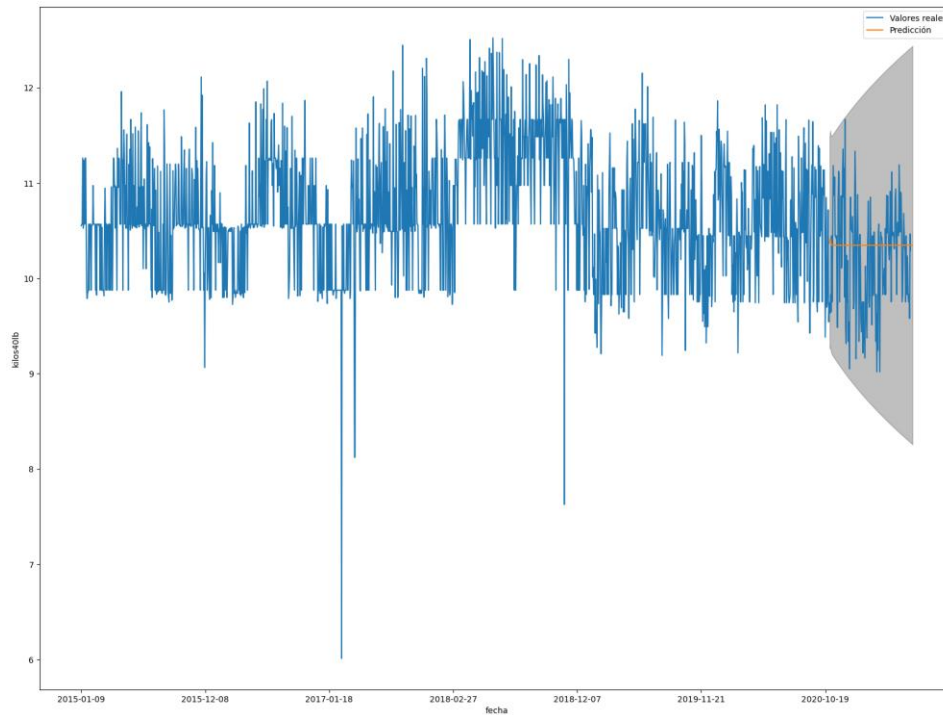


Figura 79 Gráfico comparativo valores reales vs. valores predichos, para Kilos totales.

Como puede observarse los valores predichos no son similares ni se acercan a los valores reales, por lo que ARIMA no parece ser la herramienta óptima. Este resultado cumple con el objetivo de hacer este análisis a fin de seleccionar la herramienta que mejor se ajuste a los datos reales y permita hacer predicciones lo más cercanas a los datos reales.

1.2 XGBoost para series temporales

XGBoost es una implementación eficiente de la potenciación de gradientes para los problemas de clasificación y regresión. Es rápido y eficiente, y funciona bien, si no es el mejor, en una amplia gama de tareas de modelado predictivo y es el favorito entre los ganadores de concursos de ciencias de la información, como los de Kaggle.

XGBoost también puede utilizarse para la previsión de series temporales, aunque requiere que el conjunto de datos de series temporales se transforme primero en un problema de aprendizaje supervisado. También requiere el uso de una técnica especializada para evaluar el modelo llamada validación de avance, ya que la evaluación del modelo mediante la validación cruzada de pliegues k daría lugar a resultados sesgados de manera optimista.

Los modelos basados en gradient boosting destacan dentro de la comunidad de machine learning por los buenos resultados que consiguen en multitud de casos de uso, tanto de regresión como de clasificación. Aunque su uso en el *forecasting* de series temporales ha sido limitado, en los últimos años se ha demostrado que también pueden conseguir resultados muy competitivos. Algunas de las ventajas que presenta el uso de este tipo de modelos son:

- Facilidad para incluir variables exógenas además de las autorregresivas.
- Permiten incorporar en el modelo comportamientos no lineales.
- Elevada escalabilidad, lo que permite aplicarlos cuando se dispone de grandes volúmenes de datos.

