

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN
BASADO EN AGENTES INTELIGENTES PARA MEJORAR
LOS PROCESOS DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CAFÉ.
CASO DE ESTUDIO: GRUPO MERINO TELIS CAFÉ
S. A. DE C. V. ”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PRESENTA:

Ing. José Carlos Hernández González

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre

CODIRECTOR DE TESIS:

MII María del Rosario Pérez Salazar



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

MAYO 2017

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Orizaba

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA: 02/05/2017
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I


C. JOSE CARLOS HERNANDEZ GONZALEZ
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
INGENIERIA INDUSTRIAL

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"SISTEMA DE APOYO A LA DECISION BASADO EN AGENTES INTELIGENTES
PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CAFE.
CASO DE ESTUDIO: GRUPO MERINO TELIS CAFE S.A. DE C.V.".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ggc



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Teléfonos: (272) 7 24 40 96 Fax. (272) 7 25 17 26

e-mail: Orizaba@itorizaba.edu.mx www.itorizaba.edu.mx



"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA : 03/04/2017

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

JOSE CARLOS HERNANDEZ GONZALEZ,

la cual lleva el título de:

"SISTEMA DE APOYO A LA DECISION BASADO EN AGENTES INTELIGENTES PARA MEJORAR LOS PROCESOS DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL CAFE. CASO DE ESTUDIO: GRUPO MERINO TELIS CAFE S.A. DE C.V.".

Y concluyen que se acepta.

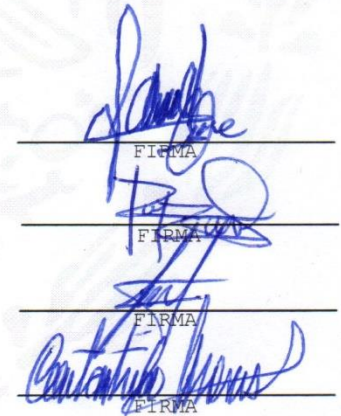
A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE

SECRETARIO : MII MARIA DEL ROSARIO PEREZ SALAZAR

VOCAL : M.C. MAGNO ANGEL GONZALEZ HUERTA

VOCAL SUP. : M.I.I. CONSTANTINO GERARDO MORAS SANCHEZ



FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **INGENIERIA INDUSTRIAL**

OPCION: I **Tesis**



Aunque pase por quebradas oscuras, no temo ningún mal porque tú estás conmigo con tu vara y tu bastón, y al verlas voy sin miedo.

Salmo 23:4

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y a la virgen de Juquila por permitirme llegar al final de este importante logro en mi vida, el cual da apertura a interesantes caminos de éxito.

A mi mamá Gisela A. González Huerta con cariño y respeto agradezco el esmero por brindarme lo mejor cada día y ayudarme a ser la persona que soy. Doy gracias a Dios por tenerte y poder compartir un mérito más juntos, te agradezco por la confianza, la comprensión y principalmente amor que me brindas, lo cual me ayuda a seguir adelante y no rendirme ante la adversidad, así mismo te doy gracias por enseñarme a confiar en mí y mis cualidades para enfrentar los problemas. Eres un icono de amor, fortaleza y ahínco digno de admiración y respeto, te quiero mamá.

A mi familia agradezco los consejos, la confianza, el fomento de valores, la fe y la disciplina que me ayudaron a salir adelante. Doy gracias principalmente a mi abuelita Socorro Huerta por su amor incondicional y aliento día tras día, a mi tía Grindelia[†] Rodríguez por su rectitud, a mi tío Magno A. González por su ejemplo de vida en esfuerzo y dedicación, y a mis primos hermanos Magno y Grindelia por tantas alegrías vividas cada viernes en unión familiar.

A mis profesores agradezco el apoyo incondicional, su paciencia y confianza durante esta travesía que culmina con este proyecto, principalmente al Dr. Alberto A. Aguilar y la maestra Ma. del Rosario Pérez por su dirección, consejos, ánimo y paciencia para realizar esta tesis, al maestro Constantino Moras por su ejemplo de vida en calidad humana y al maestro Magno A. González por el gran aporte de conocimientos matemáticos.

A mis compañeros y amigos de maestría, Missael A. Román del Valle, Raymundo Reyes, Ali López, Issa M. Ojeda y Jonathan Cid les agradezco por todos los momentos y aventuras compartidas a lo largo de estos años de estudio.

Resumen

El mundo de los negocios muestra un comportamiento dinámico, influenciado por la iteración de múltiples fuerzas y tendencias presentes, de tipo económico, político, social, cultural, tecnológico, ambiental, etc. Por lo que exige a las empresas el uso de tecnología, pero sobre todo el manejo eficiente de la información y la incertidumbre que permiten una correcta toma de decisiones para satisfacer la demanda y permanecer el mercado global.

Alrededor del mundo México es considerado como uno de los países que más generan productos agrícolas, tal es el caso específico del café que lo posiciona en quinto lugar como país productor después de Brasil, Colombia, Indonesia y Vietnam, con un volumen de producción que oscila entre los 4 a 5 millones de sacos por año. En México el café se cultiva en 12 estados: Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca, Guerrero, Hidalgo, San Luis Potosí, Nayarit, Colima, Jalisco, Querétaro, Tabasco; siendo este producto el primer lugar como producto agrícola generador de divisas y empleos en el medio rural, pero carece de control y desinformación a lo largo de la cadena de suministro (Cafés de México, 2006).

La empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. es dedicada al beneficiado seco y comercialización de café verde en sus diferentes variedades y preparaciones. Actualmente provee a diferentes clientes nacionales e internacionales con exigencias específicas, por tal motivo surge la necesidad de poseer un control descentralizado de las actividades que agregan valor al café de acuerdo a los requerimientos del cliente y un buena gestión de los precios de compra y venta que se fijan de acuerdo a las bolsas de valores internacionales de Nueva York y Londres, lo cual trae como consecuencia perdidas monetarias, gasto de recursos, desprestigio y pérdida de competitividad.

En esta propuesta se plantea el desarrollo de un sistema de apoyo a la decisión basado en un enfoque de agentes inteligentes que gestiona la cadena de suministro de la empresa mediante una plataforma de software que ayude a mejorar y controlar, en tanto sea posible, la toma de decisiones en los procesos de valor y así cumplir con los requerimientos solicitados por los clientes.

Abstract

The business world shows a dynamic behavior, influenced by the iteration of several factors and current trends, economic, political, social, cultural, technological, and environmental, among others. The context requires to companies the use of technology but above all the efficient handling of the information and the uncertainty that allow a correct decision making to satisfy the demand and remain the global market.

Around the world Mexico is considered as one of the countries that generate the most agricultural products, in specific case of coffee that places it in fifth position as a producer country after Brazil, Colombia, Indonesia and Vietnam, with a volume of production that oscillates between 4 to 5 million bags per year. In Mexico coffee is grown in twelve states: Chiapas, Veracruz, Puebla, Oaxaca, Guerrero, Hidalgo, San Luis Potosí, Nayarit, Colima, Jalisco, Querétaro y Tabasco; in other hand, coffee is the first place as agricultural product generating foreign exchange and jobs in the rural environment but it lacks of control and disinformation along the supply chain (Cafés de México, 2006).

Merino Telis Café S.A. de C.V. is a company dedicated to the dry beneficiation and commercialization of green coffee in its different varieties and preparations. At the moment it provides to different national and international clients with specific exigencies, for that reason arises the necessity to have a decentralized control of the activities that add value to the coffee according to the requirements of the client and a good management of the prices of purchase and sale that are set according to the international stock exchanges of New York and London, which results in monetary losses, expenditure of resources, discredit and loss of competitiveness.

This project proposes the development of a decision support system based on an intelligent agents approach that manages the supply chain of the company through a software platform that helps to improve and control, as much as possible, the making decisions in the processes of value and thus to fulfill the requirements requested by the clients.

Índice general

| | |
|--|------|
| Agradecimientos | ii |
| Resumen..... | iii |
| Abstract | iv |
| Índice general | v |
| Índice de figuras..... | ix |
| Índice de tablas..... | xv |
| Índice de ecuaciones | xvii |
| Introducción | 1 |
| Planteamiento del problema | 2 |
| Objetivos..... | 5 |
| General..... | 6 |
| Específicos | 6 |
| Justificación | 6 |
| Metodología..... | 10 |
| | |
| Capítulo 1 Descripción de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. | 11 |
| 1.1 Información de la empresa..... | 11 |
| 1.1.1 Antecedentes | 12 |
| 1.2 Giro de la empresa | 12 |
| 1.3 Marco geográfico | 12 |
| 1.4 Misión | 13 |
| 1.5 Visión..... | 14 |
| 1.6 Política de calidad | 14 |
| 1.7 Tipos de beneficio de café | 15 |
| 1.8 Descripción de la cadena de suministro..... | 16 |
| 1.8.1 Finca cafetalera | 16 |
| 1.8.1.1 Parcelas | 16 |
| 1.8.1.2 Cosecha..... | 16 |
| 1.8.2 Beneficio Húmedo. | 17 |
| 1.8.3 Beneficio seco | 17 |
| 1.9 Descripción del proceso de producción | 18 |
| 1.9.1.1 Recepción y estibado | 18 |
| 1.9.1.2 Prelimpia..... | 20 |
| 1.9.1.3 Trilladora | 20 |

| | | |
|------------|--|----|
| 1.9.1.4 | Clasificación | 20 |
| 1.10 | Maquinaria y equipo | 21 |
| 1.10.1 | Maquinaria | 21 |
| 1.10.1.1 | Prelimpia..... | 21 |
| 1.10.1.2 | Morteadora..... | 22 |
| 1.10.1.3 | Catadora..... | 22 |
| 1.10.1.4 | Clasificadora de zarandas | 22 |
| 1.10.1.5 | Densimétrica (Oliver) | 23 |
| 1.10.1.6 | Electrónica | 23 |
| 1.10.2 | Equipo | 24 |
| 1.10.2.1 | Sifón de pergamino..... | 24 |
| 1.10.2.2 | Tolvas | 24 |
| 1.10.2.3 | Elevadores de cangilones..... | 25 |
| 1.11 | Procesos de producción..... | 25 |
| 1.11.1 | Granza o maquila | 26 |
| 1.11.2 | Repaso mecánico..... | 26 |
| 1.11.3 | Repaso electrónico | 27 |
| 1.12 | Análisis físico..... | 27 |
| 1.12.1 | Defectos conchas..... | 29 |
| 1.12.2 | Grano brocado..... | 29 |
| 1.12.3 | Grano roto o quebrado..... | 30 |
| 1.12.4 | Daño por hongos..... | 30 |
| 1.12.5 | Granos parcial o totalmente negros..... | 31 |
| 1.12.6 | Grano vinagre o parcialmente vinagre | 32 |
| 1.12.7 | Grano flotador..... | 32 |
| 1.12.8 | Grano inmaduro..... | 32 |
| 1.12.9 | Elementos extraños..... | 33 |
| 1.13 | Proceso de cata del café. | 34 |
| 1.14 | Conclusiones..... | 35 |
| Capítulo 2 | Marco teórico..... | 36 |
| 2.1 | Cadena de suministro | 36 |
| 2.1.1 | Aprovisionamiento..... | 37 |
| 2.1.2 | Producción | 37 |
| 2.1.3 | Distribución..... | 38 |
| 2.1.4 | Tipos de estructura de cadena de suministro..... | 38 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.2 | Gestión de la cadena de suministro..... | 39 |
| 2.2.1 | Efecto látigo | 39 |
| 2.3 | Gestión de la información y gestión de conocimiento..... | 40 |
| 2.4 | Análisis de decisiones..... | 40 |
| 2.5 | Sistemas de apoyo a la decisión..... | 41 |
| 2.6 | Inteligencia artificial..... | 41 |
| 2.6.1 | Lógica difusa..... | 42 |
| 2.6.1.1 | Características de la lógica difusa..... | 42 |
| 2.6.1.2 | Diferencias entre la lógica tradicional y la lógica difusa..... | 43 |
| 2.6.2 | Sistema basado en agentes..... | 44 |
| 2.6.2.1 | Características de los agentes inteligentes..... | 45 |
| 2.6.2.2 | Proceso metodológico de agentes..... | 47 |
| 2.7 | Simulación..... | 50 |
| 2.7.1 | Sistemas y modelos..... | 51 |
| 2.7.1.1 | Sistemas..... | 51 |
| 2.7.1.2 | Modelos..... | 52 |
| 2.7.2 | Enfoque de simulación multi-método..... | 52 |
| 2.7.3 | Ventajas de los sistemas simulados..... | 53 |
| 2.8 | Revisión de la Literatura: Cadena de suministro – Agentes Inteligentes..... | 54 |
| 2.9 | Conclusiones..... | 58 |
| Capítulo 3 Desarrollo del SAD basado en agentes inteligentes..... | | 60 |
| 3.1 | Arquitectura genérica para agro-productos basada en agentes..... | 63 |
| 3.1.1 | Aspectos generales..... | 63 |
| 3.1.1.1 | Descripción del modelo genérico de agentes para agro-productos propuesto..... | 64 |
| 3.1.1.2 | Tipos de agentes y actores de la arquitectura genérica para agro-productos..... | 66 |
| 3.2 | Desarrollo del modelo de agentes..... | 70 |
| 3.2.1 | Análisis de proceso o negocio..... | 70 |
| 3.2.1.1 | Proveedor..... | 70 |
| 3.2.1.2 | Empresa..... | 71 |
| 3.2.1.3 | Cliente..... | 73 |
| 3.2.2 | Desarrollo de la ontología..... | 74 |
| 3.2.3 | Fase de diseño..... | 74 |
| 3.2.3.1 | Proceso de decisiones en la empresa..... | 74 |

| | | |
|---|---|-----|
| 3.2.4 | Proceso de conceptualización | 77 |
| 3.2.4.1 | El modelo dominio | 77 |
| 3.2.4.2 | Modelo Conceptual de agentes del caso de estudio..... | 80 |
| 3.2.4.3 | Modelo operacional | 82 |
| 3.3 | Conclusiones | 219 |
| Capítulo 4 Análisis de resultados | | 223 |
| 4.1 | Análisis de los patrones de comportamiento de decisión basados en la gestión del conocimiento del modelo de agentes | 223 |
| 4.1.1 | Superficies de respuesta del modelo difuso rendimiento de café (gestión del conocimiento del agente proveedor) | 224 |
| 4.1.1.1 | Conclusiones del análisis..... | 226 |
| 4.1.2 | Superficies de respuesta del modelo difuso catación de café pergamino (gestión del conocimiento del agente proceso organoléptico) | 227 |
| 4.1.2.1 | Conclusiones del análisis..... | 230 |
| 4.1.3 | Superficies de respuesta del modelo difuso catación de café robusto (gestión del conocimiento del agente proceso organoléptico) | 231 |
| 4.1.3.1 | Conclusiones del análisis..... | 232 |
| 4.1.4 | Superficies de respuesta del modelo difuso selección de proceso café pergamino (gestión del conocimiento del agente selección de proceso)..... | 233 |
| 4.1.4.1 | Variables de Salida 2, 3 y 4 | 235 |
| 4.1.4.2 | Conclusiones del análisis..... | 237 |
| 4.1.5 | Superficies de respuesta del modelo difuso selección de proceso café bola robusto (gestión del conocimiento del agente selección de proceso)..... | 238 |
| 4.1.5.1 | Variables de Salida 2, 3 y 4 | 240 |
| 4.1.5.2 | Conclusiones del análisis..... | 242 |
| 4.1.6 | Superficies de respuesta del modelo selección de proceso café oro natural robusto (gestión del conocimiento del agente selección de proceso)..... | 242 |
| 4.1.6.1 | Variables de Salida 2 y 3 | 245 |
| 4.1.6.2 | Conclusiones del análisis..... | 247 |
| 4.2 | Análisis de escenarios e indicadores clave de desempeño..... | 247 |
| 4.2.1 | Indicadores clave de desempeño | 251 |
| 4.2.1.1 | Indicador clave de desempeño tiempo ciclo, capacidad de utilización y cantidad correcta de café bueno | 251 |
| 4.2.1.2 | Indicador clave de desempeño cumplimiento perfecto..... | 254 |
| 4.3 | Conclusiones | 260 |
| Conclusión..... | | 263 |
| Referencias bibliográficas | | 267 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Marco metodológico de la propuesta de tesis | 10 |
| Figura 1.1 Macro-localización del municipio Fortín, Veracruz | 13 |
| Figura 1.2 Micro-localización de la empresa | 13 |
| Figura 1.3 Proceso de comercialización de grupo Merino Telis Café | 19 |
| Figura 1.4 Máquina para realizar prelimpia del grano | 21 |
| Figura 1.5 Máquina Morteadora..... | 22 |
| Figura 1.6 Máquina Catadora..... | 22 |
| Figura 1.7 Clasificadora de Zarandas..... | 23 |
| Figura 1.8 Densimétrica | 23 |
| Figura 1.9 Máquina electrónica..... | 24 |
| Figura 1.10 Sifón de pergamino..... | 24 |
| Figura 1.11 Tolvas | 25 |
| Figura 1.12 Elevadores de cangilones..... | 25 |
| Figura 1.13 Características físicas de cada tipo de café | 29 |
| Figura 1.14 Defectos tipo concha..... | 29 |
| Figura 1.15 Defectos de brocado..... | 30 |
| Figura 1.16 Grano roto o quebrado | 30 |
| Figura 1.17 Grano dañado por hongos | 31 |
| Figura 1.18 Grano parcialmente negro..... | 31 |
| Figura 1.19 Grano totalmente negro | 31 |
| Figura 1.20 Grano vinagre | 32 |
| Figura 1.21 Grano flotador..... | 32 |
| Figura 1.22 Grano inmaduro | 33 |
| Figura 1.23 Elemento extraño, palo | 33 |
| Figura 1.24 Elemento extraño, cascara | 33 |
| Figura 1.25 Elemento extraño, piedra | 34 |
| Figura 2.1 Flujo de trabajo del marco de referencia metodológico propuesto..... | 47 |

| | |
|--|-----|
| Figura 2.2 Marco de la modelación de agentes | 50 |
| Figura 2.3 Aplicación de agentes inteligentes en áreas específicas de conocimiento | 55 |
| Figura 2.4 Número de artículos por área de la gestión de la cadena de suministro | 55 |
| Figura 2.5 Número de artículos por eslabón de la cadena de suministro | 57 |
| Figura 3.1 Proceso de la toma de decisiones en la empresa..... | 60 |
| Figura 3.2 Arquitectura genérica para agro-productos..... | 65 |
| Figura 3.3 Abstracción preliminar de la cadena de suministro de café..... | 73 |
| Figura 3.4 Ejemplo de comunicación con un motor de inferencia..... | 74 |
| Figura 3.5 Diagrama de los flujos existentes en la cadena de suministro de Merino Telis Café | 76 |
| Figura 3.6 Proceso de modelación conceptual | 77 |
| Figura 3.7 Modelo estructural de Merino Telis Café | 78 |
| Figura 3.8 Modelo dinámico de Merino Telis Café | 79 |
| Figura 3.9 Modelo conceptual de agentes..... | 81 |
| Figura 3.10 Menú de objetos de la sección Process Modelling Library | 101 |
| Figura 3.11 Menú de objetos de la sección Agent | 101 |
| Figura 3.12 Menú de objetos de la sección Controls | 102 |
| Figura 3.13 Menú de objetos de la sección 3D Objets..... | 102 |
| Figura 3.14 Menú de objetos de la sección Analysis | 103 |
| Figura 3.15 Menú de objetos de la sección Space Markup..... | 103 |
| Figura 3.16 Menú de objetos de la sección Presentation | 104 |
| Figura 3.17 Ejemplo de programación para el comportamiento de elementos | 108 |
| Figura 3.18 Variables de la sección de Resumen de resultados del modelo propuesto | 108 |
| Figura 3.19. Modelo de simulación final de la empresa | 109 |
| Figura 3.20 Modelo tipo Mandani para rendimiento de café..... | 116 |
| Figura 3.21 Función de membresía de la variable Poda y limpieza..... | 117 |
| Figura 3.22 Función de membresía de la variable Nutrición del suelo | 119 |
| Figura 3.23 Función de membresía de la variable Precipitación pluvial | 120 |
| Figura 3.24 Función de membresía de la variable Control de plagas | 122 |
| Figura 3.25 Función de membresía de la variable Control de enfermedades..... | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.26 Función de membresía de la variable Densidad de plantación | 124 |
| Figura 3.27 Función de membresía de la variable de salida Rendimiento por hectárea | 126 |
| Figura 3.28 Mecanismo de inferencia del modelo rendimiento de café..... | 128 |
| Figura 3.29 Modelo tipo Mandani para catación de café pergamino | 132 |
| Figura 3.30 Función de membresía de la variable Aroma..... | 133 |
| Figura 3.31 Función de membresía de la variable Sabor de café..... | 135 |
| Figura 3.32 Función de membresía de la variable Acidez | 137 |
| Figura 3.33 Función de membresía de la variable Cuerpo..... | 139 |
| Figura 3.34 Función de membresía de la variable Vinoso, afrutado, dulce | 140 |
| Figura 3.35 Función de membresía de la variable Verde, pasta, inmaduro | 142 |
| Figura 3.36 Función de membresía de la variable Cereal, madera, papel..... | 143 |
| Figura 3.37 Función de membresía de la variable Seco, añejo | 144 |
| Figura 3.38 Función de membresía de la variable Químico, medicinal, fenol..... | 145 |
| Figura 3.39 Función de membresía de la variable Fermento, agrio, hediondo | 146 |
| Figura 3.40 Función de membresía de la variable Terroso, moho | 147 |
| Figura 3.41 Función de membresía de la variable Clase café pergamino | 149 |
| Figura 3.42 Mecanismo de inferencia del modelo catación café pergamino | 151 |
| Figura 3.43 Modelo tipo Mandani para catación de café robusto | 153 |
| Figura 3.44 Función de membresía de la variable Fermento | 154 |
| Figura 3.45 Función de membresías de la variable Agrio..... | 156 |
| Figura 3.46 Función de membresía de la variable Hediondo..... | 158 |
| Figura 3.47 Función de membresía de la variable Tierra..... | 159 |
| Figura 3.48 Función de membresía de la variable Moho | 161 |
| Figura 3.49 Función de membresía de la variable Añejo..... | 163 |
| Figura 3.50 Función de membresía la variable Clase café robusto..... | 164 |
| Figura 3.51 Mecanismo de inferencia del modelo catación café robusto | 166 |
| Figura 3.52 Modelo tipo Mandani para selección de proceso del café pergamino | 168 |
| Figura 3.53 Función de membresía de la variable Defectos leves | 169 |
| Figura 3.54 Función de membresía de la variable Defectos graves | 170 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.55 Función de membresía de la variable Granza | 171 |
| Figura 3.56 Función de membresía de la variable Humedad | 173 |
| Figura 3.57 Función de membresía de la variable Aspecto verde..... | 174 |
| Figura 3.58 Función de membresía para la variable de salida 1 | 176 |
| Figura 3.59 Función de membresía para la variable de salida 2 | 177 |
| Figura 3.60 Función de membresía para la variable de salida 3 | 179 |
| Figura 3.61 Función de membresía para la variable de salida 4 | 179 |
| Figura 3.62 Mecanismo de inferencia del modelo selección de proceso café pergamino..... | 180 |
| Figura 3.63 Modelo tipo Mandani para selección de proceso del café bola robusto | 182 |
| Figura 3.64 Función de membresía de la variable Defectos leves | 183 |
| Figura 3.65 Función de membresía de la variable Defectos graves | 184 |
| Figura 3.66 Función de membresía de la variable Granza | 185 |
| Figura 3.67 Función de membresía de la variable Humedad | 187 |
| Figura 3.68 Función de membresía de la variable Aspecto verde..... | 188 |
| Figura 3.69 Función de membresía de la variable Peso | 190 |
| Figura 3.70 Función de membresía para la variable de salida 1 | 191 |
| Figura 3.71 Función de membresía para la variable de salida 2 | 193 |
| Figura 3.72 Función de membresía para la variable de salida 3 | 194 |
| Figura 3.73 Función de membresía para la variable de salida 4 | 195 |
| Figura 3.74 Mecanismo de inferencia del modelo selección de proceso café bola robusto..... | 196 |
| Figura 3.75 Modelo tipo Mandani para selección de proceso del café oro natural robusto | 198 |
| Figura 3.76 Función de membresía de la variable Defectos leves | 199 |
| Figura 3.77 Función de membresía de la variable Defectos graves | 200 |
| Figura 3.78 Función de membresía de la variable Granza | 202 |
| Figura 3.79 Función de membresía de la variable Aspecto verde..... | 203 |
| Figura 3.80 Función de membresía de la variable Peso | 205 |
| Figura 3.81 Función de membresía para la variable de salida 1 | 206 |
| Figura 3.82 Función de membresía para la variable de salida 2 | 207 |
| Figura 3.83 Función de membresía para la variable de salida 3 | 208 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3.84 Mecanismo de inferencia del modelo selección de proceso café bola robusto..... | 209 |
| Figura 3.85 Interfaz de inicio | 211 |
| Figura 3.86 Interfaz gráfica de usuario | 212 |
| Figura 3.87 Ejemplo de programación para el comportamiento del modelo complementario | 217 |
| Figura 3.88 Vista general del funcionamiento del modelo complementario para distribución..... | 218 |
| Figura 4.1 Superficie de respuesta de la relación Nutrición del suelo y Precipitación pluvial para el rendimiento de café..... | 224 |
| Figura 4.2 Superficie de respuesta de la relación Control de enfermedades y Poda para el rendimiento de café..... | 224 |
| Figura 4.3 Superficie de respuesta de la relación Control de plagas y Temperatura para el rendimiento de café..... | 225 |
| Figura 4.4 Superficie de respuesta de la relación Precipitación pluvial y Temperatura para el rendimiento de café..... | 225 |
| Figura 4.5 Superficie de respuesta de la relación Nutrición del suelo y Densidad de plantación para el rendimiento de café..... | 226 |
| Figura 4.6 Superficie de respuesta de la relación Acidez y Sabor para cata de café pergamino..... | 227 |
| Figura 4.7 Superficie de respuesta de la relación Cuerpo y Acidez para cata de café pergamino | 228 |
| Figura 4.8 Superficie de respuesta de la relación Sabor y Aroma para cata de café pergamino | 228 |
| Figura 4.9 Superficie de respuesta de la relación Sabor y Vinoso para cata de café pergamino | 228 |
| Figura 4.10 Superficie de respuesta de la relación Químico y Añejo para cata de café pergamino..... | 229 |
| Figura 4.11 Superficie de respuesta de la relación Tierra y Fermento para cata de café pergamino ... | 229 |
| Figura 4.12 Superficie de respuesta de la relación Fermento y Añejo para cata de café pergamino ... | 230 |
| Figura 4.13 Superficie de respuesta de la relación Cuerpo y Aroma para cata de café pergamino | 230 |
| Figura 4.14 Superficie de respuesta de la relación Agrio y Fermento para cata de café robusto..... | 231 |
| Figura 4.15 Superficie de respuesta de la relación Tierra y Hediondo para cata de café robusto..... | 231 |
| Figura 4.16 Superficie de respuesta de la relación Añejo y Fermento para cata de café robusto | 232 |
| Figura 4.17 Superficie de respuesta de la relación Añejo y Moho para cata de café robusto | 232 |
| Figura 4.18 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Humedad de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino..... | 233 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.19 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Defectos leves de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino..... | 234 |
| Figura 4.20 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino | 234 |
| Figura 4.21 Superficie de respuesta de la relación Aspecto verde y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino..... | 235 |
| Figura 4.22 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Humedad de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino..... | 235 |
| Figura 4.23 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino..... | 236 |
| Figura 4.24 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Granza de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino | 236 |
| Figura 4.25 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Defectos leves de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino..... | 237 |
| Figura 4.26 Superficie de respuesta de la relación Aspecto verde y Granza de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino..... | 237 |
| Figura 4.27 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Humedad de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto..... | 238 |
| Figura 4.28 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Defectos leves de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto | 239 |
| Figura 4.29 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto..... | 239 |
| Figura 4.30 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Peso de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto..... | 240 |
| Figura 4.31 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto..... | 240 |
| Figura 4.32 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto | 241 |
| Figura 4.33 Superficie de respuesta de la relación Granza y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto..... | 241 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.34 Superficie de respuesta de la relación Peso y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto..... | 242 |
| Figura 4.35 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Defectos graves de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto..... | 243 |
| Figura 4.36 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto | 243 |
| Figura 4.37 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Peso de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto | 244 |
| Figura 4.38 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto | 244 |
| Figura 4.39 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Aspecto verde de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto..... | 245 |
| Figura 4.40 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto..... | 245 |
| Figura 4.41 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto | 246 |
| Figura 4.42 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Peso de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto | 246 |
| Figura 4.43 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Aspecto verde de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto..... | 247 |
| Figura 4.44 Indicador cumplimiento perfecto de pedidos..... | 254 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1 Tabla de correlación de la máquina Densimétrica | 90 |
| Tabla 3.2 Datos de correlaciones en los procesos electrónicas y mecánicas-electrónicas | 94 |
| Tabla 3.3 Tiempos de la maquinaria y equipo | 98 |
| Tabla 3.4 Total de procesos productivos con nomenclatura | 99 |
| Tabla 3.5 Variables detectadas en la cadena de suministro del café..... | 100 |
| Tabla 3.6 Objetos del modelo de simulación | 104 |
| Tabla 3.7. Validación del modelo de simulación | 110 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.8 Número de replicaciones del modelo de simulación..... | 112 |
| Tabla 3.9 Comparación de resultados entre datos reales y simulados | 115 |
| Tabla 3.10 Número de reglas de inferencia..... | 128 |
| Tabla 3.11 Datos para validación de modelo rendimiento de café..... | 129 |
| Tabla 3.12 Número de reglas de inferencia catación café pergamino..... | 150 |
| Tabla 3.13 Validación del modelo de lógica difusa catación de café pergamino | 151 |
| Tabla 3.14 Número de reglas de inferencia catación café robusto..... | 165 |
| Tabla 3.15 Validación del modelo de lógica difusa catación de café robusto..... | 167 |
| Tabla 3.16 Número de reglas de inferencia selección de proceso café pergamino | 180 |
| Tabla 3.17 Validación del modelo de lógica difusa selección de proceso café pergamino | 181 |
| Tabla 3.18 Número de reglas de inferencia selección de proceso café robusto | 195 |
| Tabla 3.19 Validación del modelo de lógica difusa selección de proceso café bola robusto..... | 197 |
| Tabla 3.20 Número de reglas de inferencia selección de proceso café robusto | 209 |
| Tabla 3.21 Validación del modelo de lógica difusa selección de proceso café oro natural robusto | 210 |
| Tabla 3.22 Objetos del modelo de simulación | 215 |
| Tabla 3.23. Indicadores de desempeño | 219 |
| Tabla 4.1 Casos para toma de decisiones de prácticas agrícolas..... | 248 |
| Tabla 4.2 Resultado del sistema de apoyo a la decisión para el rendimiento de café..... | 249 |
| Tabla 4.3 Proceso de catación de café pergamino..... | 249 |
| Tabla 4.4 Proceso de catación de café robusto..... | 250 |
| Tabla 4.5 Determinación de proceso productivo..... | 250 |
| Tabla 4.6 Resultado de indicadores de desempeño (kpi) | 253 |
| Tabla 4.7 Descripción de mano de obra..... | 255 |
| Tabla 4.8 Descripción de gastos generales de beneficio. | 256 |
| Tabla 4.9 Porcentaje general de proceso | 257 |
| Tabla 4.10 Conceptos para el cálculo de costos..... | 258 |
| Tabla 4.11 Calculo de costos de producción..... | 258 |
| Tabla 4.12 Tipo de proceso | 259 |
| Tabla 4.13 Cálculo de costo para energía eléctrica | 259 |