1.2.1 Prueba XGBoost para series temporales

El análisis individual anterior, por pedidos de 10lb y 40lb para ambos clientes; EUA y Europa, deja ver que la mejor opción es analizar los datos de manera conjunta, es decir, ambas presentaciones, de ambos clientes, los datos en conjunto tienen un mejor comportamiento, tal cual puede observarse en la siguiente Figura 80.

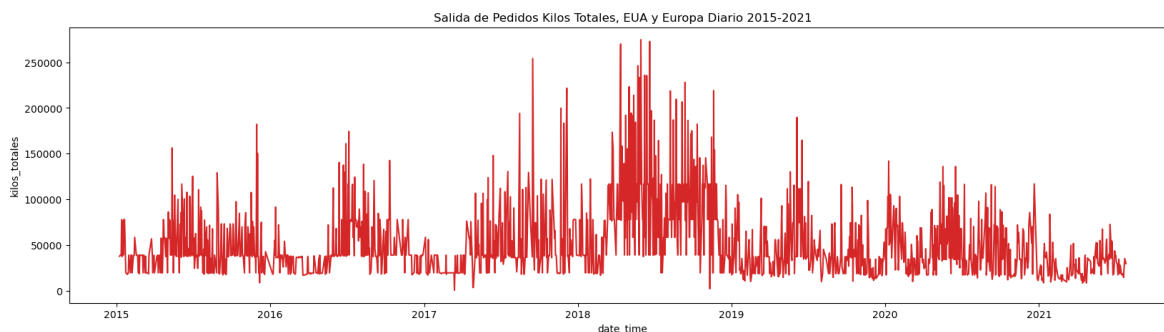


Figura 80 Plot Pedidos Kilos Totales EUA y Europa.

Para iniciar la modelación con XGBoost para Series Temporales, se cargan los datos a través de un archivo .csv en Python®, estos son divididos en tres partes, entrenamiento (1400 registros) correspondientes a los datos desde 2015 hasta 10 de junio de 2020, validación (145 registros) correspondientes a los datos que van desde 11 junio de 2020 hasta 30 de diciembre de 2020 y prueba (131 registros) correspondientes a las observaciones desde 1 enero 2021 hasta julio 2021, tal cual se muestra en la Figura 81 siguiente:

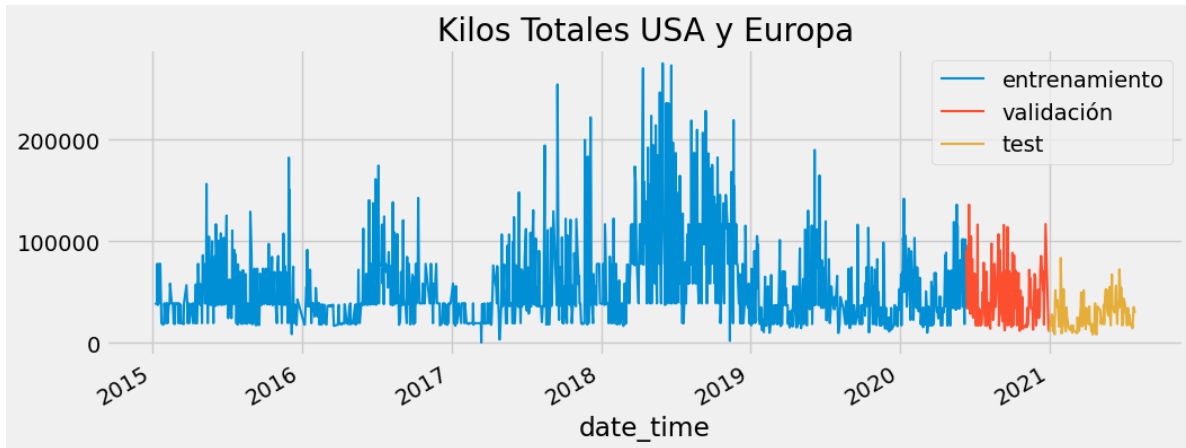


Figura 81 División de los datos en Entrenamiento, Validación y Prueba.