Índice de ecuaciones

| | |
|---------------------|----|
| Ecuación 3.1 | 83 |
| Ecuación 3.2 | 83 |
| Ecuación 3.3 | 84 |
| Ecuación 3.4 | 84 |
| Ecuación 3.5 | 84 |
| Ecuación 3.6 | 84 |
| Ecuación 3.7 | 85 |
| Ecuación 3.8 | 85 |
| Ecuación 3.9 | 85 |
| Ecuación 3.10 | 86 |
| Ecuación 3.11 | 86 |
| Ecuación 3.12 | 86 |
| Ecuación 3.13 | 86 |
| Ecuación 3.14 | 87 |
| Ecuación 3.15 | 87 |
| Ecuación 3.16 | 87 |
| Ecuación 3.17 | 87 |
| Ecuación 3.18 | 88 |
| Ecuación 3.19 | 88 |
| Ecuación 3.20 | 89 |
| Ecuación 3.21 | 89 |
| Ecuación 3.22 | 89 |
| Ecuación 3.23 | 90 |
| Ecuación 3.24 | 90 |
| Ecuación 3.25 | 90 |
| Ecuación 3.26 | 91 |
| Ecuación 3.27 | 91 |

| | |
|--------------------|-----|
| Ecuación 3.28..... | 91 |
| Ecuación 3.29..... | 91 |
| Ecuación 3.30..... | 91 |
| Ecuación 3.31..... | 91 |
| Ecuación 3.32..... | 92 |
| Ecuación 3.33..... | 92 |
| Ecuación 3.34..... | 92 |
| Ecuación 3.35..... | 92 |
| Ecuación 3.36..... | 93 |
| Ecuación 3.37..... | 93 |
| Ecuación 3.38..... | 95 |
| Ecuación 3.39..... | 95 |
| Ecuación 3.40..... | 95 |
| Ecuación 3.41..... | 95 |
| Ecuación 3.42..... | 95 |
| Ecuación 3.43..... | 95 |
| Ecuación 3.44..... | 96 |
| Ecuación 3.45..... | 96 |
| Ecuación 3.46..... | 96 |
| Ecuación 3.47..... | 96 |
| Ecuación 3.48..... | 97 |
| Ecuación 3.49..... | 97 |
| Ecuación 3.50..... | 98 |
| Ecuación 3.51..... | 98 |
| Ecuación 3.52..... | 111 |
| Ecuación 3.53..... | 111 |
| Ecuación 3.54..... | 111 |
| Ecuación 3.55..... | 113 |
| Ecuación 3.56..... | 118 |

| | |
|---------------------|-----|
| Ecuación 3.57 | 118 |
| Ecuación 3.58 | 118 |
| Ecuación 3.59 | 119 |
| Ecuación 3.60 | 119 |
| Ecuación 3.61 | 119 |
| Ecuación 3.62 | 119 |
| Ecuación 3.63 | 119 |
| Ecuación 3.64 | 120 |
| Ecuación 3.65 | 121 |
| Ecuación 3.66 | 121 |
| Ecuación 3.67 | 122 |
| Ecuación 3.68 | 122 |
| Ecuación 3.69 | 123 |
| Ecuación 3.70 | 123 |
| Ecuación 3.71 | 124 |
| Ecuación 3.72 | 125 |
| Ecuación 3.73 | 125 |
| Ecuación 3.74 | 127 |
| Ecuación 3.75 | 127 |
| Ecuación 3.76 | 127 |
| Ecuación 3.77 | 127 |
| Ecuación 3.78 | 131 |
| Ecuación 3.79 | 131 |
| Ecuación 3.80 | 131 |
| Ecuación 3.81 | 134 |
| Ecuación 3.82 | 134 |
| Ecuación 3.83 | 134 |
| Ecuación 3.84 | 134 |
| Ecuación 3.85 | 134 |

| | |
|---------------------|-----|
| Ecuación 3.86..... | 136 |
| Ecuación 3.87..... | 136 |
| Ecuación 3.88..... | 136 |
| Ecuación 3.89..... | 136 |
| Ecuación 3.90..... | 136 |
| Ecuación 3.91..... | 137 |
| Ecuación 3.92..... | 138 |
| Ecuación 3.93..... | 138 |
| Ecuación 3.94..... | 138 |
| Ecuación 3.95..... | 138 |
| Ecuación 3.96..... | 139 |
| Ecuación 3.97..... | 139 |
| Ecuación 3.98..... | 139 |
| Ecuación 3.99..... | 141 |
| Ecuación 3.100..... | 141 |
| Ecuación 3.101..... | 141 |
| Ecuación 3.102..... | 141 |
| Ecuación 3.103..... | 142 |
| Ecuación 3.104..... | 142 |
| Ecuación 3.105..... | 143 |
| Ecuación 3.106..... | 143 |
| Ecuación 3.107..... | 144 |
| Ecuación 3.108..... | 144 |
| Ecuación 3.109..... | 145 |
| Ecuación 3.110..... | 145 |
| Ecuación 3.111..... | 146 |
| Ecuación 3.112..... | 147 |
| Ecuación 3.113..... | 148 |
| Ecuación 3.114..... | 148 |

| | |
|---------------------|-----|
| Ecuación 3.115..... | 149 |
| Ecuación 3.116..... | 149 |
| Ecuación 3.117..... | 149 |
| Ecuación 3.118..... | 149 |
| Ecuación 3.119..... | 154 |
| Ecuación 3.120..... | 155 |
| Ecuación 3.121..... | 155 |
| Ecuación 3.122..... | 155 |
| Ecuación 3.123..... | 156 |
| Ecuación 3.124..... | 156 |
| Ecuación 3.125..... | 157 |
| Ecuación 3.126..... | 157 |
| Ecuación 3.127..... | 158 |
| Ecuación 3.128..... | 158 |
| Ecuación 3.129..... | 158 |
| Ecuación 3.130..... | 158 |
| Ecuación 3.131..... | 160 |
| Ecuación 3.132..... | 160 |
| Ecuación 3.133..... | 160 |
| Ecuación 3.134..... | 160 |
| Ecuación 3.135..... | 161 |
| Ecuación 3.136..... | 161 |
| Ecuación 3.137..... | 162 |
| Ecuación 3.138..... | 162 |
| Ecuación 3.139..... | 163 |
| Ecuación 3.140..... | 163 |
| Ecuación 3.141..... | 163 |
| Ecuación 3.142..... | 163 |
| Ecuación 3.143..... | 165 |

| | |
|---------------------|-----|
| Ecuación 3.144..... | 165 |
| Ecuación 3.145..... | 165 |
| Ecuación 3.146..... | 169 |
| Ecuación 3.147..... | 169 |
| Ecuación 3.148..... | 170 |
| Ecuación 3.149..... | 171 |
| Ecuación 3.150..... | 172 |
| Ecuación 3.151..... | 172 |
| Ecuación 3.152..... | 173 |
| Ecuación 3.153..... | 173 |
| Ecuación 3.154..... | 173 |
| Ecuación 3.155..... | 174 |
| Ecuación 3.156..... | 175 |
| Ecuación 3.157..... | 175 |
| Ecuación 3.158..... | 175 |
| Ecuación 3.159..... | 175 |
| Ecuación 3.160..... | 176 |
| Ecuación 3.161..... | 176 |
| Ecuación 3.162..... | 177 |
| Ecuación 3.163..... | 177 |
| Ecuación 3.164..... | 177 |
| Ecuación 3.165..... | 177 |
| Ecuación 3.166..... | 178 |
| Ecuación 3.167..... | 178 |
| Ecuación 3.168..... | 178 |
| Ecuación 3.169..... | 178 |
| Ecuación 3.170..... | 178 |
| Ecuación 3.171..... | 183 |
| Ecuación 3.172..... | 183 |

| | |
|---------------------|-----|
| Ecuación 3.173..... | 184 |
| Ecuación 3.174..... | 184 |
| Ecuación 3.175..... | 185 |
| Ecuación 3.176..... | 186 |
| Ecuación 3.177..... | 186 |
| Ecuación 3.178..... | 186 |
| Ecuación 3.179..... | 187 |
| Ecuación 3.180..... | 187 |
| Ecuación 3.181..... | 187 |
| Ecuación 3.182..... | 188 |
| Ecuación 3.183..... | 189 |
| Ecuación 3.184..... | 189 |
| Ecuación 3.185..... | 189 |
| Ecuación 3.186..... | 189 |
| Ecuación 3.187..... | 190 |
| Ecuación 3.188..... | 190 |
| Ecuación 3.189..... | 191 |
| Ecuación 3.190..... | 192 |
| Ecuación 3.191..... | 192 |
| Ecuación 3.192..... | 192 |
| Ecuación 3.193..... | 192 |
| Ecuación 3.194..... | 192 |
| Ecuación 3.195..... | 193 |
| Ecuación 3.196..... | 193 |
| Ecuación 3.197..... | 193 |
| Ecuación 3.198..... | 194 |
| Ecuación 3.199..... | 194 |
| Ecuación 3.200..... | 194 |
| Ecuación 3.201..... | 199 |

| | |
|---------------------|-----|
| Ecuación 3.202..... | 200 |
| Ecuación 3.203..... | 201 |
| Ecuación 3.204..... | 201 |
| Ecuación 3.205..... | 201 |
| Ecuación 3.206..... | 202 |
| Ecuación 3.207..... | 202 |
| Ecuación 3.208..... | 202 |
| Ecuación 3.209..... | 203 |
| Ecuación 3.210..... | 203 |
| Ecuación 3.211..... | 204 |
| Ecuación 3.212..... | 204 |
| Ecuación 3.213..... | 205 |
| Ecuación 3.214..... | 205 |
| Ecuación 3.215..... | 205 |
| Ecuación 3.216..... | 206 |
| Ecuación 3.217..... | 206 |
| Ecuación 3.218..... | 207 |
| Ecuación 3.219..... | 207 |
| Ecuación 3.220..... | 207 |
| Ecuación 3.221..... | 208 |
| Ecuación 3.222..... | 208 |

Introducción

El análisis de decisiones es un proceso que provee un método estructurado con herramientas analíticas, diseñado para mejorar la habilidad de la toma de decisiones (Clemen, 1996). Por lo tanto, el proceso de toma de decisiones resulta complejo e incierto aunque se realice cotidianamente, teniendo mayor impacto las decisiones en el sector empresarial puesto que las ganancias o pérdidas son cuantiosas y pueden llevar a una empresa al éxito o fracaso al elegir una alternativa que parezca dar la mejor solución a problemas. Una buena decisión aumenta la probabilidad de que nos vaya bien en una situación particular; y el efecto es acumulativo: las buenas decisiones (bien implementadas) mejoran el futuro de la empresa (Ley Borrás, 2011).

La toma de decisiones es también uno de los objetivos fundamentales de la contabilidad de gestión de costos, la información que sustenta el proceso de toma de decisiones gerenciales tiene su principal origen en el sistema contable interno, y este ha de ser capaz de ofrecer al gestor la información que necesita, como la necesita y en el momento que la necesita, puesto que de otra forma no está satisfaciendo adecuadamente las necesidades del usuario (Mallo & Rocafort, 2014).

La empresa Merino Telis Café S. A. de C. V. es un beneficio seco con planta en la ciudad de Fortín, Veracruz, en la cual se trata al café para quitarle toda la basura, la cascara y dejarlo listo para su comercialización nacional e internacional. A pesar de que la empresa se encuentra en una de las zonas cafetaleras más importantes del país, los procesos de cultivo y procesado del grano se encuentran centralizados y a base de experiencia de los dueños de cafetales y beneficios como Merino Telis Café S.A. de C.V.

El presente proyecto de tesis proporciona un sistema de apoyo que auxilie a cualquier persona que interactúa con el software, a tomar decisiones cruciales en los procesos de valor de la cadena de suministro de Merino Telis Café S.A. de C.V. que consiste en determinar rendimiento por hectárea del grano de acuerdo a prácticas agrícolas del caficultor,

determinación de la clase o calidad del café de acuerdo a sus características físicas y organolépticas, para que con la información anterior, determinar la selección del proceso que debe tener el lote de café para cumplir con las características del cliente con el menor uso de recursos de la empresa.

En el capítulo 1 se hace mención a todo lo referente de la empresa, sus antecedentes, su crecimiento y consolidación en la región, políticas, además se describen los procesos existentes que se llevan a cabo para la trata del café junto con la maquinaria y equipo necesario para cada proceso.

En el capítulo 2 se abordan las herramientas o técnicas utilizadas para la realización del proyecto. Se presenta una breve conceptualización sobre la cadena de suministro, su gestión y la gestión de la información; posteriormente se introduce a la inteligencia artificial haciendo hincapié en lógica difusa y agentes inteligentes, finalmente se discute sobre simulación haciendo especial énfasis en modelos de agentes.

A través del capítulo 3 se desglosa la metodología propuesta para la construcción de un modelo de simulación híbrido (eventos discretos y agentes inteligentes), el cual será la base del sistema de apoyo a la decisión que determina el mejor proceso productivo de acuerdo con el rendimiento de cultivo, características físicas y factores organolépticos. En este capítulo se presenta la capitalización del conocimiento de los expertos involucrados a través de los modelos de lógica difusa propuestos.

Finalmente, en el capítulo 4 se realiza la evaluación de impactos de variables y evaluación de escenarios de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. con el fin de mejorar su productividad con base en el modelo SCOR.

Planteamiento del problema

La gestión de la cadena de suministro es la administración efectiva al menor costo posible de los flujos, movimientos, inventarios de productos terminados e información relativa a los

mismos e infraestructura, desde un lugar de origen a un lugar de destino que permitan satisfacer las necesidades del cliente (Adarme Jaimes, 2011). La gestión de la cadena de suministro engloba de manera general tres eslabones: proveedores, procesadores y distribuidores.

La gestión de la cadena de suministro es un área de aplicación que se ha implementado en diversos ámbitos como farmacéutico, automotriz, entre otros, siendo el sector agroindustrial el de menor en atención para el caso de México, puesto que atraviesa una crisis crónica que no permite el crecimiento ni la generación de estudios a las cadenas de suministro de productos agrícolas como el maíz, cítricos o el café, que son productos de exportación. El café ocupa el primer lugar como producto agrícola generador de divisas y empleos en el medio rural (Cafés de México, 2011); así mismo México es actualmente el quinto productor mundial de café.

Particularmente el caso de cultivo y comercialización de café tiene gran importancia en el país al ser producto de exportación, sin embargo, presenta deficiencias en la cadena de suministro.

Como caso de estudio se aborda la gestión de la cadena de suministro para una empresa mercantil del ramo cafetalero denominada Grupo Merino Telis Café S.A. de C.V. que se encuentra ubicada en Avenida 18 sin número, esquina prolongación Calle 8, en la ciudad de Fortín Veracruz, siendo una de las únicas 8 empresas exportadoras que hay en el país.

Para los productores-proveedores de la empresa, la falta de tecnología, de capacitación y del desarrollo de prácticas agrícolas adecuadas en el campo impactan de manera significativa en las variables clave del producto, las cuales son: el rendimiento del cultivo, el precio y la calidad del grano; lo anterior representa una desventaja dentro de la gestión de la cadena de suministro, puesto que el problema radica en el productor primario que genéricamente es el primer eslabón de la cadena de suministro, lo cual dificulta la administración y control eficiente de dicho eslabón, trayendo como consecuencia una escasa sincronización y un deficiente proceso de toma de decisiones.

Para el segundo eslabón de la cadena de suministro del café, referente a los procesos de transformación, a lo largo del año productivo la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. recibe grandes cantidades de café de diferentes proveedores para ser procesado y finalmente comercializar el grano clientes nacionales (Nestlé, Descamex, entre otros) e internacionales (E.U.A., Japón, entre otros) acuerdo a las características solicitadas. Cuando se recibe el café, se procede a realizar un muestreo para ejecutar una evaluación física y organoléptica a través del proceso de catación, y en base a dicho análisis y a la experiencia del dueño de la empresa, se determina la cantidad de granza y/o mancha que tiene el café. La evaluación es muy importante en la compra del grano ya que se decide el ajuste de pago y la calidad que el grano está presentando, y como el análisis es subjetivo, la decisión de este puede tornarse con cierta tendencia a ciertos proveedores ya sea de manera positiva o negativa.

Para obtener un nivel de calidad en el grano se debe pasar por una combinación de procesos de limpia que ayudan de dejar el grano lo más cercano a las especificaciones del cliente, llegando a realizarse más de una combinación de procesos de granza, mecánicos o electrónicos, cabe mencionar que dicha combinación se designa de manera empírica por el dueño de la empresa, lo cual representa subjetividad y centralización, que trae como consecuencia problemas en la gestión de la información, la gestión de la cadena de suministro y debilita la sincronía de la misma.

Por otra parte, en base a la demanda de los clientes, la empresa decide, de acuerdo a los análisis hechos anteriormente, la cantidad de café que debe ingresar al sistema, para que, de acuerdo a los rendimientos de los procesos, abastezca los pedidos recibidos en tiempo y forma, pero si el proceso seleccionado no es el adecuado, entonces se presentan dos consecuencias, la primera consiste en someter nuevamente el café a una combinación de procesos generando reproceso, gastos de recursos humanos, desgaste de maquinaria, pérdida de tiempo, atraso en pedidos pendientes y ajustes económicos al comercializar tardíamente; la segunda consecuencia consiste en el sobreproceso del grano lo cual sobrepasa la calidad que el cliente está dispuesto a pagar por lo tanto se puede quedar almacenado el lote de café o venderse a menor precio de lo que en realidad se cotiza. Cabe mencionar que para la compra y venta del

grano la empresa basa el precio de acuerdo a las bolsas de valores de Nueva York y Londres, lo cual hace muy volátil el proceso de compra-venta.

Como parte del último eslabón de la cadena de suministro se encuentra al área de distribución, la cual se encarga de llevar y desembarcar el grano comprado por el cliente hasta el domicilio de este, durante este proceso consideran variables críticas que ocasionan que la empresa incurra en un desembolso mayor como lo son la disponibilidad de unidades, área transportable disponible por unidad, cantidad existente, ruta y disponibilidad de grano.

Todo lo anterior recae en la satisfacción cliente, ya que, al ser una empresa exportadora, tiene que manejar diferentes especificaciones para cada cliente que se ve obligada a cumplir para obtener dividendos máximos, de lo contrario se ve penalizada monetariamente al venderse el grano en un precio menor al establecido por la empresa. Esto se debe principalmente por no contar con la información necesaria de forma concisa y rápida para la toma de decisiones, así como falta de control en los procesos de valor agregado de la empresa y el proceso centralizado de toma de decisiones, por lo que existe la necesidad de corregir esta condición a través de la utilización de técnicas sofisticadas e inteligentes.

Un sistema de apoyo a la decisión con enfoque en agentes inteligentes, que es un sistema computacional interactivo con sistemas expertos propios de inteligencia artificial, en esta empresa será una poderosa herramienta para colaborar en el control de los procesos clave de la cadena de suministro, puesto que tiene la capacidad de emular entidades, procesos y flujos de la cadena de una manera autónoma, reactiva y proactiva, lo que permitirá a la empresa tomar decisiones para la gestión de la cadena de suministro de manera descentralizada y mejorar el desempeño de la cadena.

Objetivos

El desarrollo de este trabajo tiene como la finalidad de cumplir con los siguientes objetivos:

General

Desarrollar un sistema de apoyo a la decisión mediante el enfoque de sistemas basado en agentes, para la gestión óptima de la cadena de suministro del producto agro-alimenticio denominado café en la empresa Grupo Merino Telis Café S.A. de C.V. y mejorar su desempeño técnico/económico.

Específicos

- Revisar el estado del arte de los sistemas basados en agentes para analizar su aplicación en la gestión de la cadena de suministro, haciendo énfasis en la cadena de suministro, cadena agroalimentaria y sistemas basados en agentes.
- Caracterizar la cadena de suministro de la empresa Grupo Merino Telis Café S.A. de C.V. para la selección de arquitectura de agentes más adecuada en base a trabajos previos.
- Desarrollar un marco de referencia para la gestión de la cadena de suministro basado en agentes para consolidar la abstracción del sistema analizado y determinar elementos del modelo de agentes.
- Determinar la arquitectura del sistema de apoyo a la decisión basado en agentes para modelar en software.
- Construir el sistema de apoyo a la decisión para verificar su funcionamiento a través de la simulación en pruebas piloto.
- Validar el sistema de apoyo a la decisión a través de la evaluación de indicadores globales de desempeño para determinar ventajas competitivas.

Justificación

El escenario de la cadena de suministros de las agroindustrias se caracteriza no sólo 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 (Wu, 2009). La integración y coordinación los eslabones de la cadena de suministro, desde el proveedor del proveedor, hasta el cliente del cliente es un proceso inherentemente complejo (Manuj & Sahin, 2011). Estas complicaciones en las plantaciones resaltan la importancia del

papel que tiene el proveedor-productor en la cadena de suministro del sector agrícola, toda vez que las relaciones de cooperación entre proveedor y cliente, en las que ambos comparten riesgos, siempre enmarcan ventajas competitivas a lo largo de toda su cadena de suministro.

Los estudios realizados en el ámbito de la cadena de suministro se han enfocado a explicar la planificación y el control de los materiales y los flujos de información, así como actividades logísticas, tanto dentro como entre las empresas. Otros han tratado de describir estrategias relacionadas con la organización con el propósito de discutir una alternativa de estructura orgánica a la integración vertical, para identificar y describir la relación de una empresa que se desarrolla con su proveedor, y hacer frente a las compras y perspectivas de suministros (Maria Garcia Perez & Garcia Martinez, 2007).

En lo general, la filosofía de gestión de la cadena de suministros ha sido tradicionalmente aplicada al sector automotriz, y en los últimos años, investigadores y profesionales han reconocido la utilidad de la gestión de la cadena de suministro para el sector agroalimentario, la cual exige una precisa coordinación para que proveedores y compradores estén trabajando, no sólo con el concepto de una relación, sino con la gestión del conjunto de relaciones mutuas en el aprovechamiento de sus potencialidades (Wilson et al., 2012). Así mismo los estudios que se han realizado se enfocan principalmente a la solución de un punto en particular, ya sea análisis, producción, distribución, almacenaje, entre otros, y se deja de lado la evaluación global de la cadena, si bien cada punto de la cadena de suministro es importante y el mejorar tiene repercusión en toda la cadena de suministro, se debe realizar una gestión en donde se englobe cada uno de los objetivos particulares de cada uno de los elementos que conforman la cadena de suministro y a la vez evaluar su desempeño global de la cadena de suministro con la toma de decisiones particulares de cada actor involucrado.

La elaboración de previsiones es una tarea complicada debido al alto grado de incertidumbre que rodea a la actividad de un negocio, la importancia de tomar en cuenta a la incertidumbre en los estudios radica en que una vez identificada y minimizado el impacto que ésta tiene en el

sistema, la previsión se convierte en un factor clave en la planificación y gestión de las empresas.

Al igual que los sistemas manufactureros y/o de servicios, los sistemas agrícolas presentan también complicaciones para la mejora de su producción y calidad del fruto, sin embargo, a diferencia de ellos, ésta complicación es regulada en mayor o menor grado por la experticia de los agricultores para el tratamiento de sus cultivos, de manera que el aprovechar al máximo este conocimiento y experiencia para mejorar la rentabilidad de las plantaciones, representa un gran potencial, pues al integrarlos en un sistema inteligente computacional ayudará, por una parte, al especialista a tomar decisiones sustentadas en casos reales del comportamiento del campo agrícola, mismo que el sistema inteligente ya ha reconocido y aprendido para controlar la producción y calidad de la plantación, y por la otra, al comprador (segundo eslabón de la cadena de suministros) a garantizar que su proveedor-productor le asegure su abastecimiento y la calidad del fruto requeridos. Es una medida de esfuerzo colectivo necesario para la definición de un problema, recopilación de datos, análisis del problema, solución, implementación y control. Gran parte de literatura asegura que la gestión del conocimiento es una estrategia para la reducción de la complejidad de la toma de decisiones en la cadena de suministro, aunado al uso de técnicas de inteligencia artificial como administradores de incertidumbre.

Los Sistemas Expertos dentro de un sistema de apoyo a la decisión, se han identificado como una herramienta poderosa y con un gran potencial de aplicación en el contexto agrícola, éstos se han dirigidos al diagnóstico y tratamiento de enfermedades, diseño de calendarios de riego y programas de fertilización, entre otros. Los sistemas expertos son llamados así porque emulan el comportamiento de un experto en un dominio concreto y pueden estar en conjunto con otros sistemas expertos formando un sistema de apoyo a la decisión; con ellos se busca una mejor calidad y rapidez en las respuestas dando así lugar a una mejora de la productividad del experto. Estos sistemas imitan las actividades de un humano para resolver problemas de distinta índole mediante diversas técnicas de inteligencia artificial.

Un área de aplicación potencial de la inteligencia artificial que aún no ha sido totalmente explorado es la filosofía de la gestión de la cadena de suministro, en donde se encuentran los siguientes sub-campos (Min, 2010):

- Redes neuronales artificiales y la teoría de conjuntos aproximados ("pensar humanamente")
- Sistemas expertos, machine learning y algoritmos genéticos ("actuar humanamente")
- Lógica difusa ("pensar racionalmente")
- Sistemas basados en agentes ("actuar racionalmente")

Los sistemas basados en agentes múltiples pueden manejar eficientemente la complejidad, se pueden aplicar a un nuevo conjunto de problemas estratégicos en la cadena de suministro como la gestión y el manejo del riesgo. Cuentan con las siguientes características:

- Cada SP persigue un objetivo individual, y al mismo tiempo cumple con restricciones locales y externas
- Un agente representa cada componente de la cadena de suministro
- Autónomo
- Habilidades sociales (comunicación)
- Reactividad (modifica su comportamiento)
- Proactividad (nuevas actividades)

El enfoque de sistemas basado en agentes es una técnica adecuada para el modelado de cadena de suministro (Pino et al., 2010):

- Cada elemento (agente inteligente) toma una decisión local basada en su conocimiento disponible.
- Colaboran entre sí, a fin de lograr decisiones oportunas para afrontar diversos escenarios.
- Colaborativos y no cooperativos

La técnica de sistemas basados en agentes es la herramienta más utilizada (planificación y previsión de la demanda, gestión de relaciones con clientes, negociación, preparación de pedidos, diseño de red)(Min, 2010).

Metodología

En base al análisis de la cadena de suministro del café y al Estado del Campo, principalmente la revisión de la evolución del estado del arte, se propone el siguiente marco metodológico para el desarrollo del sistema de apoyo a la decisión basado en agentes (ver Figura 1):

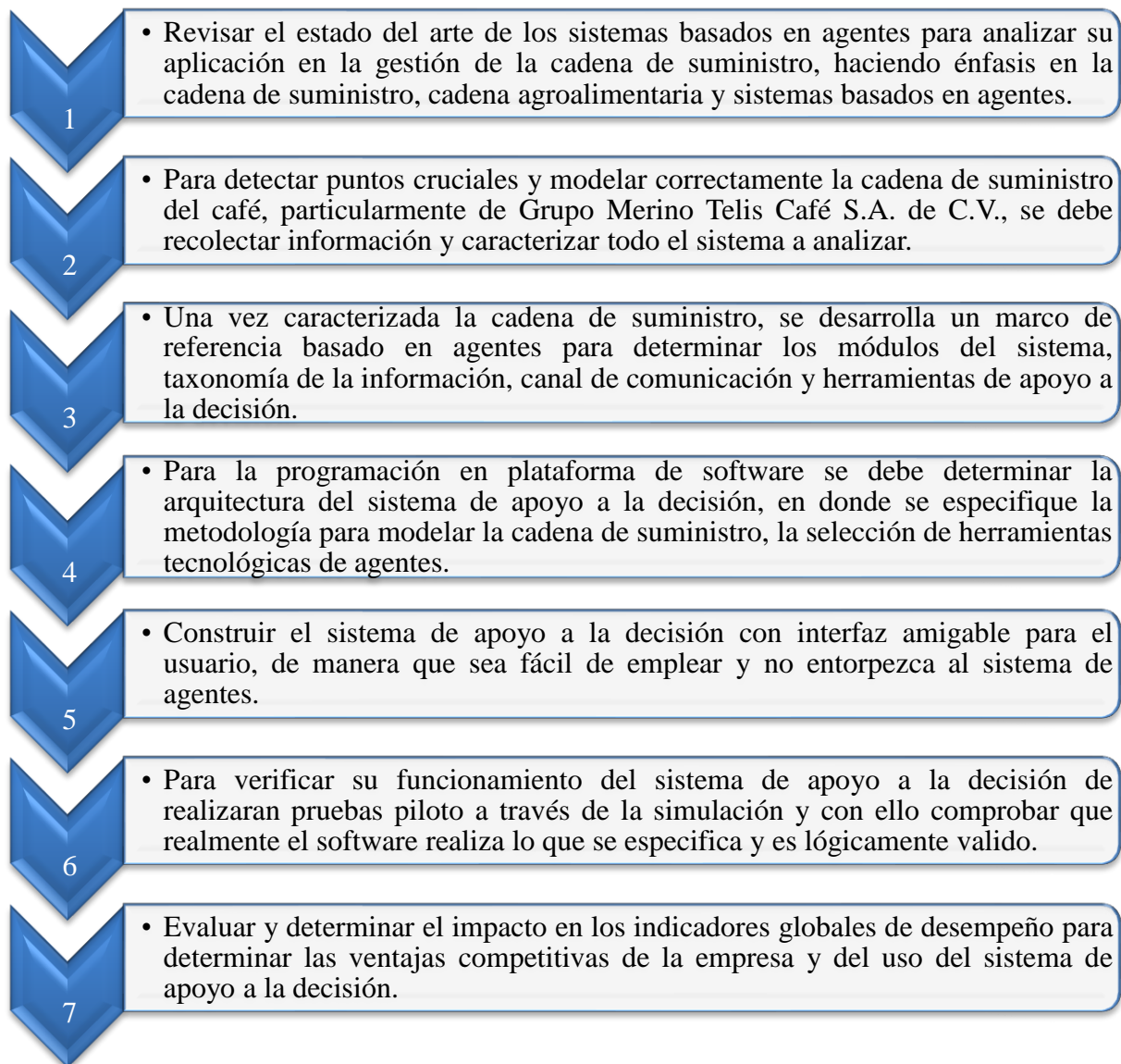


Figura 1 Marco metodológico de la propuesta de tesis (Hernández González, 2017).

Capítulo 1

Descripción de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V.

En este primer capítulo se realiza la presentación de la empresa caso de estudio, en donde se lleva a cabo el presente proyecto de tesis. Se muestra información general, así como giro de la empresa, ubicación geográfica, las empresas que la integran, misión, visión, políticas y la descripción del proceso productivo de la cadena de suministro agroindustrial del café de acuerdo a información proporcionada por (*Grupo Merino, 2015*).

1.1 Información de la empresa

El Grupo Merino Telis Café está integrado por empresas dedicadas a la producción, industrialización del café (beneficiado húmedo y seco) y comercialización del café, teniendo participación en los estados de Veracruz, Oaxaca, Puebla y Chiapas.

Las empresas que integran Grupo Merino Telis Café son tres beneficios secos y tres beneficios húmedos, siendo los siguientes:

- Beneficios Secos:
 - Beneficiadora y Exportadora de Zongolica S.A. de C.V.
 - Merino Telis Café S.A. de C.V.
 - Merino Telis Café S.A. de C.V. (Tapachula)
- Beneficios Húmedos:
 - Cafés Merino de Zongolica S.A. de C.V.
 - Cafés Merino de Tuxpanguillo A. en P.
 - Beneficio la Barranca A. en P.

En 1996 Merino Telis Café S.A. de C.V obtiene el registro como exportador de café y para 1999 la empresa contó con el registro Altex (empresa Altamente Exportadora), otorgado por la Secretaría de Economía, lo cual reconocía su participación en el mercado extranjero que llegó

a ser del 92% de su producción total en esa década. Actualmente Grupo Merino Telis Café S.A. de C.V. se encuentra entre las exportadoras activas más importantes de café en México.

1.1.1 Antecedentes

El Grupo Merino Telis Café S.A. de C.V. nace en el año 1945 en Zongolica como un beneficio húmedo. Sus fundadores el señor Joaquín Merino Martínez y el señor Joaquín Merino Trujillo comercializaban uno de los mejores cafés pergamino de esa época, con un proceso donde la maquinaria no era tan utilizada, secando a sol en planillas tradicionales de beneficios antiguos, fermentando y lavando el producto. Por la comunicación que tenía Zongolica en el siglo pasado se mantienen muchos años comercializando café y no es hasta 1987 cuando entra la tercera generación en la empresa familiar para expandirse en la región y se constituyen las sociedades mercantiles Beneficiadora y Exportadora de Zongolica, Cafés Merino de Zongolica y la Finca Santa Eloísa y en 1994 Merino Telis Café S.A. de C.V. Finalmente durante el periodo de 1990 al año 2000 se adquieren los beneficios húmedos de Tomatlán y Tuxpanguillo para continuar con la expansión del grupo empresarial.

La empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., procesadora y comercializadora del Grupo Merino, se encuentra en buen momento con una variedad de productos de café Robusta, Naturales y Lavados pudiendo ampliar su cartera de clientes y estrategia de comercialización para buscar optimizar sus utilidades. Con responsabilidad y orden se busca consolidar cada año las relaciones comerciales.

1.2 Giro de la empresa

La empresa Merino Telis Café S.A. de C.V es una exportadora de café con giro industrial, especializada en el procesamiento de café, desde el beneficio húmedo cuando es café cereza hasta la comercialización y exportación del grano.

1.3 Marco geográfico

La cercanía con el puerto de Veracruz y el centro del país le permite a la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., tener una ventaja natural estratégica que abate costos y asegura proveeduría de excelente café para su distribución nacional e internacional. La empresa se

encuentra localizada en el centro del estado de Veracruz, aproximadamente a 118.2 Km del puerto de Veracruz, en el municipio de Fortín como se ve en la Figura 1.1. La empresa beneficio seco Merino Telis Café S.A. de C.V tiene una ubicación estratégica para poder abastecerse de toda clase de café que produce el estado de Veracruz, Oaxaca y Puebla.



Figura 1.1 Macro-localización del municipio Fortín, Veracruz (Hernández González, 2017) con información de INEGI.

Cuenta con domicilio en Avenida 18 s/n, esquina prolongación Calle 8, aproximadamente a 1.5 Km de la desviación del municipio de Fortín sobre la autopista 150 Córdoba-Puebla; cómo se puede ver en la Figura 1.2.



Figura 1.2 Micro-localización de la empresa (Hernández González, 2017) con información de StreetView.

1.4 Misión

La misión de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. se centra en la calidad para satisfacer a sus clientes y personal, por lo cual esta es:

“Somos una empresa comprometida con sus clientes, socios comerciales y empleados, para que a través de un servicio de calidad y mejora continua se obtengan los resultados deseados, brindándoles a nuestros clientes productos de la mejor calidad en tiempo y en forma, a través de un equipo humano capaz, con sólidos principios y valores, comprometidos con la empresa y orientada al desarrollo y permanencia de ésta y sus relacionados.”

1.5 Visión

La empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. se rige bajo una visión ambiciosa ya que tiene la finalidad de posicionarse en el mercado nacional e internacional por lo que proyecta sus esfuerzos en la siguiente visión organizacional:

“Ser una empresa líder en la cadena productiva del café, con un crecimiento continuo, mediante la formación y capacitación de nuestros empleados y socios comerciales, para lograr ser altamente productivos, innovadores, competitivos, y dedicados a brindar un servicio de excelencia a los consumidores de nuestros productos.

Sustentar la operación económica siendo socialmente responsables en nuestra operación y compartir logros con las personas que inician la cadena productiva del café y los participantes intermedios de ésta.

Respetar el medio ambiente y contribuir al mejoramiento y conservación de la flora y fauna donde establezcamos fincas e instalaciones de café, así como la tarea para que lo hagan nuestros proveedores.”

1.6 Política de calidad

El beneficio seco Merino Telis Café S.A. de C.V. como empresa posee una política de calidad, la cual está enfocada al cliente y al recurso humano, esta política se presenta a continuación:

“Tenemos el firme compromiso de brindar un servicio de calidad orientado hacia la satisfacción del cliente, cumpliendo sus requerimientos por medio de la eficacia de los procesos de mejora continua, obteniendo utilidades y dando origen a una mejor calidad de vida para el recurso humano de la empresa.”

1.7 Tipos de beneficio de café

De acuerdo con (International Coffee Organization, 2009) el beneficiado del café comprende una serie de procesos para despojar a las semillas o granos de su envoltura, comenzando cuando el fruto parece cereza y tiene una piel roja (el exocarpio) cuando madura. Por debajo de la pulpa (el mesocarpio), se encuentran dos granos aplanados el uno contra el otro, cada uno de ellos recubierto por una especie de pergamino (el endocarpio).

Cuando el fruto está maduro, una capa delgada y viscosa de mucílago recubre el pergamino. Por debajo del pergamino los granos están recubiertos de otra membrana más delgada, una piel plateada (la semilla revestida). Hay que quitar los granos de café del fruto y secarlos para poder tostarlos, y eso puede hacerse con dos métodos: el de vía seca y el de vía húmeda.

El beneficio por la vía húmeda es el procedimiento por el cual se obtiene el café pergamino seco, a partir de las cerezas maduras. En este proceso se efectúan las operaciones de despulpado, fermentado, lavado y secado de los granos. Este beneficio por vía húmeda se sigue un cuidadoso proceso que se inicia en el tanque de recibo del grano, con agua. Luego, de manera continua, se despulpa y clasifica. Posteriormente se elimina el mucílago y se lava.

Finalmente, se efectúa un pre-secamiento, seguido del secamiento hasta un nivel del 10 al 12% de humedad del grano, lo que permite almacenarlo en pergamino durante periodos más o menos prolongados (Rojas Cubero & Alvarado Soto, 1994).

El beneficio seco o también llamado método natural, es la segunda etapa del proceso que se concentra en secar el grano y eliminar las envolturas externas. Este consiste en descascarar, clasificar, secar y seleccionar el grano, según calidades (de primera, segunda, imperfectos) y destino del grano (para exportación o consumo interno). El proceso de selección se realiza a mano o con maquinarias especiales para eliminar las semillas defectuosas y materia extraña. La clasificación está en función del tamaño. El producto final siempre es el llamado café verde o café oro (IICA, 2004).

1.8 Descripción de la cadena de suministro

Se detalla brevemente cada una de las entidades que integran la cadena de suministro de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. para mejor comprensión del proceso de toma de decisiones de las actividades de valor agregado, que principalmente se llevan a cabo en la finca cafetalera y el beneficio seco.

1.8.1 Finca cafetalera

La finca es una propiedad inmueble que se compone de una porción delimitada de terreno para el cultivo del aromático. El café de finca es un tipo específico de café de origen único, cultivado en una sola finca o conjunto de explotaciones que en algún punto comparten el proceso del café, organizadas muchas veces en cooperativas. Una finca puede variar en tamaño desde unas pocas hectáreas cultivada artesanalmente por una familia de agricultores hasta una plantación tecnificada que se extienden por decenas de kilómetros. Uno de los puntos clave de la cadena de suministro de Merino Telis Café S.A. de C.V., es la gestión de prácticas agrícolas que ayuden a cada caficultor a obtener el rendimiento en quintales por hectárea cultiva de manera tal que sirva de referencia al beneficio seco de la cantidad de café que ingresa y la combinación de procesos que se pudieran emplear.

1.8.1.1 Parcelas

La parcela es una extensión de tierra que está bajo un lindero, es decir, que se encuentra rodeada de terreno, edificios o agua que no pertenece a la explotación.

1.8.1.2 Cosecha

La cosecha del café es cuando los frutos llegan a la madurez, esto se lleva de siete a nueve meses después de la floración para el café tipo arábica, mientras que para el café robusto es de nueve a once meses.

Además, la época de cosecha varía de acuerdo a factores inciertos como la cantidad de agua, intensidad de luz, control de plagas, control de enfermedades, temperatura, control de poda, entre otros aspectos inherentes en cada cultivo de acuerdo.

1.8.2 Beneficio Húmedo.

El beneficio húmedo se caracteriza porque en él se realiza la transformación del café cereza a café verde.

El grupo Merino Telis Café cuenta con varios beneficios húmedos donde en cada uno de ellos se sigue el siguiente proceso:

- El productor de cereza llega al beneficio donde vende su café, el grano se acomoda en el beneficio.
- Se realiza una partida de café, que consiste en elegir el café que se va a procesar.
- El grano ingresa a una Tolva de recepción la cual tiene una capacidad aproximada de 50 toneladas de cereza.
- Se realiza el despulpado utilizando una despulpadora de discos.
- Posteriormente se lleva a cabo la fermentación donde el proceso enzimático descompone las capas remanentes del mucílago y toma entre 26 y 32 horas.
- Luego se pasa a la bomba lavadora donde se realiza el lavado del grano de café para quitar el mucilago que se generó en la fermentación.
- El grano es transportado en zarandas para quitar el agua y clasificar el café por densidad y tamaño.
- Para complementar la clasificación del café se utiliza otra máquina llamada “neumática” que por medio de un chorro de aire separa el grano que no cumple con el peso además de la cascarilla que se haya generado.
- Después se utiliza una cinta transportadora para que el café llegue a las secadoras.
- Consecuentemente se realiza el proceso de secado, en el cual por medio del calor se lleva la húmeda del grano entre un 12 y 14%.
- Finalmente, el café es envasado, se guarda en costales para ser almacenado.

1.8.3 Beneficio seco

El beneficio seco es el segundo proceso de transformación al que son sometidos todos los cafés lavados, en esta fase la materia prima la constituye el café obtenido del beneficio húmedo para obtener el café de oro que será utilizado por los tostadores como materia prima en el beneficio seco. Se elimina el pergamino o cascarilla endocarpio, el cual constituye

aproximadamente un 20% en peso del café pergamino seco procedente del beneficio húmedo, la cascarilla como subproducto es utilizada principalmente como combustible sólido en el secado mecánico del café en los beneficios húmedos además de otros usos.

La función del beneficio seco no es únicamente la eliminación de la cascarilla, en éste se necesita eliminar la mayoría de los granos defectuosos mediante procesos mecánicos, existiendo la posibilidad de intervención humana mediante la selección manual aunque ya no es tan usual debido a que la mayoría de los beneficios han optado por incrementar la capacidad de selección vía electrónica, con lo cual se reduce cada vez más la intervención humana. La calidad del café rige a un este gran proceso y se necesitan cuidados intensos en la manipulación del producto desde el recibo hasta el envío de escala exterior.

Dentro del beneficio seco se lleva a cabo tres puntos de valor para la gestión de la cadena de suministro, puesto que corresponden a los procesos de toma de decisiones para el proceso del grano. El primero corresponde al análisis de las características físicas del grano para determinar la clasificación del café. El segundo corresponde a la evaluación de las características organolépticas o proceso de cata del café, el cual determina la calidad. El tercer punto corresponde a la selección de la mejor combinación de procesos productivos para alcanzar una calidad deseada por los clientes.

1.9 Descripción del proceso de producción

Los procesos productivos de la cadena de suministro de café en estudio se llevan a cabo en el beneficio seco y corresponden a los realizados por la empresa comercializadora Merino Telis Café S.A. de C.V., tal como se muestra de manera general en la Figura 1.3, y se detallan a continuación.

1.9.1.1 Recepción y estibado

El proceso consiste en recibir el café en sacos de entre 50 y 60 kg para estibarlos sobre tarimas, en el área designada para cada tipo de café. Para estibar se requiere el reporte emitido por el Departamento de Aseguramiento de Calidad, por donde pasa todo el café, y

se determina si cumple con los estándares de calidad establecidos o se rechaza el lote analizado.

Si el café se acepta, entonces se estiba de acuerdo a los resultados de la evaluación física y organoléptica y se coloca un folder colgante a cada estiba correspondiente los datos de la partida de café, considerando la información generada por el sistema de inventarios

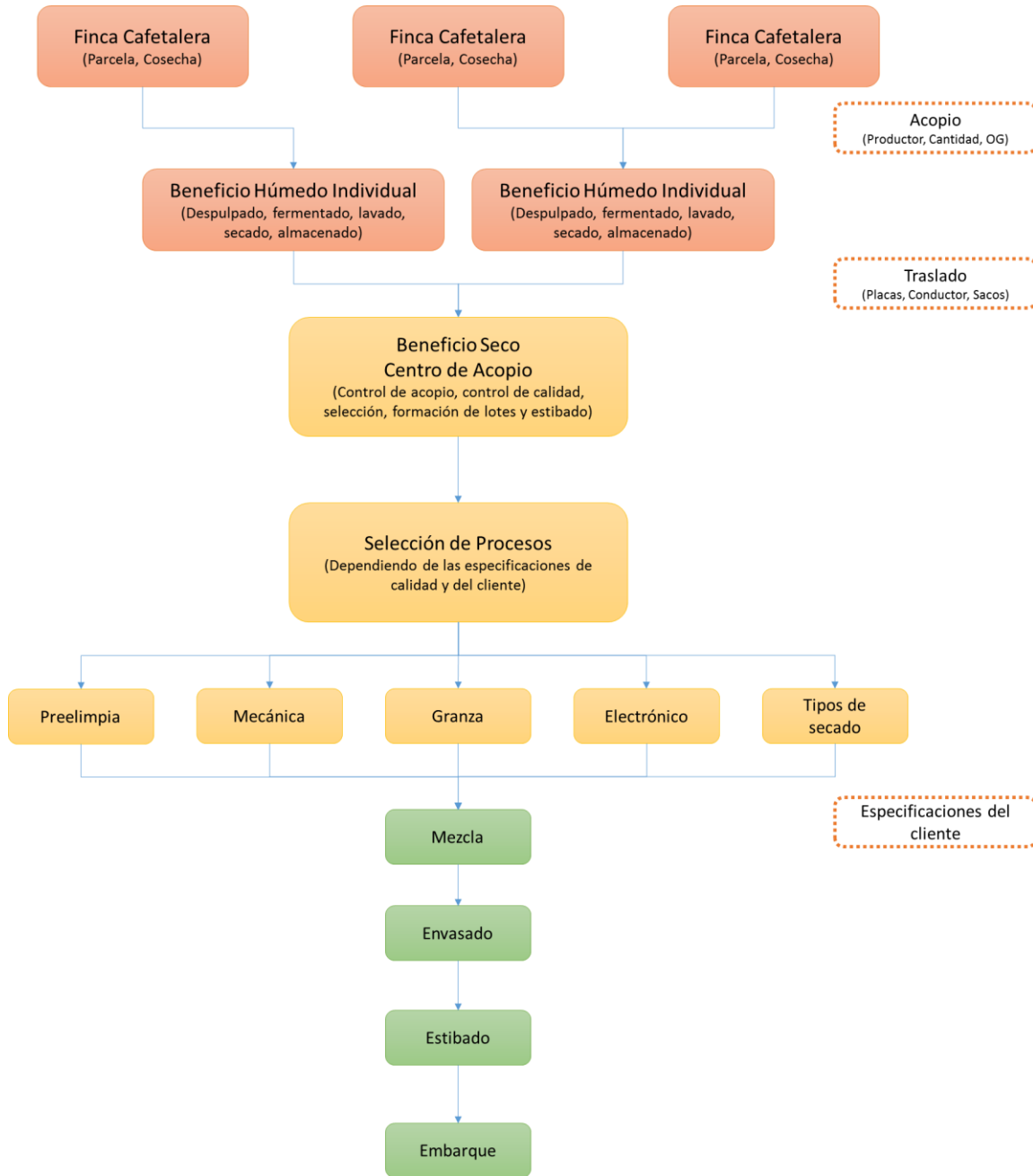


Figura 1.3 Proceso de comercialización de grupo Merino Telis Café (Hernández González, 2017).

Si el café se rechaza, entonces no se procede a estibar el café y se regresa el producto al caficultor, posteriormente se realiza trato con un nuevo caficultor para abastecer la cantidad de producto no procesado.

1.9.1.2 Prelimpia

El proceso consiste en vaciar el café en la tolva de pergamino en donde se eliminan los contaminantes físicos de mayor tamaño, posteriormente el café se introduce en la máquina de prelimpia con el objeto de eliminar cualquier elemento extraño o contaminante de menos tamaño como lo son piedras, hilos y clavos.

1.9.1.3 Trilladora

Después del proceso de prelimpia el grano pasa a la maquina trilladora, en donde se elimina la cáscara del pergamino, para obtener café verde. En la entrada de la trilladora se ubica el primer punto crítico, en donde se eliminan los metales no detectados en procesos anteriores que pudiera llevar el café pergamino.

1.9.1.4 Clasificación

La clasificación se realiza en cuatro máquinas: las catadoras, la clasificadora de zarandas, el clasificador densimétrico (Olivers) y el clasificador por color (Electrónicas).

En las catadoras se separa la cáscara y la mancha ligera a través de un ventilador donde es discriminado el café que no tiene el peso adecuado.

En la clasificadora de zarandas, el café es clasificado por tamaño y forma, separándolo en primeras, segundas, terceras, caracol, granza y bola.

En las clasificadoras densimétricas (Olivers), se clasifica por peso en primeras, segundas y terceras. Se elimina también piedras y palos de menor tamaño que no fueron eliminados anteriormente. Se verifica la alineación de la mesa y el buen funcionamiento de los ventiladores.

Finalmente, en las Electrónicas se clasifica el café por color, eliminando principalmente grano negro y amarillo, por un sistema óptico computarizado que elimina los granos de colores indeseables, de acuerdo a la preparación requerida, normativas de inocuidad y estándares de calidad que los clientes nacionales e internacionales solicitan para la compra exitosa del grano.

1.10 Maquinaria y equipo

A lo largo de todos los procesos que se llevan a cabo en esta empresa, se encuentran involucradas algunas o todas de las siguientes máquinas y equipos, los cuales se detallarán a continuación.

1.10.1 Maquinaria

Una máquina es un aparato comúnmente motorizado con diferentes piezas móviles ajustadas entre sí para realizar un trabajo determinado(Oxford, 2017). Se muestra a continuación las diferentes máquinas que la empresa emplea para realizar los diferentes procesos productivos al grano de café.

1.10.1.1 Prelimpia

El café es transportado por medio de un elevador a la primera máquina que es la prelimpia (Figura 1.4), máquina compuesta de dos cribas, la primera con perforaciones redondas de media pulgada de diámetro para retención de objetos extraños que lograron pasar a esta etapa del proceso anterior y la segunda con perforaciones de 7 x 19 mm para retención de café capulín (café bola), en esta etapa son eliminados objetos extraños de menor tamaño como son piedras, hilos y clavos por mencionar algunos.



Figura 1.4 Máquina para realizar prelimpia del grano

1.10.1.2 Morteadora

La máquina se encuentra compuesta de una tolva, un rodillo interno, una criba interna, una cubierta envolvente, un ventilador, una cuchilla regulable y una flecha de transmisión, cuentan con un motor de 30 HP y tiene una capacidad de 30 QQ/h. En este paso se elimina la cáscara del pergamino para obtener café verde. En la entrada de la morteadora (Figura 1.5) se encuentra un separador magnético, el cual ayuda a eliminar basura metálica que el café pergamino llegase a contener.



Figura 1.5 Máquina Morteadora

1.10.1.3 Catadora

Máquina que cuenta con un ventilador, cuerpo regulador de aire, trampas o mallas internas, mallas superiores, colector de desechos, y bajantes. Esta máquina (Figura 1.6) se utiliza para eliminar o separar la cáscara que queda en el café verde y mancha ligera a través de un ventilador donde es discriminado el café que no tiene el peso adecuado.



Figura 1.6 Máquina Catadora

1.10.1.4 Clasificadora de zarandas

Es una máquina (Figura 1.7) que se utiliza para clasificar café por tamaño y forma, la separación se produce mediante cribado el cual se efectúa en una caja que tiene una serie

de zarandas sobre las cuales se descargan los granos en cascada y coleta individual de cada una de ellas.



Figura 1.7 Clasificadora de Zarandas

1.10.1.5 Densimétrica (Oliver)

Máquina de vibración neumática (Figura 1.8), cuenta con 5 ventiladores y un motor de 10 HP cuya capacidad de producción es de 35 QQ/h.



Figura 1.8 Densimétrica

Las partes que la componen son: mesa vibradora, base de la máquina, transmisión y ventiladores. Su función es separar el café por peso y tamaño por medio de un zarandeo y expulsión de aire, se eliminan también las piedras por medio del despedrador con que cuenta la máquina.

1.10.1.6 Electrónica

La función de esta máquina es seleccionar el café por color (Figura 1.9), es decir el grano pasa a través de una cámara iluminada con luz blanca, donde el reflejo del color del grano es detectado por fotoceldas (ojo electrónico) el cual es comparado con su código de colores programados, si el café es aceptado, continua su flujo y si es rechazado por medio de un sistema neumático es expulsado y se va al desmanche.



Figura 1.9 Máquina electrónica

1.10.2 Equipo

Equipo se considera como un conjunto de aparatos y dispositivos necesarios para que funcione un sistema (Oxford, 2017). A continuación, se detalla el equipo industrial que la empresa emplea para realizar los procesos productivos al grano de café.

1.10.2.1 Sifón de pergamino

El café inicia su proceso en esta etapa donde es vaciado al sifón de pergamino (Figura 1.10) el cual cuenta con una malla o criba con perforaciones que permiten retener o eliminar los contaminantes físicos de mayor tamaño.



Figura 1.10 Sifón de pergamino

1.10.2.2 Tolvas

El café al pasar de una máquina a otra se almacena temporalmente en tolvas de diferentes capacidades (Figura 1.11), además, cuando ya termina su proceso, se guarda el café en una tolva final, dónde es distribuido en sacos para su almacenamiento y venta final.



Figura 1.11 Tolvas

1.10.2.3 Elevadores de cangilones

El elevador de cangilones (Figura 1.12) cuenta con cangilones de polietileno en diferentes tamaños.



Figura 1.12 Elevadores de cangilones

Estos elevadores realizan la función de mantener automatizado el proceso, debido a que transportan el café de las tolvas a las máquinas y viceversa.

1.11 Procesos de producción

En la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. se llevan a cabo varios procesos, los cuales se pueden dividir en tres grandes grupos, la *granza o maquila*, repaso *mecánico* y repaso *electrónico*.

Cabe señalar que no únicamente se realizan estos tres procesos, los demás resultan de la combinación de dos o más de ellos teniendo en cuenta que los procesos de granza pueden requerir un sub proceso de secado, a saber, *granza-mecánicas*; *granza-mecánicas-*

electrónicas; granza-electrónicas; y repaso mecánico-electrónicas. Esto es, que en total, existen once procesos, de los cuales se describirán los tres principales. Las operaciones o procesos combinados sólo resultan de la unión de los procesos principales adheridos.

Cada uno de los 11 procesos tiene una función específica, por lo que representan una gran utilidad, pero no la misma cantidad de uso.

Desde ese punto, los repasos, tanto mecánicos como electrónicos y la combinación de ambos, resultan ser los más utilizados y pedidos por los clientes, mientras que el menos utilizado es el proceso *granza-mecánicas*.

1.11.1 Granza o maquila

El proceso principal de granza o maquila y los procesos combinados que comiencen en este punto tienen la opción de integrar el proceso de secado.

Granza comienza desde la entrada del café al proceso opcional de secado, posteriormente se traslada el producto al sifón de pergamino, pasando por las máquinas de prelimpia, morteadora, catadoras y por la clasificadora de zarandas.

Durante esta etapa no existe una reducción significativa en la cantidad de mancha del café, pero sí una limpieza de impurezas externas de gran volumen, además de que se extrae el polvo y basura que puede llegar a tener el café que alimenta este proceso principal.

1.11.2 Repaso mecánico

Este proceso consiste en la reducción de la cantidad de mancha del café, por medio de la máquina densimétrica (Oliver), en donde al final, se obtiene café con menos mancha.

Se realiza este paso cuando se requiere “limpiar” cierto café, y se trata de que la mancha llegue a un porcentaje deseado, el cual se puede alcanzar en un sólo repaso o se tiene que reprocesar el café.

La máquina Oliver presenta tres salidas: una donde sale el café bueno rebajado al porcentaje deseado, otra en donde se regresa el café para volver a ser procesado por la misma máquina, y una última salida donde se obtiene el café casi en su totalidad manchado.

1.11.3 Repaso electrónico

Este repaso incluye únicamente a las máquinas electrónicas y tiene de igual manera el objetivo reducir el porcentaje de mancha del café.

A diferencia del repaso mecánico, este gran proceso discrimina por color, por lo que si se requiere realizar un desmanche mucho más profundo, se realiza una combinación de ambos repastos, dando por resultado una operación combinada que se refleja en un café más limpio o menos manchado.

Por medio de las máquinas electrónicas se obtienen dos resultados, en una salida el café bueno rebajado al porcentaje de mancha requerido, y en la segunda salida, se obtiene un café manchado prácticamente en su totalidad.

1.12 Análisis físico

A través de evaluación de las características físicas de calidad del café, establece los procesos principales a realizar.

Enseguida se presenta la metodología para la evaluación física que consta de nueve pasos:

1. Se debe pesar una muestra representativa del lote (350 gramos).
2. Extender la muestra sobre una superficie lisa, plana y limpia, preferiblemente de un color sólido que puede ser blanco, azul o negro, para una mejor apreciación.

3. Se procede a separar todos los granos que presentan aspectos defectuosos en relación a los granos normales.
4. Con la ayuda del manual de defectos, se identifican los diferentes tipos de daños siguiendo las recomendaciones, comparando cada uno de los granos defectuosos con las fotografías presentadas en dicho manual, que se presentan más adelante.
5. Todo grano aparentemente defectuoso que ha sido separado de la muestra y que no está considerado dentro del manual, debe retornarse a ella y ser considerado como no defectuoso.
6. Una vez que se han definido los granos defectuosos, se procede al conteo de defectos completos siguiendo la tabla de equivalencia de defectos. No se pueden mezclar diferentes tipos de daños para completar un defecto.
7. Cada uno de los defectos encontrados, sean completos o no, deberán registrarse en la hoja de evaluación del café para dejar constancia del análisis realizado y del procedimiento para la obtención de los defectos totales de la muestra.
8. Se debe incluir en la hoja de evaluación los datos que describen la muestra: origen, tipo de café, descripción general, código de la muestra, tamaño de la muestra y fecha de la evaluación.
9. Dependiendo del resultado del análisis, se determina si la cumple o no con los requisitos que exige el mercado especial, si se rechaza la muestra queda a criterio del experto el reproceso del lote hasta cumplir con los requisitos establecidos, sometiéndolo a una nueva evaluación.

En la Figura 1.13 se representan las características físicas a tomar en cuenta para cada uno de los tipos de café que maneja la empresa.

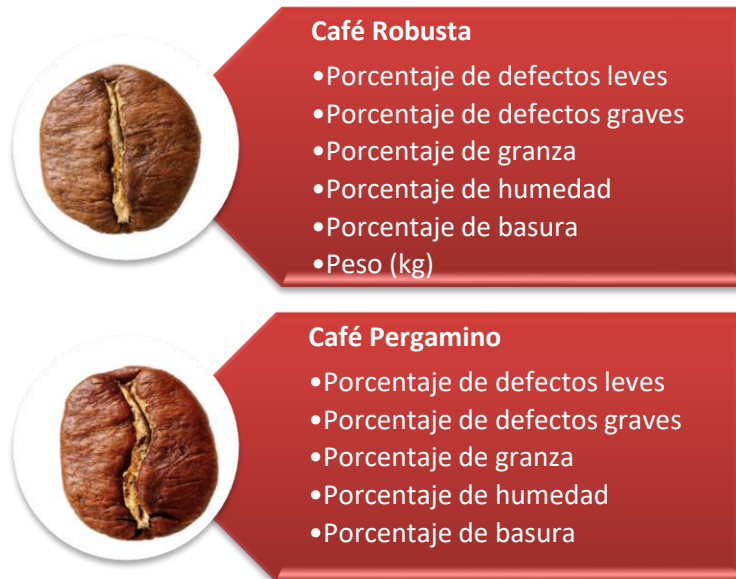


Figura 1.13 Características físicas de cada tipo de café (Hernández González, 2017).

Los principales defectos que se encuentran al evaluar físicamente el café, son los siguientes:

1.12.1 Defectos conchas

Es una malformación genética natural del fruto. A veces se debe al desarrollo de dos granos en uno sólo, que se separan durante el tratamiento de secado. Su aspecto habitual es el de la corteza de un grano sano como se ve en la Figura 1.14.



Figura 1.14 Defectos tipo concha

1.12.2 Grano brocado

Es fácil de distinguir este defecto de los granos por sus agujeros redondos. Estas perforaciones las causa un insecto conocido como Taladro o *Stephanoderes Coffee*.

El insecto ataca las flores antes del cuarto mes después de la floración, cuando el grano aún está blando (ver Figura 1.15). Se separan por flotación o densidad.



Figura 1.15 Defectos de brocado.

1.12.3 Grano roto o quebrado

El grano se rompe durante el despulpado por el tratamiento mecánico o en los procesos posteriores de transporte, lavado en canales y secadoras (ver Figura 1.16).

Las roturas se producen con facilidad cuando la humedad residual del grano es inferior al 12%. Se separan fácilmente por criba o densidad.



Figura 1.16 Grano roto o quebrado

1.12.4 Daño por hongos

Se considera al grano atacado por hongos, recubierto de polvillo amarillo o amarillo rojizo, este daño es causado por fermentaciones prolongas, interrupciones largas del proceso de secado y almacenamiento húmedo (ver Figura 1.17).

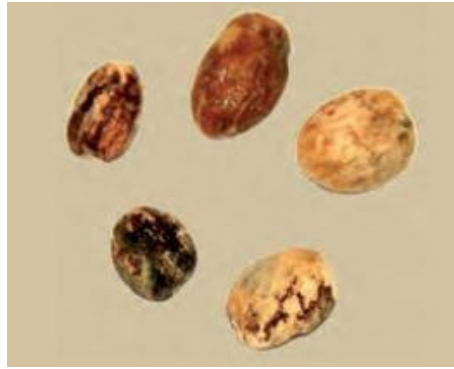


Figura 1.17 Grano dañado por hongos

1.12.5 Granos parcial o totalmente negros

Este defecto consiste en el grado de coloración del pardo al negro (ver Figura 1.18), encogido, arrugado y cara plana; este defecto es causado por falta de agua durante el llenado de grano, fermentación prolongada, cerezos recogidos del suelo, mal secado y rehumedecimiento.