Una vez separados los datos hace un análisis de autocorrelación y crea el modelo para realizar las predicciones, se hace uso de un Gridsearch para ubicar los mejores hiperparámetros para el modelo de predicción, se comparan 48 modelos diferentes (Figura 82):

	lags	params	mean_squared_error	learning_rate	max_depth	n_estimators
13	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.01, 'max_depth': 3, 'n_est...	7.056582e+08	0.01	3.0	500.0
1	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.01, 'max_depth': 3, 'n_est...	7.078575e+08	0.01	3.0	500.0
25	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.01, 'max_depth': 3, 'n_est...	7.110360e+08	0.01	3.0	500.0
30	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'n_esti...	7.143015e+08	0.10	3.0	100.0
6	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'n_esti...	7.145727e+08	0.10	3.0	100.0
18	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'n_esti...	7.231626e+08	0.10	3.0	100.0
7	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 3, 'n_esti...	7.354963e+08	0.10	3.0	500.0
10	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.1, 'max_depth': 10, 'n_est...	7.358639e+08	0.10	10.0	100.0
27	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.01, 'max_depth': 5, 'n_est...	7.367707e+08	0.01	5.0	500.0
3	[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14...	{'learning_rate': 0.01, 'max_depth': 5, 'n_est...	7.377200e+08	0.01	5.0	500.0

Figura 82 Resultados Gridsearch.

Una vez identificada la mejor combinación de hiperparámetros utilizando los datos de validación se evalúa la capacidad predictiva del modelo con el conjunto de test. Con este modelo se realizan predicciones que posteriormente serán validadas.

	pred
48	37965.757812
49	51607.109375
50	56584.261719
51	55809.085938
52	44646.945312
...	...
65	44308.132812
66	45356.082031
67	45708.964844
68	44616.144531
69	44987.757812

130 rows × 1 columns

Figura 83 Predicciones del modelo XGBoost para series temporales.

2. Selección de la técnica para pronóstico

Después de analizar las tres técnicas y sobre todo el abordaje de los datos, se determina que el modelo más adecuado es el modelo Exponential Smoothing, con los datos en conjunto, es decir Kilos Totales en los pedidos, presentados mensualmente.

Se muestra la evaluación de los tres modelos (Figura 84) teniendo como métrica de desempeño el Error cuadrático Medio.

```
# =====
metric, predicciones = backtesting_forecaster(
    forecaster = forecaster2,
    y = datos['kilos'],
    initial_train_size = len(datos.loc[:fin_validacion]),
    steps = 36,
    refit = True,
    metric = 'mean_squared_error',
    verbose = False # Change to True to see detailed information
)

print(f"Error de backtest: {metric:.2f}")
Error de backtest: 69018595292.17

rmse = sqrt(metrics.mean_squared_error(y_test, y_pred))

print("El modelo ARIMA con los parametros {}, ha dado un rmse en test de {}".format(best_params, round(rmse, 2)))
El modelo ARIMA con los parametros (1, 1, 1), ha dado un rmse en test de 0.56

RMSE train: 319416.86215091264
RMSE test: 401186.46020502155
MAE train: 245469.69274115804
MAE test: 341596.30931218195
```

Figura 84 Evaluación de los modelos ARIMA, XGBoost para series temporales y Exponential Smoothing; MSE.

Bajo esta métrica el mejor modelo se considera el modelo de XGBoost, sin embargo, el modelo de Exponential Smoothing presenta una mayor facilidad para predecir datos, lo que representa una ventaja para el usuario final que no es experto en el uso de la programación, por esta razón, y por el hecho de que los resultados se miden en escalas diferentes, se selecciona Exponential Smoothing como el modelo para predicción de la demanda.