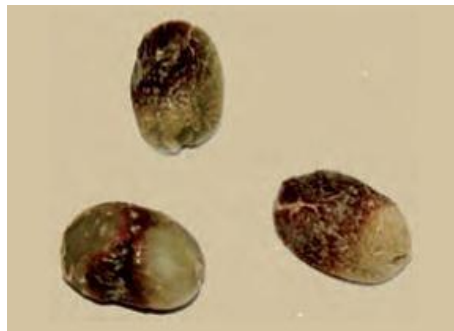


Figura 1.18 Grano parcialmente negro

También existe coloración del grano completamente negro (ver Figura 1.19).

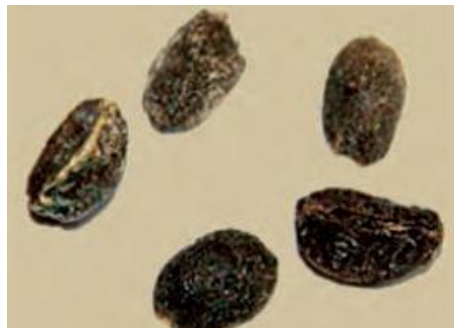


Figura 1.19 Grano totalmente negro

1.12.6 Grano vinagre o parcialmente vinagre

Grano con coloración que va del color crema al café oscuro, hendidura libre de película plateada, puede tender a coloraciones pardas o rojizas (ver Figura 1.20).

Este defecto es causado por retrasos entre la recolección y el despulpado, por deficiencia de limpieza en los tanques de fermentación, uso de aguas contaminadas, sobrecalentamiento, almacenamiento húmedo del café.



Figura 1.20 Grano vinagre

1.12.7 Grano flotador.

Son extremadamente blancos y decolorados y dan al café verde una apariencia dispareja, este defecto se da por un mal secado o por condiciones deficientes de almacenamiento.

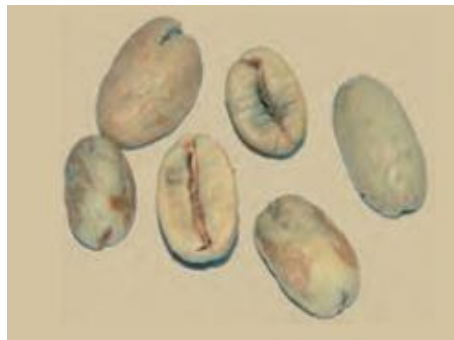


Figura 1.21 Grano flotador

1.12.8 Grano inmaduro.

Se considera al grano de color verdoso o gris claro, la cutícula no desprende, tamaño menor que el normal.

Este defecto es causado principalmente por recolección de granos verdes o pintones, por mala nutrición y por ataque de enfermedades.

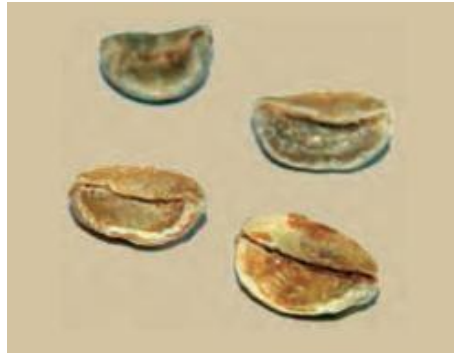


Figura 1.22 Grano inmaduro

1.12.9 Elementos extraños.

Palos: Pequeños fragmentos de las ramas del arbusto del café (ver Figura 1.23).



Figura 1.23 Elemento extraño, palo

Cascaras: Son las cortezas de las cerezas del café (ver Figura 1.24).



Figura 1.24 Elemento extraño, cascara

Piedras: Añadidas durante el proceso de secado en las eras al aire libre (ver Figura 1.25).



Figura 1.25 Elemento extraño, piedra

1.13 Proceso de cata del café.

El análisis sensorial es conocido como la cata del café, en el cual dependiendo del tipo de café que se está evaluando, serán las propiedades para valorar, estas características corresponden a la intensidad con los que se presentan los defectos de taza, posteriormente de acuerdo a los resultados se le asigna una clasificación al café evaluado. Es un proceso que se realiza al café tostado y molido, para evaluar y controlar la calidad del café y poder tomar decisiones de mejoramiento en la empresa cafetera, basado en criterios como:

- La calidad sensorial del café.
- Identificación de los defectos físicos.

El café es una bebida que, en última instancia, lo valora el comprador por su apariencia física y sensorial (aroma, fragancia, acidez, sabor, cuerpo y una taza limpia o sin defectos.

A continuación, se explicará el paso a paso del proceso de cata:

1. Se prepara la prueba utilizando café tostado y molido en seis tazas por muestra, cada taza con aproximadamente 6 gramos de café teniendo en cuenta que cada una lleva la misma cantidad o gramaje.
2. Se toma la fragancia luego de adicionar la muestra en cada taza, esto se refiere al olor del café tostado recién molido, sin adición de agua caliente.
3. Se adiciona agua caliente a cada taza con el café tostado y molido para disolver todos sus aromas y sabores.
4. Se toma el aroma sin realizar ninguna mezcla, sólo el agua caliente con el café.

5. Luego se rompe la taza, es decir, sumergir la cuchara de catación para que las partículas sólidas del café queden en el fondo, el valor retenido salga y se percibe nuevamente el aroma.
6. Después se limpia la taza, es decir; retirar de la superficie la espuma y algunas de las partículas que no se sumergieron al fondo al momento de romper la taza.
7. Por último, se prueba el café en tres momentos, tanto en caliente, tibio y frío. La finalidad de este paso de la cata es identificar el sabor de la bebida, que no tenga ningún tipo de defecto o sea taza limpia y además percibir sabores especiales.
8. Al final de la cata se le da un puntaje a la muestra analizada. Cada puntaje se ubica en un rango lo cual determina la calidad de la muestra.

1.14 Conclusiones

En este capítulo se describe el giro, ubicación y actividades que realiza la empresa, así como toda la maquinaria, equipo, procesos productivos, actividades clave y aspectos de calidad.

En cuestión de maquinaria y equipo se describe cada uno de los procesos existentes en la empresa, así como las maquinas involucradas en cada proceso productivo; en el aspecto de toma de decisiones se describe el proceso desde la llegada del proveedor hasta la comercialización del grano con el fin de detectar puntos críticos de mejora; en cuestiones de calidad se muestra brevemente las diferentes anomalías físicas que presenta el grano de café al ingresar a la empresa y se describe el proceso de catación para detectar anomalías sensoriales.

Se describe también la situación actual de la empresa y los puntos críticos subjetivos para el proceso de toma de decisiones, los cuales son la gestión de prácticas agrícolas a los caficultores, la evaluación física, la evaluación organoléptica del café y la selección óptima de la combinación de procesos productivos a seguir.

Capítulo 2

Marco teórico

El mercado altamente competitivo y cada vez más cambiante de los últimos años, ha hecho que las empresas encuentren más complicado mantener su ventaja competitiva en el actual entorno empresarial. El rápido movimiento de la innovación tecnológica, el aumento de la competencia globalizada, la desintegración vertical y las siempre cambiantes demandas de los consumidores, han conformado un contexto empresarial en donde el establecimiento de interrelaciones de empresas, y el estudio de los eslabones de la cadena de suministro con el propósito de mejorar su desempeño, se ha convertido en una condición necesaria para emerger en una competitividad alta de mercados.

2.1 Cadena de suministro

Una cadena de suministro es una serie de organizaciones que interactúan entre sí con la finalidad de llevar los productos (bienes o servicios) hasta el consumidor final.

Típicamente una cadena incluye etapas de cliente o consumidor, detallista o minorista, comerciantes o distribuidores, fabricantes o manufactureros y proveedores, entre otros (Sánchez Ramírez, 2014). Uno de los principales propósitos de administrar las cadenas de suministro es la coordinación y mejora de los procesos inter-organizacionales (Mata & Cobas Flores, 2008).

La cadena de suministro es una red que interviene en el flujo de entidades que participan en el ciclo de vida del producto, desde la producción hasta la venta (Simchi-Levi et al., 2000). Esta red se compone de nodos y arcos, en donde los nodos representan los proveedores, fabricantes, distribuidores y vendedores, así como sus instalaciones de inventario para almacenar los productos y servicios de transporte para el envío entre ellos; y los arcos representan el flujo ya sea de información o un flujo de materiales o productos (Sánchez Ramírez, 2014).

Las cadenas de suministro hoy en día se han vuelto vulnerables a interrupciones frecuentes y, con un énfasis constante en la eficiencia, carecen de solidez para lidiar con ellas (Samvedi & Jain, 2013). Los problemas de la cadena de suministro son importantes para intentar lograr la capacidad de respuesta efectiva, pero no sería suficiente para lograr una eficiente capacidad de respuesta de la cadena de suministro por sí sola sin antes lograr la capacidad de respuesta dentro del propio sistema de fabricación de una empresa (Zhang et al., 2006).

La optimización de la cadena suministro se ha vuelto recientemente un tema de importante relevancia, puesto que la aplicación de técnicas modernas ingeniería ayudan a la identificación de acciones concretas que permiten, no sólo una buena armonía a través de los diferentes eslabones de la cadena, sino que también de una serie de indicadores que apoyan medir su eficiencia

2.1.1 Aprovechamiento

Este proceso también referido como abastecimiento, es responsable de adquirir todos los materiales requeridos por una organización (Waters, 2003), y cuyos objetivos principales son el aseguramiento de los procesos de suministro, minimización del inventario, mejora de la calidad, gestión/desarrollo de proveedores, y la minimización de los costos totales. Se utilizan modelos de gestión de inventarios que soportan decisiones operacionales los cuales han sido estudiados ampliamente (Adarme Jaimes, 2011).

2.1.2 Producción

Este proceso contempla todos procesos u operaciones unitarias que se llevan a cabo en las instalaciones de la empresa, con el fin de agregarle valor a un conjunto de materias primas al transformarlas en un producto de consumo. Para gestionar la producción es necesario disponer de datos sobre las previsiones de consumo de cada producto, es decir, estimaciones de la demanda. Muchas veces se cuenta con históricos del consumo (ventas o demanda) de los productos, y estas se presumen con un indicativo de las expectativas futuras, pudiéndose realizar pronósticos (Adarme Jaimes, 2011).

Es importante definir la producción como un proceso que está estrechamente ligado a la capacidad de la empresa de tener un sistema, que bien puede ser sofisticado o de desarrollo interno, previsional que se anticipe a la necesidad y que mida la velocidad del cambio y su magnitud.

2.1.3 Distribución

El proceso de distribución implica un amplio conjunto de actividades para llevar el producto desde la fábrica hasta el consumidor, involucrando decisiones de diversa índole, destacándose a nivel logístico la selección de canales y redes de distribución, gestión de puntos de compra, y las decisiones relativas al transporte, en relación con los sistemas utilizados, tamaño de la flota, capacidades requeridas y establecimiento de rutas (Adarme Jaimes, 2011).

2.1.4 Tipos de estructura de cadena de suministro

De acuerdo a (Montoya T & Ortiz V, 2013), se maneja una clasificación con base a la complejidad de la cadena de suministro abordada en múltiples trabajos de investigación, siendo las posibles estructuras existentes: estructura en serie, diádica, diádica convergente, diádica divergente y estructura en red.

La estructura en serie es aquella que considera sólo un proveedor, un fabricante, un detallista y un cliente, por practicidad este tipo de estructura es la más analizada en investigaciones científicas.

La estructura diádica es aquella estructura en donde se representan sólo dos de los tres eslabones existentes de la cadena de suministro de manera independiente y única. La estructura diádica convergente es aquella que representa una sola entidad de la cadena de suministro que es abastecida por múltiples entidades aguas arriba. La estructura diádica divergente se caracteriza por ser una cadena que se estudia con mayor realismo y frecuencia, debido a que está conformada por una entidad que distribuye a un conjunto de entidades aguas abajo.

La estructura más compleja y completa es la estructura en red debido a que emplea la estructura diádica convergente y divergente de manera simultánea, teniendo un análisis más profundo y sistémico en el análisis.

2.2 Gestión de la cadena de suministro

La gestión de la cadena de suministro usa tecnología avanzada, gestión de la información e investigación de operaciones para planificar y controlar una complejidad creciente de factores para producir y entregar de mejor forma los productos y servicios para satisfacer al cliente (H. Chavez & Torres Rabello, 2012).

La gestión efectiva de la cadena de suministro permite una mejor prestación de servicio al cliente y de la cadena de valor, a través de la gestión de flujos de información, de producto y monetarios (Waters, 2003). Las compañías globales reconocen ampliamente que la gestión de la cadena de suministro es una de las principales competencias básicas para que una organización pueda competir en el mercado (Ko et al., 2010).

2.2.1 Efecto látigo

El "efecto látigo" o "bullwhip effect" es un fenómeno muy conocido en logística y hace referencia a los grandes desajustes que pueden darse entre la demanda real de los consumidores y la demanda de los actores intermedios que participan en la cadena de suministro (Chopra & Meindl, 2008).

La variabilidad en la demanda es, sin duda, la principal causa del efecto Látigo, pero no la única. Entre los principales factores que propician el efecto Látigo encontramos (Chopra & Meindl, 2008):

- Problemas de comunicación y coordinación a lo largo de la cadena de suministro.
- Una base poco consistente en la estimación de la demanda
- Una estrategia de aprovisionamiento poco flexible: el suministro de materiales y productos debe ser totalmente flexible.

- Grandes fluctuaciones en las políticas de precios: las políticas de descuentos alteran inevitablemente la cantidad de producto demandada.
- La aversión al riesgo de los responsables de compra.

2.3 Gestión de la información y gestión de conocimiento.

La Gestión de conocimiento trata generalmente del intento sistemático y organizado para utilizar el conocimiento dentro de una organización, para transformar su capacidad para almacenar conocimiento y utilizarlo para mejorar el desempeño de la organización, y generalmente incluye cuatro procesos básicos, generación, almacenamiento/captación, transferencia, y aplicación del conocimiento (Chuang et al., 2013).

En la literatura de la gestión de conocimiento se hace una clara diferencia entre el concepto de datos (o información) y conocimiento, los datos son estímulos primarios con poca organización o utilidad, el conocimiento es una forma de alto valor de la información que puede ser útil en la toma de decisiones y provocando acciones (Shih et al., 2012).

Se aborda este tópico ya que los clientes y los proveedores tienen conocimientos especializados en sus propios dominios y su conocimiento debe ser complementario para lograr una ventaja competitiva, así, una coordinación entre clientes y proveedores ofrece un buen contexto para el estudio de la gestión de conocimiento y el intercambio de conocimiento en materia del abastecimiento y el desarrollo de proveedores, áreas importantes de la gestión de la cadena de suministro.

2.4 Análisis de decisiones

Una decisión es la elección de entre varias alternativas posibles, teniendo en cuenta la limitación de recursos y con el ánimo de conseguir algún resultado deseado (Lennox, 1996).

La importancia de la información en la toma de decisiones es queda patente en la definición de decisión propuesta por Forrester, entendiendo por esta “el proceso de transformación de la información en acción” (Sánchez Ramírez, 2014). Entonces el análisis de decisiones consiste

en un conjunto de técnicas de procesamiento orientadas a reducir el margen de error en las decisiones adoptadas en el marco de la administración de negocios y gestión de conocimiento.

2.5 Sistemas de apoyo a la decisión

En un sentido amplio, se define a este sistema, como un conjunto de programas y herramientas que permiten obtener de manera oportuna la información que se quiere para el proceso de la toma de decisiones, que se desarrolla en un ambiente de incertidumbre (Min, 2010). Para ello, se combinan datos, modelos analíticos sofisticados y software amigable en un sólo sistema poderoso para mejorar la calidad de las decisiones.

El nivel de información determina el tipo de ambiente de la decisión. Según la literatura los ambientes son los siguientes (Min, 2010):

- Certeza: el ambiente donde se conoce con absoluta seguridad los estados de la naturaleza a ocurrir.
- Riesgo: es aquel en el que se sabe que los estados de la naturaleza pueden ocurrir y se demuestran bajo probabilidades.
- Incertidumbre estructurada: es aquel en el que se conocen los estados de la naturaleza, pero no la probabilidad de cada uno de ellos.
- Incertidumbre no estructurada: es aquel en el que ni siquiera se conocen los posibles estados de la naturaleza.

2.6 Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) es la parte de la ciencia que se ocupa del diseño de sistemas de computación inteligentes, es decir, sistemas que exhiben las características que asociamos a la inteligencia en el comportamiento humano que se refiere a la comprensión del lenguaje, el aprendizaje, el razonamiento, la resolución de problemas, etc., (Barr et al., 1981).

El campo de la inteligencia artificial hoy día engloba varias sub-áreas tales como los sistemas expertos, la lógica difusa, computación evolutiva, redes neuronales artificiales, algoritmos genéticos, juego automático, visión artificial, procesamiento del lenguaje, robótica, sistemas

basados en agentes, etc. (Min, 2010), siendo el sistema de agentes el empleado para la solución de la problemática de este trabajo, debido a que es una técnica distribuida, en donde se puede emplear algunas otras herramientas de la inteligencia artificial como motores de inferencia de cada uno de los agentes modelados para el sistema a analizar.

2.6.1 Lógica difusa

Es un método de análisis desarrollado a propósito para incorporar la incertidumbre en un modelo de decisión. En esencia, la lógica difusa permite considerar el razonamiento que es aproximado y no preciso (Zadeh, 1996).

Mientras la motivación original fue ayudar a manejar aspectos imprecisos del mundo real, la práctica temprana de la lógica difusa permitió el desarrollo de aplicaciones prácticas. La lógica difusa ayuda a conceptualizar la difuminación en el sistema en un parámetro cuantificable nítido (Suganthi et al., 2015).

La lógica difusa y la probabilidad son formas diferentes de expresar la incertidumbre. La teoría de conjuntos difusa utilizó el concepto de pertenencia a conjuntos difusos mientras que la teoría de probabilidades usó el concepto de probabilidad subjetiva; los diversos tipos de funciones de pertenencia que se utilizan normalmente en la lógica difusa son ' Δ ' triangular, ' Π ' trapezoidal, función ' L ', función ' T ', función ' S ', conjunto borroso gaussiano(Suganthi et al., 2015).

2.6.1.1 Características de la lógica difusa

De acuerdo con (Zadeh, 1996) algunas de las características esenciales de la lógica difusa son:

- En la lógica difusa, el razonamiento exacto es visto como un caso límite de razonamiento aproximado.
- En la lógica, todo es una cuestión de grado.
- Cualquier sistema lógico puede ser fusificado.
- En la lógica difusa, el conocimiento se interpreta como una colección de restricciones flexibles o, equivalentemente, una colección de variables difusas.

- La inferencia es considerada como un proceso de propagación de restricciones flexibles.

2.6.1.2 Diferencias entre la lógica tradicional y la lógica difusa.

El estudioso (L. A. Zadeh) agrega que la lógica difusa difiere de los sistemas de lógica tradicional, tanto en esencia como en detalle. Algunas de las principales diferencias las resume en los siguientes puntos:

- Verdad: En los sistemas de lógica bivalente, la verdad sólo puede tener dos valores: verdadero o falso. En la lógica difusa, el valor de verdad de una proposición puede ser un subconjunto borroso de cualquier conjunto parcialmente ordenado, pero por lo general se supone que es un subconjunto borroso del intervalo $[0, 1]$ o, más simplemente, un punto en ese intervalo.
- Predicados: En los sistemas bivalentes, los predicados son precisos, por ejemplo, mortal, incluso, mayor que. En la lógica difusa, los predicados son borrosos, por ejemplo, alto, los malos, pronto, rápido, mucho más grande que. Cabe señalar que la mayoría de los predicados en un lenguaje natural son más difusos que precisos.
- Modificadores del predicado: En los sistemas clásicos, el único modificador utilizado en el predicado es la negación, no. En la lógica difusa, hay una variedad de modificadores de predicados que actúan como instrumentos de cobertura, por ejemplo, muy, más o menos, bastante, más bien. Estos modificadores de predicado desempeñan un papel esencial en la generación de los valores de una variable lingüística, por ejemplo, muy joven, no muy joven, más o menos jóvenes, etc.
- Cuantificadores: En los sistemas de lógica clásica sólo hay dos cuantificadores: universal y existencial. La lógica difusa admite una amplia variedad de cuantificadores difusos como: varios, por lo general, la mayoría, casi siempre, frecuentemente, etc. En la lógica difusa, un cuantificador difuso se interpreta como un número borroso o una parte difusa.
- Probabilidades: En los sistemas de lógica clásica, probabilidad numérica es un valor o intervalo. En la lógica difusa, se tiene la opción adicional de emplear lingüística o, más en general, las probabilidades difusas, por ejemplo: probable, poco probable, muy probable, alrededor de 0,8 de alto, etc.

- **Posibilidades:** A diferencia de la lógica clásica, el concepto de posibilidad en la lógica difusa es gradual en lugar de bivalente. Además, como en el caso de las probabilidades, las posibilidades pueden ser tratadas como variables lingüísticas con valores tales como: posible, muy posible, casi imposible, etc.

2.6.2 Sistema basado en agentes

Podemos definir al agente inteligente como una entidad software que, basándose en su propio conocimiento, realiza un conjunto de operaciones destinadas a satisfacer las necesidades de un usuario o de otro programa, bien por iniciativa propia o porque alguno de éstos se lo requiere (Hípola & Vargas Quesada, 1999). El concepto de agentes inteligentes es un tema reciente que desde 1980 se ha aplicado ampliamente (Ming et al., 2007).

Los enfoques de modelización tradicionales tratan a los empleados, proyectos, productos, clientes y socios de una empresa como cantidades promedio agregadas o como entidades o recursos pasivos en un proceso (AnyLogic, 2016). Mediante la modelación basada en agentes es posible plantear distintos escenarios con entidades activas y ver qué ocurre en una problemática, esto es, estudiar los posibles estados del sistema objeto de estudio. Cabe mencionar que los sistemas basados en agentes son una técnica propia de inteligencia artificial con la capacidad de emular entidades, procesos y flujos inciertos en ambientes distribuidos a lo largo de la cadena de suministro en donde cada entidad toma una decisión local basada en su conocimiento disponible que conduce a una meta global.

Se ha aplicado sistemas basados en agentes como una herramienta idónea para la gestión de la cadena de suministro por su autonomía, proactividad, reactividad y sus relaciones sociales.

La simulación multi-agente es la ejecución de un modelo multi-agente (Tian & Tianfield, 2006). En donde después de caracterizar el sistema de estudio se procede a programar cada agente inteligente en una plataforma de software especializado con el fin de simular el sistema de estudio. Las principales plataformas para crear modelos de agentes inteligentes son basadas en programación como la plataforma Java Agent Development Framework (JADE), Zeus,

Agent Builder, Cougaar, Brahms, Jason, NetLogo y AnyLogic, el cual es un software más avanzado que permite la modelación híbrida o multi-método, que consiste en poder combinar dinámica de sistemas, simulación de eventos discretos y agentes inteligentes.

De acuerdo con (Li & Chan, 2013), el modelo basado en agentes es un modelo que contiene agentes heterogéneos (empresas virtuales) que actúan en un entorno virtual (AnyLogic, 2016). En el modelo, la producción de una empresa virtual puede estar respaldada por varios subcomponentes que son producidos por otras empresas virtuales. Las empresas virtuales realizan sus trabajos con sus conocimientos. Cada empresa virtual es simulada por un agente en el modelo.

2.6.2.1 Características de los agentes inteligentes

La característica distintiva es que la interacción entre los agentes que utilizan un lenguaje de comunicación es que el agente permite a los socios de la cadena de suministro ser capaces de negociar y coordinar de forma automatizada entre sí de manera más eficaz en la gestión dinámica de la cadena de suministro (Tian & Tianfield, 2006).

De acuerdo con (Hernan Tolosa & Alfredo Bordignon, 1999) los agentes inteligentes cuentan con las siguientes características:

- Autonomía: Capacidad de actuar sin la intervención directa de una persona o de otro agente. Un agente debe poder controlar sus propias acciones y estado interno. Una vez que el usuario activa el agente indicando algún objetivo de alto nivel, éste actúa independientemente, seleccionando estrategias y monitoreando el progreso en busca de la meta. Si falla con una estrategia, usará otra, pero sin intervención humana o con la mínima indispensable.
- Habilidad Social: Un agente debe ser comunicativo. Debe tener habilidad para interactuar con otros agentes o incluso con alguna persona, para solicitar información o bien para exponer los resultados que se obtienen de la ejecución de las tareas programadas. La naturaleza de la comunicación dependerá del tipo de agente con quien se comunique (humanos o no), en ambos casos se deberá establecer un protocolo común de intercambio

de información entre ambas partes. Los agentes deben poseer algún tipo de interface para comunicarse con sus usuarios.

- Reactividad: Se refiere al hecho de que un agente debe poder pensar el estado del ambiente dentro del cual se encuentra inmerso y -en función de esto- actuar, respondiendo de manera adecuada a cambios producidos en el mismo.
- Orientación por objetivos: Un agente no sólo debe actuar por cambios detectados en el medioambiente, sino que – además – debe “trabajar” en función de los objetivos para los cual fue diseñado y las tareas que le fueron delegadas en cada momento. Un agente busca permanentemente satisfacer su agenda interna. En las aplicaciones convencionales, cuando un usuario ejecuta un comando, se activa un proceso que se ejecuta por determinado tiempo, algunos solicitan datos al usuario, retornan resultados y así sucesivamente.
- Continuidad temporal: Un agente es un proceso temporalmente continuo. A diferencia de un programa convencional del cual se conoce su inicio y fin, un agente debe ejecutarse hasta que se haya alcanzado con el conjunto de objetivos solicitados, o bien, mientras su ciclo perdure y su usuario no desee detenerlo.
- Movilidad: Es la capacidad de un agente de “viajar” por las redes de computadoras, de nodo a nodo, en busca de los recursos que le permitan cumplir con su agenda. El término “viajar” se refiere a que en un determinado instante de tiempo el agente detiene su ejecución, almacena su estado interno y se dirige a otro sitio dentro de una red de computadoras (tanto el código del agente como su estado) para luego continuar con su ejecución en la nueva ubicación.

Los sistemas basados en agentes se caracterizan por comprender varios agentes virtuales que son en mayor o menor grado autónomos, heterogéneos e independientes, que muestran cada uno sus propias metas y objetivos (Torsun, 1995). La técnica de sistemas basados en agentes, se ha aplicado a la planificación y previsión de la demanda, gestión de relaciones con clientes, negociación, preparación de pedidos, diseño de red, entre otros; los algoritmos genéticos se han aplicado al diseño de red; y los sistemas expertos, a la planificación de inventario, decisiones de fabricar o comprar, y selección de proveedores (Pino et al., 2010).

Dado que la complejidad de las cadenas de suministro, la tecnología de agentes inteligentes se ha utilizado en muchas obras importantes para estudiar la gestión de las cadenas de suministro (Li & Chan, 2013).

2.6.2.2 Proceso metodológico de agentes

La elaboración de modelos de simulación orientados a objetivos de cualquier cadena de suministro compleja requiere un marco metodológico específico. Para lo cual se propone un marco de referencia metodológico similar al propuesto por (Oprea, 2014), el cual consta de cinco fases: análisis, ontología, diseño, implementación y pruebas (ver Figura 2.1).

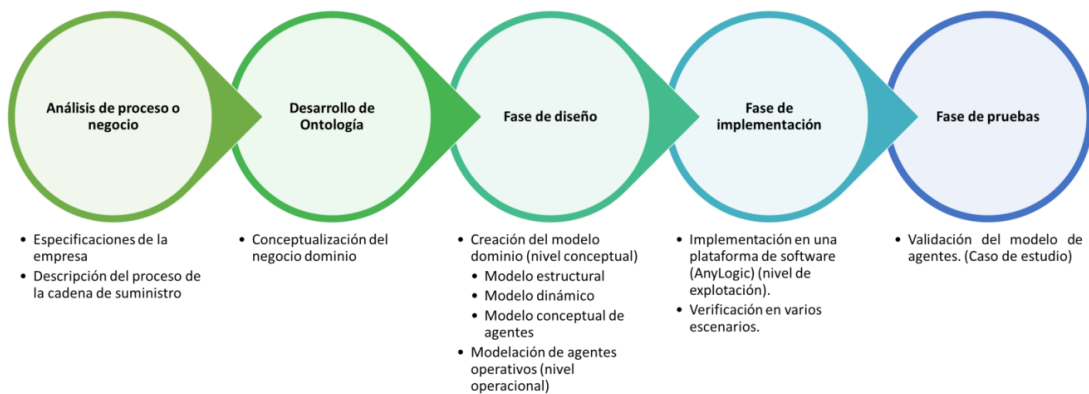


Figura 2.1 Flujo de trabajo del marco de referencia metodológico propuesto (Hernández González, 2017).

El proceso metodológico se detalla a continuación:

1. Análisis de proceso o negocio

Consiste en realizar un análisis selecto a cada uno de los procesos involucrados en la cadena de suministro para comprender el proceso productivo, sus eslabones y determinar áreas de oportunidad mediante la presentación de la problemática de estudio.

- Resumen de funcionalidades, roles y lista de responsabilidades, así como flujos de información, reglas de negocio, normas y legislaciones
- Identificación de actividades, ambiente de trabajo, recursos y procesos necesarios.
- Identificación de las necesidades principales de la empresa o empresas involucradas en la cadena de suministro.

2. Desarrollo de la ontología

Consiste en la conceptualización de la cadena mediante la determinación de canales de comunicación y propósitos de los actores de la cadena de suministro

3. Fase de diseño

Consiste en la creación del modelo organizacional o conceptual, que consiste en la abstracción del modelo real. Así mismo se detalla la arquitectura del modelo de agentes, se seleccionan estrategias, procesos y mecanismos de negociación o toma de decisiones. Se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El nivel conceptual: En este nivel se desarrolla un modelado conceptual que constituye una abstracción del sistema real, en el caso particular una compleja cadena de suministro. Este proceso de modelado se realiza a partir del conocimiento extraído de la Empresa (modelo preliminar). El modelo obtenido de la cadena de suministro se cristaliza en un modelo de dominio. Este modelo se reformula a continuación, en el paradigma de agentes para obtener el Modelo Conceptual de agentes de la cadena de suministro considerada.
- El nivel operativo: Desde el Modelo Conceptual de agente de la cadena de suministro, en este nivel se desarrolla una modelación de agente operativo, cristalizado en un modelo de agente operacional. Este modelo debe permitir simular el comportamiento de la cadena de suministro en estudio. El modelo de agente operativo es un modelo de computadora que tiene en cuenta todas las limitaciones inherentes a la simulación en un contexto de simulación basada en agentes. Así mismo se desarrollan técnicas de apoyo y/o motores de inferencia que los agentes utilizaran como base de conocimiento para tomar decisiones.

4. Fase de implementación

Selección de la plataforma de software o diseño de implementación para el modelo de agentes propuesto. Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El nivel de explotación: Este nivel se refiere a la aplicación y la integración del modelo de agentes operacional en una plataforma de software de simulación físico y al análisis de comportamientos de variables.

5. Fase de prueba

Validación del desarrollo y operación del modelo propuesto. Este nivel se refiere también a la ejecución del modelo de simulación de acuerdo con los escenarios contextuales diferentes definidos por el analista.

Para mayor detalle se presenta en la Figura 2.2 el esquema de (Labarthe et al., 2005), donde se puede apreciar el desarrollo de los puntos 3 y 4 del marco genérico propuesto de la Figura 2.1 con el objetivo de identificar y detallar los pasos a realizar para la modelación de agentes inteligentes.

En el nivel conceptual el participante responsable es el experto, puesto que domina los conocimientos necesarios. El rol del experto es realizar una base de conocimiento describiendo el sistema real y definir el fenómeno bajo estudio. El experto usará formalismos propios de la modelación de la empresa para elaborar un primer modelo del sistema real: el modelo dominio. Después el experto reformulará el modelo bajo el paradigma de agentes para conseguir el Modelo Conceptual de Agentes.

Dos tipos de conocimiento son explotados en este nivel, el Macro-conocimiento es usado para desarrollar una visión global del sistema para expresar el fenómeno a explorar, a través de necesidades y escenarios. Micro-conocimiento ayuda a identificar los individuos del sistema y permite describir su comportamiento.

En el nivel operacional, el propósito principal es la elaboración de especificaciones para un modelo de simulación de agentes y su construcción en una plataforma, siendo en el caso particular el uso del software profesional AnyLogic[®]. Así mismo se desarrollan las técnicas de apoyo que servirán como motor de inferencia de los agentes, que en el caso particular se emplea el software Matlab[®] para la creación de modelos de lógica difusa. Esta responsabilidad queda a cargo de un experto en computación

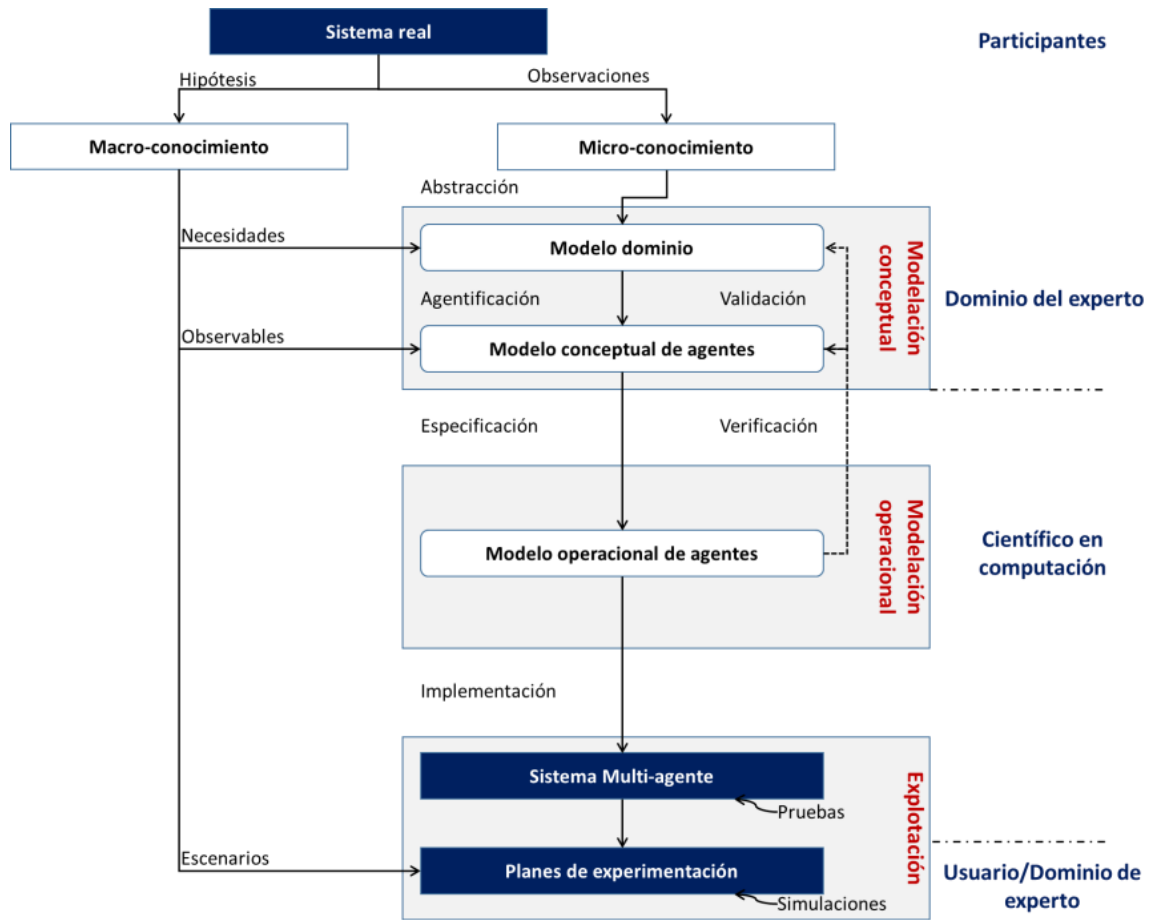


Figura 2.2 Marco de la modelación de agentes

En el nivel de explotación, tanto el experto de la empresa (experto de dominio) como el experto en computación tienen responsabilidades como tomador de decisiones y analista. El experto en computación tiene que integrar e implementar el modelo operacional de agentes con las técnicas de apoyo, siendo base la plataforma de construcción de agentes. El experto de dominio tiene que clarificar y especificar varios escenarios para analizarlos y brindar propuestas para mejorar el desempeño de la empresa.

2.7 Simulación

Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora, donde dichos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo (Coss Bu, 2003).

La simulación se utiliza cuando realizar experimentos en un sistema real sería imposible o poco práctico: por ejemplo, debido al alto costo de prototipos y pruebas, o porque la fragilidad del sistema no soportará extensas pruebas o debido a la duración del experimento en tiempo real es poco práctico.(AnyLogic, 2016). Dentro de la simulación se emplea bastante seguido los términos de modelos y sistemas, por lo que se puede llegar a confundir el término.

2.7.1 Sistemas y modelos

Comúnmente se piensa que un sistema y un modelo son lo mismo, aunque tienen diferentes significados a través de varias disciplinas.

2.7.1.1 Sistemas

Un sistema puede definirse como un conjunto de objetos o entidades que interactúan entre ellos con la finalidad de lograr ciertos objetivos (Guasch et al., 2003).

Los sistemas pueden clasificarse en continuos, discretos y combinados, tomando en cuenta únicamente a la evolución de las variables de interés y el tiempo:

- Sistemas continuos. Las variables del sistema cambian constantemente a lo largo del tiempo.
- Sistemas discretos. Estos sistemas presentan cambios en las variables del sistema solamente en un periodo puntual de tiempo, permaneciendo constantes el resto del tiempo.
- Sistemas combinados. Son aquellos que combinan subsistemas con características continuas y discretas. Estos sistemas deben ser modelados de manera específica.

Existen además varias formas de estudiar un sistema:

- El sistema actual contra el modelo del sistema.
- El sistema físico contra la representación matemática.
- La solución analítica contra el resultado de la simulación.

En el estudio de los sistemas, el modelador se centra en tres situaciones principales: el análisis cuantitativo de los sistemas; las técnicas para el diseño, control o uso de sistemas; y la medida o evaluación del desempeño del sistema.

2.7.1.2 Modelos

La descripción de las características de interés de un sistema se conoce como modelo del sistema, y el proceso de abstracción para obtener esta descripción se conoce como modelado.

Los modelos utilizados pueden ser clasificados de acuerdo a (Guasch et al., 2003):

- Modelos deterministas analíticos. Su característica principal consiste en que presenta valores puntuales conocidos, con el objetivo de lograr una solución analítica auxiliado de cualquier técnica de programación matemática.
- Modelos analíticos estocásticos. Al contrario de los modelos deterministas analíticos, estos modelos presentan valores inciertos, los cuales generalmente se representan mediante una función de probabilidad estadística. Pese a ser más detallados en la representación del sistema real, al no ser dinámicos, es decir, cambiar respecto al tiempo, no se logra tener una debida actualización de los valores mencionados.
- Modelos económicos. Se enfocan en presentar un punto de vista basado en los costos.
- Modelos de simulación. Permiten alcanzar representaciones con un elevado grado de detalle del sistema en estudio. Permite una mayor perspectiva respecto al sistema real.

2.7.2 Enfoque de simulación multi-método

Según la plataforma de (AnyLogic, 2016) existen tres metodologías principales utilizadas para construir modelos de simulación de negocios dinámicos: Dinámica de Sistemas, modelado centrado en procesos y modelado basado en agentes (AB). Los dos primeros se desarrollaron en los años 1950 y 1960 y ambos emplean una visión del sistema (de arriba hacia abajo) de las cosas. El enfoque basado en agentes, un desarrollo más reciente, es un enfoque de abajo hacia arriba en el que el modelador se centra en el comportamiento de los objetos individuales.

El método de dinámica del sistema asume un alto nivel de abstracción y se utiliza principalmente para problemas de nivel estratégico. El modelado centrado en procesos 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.

2.7.3 Ventajas de los sistemas simulados

Los experimentos a través del modelo de simulación según (AnyLogic, 2016) tienen varias ventajas importantes frente a experimentos físicos:

- Valor. Un modelo de simulación puede ofrecer un espectacular retorno de la inversión. Una simulación podría utilizarse para equilibrar parámetros clave como descuentos, cambios de procesos, publicidad y muchos otros factores necesarios para equilibrar este sistema redefinido.
- Hora. En el mundo real, evaluar el impacto a largo plazo de los cambios en el proceso o el diseño puede llevar meses o años. Un modelo de simulación informará los resultados en cuestión de minutos.
- Repetibilidad. La vida moderna requiere que las organizaciones respondan rápidamente a las cambiantes condiciones del mercado. Los análisis como las previsiones de demanda de producto tienen que prepararse rápidamente, pero sus resultados pueden ser críticos. Un equipo de marketing podría utilizar un modelo de simulación y variar los parámetros como el precio y el segmento de mercado para un número ilimitado de experimentos.
- Exactitud. Los métodos matemáticos computacionales tradicionales requieren un alto grado de abstracción y no tienen en cuenta detalles importantes. El modelado de simulación nos permite describir la estructura del sistema y sus procesos de manera natural, sin recurrir al uso de fórmulas y relaciones matemáticas estrictas.
- Visibilidad. Un modelo de simulación permite la visualización del sistema a través del tiempo; Las animaciones ilustran el sistema en funcionamiento y los resultados gráficos cuantifican los resultados. Esto nos permite visualizar la decisión resultante y simplificar dramáticamente la tarea de llevar estas ideas al cliente y colegas.

- Versatilidad. La simulación nos permite resolver problemas en cualquier área: fabricación, logística, finanzas, salud y muchos otros. En cada caso, el modelo simula la vida real y permite una amplia gama de experimentos sin impacto en objetos reales.

2.8 Revisión de la Literatura: Cadena de suministro – Agentes Inteligentes

De acuerdo a una investigación sistemática realizada a 219 artículos relacionados con la aplicación exitosa de agentes inteligentes en áreas específicas en la cadena de suministro, se denota en la Figura 2.3 que el área de conocimiento más abordada en los artículos analizados es Ingeniería, cuenta con 105 artículos de los 219 en análisis, esto quiere decir que los sistemas multi-agente se han empleado extensamente para la solución de problemas en aspectos ingenieriles a lo largo de la cadena de suministro.

Así mismo el área de Ciencias de la decisión es la segunda área de conocimiento más abordada con un total de 63 artículos de la colección de literatura, en la que los multi-agentes se han desempeñado con éxito para solucionar problemáticas referentes a coordinación y gestión de la información debido a sus propiedades de comunicación, reactividad y proactividad.

La tercera posición se encuentra el área de conocimiento Negocios y administración con un total de 38 artículos referentes a esta área. Las demás áreas de conocimiento registraron menor índice de aplicación con hasta 1 artículo, lo cual no refleja ineficiencia de la herramienta en el área de conocimiento, sino que no se han realizado suficientes estudios debido a la modernidad de los multi-agentes.

Cabe mencionar que de acuerdo con (Higgins et al., 2007) aspectos de manufactura e ingeniería resultan más fáciles de modelar y resolver que otras áreas de conocimiento.

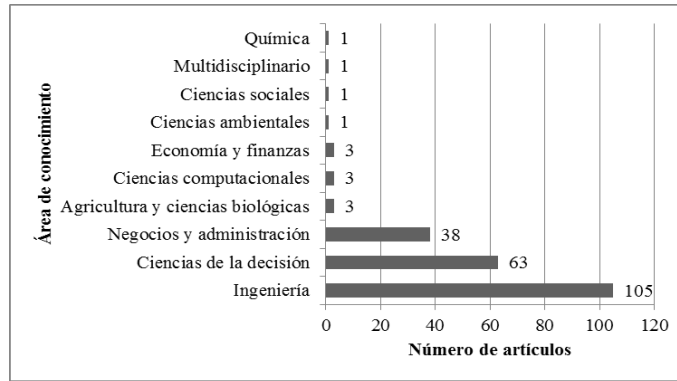


Figura 2.3 Aplicación de agentes inteligentes en áreas específicas de conocimiento (Hernández González et al., 2016)

Los resultados referentes a las problemáticas de la gestión de la cadena de suministro, que más se registraron al analizar los artículos, se presentan de manera detallada en Figura 2.4, con el claro objetivo de enfatizar cuales son las problemáticas más frecuentes que se han resuelto con multi-agentes.

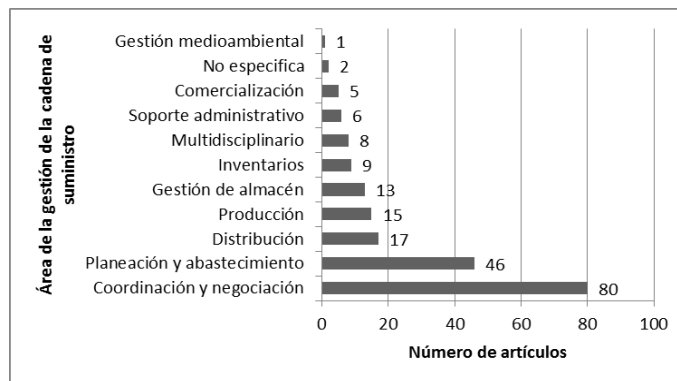


Figura 2.4 Número de artículos por área de la gestión de la cadena de suministro (Hernández González et al., 2016)

Se puede argumentar que los problemas de coordinación, comunicación y negociación son los más abordados con un total de 80 artículos, es decir, un 40% de los artículos de esta sección se enfocaron en resolver estos problemas, tal como (Lou et al., 2006) que genera un mecanismo automático de negociación con los proveedores y distribuidores para la asignación de tareas y mejorar la coordinación de la cadena de suministro, o en algún punto específico, tal como (Ying & Dayong, 2005) que mejora la negociación entre cliente y los servicios de logística de distribución externa, siendo el sistema multi-agente un soporte para la administración de órdenes de pedido y despacho para la empresa externa. Siendo esta última aportación de carácter crucial al colaborar un sistema multi-agente con sistemas de administración de

recursos externos y/o Enterprise Resource Planning (ERP). Cabe mencionar que este tipo de problemas sobre coordinación y negociación no son abordados por técnicas tradicionales que sólo se enfocan a problemas particulares y no gestionan la cooperación entre todos los involucrados de la cadena de suministro.

La segunda área de mayor afluencia, con un total de 46 contribuciones (23%), resulta ser la referente a Planeación y abastecimiento, siendo este uno de los temas más variables y atacados por enfoques tradicionales.

Se puede decir que los sistemas multi-agente son altamente competentes ante problemas de abastecimiento como selección de proveedores u otros temas relacionados. Tal es el caso de (Kumari et al., 2015), (Labarthe et al., 2007) y (Soroor et al., 2012), por mencionar algunas contribuciones, que se enfrentan ante la incertidumbre de elegir proveedores nuevos para agilizar la producción y lograr las órdenes de los clientes de una forma eficiente y coordinada, los tres autores proponen una modulación multi-agentes que consiste en un agente coleccionador de órdenes de compras, selector de proveedores, transporte, outsourcing, planificador, pronósticos, mantenimiento, administrativo y una base de conocimiento para el aprendizaje continuo de los agentes y puedan realizar mejor las tareas encomendadas.

Para las demás áreas de la gestión de la cadena de suministro se presentan situaciones similares a las descritas, en donde varios autores se asemejan en la modelación multi-agente para la solución de problemas, comparten conocimiento a través de canales de comunicación como el internet para mejorar procesos, la mayoría de los módulos de agentes analizados presentan una base de datos o base de conocimiento que permite gestionar el aprendizaje de los agentes en sus tareas y finalmente se pueda asegurar, de acuerdo a los artículos analizados, que todas las aportaciones lograron resolver exitosamente las problemáticas planteadas gracias a las características especiales de los agentes inteligentes.

Para el caso de identificar cuál es el eslabón donde se realizan los estudios principales para la solución de problemáticas, se presenta la Figura 2.5, donde se puede apreciar

significativamente que el eslabón Fabricante es el de mayor cantidad de estudios independientemente del tipo de estructura con la que cuenta la cadena de suministro analizada.

Cabe mencionar que la aplicación de estudios al eslabón Fabricante asciende a 139, que corresponde a un 63% de los artículos analizados.

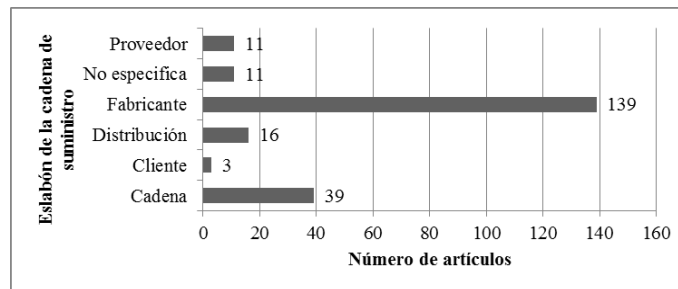


Figura 2.5 Número de artículos por eslabón de la cadena de suministro (Hernández González et al., 2016).

El segundo lugar de importancia de acuerdo al eslabón con mayor aplicación de investigaciones es denominado Cadena, es decir, 39 aplicaciones de estudios sobre la cadena de suministro y agentes inteligentes se han realizado a nivel red, involucrando a proveedores, fabricantes, detallistas y clientes.

Se concluye que la aplicación del enfoque de sistema basado en agentes es utilizado en para dar solución a problemas relacionados en la cadena de suministro, en los que destacaron problemas de coordinación y negociación de recursos principalmente, planificación de la demanda, logística interna, transporte y proveeduría, por tal motivo se concuerda con (Min, 2010) al especificar que el modelado de agentes es la herramienta idónea para resolver problemas de la cadena de suministro.

Así también se detectó que el software más utilizado para la resolución de las problemáticas basado en sistemas de agentes es Java Agent Development framework (JADE) y AnyLogic, y debido a que se busca crear un sistema de apoyo a la decisión, se opta por emplear el software AnyLogic® versión libre y lograr este proyecto. Algunos de los trabajos publicados utilizan diferente plataforma para la modelación de agentes como lo es C++, Protegé, Tropos, Phyton, Mallet, entre otros, cabe mencionar que algunas publicaciones no mencionan el software con

el cual modelaron agentes, pero se sabe al menos que la plataforma de Java es una de las más completas y amigables a la hora de programar el sistema de agentes.

Como parte del análisis de los trabajos publicados se detecta que en su mayoría las problemáticas abordadas son dentro de la cadena de suministro, pero considerando puntos particulares de la cadena y pocos de ellos se enfocan al análisis de la misma con enfoque de optimización.

Se encontró sólo un artículo de los tres existentes en la clasificación Agricultura y ciencias biológicas, que involucra un enfoque agrícola presentada por (Higgins et al., 2007) en 2007 en donde muestra que las oportunidades de las cadenas de valor requieren más que una solución técnica y se requiere una integración colectiva entre todos los miembros de la cadena de suministro. Se muestra que existen mayores beneficios en una cadena ágil en comparación con la tendencia actual de sistemas esbeltos, así mismo se hace mención de las futuras ventajas competitivas del enfoque multi-agente de la cadena de valor en el azúcar para lograr un mejor funcionamiento desde el aumento en la integración empresarial, comunicación y transparencia de actividades; cabe mencionar que gran parte de la información presentada es relevante para las cadenas de otros productos agrícolas.

Por lo anterior expuesto, se detecta un área de oportunidad en abordar el área de conocimiento relacionada con la Agricultura y ciencias biológicas con la creación un sistema de apoyo a la decisión que modele la cadena de suministro del café de manera tal que cada eslabón sea capaz de tomar decisiones sin comprometer el objetivo global de la cadena, mejorando con ello el desempeño de esta.

2.9 Conclusiones

En este capítulo se describen los temas y técnicas que el desarrollo de esta tesis emplea para alcanzar los objetivos planteados y brindar la mejor solución posible.

Dentro de los temas se encuentran conceptos respecto a logística y cadena de suministro como la gestión de la información, gestión de la cadena de suministro y eslabones de la cadena.

Posteriormente se detalla sobre el uso de técnicas de inteligencia artificial profundizando en lógica difusa y agentes inteligentes, puesto que son parte de las técnicas aplicadas en el desarrollo de este trabajo.

Así también se detalla sobre la técnica de simulación, haciendo énfasis en las características y ventajas de realizar un modelo de simulación de cualquier índole, aclarando las posibles confusiones del uso de la técnica y los errores más comunes.

Por otro lado, se brinda un breve estado del arte que parte de una investigación sistemática exhaustiva publicada en congreso internacional, la cual hace mención al uso de agentes inteligentes en la cadena de suministro, en donde se puede apreciar el mayor índice de contribuciones las realiza China y Estados Unidos, dejando a México en el lugar 25 de participación con 2 investigaciones científicas realizadas a lo largo de 16 años. Así mismo queda en evidencia que los agentes inteligentes se han empleado poco en la gestión de cadenas de suministro agrícolas, siendo que la mayor cantidad de aplicaciones se realiza en el sector manufacturero como parte del área de conocimiento Ingeniería.

Capítulo 3

Desarrollo del SAD basado en agentes inteligentes

Las herramientas tecnológicas representan un gran avance e innovación para el análisis de procesos y cadenas de suministro, como el caso de agentes inteligentes como parte de técnicas de inteligencia artificial, que se ha implementado como herramienta idónea para la solución de problemas y sincronización en cadenas de suministro complejas; con este fin, entidades computacionales realizan cálculos complejos que permiten ser distribuidos y se basan en la delegación, procesamiento de la información y comunicación. Con ese preámbulo se describe la Figura 3.1, en donde se presenta el proceso de toma de decisiones de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., con el objeto de generalizar el desarrollo del sistema de apoyo a la decisión propuesto.

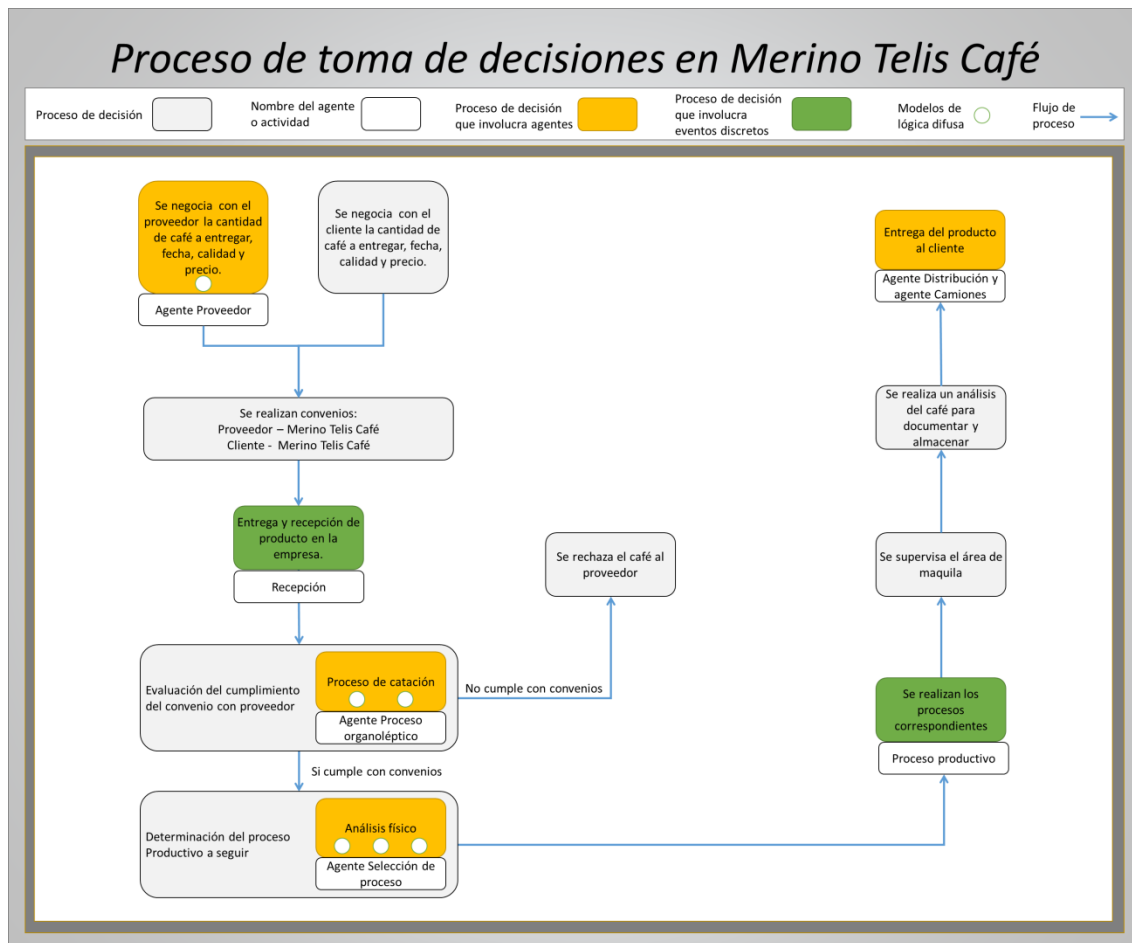


Figura 3.1 Proceso de la toma de decisiones en la empresa (Hernández González, 2017).

El flujo de proceso que realiza en Merino Telis Café S.A. de C.V. inicia con la negociación entre el proveedor (agente proveedor) y cliente con la empresa, en donde se determinan la fecha de entrega del grano, cantidad a recepción y comercialización y la calidad del producto junto con su precio de compra y venta en base a bolsas de valores internacionales.

Posteriormente de la negociación se procede a realizar un convenio en donde el proveedor se compromete a entregar el grano en tiempo y forma a la empresa para abastecer la negociación realizada con el cliente. Al llegar el día pactado en el convenio, el café es entregado en la empresa (recepción) para realizar el análisis sensorial como parte del proceso organoléptico (agente proceso organoléptico), donde dependiendo del tipo de café a evaluar serán las propiedades para valorar, dichas características corresponden a las intensidades con los que se presentan los defectos de la taza, los cuales son cruciales para determinar la clase de café analizado. Es de resaltar que este proceso sensorial de decisión es subjetivo, pudiendo existir tendencia hacia algunos proveedores de forma positiva o negativa, así mismo se realiza de forma centralizada.

Si las características resultado no coinciden con el convenio realizado, se da a conocer al proveedor y se aceptará el café con ajustes en precio y peso siempre y cuando el proveedor acepte, por el contrario, se le regresa el lote de café; si las características coinciden con el convenio previo, el flujo del producto continua a la selección de proceso.

Después de haber realizado el proceso organoléptico, se realiza un análisis físico (agente selección de proceso), este proceso también va a depender del tipo de café, pudiendo ser pergamino, bola robusto u oro natural robusto, para la evaluación de las características tales como: porcentaje de humedad, porcentaje de granza, porcentaje de bola, porcentaje de defectos graves y leves, entre otros. De este proceso de decisión en conjunto con el análisis sensorial, el dueño de la empresa determina el proceso a seguir (proceso productivo) de acuerdo con su experiencia.

Posteriormente se realiza la maquila de café conforme a las indicaciones del dueño de la empresa, y durante el proceso se va supervisando la calidad que va adquiriendo el grano. Al finalizar el proceso, se toma una muestra de café con la finalidad de documentar las características del café procesado por si el cliente llega a tener alguna reclamación. Finalmente se entrega el producto al cliente (agente distribución y agente camiones) en tiempo y forma.

Generalmente se aprecia en el esquema que no todos los procesos de decisión se abordan en este sistema de apoyo a la decisión, sino aquellos identificados como cruciales y se representan mediante agentes o actividades clave. Así mismo, se denota la incursión de agentes inteligentes (agente proveedor, agente proceso organoléptico, agente selección de proceso, agente distribución y agente camiones) en los procesos de decisión de la empresa, cada agente puede estar optimizado mediante técnicas de inteligencia artificial, por lo que en el esquema se muestra con un círculo aquellos agentes que albergan motores de inferencia (agente proveedor, agente proceso organoléptico y agente selección de proceso), particularmente de lógica difusa para la gestión de conocimiento. Por otro lado, los agentes recurso o actividad (recepción y proceso productivo) se representarán en el sistema de apoyo a la decisión como modelo de eventos discretos.

En primera instancia de este capítulo, se encontrará una arquitectura genérica para agro-productos que engloba los actores y agentes existentes en la cadena de suministro agrícola, mismo que se emplea como referencia en combinación con la metodología de agentes para la conceptualización del modelo de agentes de Merino Telis Café S.A. de C.V. Posteriormente se realiza el modelo operacional de la metodología, que consiste en desarrollar el sistema de apoyo a la decisión mediante la creación en software del modelo de agentes conceptualizado, el modelo de simulación de agentes y eventos discretos, los motores de inferencia basados en lógica difusa, el diseño de la interfaz gráfica de usuario y el detalle del modelo complementario de distribución, finalmente se proponen indicadores clave de desempeño para cuantificar el impacto del sistema de apoyo a la decisión desarrollado.

3.1 Arquitectura genérica para agro-productos basada en agentes

Con fundamento en literatura existente, no existe un marco de referencia para productos agrícolas, por lo tanto, se propone un modelo o arquitectura genérica para agro productos que sirva como referencia para identificar todos los actores inmersos en una cadena de suministro agrícola.

3.1.1 Aspectos generales

La arquitectura genérica busca concentrar actores, interacciones, flujos y acciones entre los involucrados en una cadena de suministro agrícola, con el propósito de crear un modelo reusable y escalable para el establecimiento de agentes inteligentes de cualquier producto agrícola a lo largo de su cadena de suministro.

La propuesta parte de la revisión de literatura referente a marcos de referencia sobre productos agrícolas percederos en combinación con agentes inteligentes. A manera de consenso es preciso describir en primera instancia los participantes icónicos con sus respectivas funciones para cualquier cadena de suministro de productos agrícolas:

- Proveedor/productor: 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.
- Vendedor: está interesado en vender los productos agrícolas después de su cosecha y que son provenientes de los productores. Cooperativas agrícolas, negocios agrícolas, compañías de comida, mayoristas y exportadoras se pueden considerar como vendedores.
- Mayorista: tiene el cargo de intermediar la prestación de servicios entre la oferta y la demanda de extremo a extremo. Exportadoras, importadoras, vendedores, productores, compradores, intermediarios, corredores, distribuidores, cooperativas agrícolas, subastadores y comisionistas pueden considerarse como mayoristas.
- Comprador: interesado en su totalidad en la compra efectiva de productos agrícolas procedentes de los productores, vendedores o mayoristas, para después revender los productos a los consumidores. Para este tipo de actor puede considerarse un minorista,

supermercado, negocios agrícolas, compañías de comida, cooperativas agrícolas e importadoras.

- Consumidor: compra productos agrícolas procedentes de los productores o compradores. Se puede distinguir este participante como individual o colectivo, tal es el caso de restaurantes, hoteles y hospitales.
- Firma transportista: distribuye los productos agrícolas procedentes de los productores, vendedores o mayoristas a los compradores. Se incluyen como participantes a empresas locales, medianas transportistas y grandes transportadoras.

De acuerdo con los actores icónicos generales de una cadena de suministro, se propone la arquitectura o modelo genérico de negocio para productos agrícolas (ver Figura 3.2) que consta de siete actores clave, incluidos los actores icónicos: consumidor (comprador o consumidor), proveedor (productor o vendedor), mayorista, firma transportista, proveedor de comunicaciones y negociaciones, entidades normativas y entidades financieras.

La particularidad del modelo genérico para productos agrícolas radica en introducir normativas a lo largo de la cadena de suministro, negociadores, así como entidades gremiales y financieras que tienen impacto en la sincronía de la cadena de suministro para productos perecederos agrícolas y forman parte de la trazabilidad de los productos.

3.1.1.1 Descripción del modelo genérico de agentes para agro-productos propuesto

A partir del modelo de (Karetsos et al., 2002) se realiza la arquitectura genérica propuesta en la Figura 3.2 que consiste en un Marco de referencia agrícola con la capacidad de ofrecer un conjunto de funcionalidades genéricas de manera independiente e interoperable que esté basado en los requerimientos de apertura, modularidad, escalabilidad y reusabilidad con el objeto de atender problemas de negocio, gestión de la cadena de suministro, negociación, importación y exportación de productos agrícolas con poco tiempo de disponibilidad en mercados.

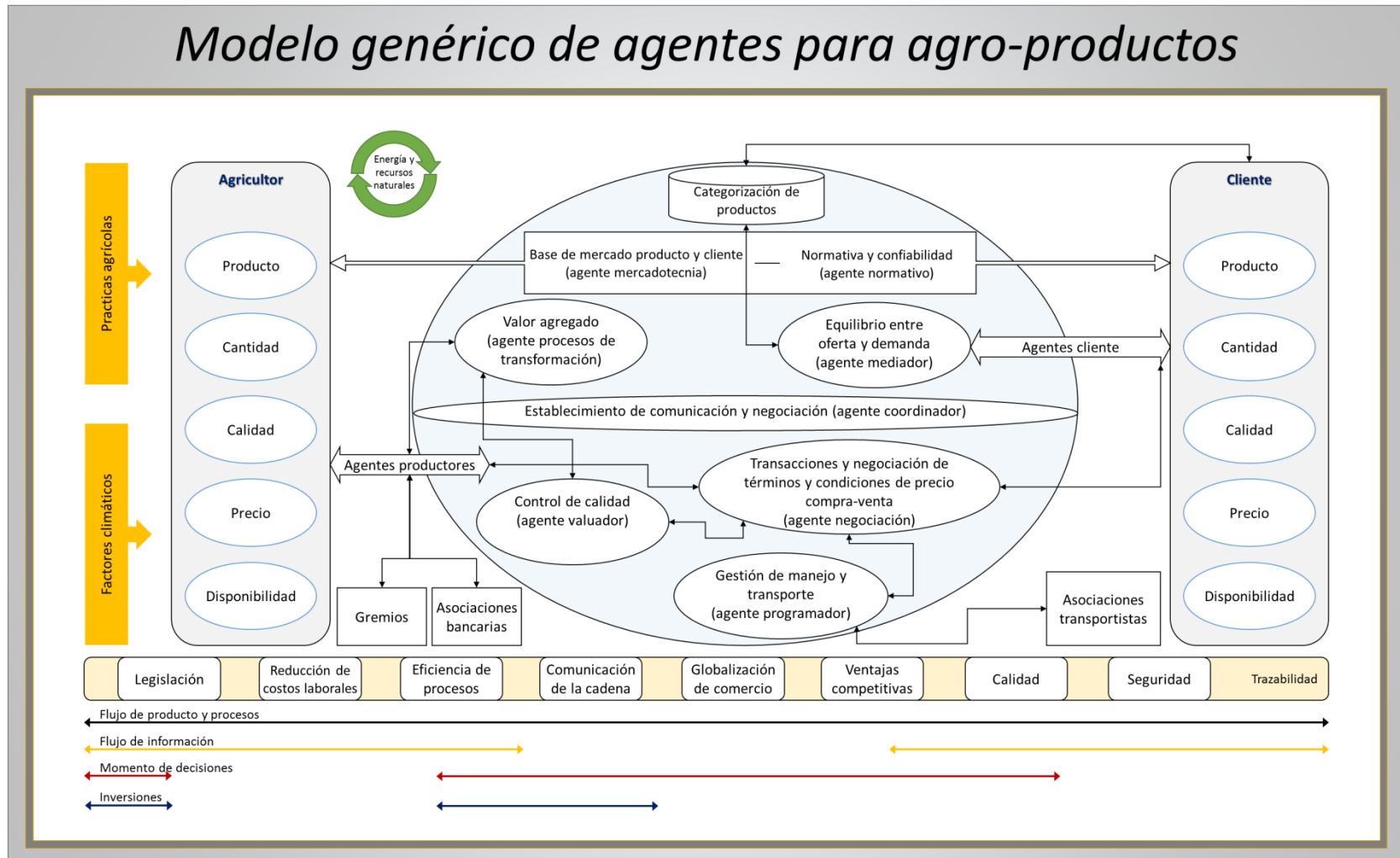


Figura 3.2 Arquitectura genérica para agro-productos (Hernández González, 2017).

En el marco genérico propuesto se aprecia la interacción de agentes y actores propios de la cadena de suministro agrícola. En cuanto a interacciones se puede apreciar los flujos de productos y procesos que se distribuyen de extremo a extremo de la cadena de suministro agrícola en ambos sentidos, puesto que en cualquier punto de la cadena los procesos y productos agrícolas están presentes. En cuanto al flujo de información se puede decir que se encuentra presente en toda la cadena de suministro en una forma centralizada en el segundo eslabón, es decir, la información fluye en ambos sentidos de proveedor a la empresa de transformación e igualmente la información fluye en ambos sentidos de la empresa al cliente, convirtiéndose la empresa en una base de conocimiento.

La fase crucial de la cadena de suministro agrícola se lleva al momento de tomar decisiones de trascendencia, notándose que la importancia de la toma de decisiones se concentra en 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 y estimación de precios de compra-venta dentro de la empresa de transformación, lo anterior se debe al alto grado de complejidad y alta presencia de subjetividad (experticia) en los procesos de decisión.

Para el caso de detectar puntos donde se deben realizar inversiones se puede apreciar que en el área de proveeduría y al inicio de los procesos de transformación son los puntos ideales para realizar inversiones en cuanto a ejecutar estudios exhaustivos que ayuden optimizar la calidad y rendimiento de cultivos por hectárea de acuerdo a un buen manejo de prácticas agrícolas y factores climáticos, así mismo en los procesos de transformación se debe invertir en maquinaria de alta tecnología que facilite los procesos productivos, además de invertir en estudios y sistemas de apoyo a la decisión que reduzcan la subjetividad de la toma de decisiones, aunado a una inversión en planes de mercadeo que favorezcan las ventas tanto de vendedores como de productores.

3.1.1.2 Tipos de agentes y actores de la arquitectura genérica para agro-productos

En cuanto a agentes inteligentes y actores presentes en la cadena de suministro agrícola, se detallan los siguientes de acuerdo con el modelo genérico propuesto:

3.1.1.2.1 Agentes propuestos:

- Agente consumidor: cada consumidor (comprador o consumidor) tiene un agente personal, el cual es responsable de las consultas y del seguimiento de los resultados de búsqueda de mercados (productores o vendedores). Este agente tiene capacidad de mejorar patrones de búsquedas, priorizar preferencias de cliente, y monitorizar el seguimiento de pedidos. Cada consumidor o comprador maneja siempre aspectos como el tipo de producto agrícola adquirido, cantidad de producto agrícola adquirido, calidad de producto, precio de adquisición, y disponibilidad actual para consumo.
- Agente proveedor: cada proveedor (productor o vendedor) tiene igualmente su propio agente personal que se encarga de reportarle las órdenes de los productos disponibles en el sistema, así mismo los agentes informan al proveedor el tipo de relación comercial con sus clientes, el estado de negociación y transacciones. Cada proveedor tiene siempre presente aspectos como el tipo de producto cultivado, cantidad de producto cultivado (rendimiento por hectárea), calidad de producto, precio de venta, y disponibilidad de oferta.
- Agente mercadotecnia: este agente tiene la responsabilidad de promover los productos agrícolas procedentes de los proveedores a los posibles clientes o consumidores de extremo a extremo de la cadena de suministro. En otro aspecto, el agente tiene la capacidad de informar a los proveedores aspectos comerciales de sus clientes como preferencias de productos, localización, actividades de compras, oportunidades de nuevos mercados, entre otros.
- Agente normativo: todos los productos agrícolas se consideran de carácter alimenticio, por lo que se tiene que considerar regulaciones federales, estatales, regionales y de clientes para el cultivo, procesamiento, limpieza y distribución de productos; así mismo este agente se encarga de verificar y hacer cumplir las normativas internacionales para manejo, empaque, inocuidad y medios de exportación de productos agrícolas. Este agente tiene la responsabilidad de hacer cumplir las normativas presentes a lo largo de la cadena de suministro para productos agrícolas, teniendo también en consideración aquellas regulaciones por parte de gremios o cooperativas agrícolas regionales o nacionales.
- Agente coordinador: este agente tiene la función de mantener siempre una relación fluida y precisa para aspectos de comunicación entre procesos, departamentos y demás actores en cuanto sea posible abarcar a lo largo de la cadena de suministro. Así mismo el agente

coordinador tiene la tarea de mantener un equilibrio en las metas globales que la cadena de suministro agrícola se fije a corto o largo plaza, de manera que se cumplan con objetivos particulares en los actores o agentes involucrados y se alcancen las metas generales.

- Agente mediador: encargado de mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda, colabora con la agente mercadotecnia para la promoción de productos agrícolas a clientes. Este agente se encarga de no ofertar más de lo debido de acuerdo con la capacidad instalada de la empresa y el rendimiento por hectárea de los productores, así mismo busca mantener buenos volúmenes de venta.
- Agente negociación: tiene la responsabilidad de monitorizar bolsas de valores específicas en concordancia al tipo de producto agrícola a comercializar con el objeto de establecer precios de compra y venta para realizar transacciones con proveedores y clientes. Este tipo de agente puede ser autorizado para negociar los términos y condiciones en transacciones de negocio en relación con el intercambio de productos y su pago; los términos que tienen que ser discutidos son en relación con protocolos de entrega, políticas de devolución, crédito, plazos de pago, instrucciones de pago, facturación, pagos de contado, métodos de resolución de conflictos, garantías, entre otros.
- Agente valuator: de acuerdo con características físicas y/o procesos sensoriales a los productos agrícolas, se determina un grado de calidad específico del producto para posteriormente con ayuda del agente procesos de transformación, determinar la mejor combinación de procesos que ayude a mejorar aspectos de calidad que satisfagan al cliente.
- Agente procesos de transformación: se encarga de seleccionar y realizar la mejor combinación de procesos productivos necesarios para cumplir con las características del cliente con el menor uso de recursos de la empresa, inclusive tiene la capacidad de mejorar aspectos del producto agrícola para venderse a mayor precio en el mercado meta.
- Agente programador: Posterior a una satisfactoria negociación con los clientes este agente tiene la capacidad de programar la secuencia de las órdenes a surtir de acuerdo con niveles de inventario y capacidad de producción, además puede administrar un correcto manejo de materiales y productos con el objeto de transferirlos en el menor tiempo posible, ya sea dentro de la empresa o de manera externa mediante empresas transportistas.

3.1.1.2.2 Actores propuestos:

- Asociaciones bancarias: esta entidad está enfocada en la gestión de transacciones monetarias, es un elemento extraordinario que se solicita por cualquier miembro de la cadena de suministro como medio de financiación de dinero para inversión o cubrir contingencias. Provee información sobre procesos de transacciones a través de la interacción de con los clientes, proveedores y empresa mediante sus agentes.
- Firmas transportistas: entidades especializadas en transporte que se encuentran presentes en la cadena de suministro, se encargan de mover productos agrícolas de acuerdo con especificaciones de clientes y normativas de inocuidad. Trabaja en colaboración con el agente normativa y agente programador para determinar condiciones de entrega y manejo de productos dependiendo del tipo de cliente.
- Gremios: son agrupaciones de agricultores que regulan su comportamiento laboral mediante estatutos establecidos en consenso. Este tipo de entidades puede llegar a ser tanto benéfico como perjudicial a la cadena de suministro dependiendo de las ideologías y metas de los agricultores.
- Factores climáticos: los aspectos medioambientales (cantidad de precipitación fluvial, cantidad de luz solar, cantidad de viento, etc.) están presentes en todo tipo de cadenas agrícolas del mundo y no se tiene control sobre ellos, por lo que se le considera como factores inciertos. Hasta el momento sólo se puede llegar a predecir cantidad y calidad de productos agrícolas de acuerdo con una combinación de factores climáticos presentes.
- Prácticas agrícolas: son formas de proceder en el cuidado de cultivos de los agricultores. Se sabe que 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.
- Trazabilidad: se concibe como la información necesaria para describir la historia de producción de un producto y algunas subsecuentes transformaciones o procesos de valor agregado desde el agricultor hasta el consumidor final. La trazabilidad ayuda a minimizar la producción y distribución de productos no seguros o de mala calidad, minimizando así el potencial de mala reputación, responsabilidad y reclamos. Los gremios al igual que los agentes de las cadenas de suministro agrícolas se preocupan arduamente por aspectos de inocuidad, seguridad y calidad de sus productos, llegando a convertir la trazabilidad como

una herramienta de apoyo en la garantía de la seguridad alimentaria con el objeto de conseguir la confianza del cliente. En cadenas agrícolas existe un número de factores o conductores que hacen cumplir la trazabilidad como una técnica para responder las preguntas cruciales de ¿Quién? (actor/productor), ¿Qué? (actor/productor/información), ¿Cuándo? (tiempo), ¿Dónde? (localidad), y ¿Por qué? (causa o razón), con respecto a la inocuidad, calidad, procedencia y seguridad de los alimentos. Los factores o conductores de la trazabilidad son: legislación (requerimientos de seguridad y calidad), reducción de costos laborales (eficiencia dirigida, metas), eficiencia de procesos de cadena de suministro (transparencia e interoperabilidad), comunicación de la cadena (retroalimentación, disputas, enlaces, reclamaciones), globalización de comercio (requerimientos de comercio específico regional o nacional), ventajas competitivas (protección de marca, valor agregado, diferenciación), calidad (calidad de producto, servicios de garantía, certificaciones) y seguridad (alimentos peligrosos, contaminación, prevención de accidentes).

3.2 Desarrollo del modelo de agentes

De acuerdo con los actores y agentes de la arquitectura genérica propuesta en Figura 3.2, se desarrolla el marco de referencia metodológico propuesto en Figura 2.1 para la construcción del modelo basado en agentes.

3.2.1 Análisis de proceso o negocio

En este punto se detalla en general el proceso que sigue la cadena de suministro agrícola del café, en específico de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., con apoyo del modelo genérico propuesto en Figura 3.2.

3.2.1.1 Proveedor

Existen múltiples caficultores que surten a la empresa Merino Telis S.A. de C.V., cada uno de ellos tiene diferente proceso de cultivo y de prácticas agrícolas, por tal motivo el café que venden a la empresa es muy variado en su calidad y en el rendimiento que se tiene por hectárea de café sembrado. Las condiciones climáticas y demás factores inciertos inmersos en el proceso de cultivo hacen que las características del café fluctúen y no se beneficien los

caficultores al vender un café más caro, ni la empresa al realizar múltiples procesos para obtener las características de los clientes.

Dentro de las principales variables inciertas que afectan el rendimiento y calidad del café cultivado se encuentran el índice de nutrición, precipitación pluvial, control de plagas, control de enfermedades, densidad de plantaciones, poda o limpia, temperatura y edad de la mata de café.

3.2.1.2 Empresa

Existen dos tipos de beneficios en la producción del café: el beneficio húmedo y el beneficio seco. En este caso, Merino Telis Café S.A. de C.V. es un beneficio seco, por lo que se detallará únicamente este tipo de beneficio.

3.2.1.2.1 Recepción y estibado

El café recibido es estibado sobre tarimas, en el área designada para cada tipo de café. Para estibar se requiere el reporte emitido por el Departamento de Aseguramiento de Calidad, por donde pasa todo el café, y se determina si cumple con los estándares de calidad o es rechazado. A continuación, dichas pruebas de aseguramiento se realizan en el laboratorio de la empresa, lo que se denomina proceso de captación y análisis físico del grano.

3.2.1.2.2 Pre limpia

El café es vaciado a la tolva de pergamino en donde se eliminan los contaminantes físicos de mayor tamaño, donde pasa posteriormente a la máquina de prelimpia, en donde se eliminan contaminantes físicos de menor tamaño como son piedras, hilos y clavos.

3.2.1.2.3 Trilladora

Después del proceso de prelimpia entra a la trilladora, en donde se elimina la cáscara del pergamino, para obtener café verde. En la entrada de la trilladora se ubica el primer punto crítico, en donde se eliminan los metales que pudiera llevar el café pergamino.

3.2.1.2.4 Clasificación

La clasificación se realiza en cuatro máquinas: las catadoras, la clasificadora de zarandas, el clasificador densimétrico (Olivers) y el clasificador por color (Electrónicas).

En las catadoras se separa la cáscara y la mancha ligera a través de un ventilador donde es discriminado el café que no tiene el peso adecuado. En la clasificadora de zarandas, el café es clasificado por tamaño y forma, separándolo en primeras, segundas, terceras, caracol, granza y bola.

En las clasificadoras densimétricas (Olivers), se clasifica por peso en primeras, segundas y terceras. Se elimina también piedras y palos de menor tamaño que no fueron eliminados anteriormente. Se verifica la lineación de la mesa y el buen funcionamiento de los ventiladores.

Finalmente, en las Electrónicas se clasifica el café por color, eliminando principalmente grano negro y amarillo, por un sistema óptico computarizado que elimina los granos de colores indeseables, conforme a la preparación requerida y estándares de calidad.

3.2.1.2.5 Almacén

Una vez que el café es previamente procesado, se lleva a efecto el proceso de empaque que consiste en llenar sacos de mimbre con capacidad de entre 50 a 60 kg cada uno para después apilarlos dependiendo del tipo de café y características diferenciales para su futura venta a los clientes. Cabe resaltar que el apilado deberá ser estratégico para poder manipular el café conforme sus características y estrategias de ventas para lograr ofertar todo el café en existencia y no exista demasiado inventario.

3.2.1.2.6 Maquinaria y equipo

A lo largo de todos los procesos que se llevan a cabo en esta empresa, se encuentran involucradas algunas o todas de las siguientes máquinas y equipos que se detallan en el capítulo 1 de este trabajo.

3.2.1.3 Cliente

Tanto para la compra como la venta del café, la empresa realiza estimaciones del precio compra-venta mediante las fluctuaciones de la bolsa de valores de Nueva York con el objetivo de determinar el precio que pagara a los caficultores por la venta del grano y determinar el precio de venta para los mercados extranjeros y demás clientes naciones como lo son Nestlé.

El proceso de distribución es realizado mediante flotillas de camiones propios de la empresa, por lo que debe tener en cuenta la logística de rutas, disponibilidad de camiones y capacidad de transporte para no comprometer la entrega de la mercancía con el cliente y perder fidelidad y prestigio.

En la Figura 3.3 se presenta un modelo preliminar de la cadena de suministro de Merino Telis Café S.A. de C.V. de acuerdo con la información obtenida de las empresas involucradas, teniendo en cuenta que es una visión general de la cadena de suministro.

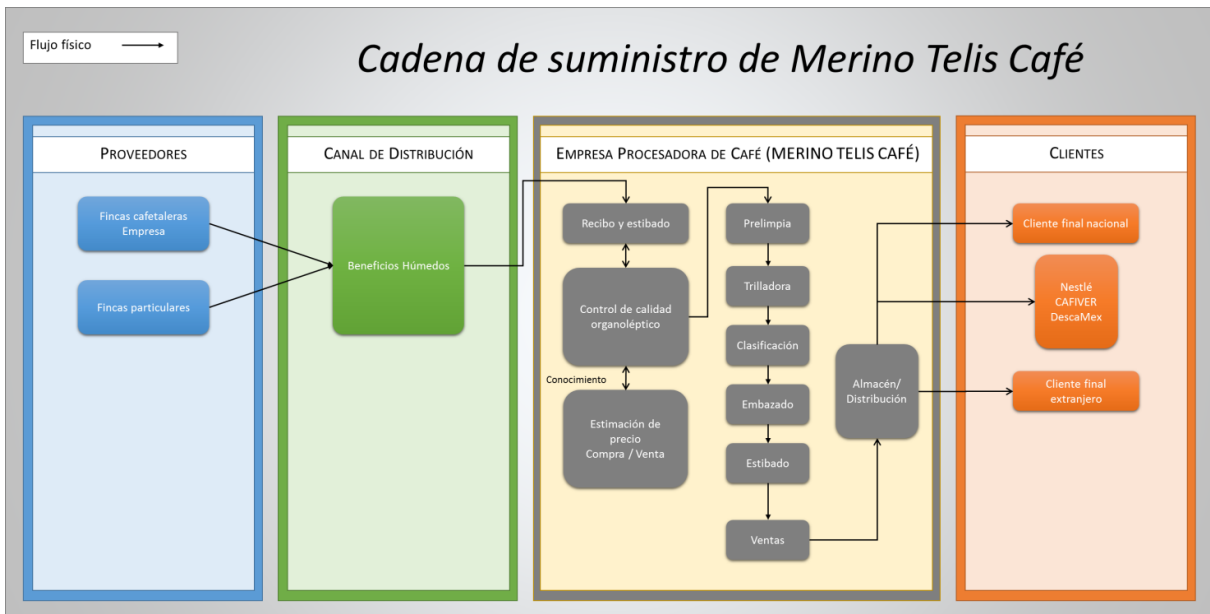


Figura 3.3 Abstracción preliminar de la cadena de suministro de café (Hernández González, 2017).

Así mismo cabe resaltar que para modelaciones posteriores en software no se tomará en cuenta el canal de distribución entre el proveedor y la empresa de transformación (Merino Telis Café) ni el beneficio húmedo debido a que no se tiene información significativa que comprometa el rendimiento de la cadena de suministro.

3.2.2 Desarrollo de la ontología

El desarrollo de la ontología se lleva a cabo mediante programación interna a base de Java en el software profesional AnyLogic®. Consiste principalmente en establecer los canales de comunicación entre agentes y la comunicación existente entre los motores de inferencia, que en el caso particular constan de módulos de lógica difusa para los puntos cruciales del proceso de toma de decisiones, en la Figura 3.4 se ejemplifica la programación de la comunicación existente entre el agente y el motor de inferencia, que en el caso particular de la imagen se refiere al módulo de lógica difusa referente a catación de café robusto.

```
try
{
    matlabcontrol.MatlabProxyFactory factory = new matlabcontrol.MatlabProxyFactory();
    matlabcontrol.MatlabProxy proxy = factory.getProxy();

    proxy.setVariable("a1", Fermento);
    proxy.setVariable("a2", Agrio);
    proxy.setVariable("a3", Hediondo);
    proxy.setVariable("a4", Terroso);
    proxy.setVariable("a5", Moho);
    proxy.setVariable("a6", Añejo);

    proxy.eval("load('cat_robusto.mat')");
    proxy.eval("res = evalfis([a1, a2, a3, a4, a5, a6], cat_robusto)");
    proxy.eval("res1 = res(1)");

    Object result1 = proxy.getVariable("res1");

    System.out.println("Result: " + ((double [])result1)[0]);

    ValorClaseRobusto=((double [])result1)[0];
}
```

Figura 3.4 Ejemplo de comunicación con un motor de inferencia (Hernández González, 2017).

3.2.3 Fase de diseño

En esta fase de diseño se sigue la estructura del modelo de la Figura 2.2, con el propósito de realizar el proceso de agentificación o conceptualización de agentes.

3.2.3.1 Proceso de decisiones en la empresa

El proceso para la toma de decisiones está compuesto principalmente por las siguientes actividades: negociación, convenio, recepción del café en la empresa, análisis organoléptico (evaluación física y cata del café), determinación de: procesos a realizar, ajuste en peso, descuento económico, producción y almacenaje.

A lo largo de la cosecha de café, Grupo Merino Telis Café S.A. de C. V. recibe café de alrededor de tres mil proveedores, estos proveedores se diferencian en la frecuencia de

entrega, calidad del café y cantidad que ofrecen, en su mayoría, estos negocian vía telefónica para conocer el precio que ofrece Grupo Merino Telis Café S.A. de C.V. a los proveedores, el precio del café pergamino está dado por la bolsa de valores de Nueva York, la cual fluctúa cada minuto, mientras que el café robusta está dado por la bolsa de valores de Londres, la cual permanece constante por largo periodos; para determinar el precio de compra del grano, también se toma en cuenta el tipo de cambio del dólar, así como el porcentaje de ganancia, posterior a la negociación se realiza el convenio, en el que se indica: cantidad de café a comprar, precio y fecha que se compromete el proveedor a entregar el aromático a la empresa.

El café se recibe en la empresa y se realiza el análisis organoléptico, dicho análisis consiste en evaluar las características físicas, es importante señalar que las características a evaluar dependen del tipo de café en cuestión (café robusto o pergamino), posteriormente a este análisis se realiza una catación, que consiste en evaluar las intensidades de las características sensoriales del café.

Si se trata de un café robusto, el análisis físico consiste en determinar los valores de los siguientes porcentajes: granza (granos partidos o quebrados), defectos graves (granos negros, descoloridos, granos que presentan la evidencia del ataque de un insecto), defectos leves 8 granos deformes o anormales, pequeños, manchados o inmaduros), materiales extraños (piedras, palos, caña, etc.), humedad, y cantidad de café a procesar. Por otro lado, para realizar la cata se toman en cuenta las intensidades de sabores extraños como lo son: fermento, sabor agrio, hediondo, terroso, moho y añejo.

Para un café pergamino, las variables a tomar en cuenta para el análisis físico son las siguientes: presencia de la mancha (porcentaje de granos que han sido atacados por hongos, granos negros, granos que presentan tendencia al color crema, de color gris azulado, decolorados, malformados o deformados), aspecto verde (es la apariencia que presentan los granos, en relación a la humedad, esta pueden ser: faltos, muy secos, excesivamente faltos), porcentaje de café bola (es aquel que se pasó y no fue clasificado). En otro aspecto, para la cata, se clasifican en arábigos lavados y no lavados, de acuerdo al tipo de secado. Los arábigos

lavados se toman en cuenta las características generales del café, tales como el aroma, sabor de café, acidez, cereal y cuerpo, así también los sabores extraños como: vinoso, verde, cereal, seco, químico, fermento y terroso. Para los arábigos no lavados se toman en cuenta solamente los sabores extraños como: fermento, cereal, inmaduro, seco y terroso.

Posteriormente que se han realizado ambos análisis, tanto el físico, como el de cata, se presentan los valores obtenidos ante el experto, quien decide qué tipo de proceso se debe realizar de acuerdo al tipo de café que se está analizando (café robusta o café pergamino), aunado a esto se realiza un descuento económico y el ajuste en peso, todo ello en base a la experticia que tiene el especialista (experto y dueño de la empresa), con la finalidad de ofrecer un café que cumpla con los estándares de calidad.

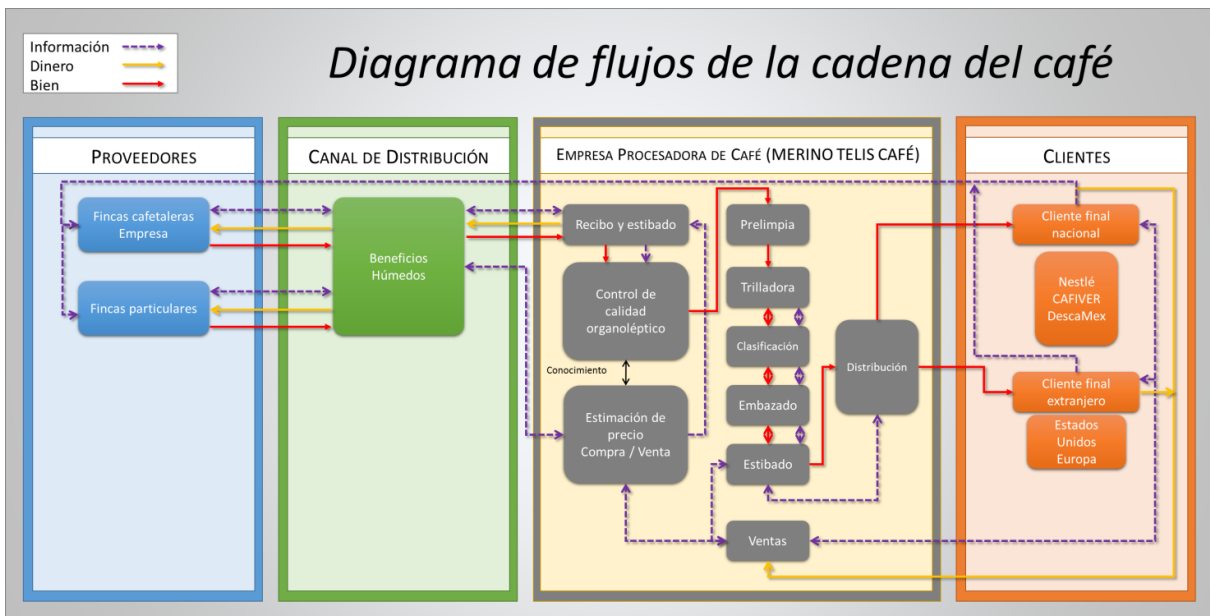


Figura 3.5 Diagrama de los flujos existentes en la cadena de suministro de Merino Telis Café (Hernández González, 2017).

En la Figura 3.5 se muestra los diferentes flujos presentes a lo largo de la cadena de suministro de grupo Merino Telis Café S.A. de C.V., teniendo presente que la línea azul punteada representa flujo de información, la línea naranja representa flujo de dinero entre entidades y la línea roja representa recursos materiales o bienes para realizar el proceso productivo y negociaciones.

3.2.4 Proceso de conceptualización

El proceso de conceptualización está dirigido principalmente por dos pasos: la elaboración del Modelo dominio y el Modelo Conceptual de agentes de la cadena de suministro, basados en la abstracción preliminar de la Figura 3.3 y los flujos e interacciones mostradas en la Figura 3.5.

3.2.4.1 El modelo dominio

Para la modelación de agentes inteligentes se debe obtener el Modelo dominio, el cual propone una representación de la cadena de suministro real. Dicho modelo se compone de dos modelos: el Modelo Estructural y el Modelo Dinámico (ver Figura 3.6), los cuales son concebidos de acuerdo con el nivel de abstracción adoptado para las necesidades del estudio.

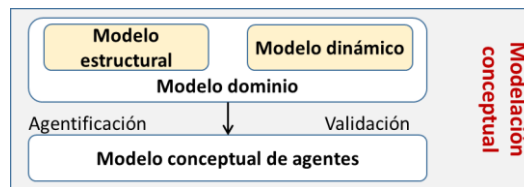


Figura 3.6 Proceso de modelación conceptual (Hernández González, 2017).

3.2.4.1.1 Modelo estructural

Este modelo es construido de un conjunto de diferentes actores incluyendo productores, ensambladores, procesadores, materiales de carga, distribuidores, minoristas, mayoristas y clientes, así mismo como su flujo de material del cual son responsables.

Este modelo es basado en las responsabilidades de la red y está adaptado a la modelación distribuida de organizaciones.

Cabe mencionar que un actor es considerado como un nodo dentro de la cadena de suministro, es decir, existe en el caso particular de Merino Telis Café S.A. de C.V., un actor proveedor, un actor empresa que contiene múltiples sub-actores, y un actor cliente.

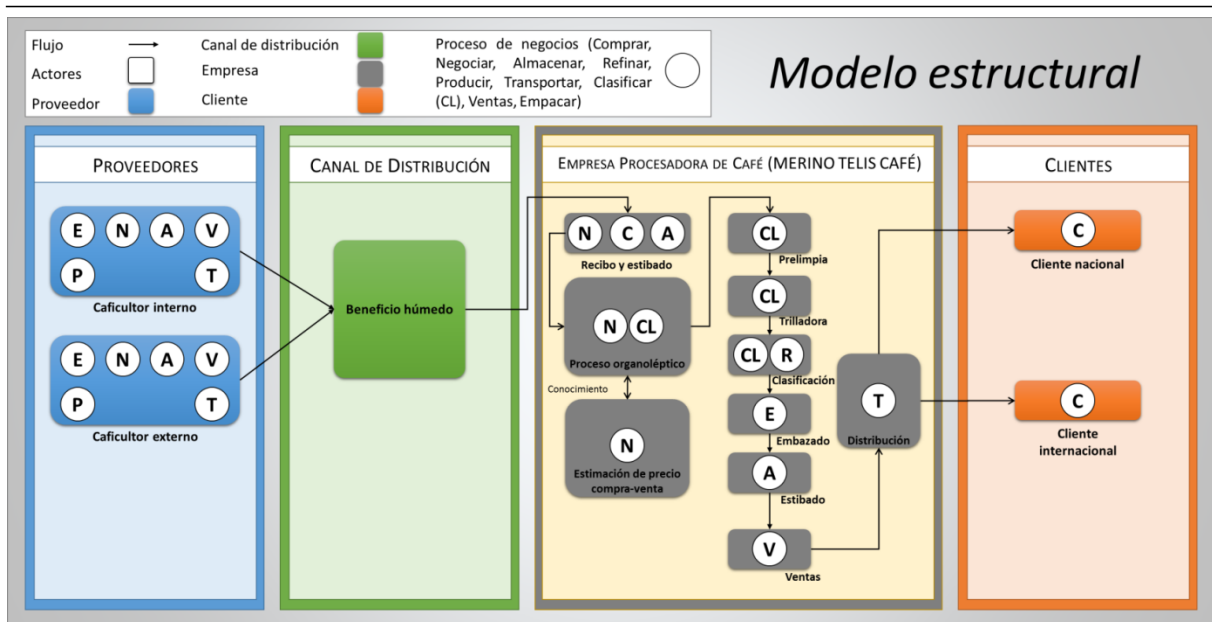


Figura 3.7 Modelo estructural de Merino Telis Café (Hernández González, 2017).

En la Figura 3.7 se puede apreciar el modelo estructural de la cadena de suministro de Merino Telis Café S.A. de C.V., con la cual se resaltan las tareas responsabilidad (procesos de negocio) que cada uno de los actores involucrados debe llevar a cabo. Los proveedores, en este caso caficultores, son los encargados de suministrar un grano de calidad, de acuerdo con un proceso de cultivo exhaustivo, a la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., los caficultores pueden ser internos (fincas de la misma empresa) o externos (fincas de caficultores regionales y nacionales).

Los productores o empresa tienen la responsabilidad de producir partes y componentes de materiales, en el caso particular tiene la responsabilidad de transformar el café en conjunto de varios actores del mismo tipo que conforman la empresa o productor.

Una vez que los pasos de transformación se realizaron, los productos finales se entregan a los distribuidores y minoristas para que distribuyan el producto a clientes nacionales (Nestlé, Cafiver, Descamex, etc.), y a clientes internacionales (E.U.A., Europa, Japón). En general, los distribuidores tienen el mandato de atender al proveedor y el cliente.

3.2.4.1.2 Modelo Dinámico

En la Figura 3.8 se muestra el Modelo Dinámico de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., el cual complementa el Modelo Estructural clarificando los modos de uso y coordinación, en particular la naturaleza del intercambio de información. El Modelo dinámico permite definir el comportamiento de cada actor y sub –actor para clarificar la interacción entre nodos.

Para propósitos de la coordinación de flujos se propuso una referencia entre los actores a lo largo de la cadena de suministro, dicha referencia es el punto desacople o punto de nivel de agilidad, su posición determina la entrada de órdenes de proceso en el flujo físico. El punto de desacople tendrá un impacto en los niveles de inventario o gestionará las actividades aguas arriba y aguas abajo. Para el caso particular, la empresa Merino Telis Café es de tipo Make to Order, por tal motivo, el punto de desacople se encuentra en el área de ventas (marcado con triángulo rojo en la Figura 3.8), el cual manda las ordenes de requerimiento al departamento de Estimación de precios para evaluar costos y determinar cuánto café mandar a pedir al Beneficio húmedo y este a su vez solicita a los caficultores, para que posteriormente el café entre al Beneficio Seco y se realice los procesos necesarios para la venta directa.

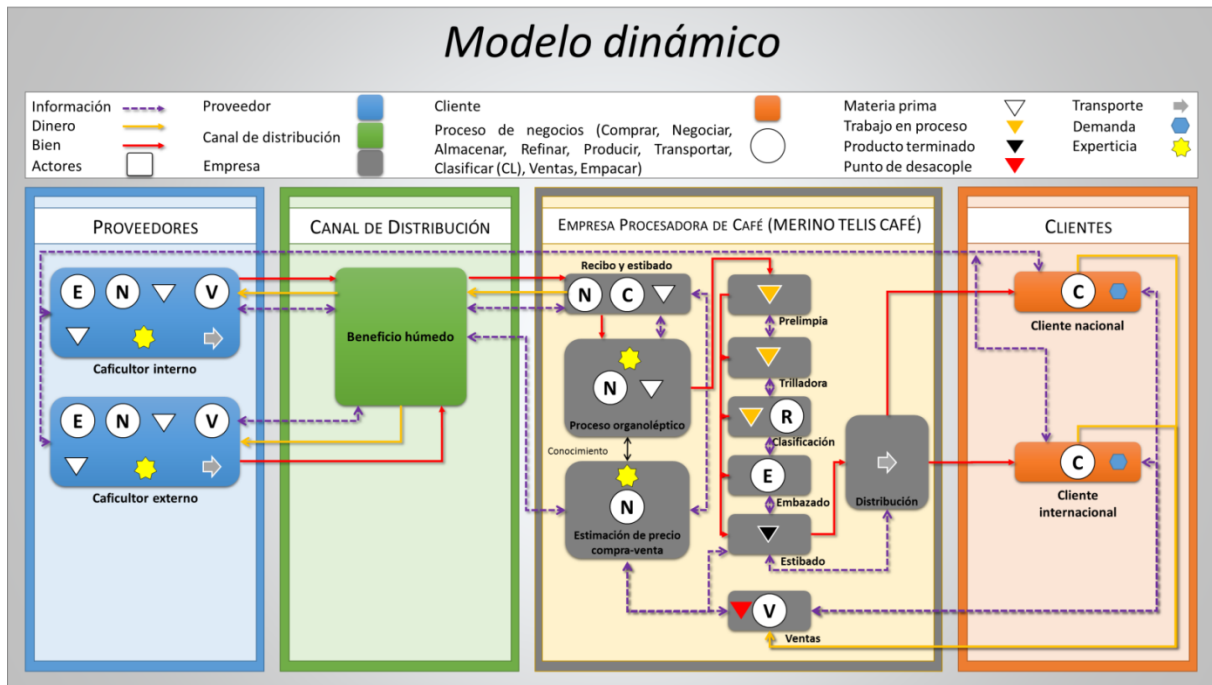


Figura 3.8 Modelo dinámico de Merino Telis Café (Hernández González, 2017).

Cabe mencionar que es importante resaltar que la empresa se maneja bajo un esquema centralizado en cuanto a la toma de decisiones, por lo que en el Modelo Dinámico se resaltan aquellas áreas donde el proceso de toma de decisiones es crucial y es basado en la experticia o experiencia del experto, resultando el proceso de los caficultores (determinación de prácticas agrícolas y rendimiento de cultivos), el proceso organoléptico (evaluación de características sensoriales), el análisis físico (evaluación de características físicas) y selección de procesos a realizar, como los más significativos para la generación de conocimiento y a su vez son los puntos más sensibles para mejorar el rendimiento de la cadena de suministro debido a que las decisiones tienen de alto grado de subjetividad.

3.2.4.2 Modelo Conceptual de agentes del caso de estudio

El Modelo Conceptual de agentes es el resultado del proceso de agentificación. Este proceso es la reformulación unificada de acuerdo con un enfoque central individualizado. Parte de la perspectiva del Modelo estructural y el Modelo dinámico a manera de unificar y elaborar el Modelo de agentes propuesto. En este modelo se especifican los agentes, objetos y sus interacciones, distinguiendo dos tipos de interacciones: información (mensajes) o interacciones físicas.

Cualquier actividad de un actor o sub-actor de la cadena genera un agente específico en estrecha relación con el agente asociado. Todo intercambio de información que se especifica en el modelo dinámico genera una interacción de información basado en mensajes. Cualquier material de flujo en el modelo dinámico requiere un objeto para representar un producto físico y conduce a una interacción de tipo física.

En este nivel de modelado conceptual se pone mayor énfasis en la identificación de los agentes, los objetos, la naturaleza de sus interacciones y motores de inferencia, para el modelo conceptual de agentes propuesto en Figura 3.9 se consideran los siguientes:

- Un agente actor Demanda que genere pedidos de los clientes en tiempo real.
- Un agente actor Coordinación que monitorea la actividad de los agentes actores y sub-actores y gestiona el flujo de información.

- Un agente Proveedor que tendrá un motor de inferencia basado en un modelo de lógica difusa que refleje la experticia de los caficultores y ayude a determinar el rendimiento de sus cultivos en base a una serie de prácticas agrícolas
- Un agente Beneficio Seco que emulara estructuralmente la empresa procesadora y contendrá todos los procesos productivos y los puntos cruciales a descentralizar, en tanto sea posible, del proceso de toma de decisiones.

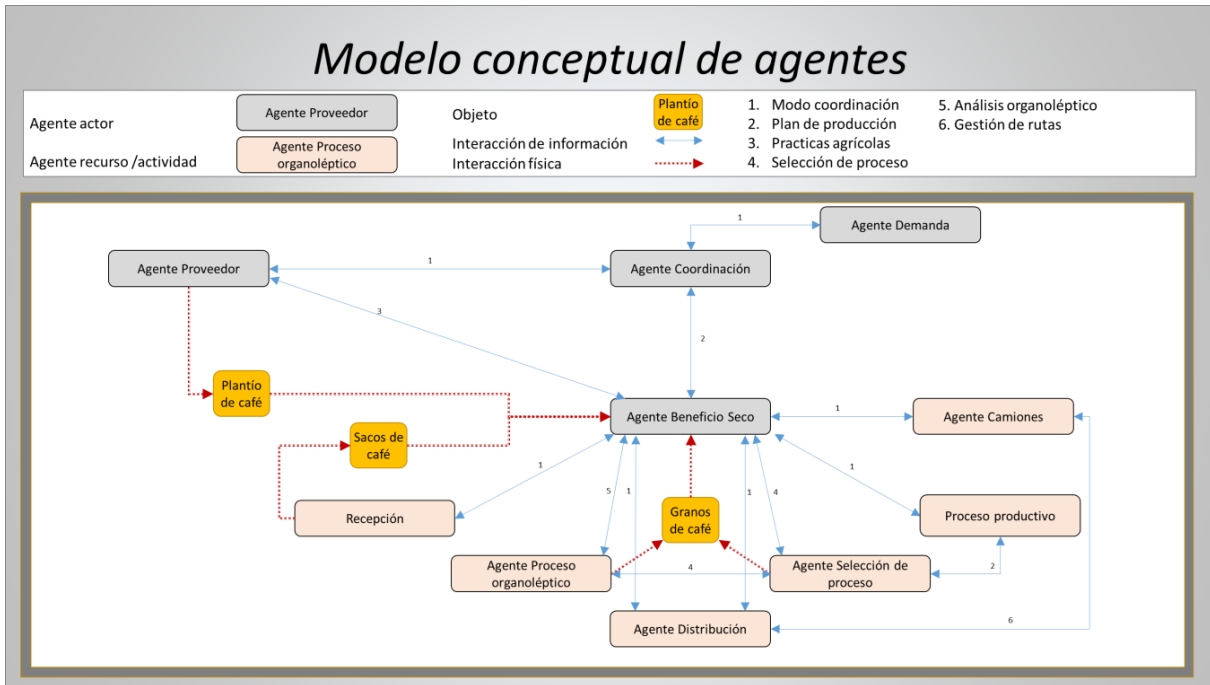


Figura 3.9 Modelo conceptual de agentes (Hernández González, 2017).

Para el caso de los sub-actores, que son llamados agentes recurso o agente actividad, se proponen:

- Un agente recurso Proceso Organoléptico el cual realizará la evaluación sensorial para determinar la clase de café mediante dos modelos de lógica difusa como motor de inferencia, uno para catación de café robusto y otro para catación de café pergamino
- Un agente recurso Selección de proceso, el cual realizará la evaluación física del grano con ayuda de la predicción del agente Proceso Organoléptico y 3 modelos de lógica difusa como motor de inferencia, el primero para el café de tipo pergamino, el segundo para el café de tipo bola robusto y el tercero para el café tipo oro natural robusto. Este agente tiene íntima relación con la actividad Proceso Productivo, puesto que contiene toda la maquinaria y equipo para realizar los procesos seleccionados.

- Un agente recurso Distribución y agente recurso Camiones que se encargarán de tener el pedido listo cuando lo solicita el cliente gestionando unidades de transporte y rutas.

Las actividades de Recepción y Proceso Productivo son las encargadas de realizar la transformación del café para su comercialización y en el caso particular se consideran como actividades recurso que serán modeladas mediante simulación de eventos discretos y no como agentes, creando un modelo híbrido o multi-método. La naturaleza de los agentes, la naturaleza de los objetos, su arquitectura de software y técnicas de apoyo (modelos de lógica difusa) serán definidas durante el Modelo operacional.

3.2.4.3 Modelo operacional

Con el fundamento del modelo de la Figura 2.2, ese apartado se refiere a plasmar la parte conceptual de agentes en la plataforma de software profesional AnyLogic®.

3.2.4.3.1 Planteamiento para simulación

La empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., en su planta ubicada en Fortín, Veracruz, realiza un trato al café por medio del beneficiado seco. Pese a los años de experiencia, la empresa cuenta con procesos subjetivos, es por ello que se requiere conocer el comportamiento de todos los procesos productivos, además, resulta imperativo realizar un estudio de simulación con enfoque de agentes inteligentes, para así poder conocer el rendimiento de café, tiempo de proceso, utilización de maquinaria y cumplimiento para determinar la calidad del café y disminuir la subjetividad de los procesos y satisfacer las ordenes de los clientes.

A continuación, se detallan los pasos necesarios para crear el Modelo operacional de la metodología que consiste en la programación en una plataforma de software profesional, que en el caso específico se utiliza AnyLogic®.

3.2.4.3.2 Recolección de datos

El modelo de simulación fue construido en base a los rendimientos de cada una de las máquinas implicadas en los procesos productivos, se procedió a calcular la cantidad de producto que abandona cada una de las salidas de las máquinas para obtener distribuciones de

probabilidad, con la intención de tomar en cuenta a la fluctuación de los procesos, tomando como base la *ley de la conservación de la materia*.

Para realizar los cálculos de todas las distribuciones de probabilidad se utilizó el complemento *DataFit* del software profesional *Plan simulation*®.

3.2.4.3.2.1 Prelimpia (M1)

En esta máquina existen dos salidas, una de café bueno, que seguirá a la siguiente máquina, y otra de basura. A pesar de que existen estas dos salidas, la cantidad de café que entra, es la misma que pasará a la siguiente etapa, despreciando totalmente la basura, debido a que este elemento poco frecuente y no influye en la cantidad de café bueno que ingresa.

3.2.4.3.2.2 Morteadora (M2)

Esta máquina tiene 2 salidas: una de paja y otra de café bueno. La paja sale del sistema y el café bueno continúa su camino hacia la siguiente máquina.

Para conseguir la distribución de la maquina M2, en primer lugar, se obtuvieron 10 muestras de 300 gramos, con dichos valores se obtuvieron los porcentajes de café bueno y paja, de cada una de las 10 muestras.

Se ingresaron a *DataFit* únicamente los porcentajes de café bueno, para obtener su distribución de probabilidad, dando como resultado una distribución normal con media de 0.79 y desviación estándar de 0.026.

Considerando que se emplea la *ley de la conservación de la materia*, en la cual se estipula que las entradas a un sistema deben ser igual a la salida (ver Ecuación 3.1), entonces, la cantidad de paja se calcula a partir de la Ecuación 3.2.

$$\text{entradas} = \text{salidas} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.1}$$

$$\text{entradas} = \text{café bueno} + \text{paja} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.2}$$

Hablando en porcentajes, la Ecuación 3.2 quedaría como se muestra en la Ecuación 3.3, que si sustituimos la información de la distribución de probabilidad de café bueno, entonces queda como la Ecuación 3.53.

$$1 = \text{café bueno} + \text{paja} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.3}$$

$$1 = \text{normal}(\mu = 0.79, \sigma = 0.026) + \text{paja} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.4}$$

Por lo que, realizando un despeje se puede obtener la fórmula de la paja, tal como lo representa la Ecuación 3.5.

$$\text{paja} = 1 - \text{normal}(\mu = 0.79, \sigma = 0.026) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.5}$$

3.2.4.3.2.3 Catadoras (M3 y M4)

Estas máquinas presentan tres tipos de salidas: café bueno, café quebrado y paja. El café bueno continúa su camino para entrar a la siguiente máquina, mientras que el café quebrado y la paja abandonan el sistema, de manera separada.

Para el cálculo de la distribución se obtuvieron 10 muestras, mediante la medición de elementos que salen por cada una de las salidas durante 20 segundos. Al igual que con los datos obtenidos en la máquina anterior, se obtuvieron los porcentajes de cada una de las salidas, los cuales se tratarán en el complemento de software *DataFit*.

De acuerdo a los resultados arrojados por *DataFit*, el café bueno se puede presentar mediante una distribución triangular, con valor modal de 0.9881, el valor mínimo de 0.9863 y el valor máximo de 0.9903.

Por su parte, el café quebrado se puede representar mediante una distribución log-normal, con media de 0.0091 y desviación estándar de 0.0008.

Entonces, en base a la Ecuación 3.1, la cantidad de paja se calcula a partir de la Ecuación 3.6.

$$\text{entradas} = \text{bueno} + \text{paja} + \text{quebrado} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.6}$$

Hablando en porcentajes, la Ecuación 3.6 quedaría como se muestra en la Ecuación 3.7, y si sustituimos la información de la distribución de probabilidad de café bueno, entonces queda como la Ecuación 3.8.

$$1 = \text{bueno} + \text{paja} + \text{quebrado} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.7}$$

$$1 = \text{triangular}(a = 0.9881, b = 0.9863, c = 0.9903) \\ + \text{lognormal}(\mu = 0.0091, \sigma = 0.0008) + \text{paja} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.8}$$

Por lo que, realizando un despeje se puede obtener la fórmula de la paja, tal como lo representa la Ecuación 3.9.

$$\text{paja} = 1 - \text{triangular}(a = 0.9881, b = 0.9863, c = 0.9903) \\ - \text{lognormal}(\mu = 0.0091, \sigma = 0.0008) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.9}$$

3.2.4.3.2.4 Clasificadora de zarandas (M5)

La clasificadora de zarandas presenta 4 salidas: café bueno, que pasa a la siguiente máquina, o en su defecto, sale del sistema como producto final a vender; la granza, el polvo y el café bola que abandonan el sistema definitivamente como desperdicio.

Esta máquina presenta dos comportamientos diferentes: cuando se trata del proceso de granza; y cuando es el proceso de granza-mecánicas-electrónicas y granza-mecánicas.

3.2.4.3.2.4.1 Granza

Se realizaron 10 muestras durante 20 segundos de cada una de las salidas de la máquina. Se procedió a calcular los porcentajes de salida o rendimiento de granza. Entonces, introduciendo los valores obtenidos en el complemento *DataFit*, se encuentra que el café bueno se comporta con una distribución de probabilidad triangular con valor modal de 0.7656, valor mínimo de 0.72 y valor máximo de 0.79.

La granza se puede definir por medio de una distribución normal con media de 0.004 y desviación estándar de 0.0005.

El polvo presenta una distribución log-normal, con media de 0.2239 y desviación estándar de 0.01885.

Finalmente, para determinar el café bola, se sigue la regla de la conservación de la materia que se describe en la Ecuación 3.1, quedando como se muestra en la Ecuación 3.10

$$\text{entradas} = \text{bueno} + \text{granza} + \text{polvo} + \text{bola} \quad \dots\dots \text{Ecuación 3.10}$$

Hablando en porcentajes, la Ecuación 3.10 quedaría como se muestra en la Ecuación 3.11, y si sustituimos la información de las distribuciones de probabilidad obtenidas, entonces queda como la Ecuación 3.12.

$$1 = \text{bueno} + \text{granza} + \text{polvo} + \text{bola} \quad \dots\dots \text{Ecuación 3.11}$$

$$\begin{aligned} 1 &= \text{triangular}(a = 0.7656, b = 0.72, c = 0.79) \\ &+ \text{normal}(\mu = 0.004, \sigma = 0.0005) + \text{lognormal}(\mu \\ &= 0.2239, \sigma = 0.01885) + \text{bola} \quad \dots\dots \text{Ecuación 3.12} \end{aligned}$$

Por lo que, realizando un despeje se puede obtener la fórmula del café bola, tal como lo representa la Ecuación 3.13 .

$$\begin{aligned} \text{bola} &= 1 - \text{triangular}(a = 0.7656, b = 0.72, c = 0.79) \\ &- \text{normal}(\mu = 0.004, \sigma = 0.0005) \\ &- \text{lognormal}(\mu = 0.2239, \sigma = 0.01885) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.13} \end{aligned}$$

3.2.4.3.2.4.2 Granza-mecánicas-electrónicas y granza-mecánicas

Se realizaron 10 muestras de 20 segundos por cada una de las salidas de esta máquina. De acuerdo con los porcentajes de cada una de las salidas de la máquina, se obtuvieron las distribuciones de probabilidad que describen su comportamiento.

El café bueno se puede describir a través de una distribución log-normal, con media de 0.9896 y desviación estándar de 0.011.

La granza se comporta de acuerdo con una distribución log-normal, con media de 0.013 y desviación estándar de 0.0056.

El polvo tiene una distribución uniforme, con valor mínimo de 0.0017 y valor máximo de 0.0027.

Por último, al igual que en el apartado anterior, se calcular la cantidad de café bola que saldrá del sistema, mediante la Ecuación 3.14 que parte de la Ecuación 3.1.

$$\text{entradas} = \text{bueno} + \text{granza} + \text{polvo} + \text{bola} \quad \dots\dots \text{Ecuación 3.14}$$

Hablando en porcentajes, la Ecuación 3.14 quedaría como se muestra en la Ecuación 3.15, y si sustituimos la información de las distribuciones de probabilidad obtenidas, entonces queda como la Ecuación 3.16.

$$1 = \text{bueno} + \text{granza} + \text{polvo} + \text{bola} \quad \dots\dots \text{Ecuación 3.15}$$

$$\begin{aligned} &1 = \text{lognormal}(\mu = 0.9896, \sigma = 0.011) \\ &+ \text{lognormal}(\mu = 0.013, \sigma = 0.0056) \\ &+ \text{uniforme}(a = 0.0017, \sigma = 0.0027) + \text{bola} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.16} \end{aligned}$$

Por lo que, realizando un despeje se puede obtener la fórmula del café bola, tal como lo representa la Ecuación 3.17.

$$\begin{aligned} \text{bola} &= 1 - \text{lognormal}(\mu = 0.9896, \sigma = 0.011) \\ &- \text{lognormal}(\mu = 0.013, \sigma = 0.0056) \\ &- \text{uniforme}(a = 0.0017, \sigma = 0.0027) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.17} \end{aligned}$$

3.2.4.3.2.5 Densimétrica u Oliver (M6, M7 y M8)

La máquina Oliver presenta un mecanismo de funcionamiento particular, a priori, tiene 3 salidas, una de café bueno que sale del sistema como producto final; otra de café mancha que sale del sistema como desperdicio; y una última que contiene café que se vuelve a reingresar a

la máquina para ser procesado de nuevo, superándose únicamente en café bueno y café mancha.

En este caso se distinguen dos comportamientos de ésta máquina, el primero se dará con los procesos granza-mecánica-electrónica y granza-mecánica; y el segundo proceso es el de mecánicas y mecánicas-electrónicas.

3.2.4.3.2.5.1 Granza-mecánica-electrónica y granza-mecánica

Para este proceso en primer lugar se mide la cantidad de café que sale de cada una de las tres salidas, por lo que se realiza 10 muestras durante un lapso de 20 segundos para conocer los rendimientos. Conforme las cantidades obtenidas, se calcula la distribución de probabilidad en cada una de las salidas.

El café bueno se comporta con una distribución normal con media de 0.4642 y desviación estándar de 0.0039.

El café que reingresa tiene una distribución triangular con valor modal de 0.5007, valor mínimo de 0.49 y valor máximo de 0.51.

Entonces, en base a la Ecuación 3.1, el café mancha se calcula a partir de la Ecuación 3.18.

$$\text{entradas} = \text{bueno} + \text{regreso} + \text{mancha} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.18}$$

Hablando en porcentajes, la Ecuación 3.18 quedaría como se muestra en la Ecuación 3.19, y si sustituimos la información de las distribuciones de probabilidad obtenidas, entonces queda como la Ecuación 3.20:

$$1 = \text{bueno} + \text{regreso} + \text{mancha} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.19}$$

$$\begin{aligned}
 &1 = normal(\mu = 0.4642, \sigma = 0.0039) \\
 &+ triangular(a = 0.5007, b = 0.49, c = 0.51) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.20} \\
 &+ mancha
 \end{aligned}$$

Por lo que, realizando un despeje se puede obtener la fórmula del café mancha, tal como lo representa la Ecuación 3.21:

$$\begin{aligned}
 mancha &= 1 - normal(\mu = 0.4642, \sigma = 0.0039) \\
 &- triangular(a = 0.5007, b = 0.49, c = 0.51) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.21}
 \end{aligned}$$

Para el reingreso del grano a la máquina densimétrica se tienen únicamente dos salidas, la primera como café bueno y la segunda como café mancha.

El café de regreso que saldrá como bueno (R_bueno), se comporta de acuerdo con una distribución normal con media de 0.93 y desviación estándar de 0.0038.

El café de regreso que saldrá como mancha (R_mancha) quedaría como lo muestra la Ecuación 3.22:

$$R_{mancha} = 1 - normal(\mu = 0.93, \sigma = 0.0038) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.22}$$

3.2.4.3.2.5.2 Mecánicas y mecánicas-electrónicas

Cuando se trate de estos dos tipos de procesos, se debe tomar en cuenta el nivel de mancha al que se desea rebajar el café, es decir, el porcentaje de mancha que posee el café actualmente y el porcentaje de mancha que se desea obtener.

En base a los porcentajes, se obtiene la distribución de probabilidad para el regreso únicamente, el cual será descrito por una distribución triangular con valor modal de 0.38, valor mínimo de 0.36 y valor máximo de 0.40.

Cabe aclarar que la distribución del café de regreso que saldrá como bueno (R_{bueno}) y el café de regreso que saldrá como mancha (R_{mancha}), se comportan de la misma manera que el apartado anterior, quedando como la Ecuación 3.23 y Ecuación 3.24 respectivamente:

$$R_{bueno} = normal(\mu = 0.93, \sigma = 0.0038) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.23}$$

$$R_{mancha} = 1 - normal(\mu = 0.93, \sigma = 0.0038) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.24}$$

Ahora bien, como en este proceso está incluida la variable de la mancha, se verifica que existiera correlación entre la cantidad de mancha a reducir y la cantidad de café mancha que sale del sistema.

Para calcular el índice de correlación se realiza en primera instancia la Tabla 3.1, en donde la columna 2 se obtiene mediante la diferencia de la mancha inicial y la mancha final, la columna 3 se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 3.25:

$$Mancha_{total} = Mancha + (Regreso * R_{mancha}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.25}$$

Tabla 3.1 Tabla de correlación de la máquina Densimétrica (Hernández González, 2017).

| Observación | Mancha inicial – Mancha final (X) | Mancha Total (Y) | X ² | XY | Yi ² |
|-------------|--------------------------------------|---------------------|----------------|-----------|-----------------|
| 1 | 5 | 0.05291 | 25 | 0.264536 | 0.002799 |
| 2 | 5 | 0.05000 | 25 | 0.250000 | 0.002500 |
| 3 | 20 | 0.15648 | 400 | 3.129603 | 0.024486 |
| 4 | 30 | 0.35381 | 900 | 10.614338 | 0.125182 |
| 5 | 5 | 0.05172 | 25 | 0.258621 | 0.002675 |
| 6 | 5 | 0.02729 | 25 | 0.136458 | 0.000745 |
| 7 | 10 | 0.03090 | 100 | 0.308977 | 0.000955 |
| Totales | 80 | 0.72311209 | 1500 | 14.962532 | 0.159343 |
| Promedios | 11.4285714 | 0.10330173 | | | |

Se procede a obtener los valores necesarios para calcular el coeficiente de correlación, con ayuda de la Ecuación 3.26 a la Ecuación 3.30:

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{\sum x^2}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.26}$$

$$S_{xx} = 585.714286$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{\sum y^2}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.27}$$

$$S_{yy} = 0.0846437$$

$$S_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.28}$$

$$S_{xy} = 6.69839428$$

$$B_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.29}$$

$$B_1 = 0.0114$$

$$B_0 = \bar{y} - B_1\bar{x} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.30}$$

$$B_0 = -0.0274$$

Por lo que el modelo de correlación quedaría como la Ecuación 3.31:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1X_i \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.31}$$

$$\hat{Y} = -0.0274 + 0.0114X_i$$

Ahora se prosigue a calcular el coeficiente de determinación, lo cual es una diferencia respecto al cálculo en regresión lineal, llevando a cabo el desarrollo de la Ecuación 3.32, se tiene que como r^2 es cercano a 1, el modelo de correlación se considera bueno

$$r^2 = \frac{\hat{\beta}_1 - S_{XY}}{S_{YY}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.32}$$

$$r^2 = \frac{0.0114 - 6.6983}{0.08464}$$

$$r^2 = 0.90502$$

Por último, se realiza una prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95%, para probar si el coeficiente de correlación es lo suficientemente grande para afirmar que existe correlación entre los valores de X y Y.

Las hipótesis planteadas son:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se calcula el estadístico de prueba a partir de la Ecuación 3.33:

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.33}$$

$$t_0 = \frac{0.95132\sqrt{7-2}}{\sqrt{1-0.90502}}$$

$$t_0 = 6.90256$$

La zona crítica se encuentra estipulada por la Ecuación 3.34:

$$|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.34}$$

Posterior a realizar los cálculos pertinentes, la zona crítica queda bajo la Ecuación 3.35:

$$|6.90256| > 2.57058 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.35}$$

$$6.90256 > 2.57058$$

Se concluye que la condición se cumple, por lo tanto, se rechaza H_0 y se demuestra que existe correlación entre el porcentaje de mancha reducido y la cantidad de mancha que sale de la máquina.

Teniendo en cuenta la existencia de correlación entre el porcentaje de mancha y la cantidad de mancha que abandona el sistema, se procede a calcular una fórmula que describa su comportamiento.

En primer lugar, se busca, para cada muestra, una cantidad que multiplicada por la diferencia de los porcentajes de mancha, de cómo resultados el porcentaje de café mancha que abandona la máquina.

La cantidad determinada se analiza con el complemento *DataFit*, encontrando que se comporta de manera normal, con media de 0.0056 y desviación estándar de 0.007.

Por lo que el comportamiento de la mancha se podrá calcular con la Ecuación 3.36:

$$Mancha = (Mancha_{inicio} - Mancha_{fin}) * [normal(\mu = 0.0056, \sigma = 0.007)] - Regreso * R_m \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.36}$$

Finalmente, la cantidad de café bueno se expresa de la siguiente manera, en la Ecuación 3.37:

$$Bueno = 1 - Regreso - Mancha \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.37}$$

3.2.4.3.2.6 Electrónicas (M9, M10 y M11)

Las máquinas electrónicas sólo presentan dos salidas: la primera consiste en café bueno que sale del sistema como producto final a vender; y la segunda es el café mancha, que abandona el sistema como desperdicio.

Para este tipo de máquinas se distinguen dos comportamientos distintos: el primero con los procesos electrónicas y mecánicas-electrónicas; y el segundo comportamiento es el proceso grana-mecánica-electrónica.

3.2.4.3.2.6.1 Electrónicas y mecánicas-electrónicas

Se tomaron en cuenta 15 procesamientos que se obtuvieron del registro histórico de la empresa. El paso siguiente consiste en saber si existe correlación alguna entre la cantidad de café mancha que abandona el sistema y el porcentaje de mancha que se redujo, por lo que se procede a calcular el índice de correlación con ayuda de la Tabla 3.2, donde la variable X es la diferencia del porcentaje de mancha inicial y el porcentaje de mancha final, y la variable Y es el porcentaje de mancha de cada una de las observaciones.

Tabla 3.2 Datos de correlaciones en los procesos electrónicas y mecánicas-electrónicas (Hernández González, 2017).

| Observación | Mancha inicial – Mancha final | Mancha Total (Y) | X^2 | XY | Y_i^2 |
|-------------|-------------------------------|------------------|-------|-----------|----------|
| 1 | 10 | 0.06589 | 100 | 0.658921 | 0.004342 |
| 2 | 7 | 0.05212 | 49 | 0.364865 | 0.002717 |
| 3 | 25 | 0.10654 | 625 | 2.663438 | 0.011350 |
| 4 | 8 | 0.04815 | 64 | 0.385176 | 0.002318 |
| 5 | 15 | 0.08004 | 225 | 1.200534 | 0.006406 |
| 6 | 15 | 0.10875 | 225 | 1.631235 | 0.011826 |
| 7 | 20 | 0.14251 | 400 | 2.850200 | 0.020309 |
| 8 | 10 | 0.01849 | 100 | 0.184852 | 0.000342 |
| 9 | 10 | 0.02582 | 100 | 0.258206 | 0.000667 |
| 10 | 10 | 0.04752 | 100 | 0.475234 | 0.002258 |
| 11 | 5 | 0.00326 | 25 | 0.016287 | 0.000011 |
| 12 | 5 | 0.01043 | 25 | 0.052137 | 0.000109 |
| 13 | 75 | 0.47541 | 5625 | 35.655738 | 0.226015 |
| 14 | 10 | 0.02245 | 100 | 0.224517 | 0.000504 |
| 15 | 10 | 0.11245 | 100 | 1.124498 | 0.012645 |
| Totales | 235 | 1.31982005 | 7863 | 47.745838 | 0.301818 |
| Promedios | 15.666667 | 0.087988 | | | |

Se procede a obtener los valores necesarios para calcular el coeficiente de correlación, con ayuda de la Ecuación 3.38 a la Ecuación 3.42:

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{\sum x^2}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.38}$$

$$S_{xx} = 4181.3333$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{\sum y^2}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.39}$$

$$S_{yy} = 0.18568959$$

$$S_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.40}$$

$$S_{xy} = 27.06865$$

$$B_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.41}$$

$$B_1 = 0.0065$$

$$B_0 = \bar{y} - B_1\bar{x} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.42}$$

$$B_0 = -0.0134$$

Por lo que el modelo de correlación quedaría conforme la Ecuación 3.43:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1X_i \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.43}$$

$$\hat{Y} = -0.0134 + 0.0065X_i$$

Ahora se prosigue a calcular el coeficiente de determinación, lo cual es una diferencia respecto al cálculo en regresión lineal, llevando a cabo el desarrollo de la Ecuación 3.44, se tiene que como r^2 es cercano a 1, el modelo de correlación se considera bueno

$$r^2 = \frac{\hat{\beta}_1 - S_{XY}}{S_{YY}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.44}$$

$$r^2 = \frac{0.0065 - 27.0686}{0.1856}$$

$$r^2 = 0.94369$$

Por último, se realiza una prueba de hipótesis, con un nivel de confianza del 95%, para probar si el coeficiente de correlación es lo suficientemente grande para afirmar que existe correlación entre los valores de X y Y.

Las hipótesis planteadas son:

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0$$

Se calcula el estadístico de prueba a partir de la Ecuación 3.45:

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.45}$$

$$t_0 = \frac{0.97143\sqrt{15-2}}{\sqrt{1-0.94369}}$$

$$t_0 = 14.76075$$

La zona crítica se encuentra estipulada por la Ecuación 3.46:

$$|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.46}$$

Posterior a realizar los cálculos pertinentes, la zona crítica queda bajo la Ecuación 3.47:

$$|14.76075| > 2.57058 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.47}$$

$$14.7607 > 2.57058$$

Se concluye que la condición se cumple, por lo tanto, se rechaza H_0 y se demuestra que existe correlación entre el porcentaje de mancha reducido y la cantidad de mancha que sale de la máquina.

Entonces, al saber que si existe correlación entre ambas variables, se prosigue a encontrar un valor que multiplicado por cada una de los porcentajes de mancha reducidos, dé como resultado el porcentaje de café mancha.

De acuerdo con la cantidad determinada y el análisis en el complemento *DataFit*, se obtiene la distribución de probabilidad que consiste en una distribución gamma con α de 2.6 y β e 0.0019.

Por lo tanto, la cantidad de café mancha que abandona la máquina estará dada por la Ecuación 3.48:

$$Mancha = (Mancha_{inicio} - Mancha_{fin}) * [gamma(\alpha = 2.6, \beta = 0.0019)] \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.48}$$

Entonces, el café bueno estará definido por la Ecuación 3.49:

$$Bueno = 1 - Mancha \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.49}$$

3.2.4.3.2.7 Granza-mecánica-electrónica

Para este proceso se realizaron 10 muestras, recolectando las cantidades de café que salen por la máquina, durante 2 segundos. Se procede a continuación, a determinar los porcentajes de cada salida.

El café mancha, de acuerdo con el complemento *DataFit*, se comporta de acuerdo a una distribución gamma con α de 4 y β e 0.016.

El café bueno se calcula en base a la ley de conservación de la materia representada en la Ecuación 3.1, quedando la fórmula como se muestra en la Ecuación 3.50:

$$Bueno = 1 - Mancha \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.50}$$

Posteriormente se realiza el despeje correspondiente, quedando la Ecuación 3.51:

$$Bueno = 1 - \text{gamma}(\alpha = 4, \beta = 0.016) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.51}$$

3.2.4.3.3 Obtención de los tiempos de la maquinaria y equipo

Se procede a determinar los cálculos correspondientes al tiempo de proceso de maquinaria y equipo.

Tabla 3.3 Tiempos de la maquinaria y equipo (Hernández González, 2017).

| Máquina | Tiempo de operación (distribución triangular (moda, mínimo, máximo) en segundos) |
|---------------------------|---|
| Prelimpia | 6.3, 5.8, 6.9 |
| Morteadora | 9.3, 9.0, 10.1 |
| Catadoras | 7.6, 6.4, 8.2 |
| Clasificadora de zarandas | 8.1, 7.7, 9.7 |
| Densimétricas | 7.3, 5.4, 9.6 |
| Electrónicas | 12.7, 11.5, 14.2 |
| Elevadores | 6.4 |
| Dragas | 3.0 |

A causa de la dificultad para obtener datos directamente de la maquinaria por el flujo continuo de material, se recurre a la experiencia y conocimiento de los trabajadores., quedando modelados todos los tiempos de manera triangular dados por cada kilogramo de café procesado. Los tiempos modelados se establecen en segundos y se muestran en la Tabla 3.3 como una distribución triangular. En el caso del equipo (elevadores y dragas), el tiempo es fijo y permanecen constantes.

3.2.4.3.4 Variables clave del sistema

Conforme la producción de la empresa, se presenta en la Tabla 3.4, en donde se muestra la totalidad de los procesos existentes con la respectiva nomenclatura que se empleará en la construcción del modelo propuesto, a excepción del proceso número 10 que actualmente no se emplea en la empresa.

Tabla 3.4 Total de procesos productivos con nomenclatura (Hernández González, 2017).

| No. | Proceso | Nomenclatura para el modelo |
|-----|--|-----------------------------|
| 1 | Granza con secadora | GranzaCon |
| 2 | Granza sin secadora | GranzaSin |
| 3 | Mecánicas | Mecánicas |
| 4 | Electrónicas | Electrónicas |
| 5 | Granza-mecánicas con secadora | GranMecCon |
| 6 | Granza-mecánicas sin secadora | GranMecSin |
| 7 | Granza-electrónicas con secadora | GranzaElectrónicasCon |
| 8 | Granza-electrónicas sin secadora | GranzaElectronicasSin |
| 9 | Mecánicas-electrónicas | MecElect |
| 10 | Granza-mecánicas-electrónicas con secadora | GranMecElectCon |
| 11 | Granza-mecánicas-electrónicas sin secadora | GranMecElectSin |

Al analizar el proceso de la empresa con sus respectivos tiempos, entradas y salidas, se detectan variables clave para el funcionamiento del modelo de simulación con enfoque de agentes, principalmente en el modelado del beneficio seco como un modelo de eventos discretos.

En la Tabla 3.5 se detalla las variables detectadas a lo largo de la cadena de suministro del café, particularmente en la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., junto con su respectiva descripción.

Tabla 3.5 Variables detectadas en la cadena de suministro del café (Hernández González, 2017).

| Eslabón | Variable clave | Descripción |
|-------------------|------------------------------|--|
| Proveedor | Rendimiento por hectárea | Cantidad de toneladas por hectárea cultivada de café, ya sea en cultivos internos o externos de la empresa |
| | Calidad de entrada del grano | Nivel de mancha y desperfectos que puede tener el café antes de entrar a la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. |
| Empresa | Calidad de salida del grano | Nivel de mancha y desperfectos que puede tener el café después de ser procesado en la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. |
| | Paja de Morteadora | Basura inherente |
| | Café bueno Morteadora | Café que cumple las especificaciones de la máquina |
| | Paja Catadora | Basura inherente en los lotes de café |
| | Quebrado Catadora | Café que presenta desperfectos leves y graves |
| | Café bueno Catadora | Café que cumple las especificaciones de la máquina |
| | Granza Zarandas | |
| | Polvo Zarandas | Cantidad de partículas diminutas contenidas en los granos de café en el proceso productivo |
| | Café Bola Zarandas | Café tipo esférico que no cumple con las especificaciones del cliente en el proceso productivo |
| | Café Bueno Zarandas | Cantidad de café que cumple las especificaciones del cliente y de la máquina en el proceso productivo |
| | Café Bueno Oliver | Cantidad de café que cumple con las especificaciones de la máquina y el cliente en el proceso productivo |
| | Café Mancha Oliver | Cantidad de Café con decoloraciones visibles |
| | Reproceso Oliver | Cantidad de café que no cumple con las especificaciones de los clientes y tiene que volverse a procesar |
| | Cliente | Ordenes enviadas |
| Ordenes generadas | | Cantidad de pedidos que realizan los clientes |

3.2.4.3.5 Construcción del modelo en software

El modelo de agentes se construye utilizando el software profesional multi-método AnyLogic® en su versión PLE con la intención de representar detallado y fielmente el sistema real en análisis.

3.2.4.3.5.1 Objetos empleados

En este punto se muestra, de manera breve pero concisa, las librerías y los elementos que se utilizaron para la construcción del modelo, así como el detalle de todas sus características. En la Figura 3.10 se presenta una de las librerías empleadas con sus respectivos objetos configurables, en el caso específico se trata de la librería Process Modelling Library.

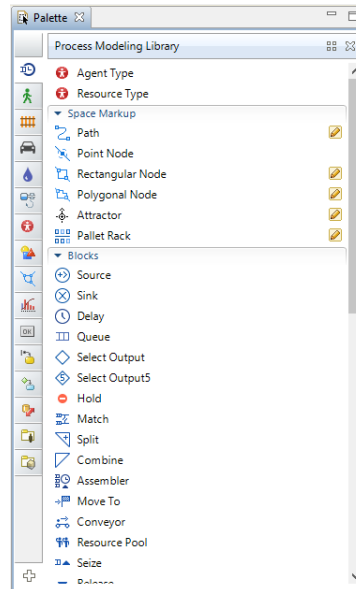


Figura 3.10 Menú de objetos de la sección Process Modelling Library (AnyLogic, 2016).

Se emplean de igual manera en el modelo algunos elementos correspondientes a la librería Agent, que se muestra el despliegue de objetos en la Figura 3.11.

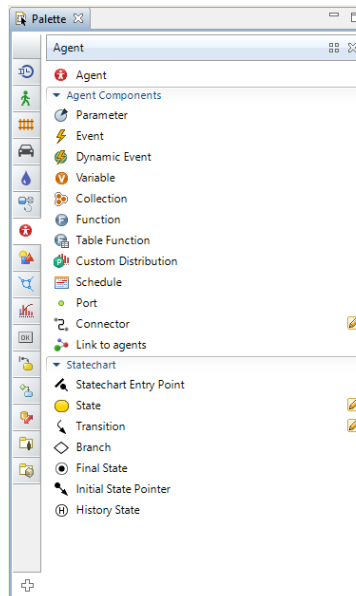


Figura 3.11 Menú de objetos de la sección Agent (AnyLogic, 2016).

Para el ingreso de datos y control del modelo durante su ejecución se utilizan elementos de la librería Controls, mostrando el despliegue de objetos existentes en la Figura 3.12.

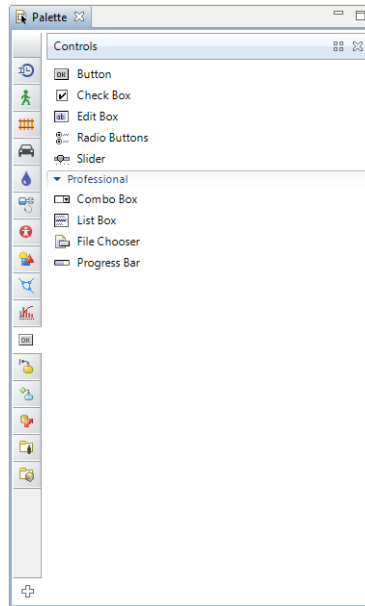


Figura 3.12 Menú de objetos de la sección Controls (AnyLogic, 2016).

Para abordar algunos detalles gráficos se emplean elementos mostrados en la Figura 3.13 que corresponde a la librería 3D objects.

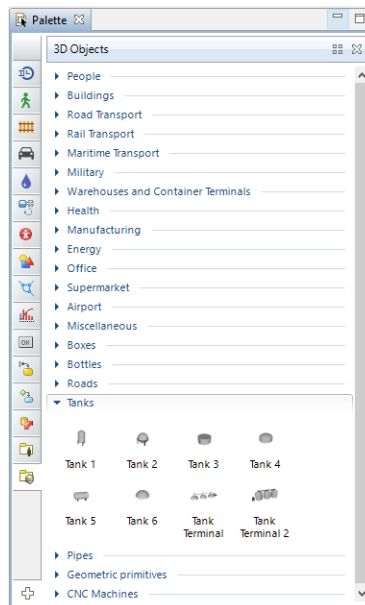


Figura 3.13 Menú de objetos de la sección 3D Objects (AnyLogic, 2016).

Para mostrar gráficas y distribuciones del comportamiento de máquinas y tiempo se emplearon algunos de los elementos mostrados en la Figura 3.14 que corresponde a la librería Analysis.

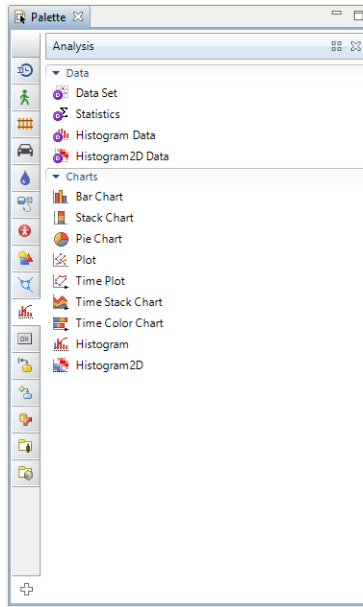


Figura 3.14 Menú de objetos de la sección Analysis (AnyLogic, 2016).

Para mostrar localizaciones de manera geográfica de clientes y empresa, se emplearon elementos de la Figura 3.15, que corresponde a la librería Space Markup

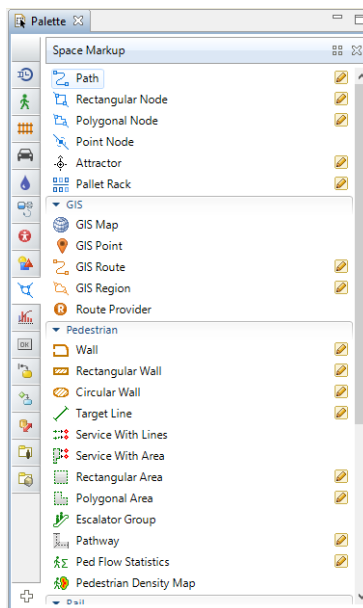


Figura 3.15 Menú de objetos de la sección Space Markup (AnyLogic, 2016).

Para el control de la navegación durante la simulación y mostrar tanto imágenes como texto, se emplean elementos la Figura 3.16, que corresponde a la librería Presentation.

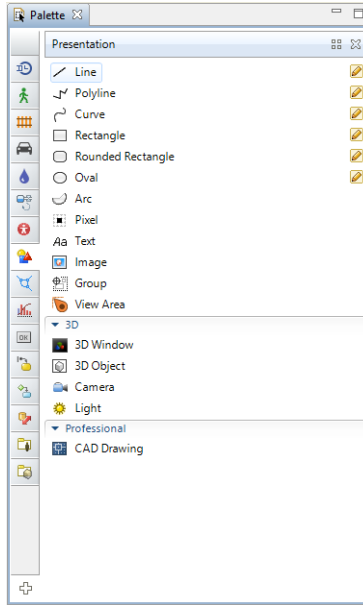


Figura 3.16 Menú de objetos de la sección Presentation (AnyLogic, 2016).

En la Tabla 3.6 se indican en específico los objetos utilizados para el desarrollo del modelo híbrido de la empresa dentro de la plataforma de software AnyLogic®, indicando la cantidad y la función que representan del sistema.

Tabla 3.6 Objetos del modelo de simulación (Hernández González, 2017) con información de AnyLogic®.

| Objeto | Cantidad | Descripción | Librería |
|------------|----------|--|----------|
| Agent Main | 1 | Es el agente principal que contiene a la empresa y sirve para 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 | 1 | Agente es una unidad de diseño de modelo que puede tener comportamiento, memoria (historia), tiempo, contactos, etc. Dentro de un agente se puede definir variables, eventos, diagramas de estado. El modelo con enfoque de agentes tiene seis agentes de tipo consulta con motor de inferencia y dos agentes móviles que emulan el tipo de café | Agent |
| Parameter | 73 | Los parámetros se utilizan con frecuencia para representar algunas características del objeto modelado. Se emplean | Agent |

| | | | |
|-----------------|-----|---|-------------------|
| | | principalmente para capturar los valores ingresados por el usuario y regularmente son constantes durante la simulación. | |
| Funtion | 1 | Una función define el comportamiento del modelo de acuerdo con parámetros establecidos. | Agent |
| Variable | 181 | Una variable representa un estado del modelo, y puede cambiar durante la simulación, pudiendo ser variables locales o globales. | Agent |
| Connector | 150 | Sirve para unir objetos del modelo, teniendo en cuenta que no ocupan tiempo ni distancia. | Agent |
| Source | 2 | Realizan la introducción del agente de tipo al modelo de simulación, en este caso, café pergamino y robusto. Marcan el inicio de cada uno de los procesos, siendo estos: la secadora, la granza, las mecánicas y las electrónicas. | Modelling process |
| Sink | 13 | Este objeto se encarga de retirar los agentes tipo del modelo, siendo café en diferentes modalidades. En este modelo, no sólo indican el fin de cada uno de los procesos, sino que además también se encarga de sacar del sistema todo el café que resulta como desperdicio, de cada una de las máquinas. | Modelling process |
| Delay | 16 | Representa estaciones de trabajo que procesan agentes en un tiempo establecido. En el modelo, simula el comportamiento de la secadora, y todas las máquinas M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11 y ProcesoMezcla. | Modelling process |
| Queue | 33 | Es una cola (un búfer) de agentes que esperan ser aceptados por el siguiente objeto en el flujo del proceso, o un almacenamiento de propósito general para los agentes. | Modelling process |
| Conveyor | 31 | Indican a una banda transportadora. En el modelo fue utilizada para simular a los elevadores y a las dragas, de longitud y velocidad variada. | Modelling process |
| Select OutputIn | 19 | SelectOutputIn debe configurarse para encaminar agentes a los bloques "SelectOutputOut" conectados dependiendo de las probabilidades o parámetros. En el modelo se | Modelling process |

| | | | |
|-------------------|----|--|-------------------|
| | | utilizan para direccionar el café a las diferentes salidas de cada máquina. | |
| Select OutputOut | 57 | Los bloques SelectOutputOut deben referirse a SelectOutputIn en sus parámetros. | Modelling process |
| Select Output | 3 | Ruta los agentes entrantes a uno de los dos puertos de salida dependiendo de la condición (probabilística o determinista). La condición puede depender del agente, así como de cualquier factor externo. En el modelo se emplea el objeto para permitir que el café continúe al siguiente gran proceso (granza, mecánicas o electrónicas), de acuerdo con la recomendación del agente. | Modelling process |
| Hold | 5 | Puede bloquear el flujo del agente a lo largo de una conexión en particular. En el modelo se emplean para bloquear el flujo de café entre los grandes procesos (granza, mecánicas o electrónicas). | Modelling process |
| TimeMeasure Start | 1 | Este objeto recuerda el tiempo cuando una entidad lo atraviesa. Más adelante, cuando la entidad pasa por uno de los objetos TimeMeasureEnd correspondientes, se mide el tiempo que la entidad ha pasado entre estos dos objetos "marcadores". | Modelling process |
| TimeMeasure End | 4 | TimeMeasureEnd así como TimeMeasureStart componen un par de objetos que miden el tiempo que las entidades pasan entre ellos (puntos dados en un diagrama de flujo), como "tiempo en el sistema", "duración de la estancia", etc. | Modelling process |
| Edit box | 44 | El cuadro de edición es un control de texto básico que permite al usuario escribir una pequeña cantidad de texto. Los cuadros de edición se utilizan comúnmente para modificar valores de variables y parámetros en el modelo de tiempo de ejecución. Ocupándose en el modelo para ingresar valores inciertos de los módulos de lógica difusa propuestos. | Controls |
| Radio buttons | 2 | Los botones de radio son grupos de botones en los que sólo se puede seleccionar un botón a la vez. En el modelo se utilizan para la selección del proceso que seguirá el | Controls |

| | | | |
|-----------|----|---|--------------|
| | | café de acuerdo con la recomendación de los modelos de lógica difusa propuestos. | |
| Button | 8 | Control que se utiliza comúnmente para permitir al usuario influir de forma interactiva en el modelo. Puede definir alguna acción específica (en la propiedad Acción del botón) que se realizará cada vez que el usuario haga clic en el botón en el tiempo de ejecución del modelo. Se emplearon algunos para entablar comunicación con los modelos de lógica difusa propuestos y generar el enfoque de agentes. | Controls |
| View area | 9 | Se pueden marcar algunas áreas en particular en el diagrama de presentación y con ello navegar por el área del modelo. | Presentation |
| Text | 98 | Es una forma de presentación de texto, puede colocar etiquetas con algunos comentarios o descripciones en el diagrama de presentación. | Presentation |
| Bar chart | 1 | El gráfico de barras muestra una serie de elementos de datos como barras alineadas en un extremo, cuyos tamaños son proporcionales a los valores de los datos del elemento correspondiente. | Analysis |
| Time plot | 1 | El gráfico de tiempo muestra la historia de varios elementos de datos durante el último horizonte de tiempo como líneas. El eje de tiempo es siempre horizontal y dirigido a la derecha. | Analysis |
| Histogram | 1 | El histograma visualiza las estadísticas recopiladas por una serie de datos de objetos. El eje X siempre se escala para ajustarse a todos los rangos de datos del histograma. | Analysis |

3.2.4.3.5.2 Comportamiento del modelo

Las variables son objetos que se emplean para el control y ejecución de ciertas actividades que son programas a través de la sección *Action* de cada elemento configurable del software, como se puede ver en la Figura 3.17 un ejemplo de la programación.

```

Action

if (ProcesoARealizarPer!="0") {
EntradaPergamino.inject(CantidadCaféP:
getEngine().run();
getPresentation().refresh();
}else{
EntradaRobusto.inject(CantidadCaféPro:
getEngine().run();
getPresentation().refresh();
}

if (radio.getValue()==1)
HoldMecánicas.block();
else
if (radio.getValue()==2)
HoldMecánicas.block();
if (radio.getValue()==10)
HoldMecánicas.block();
}
    
```

Figura 3.17 Ejemplo de programación para el comportamiento de elementos (Hernández González, 2017)

La programación de acciones, enlaces de comunicación, y comportamientos del modelo se realiza mediante programación en lenguaje Java, propio de AnyLogic®. En la elaboración del modelo se emplearon 181 variables, 73 parámetros y 6 agentes que fueron programados en 49 secciones *Action* de elementos.

En la Figura 3.18 se muestran algunas de las variables presentes en el modelo de simulación, que en la mayoría de los casos, las variables representan la cantidad de elementos que entran a cada una de las máquinas; la masa total en kilogramos de café que pasa por cada máquina, para cada variedad (bueno, mancha, granza, polvo, etc.); y los porcentajes de rendimiento de las máquinas, es decir, el porcentaje de café bueno, café malo y otras variedades que procese cada tipo de máquina.

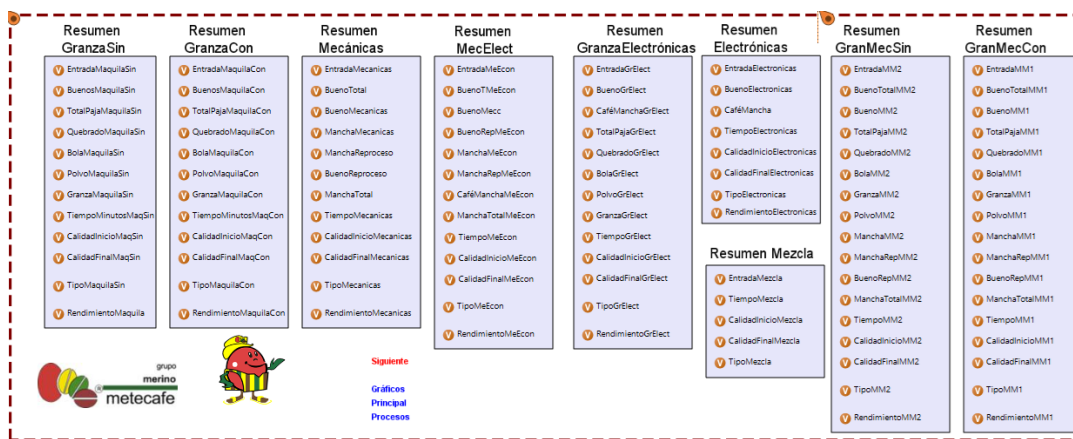


Figura 3.18. Variables de la sección de Resumen de resultados del modelo propuesto (Hernández González, 2017)

3.2.4.3.5.3 Modelo final

Finalmente, el modelo de simulación queda como se muestra en la Figura 3.19, en donde el usuario puede monitorear la ruta desde el inicio hasta el final del proceso productivo. Cabe mencionar que la imagen se muestra desde una macro perspectiva, notándose algunos elementos gráficos de análisis.

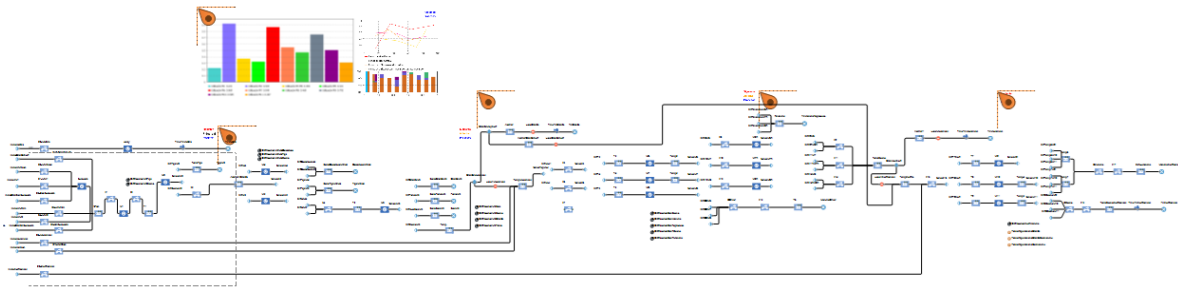


Figura 3.19. Modelo de simulación final de la empresa (Hernández González, 2017)

3.2.4.3.5.4 Verificación y validación del modelo

En esta etapa se procede a verificar que el modelo corre realmente de acuerdo con la lógica para el cual fue elaborado, es decir, sigue el movimiento de la elaboración del café en el beneficio seco. De acuerdo con la verificación visual y al análisis parte por parte de cada uno de los elementos que conforman al modelo, se comprueba un correcto funcionamiento. Además del citado análisis, se realizó una inspección en el cambio de las variables, donde se pudo constatar que cambiaban de acuerdo con el flujo de materiales (café) a lo largo del modelo, realizando las operaciones tal cual deben realizarse.

Finalmente se comprueba el comportamiento del modelo mediante datos históricos proporcionados por un estudio realizado con anterioridad en la empresa, comprobando una vez más el funcionamiento adecuado de los procesos.

3.2.4.3.5.4.1 Validación del modelo de simulación

La utilidad de un modelo de simulación radicará en la importancia y utilidad de los resultados y datos que arroje. Es por eso por lo que se debe realizar una validación del modelo de simulación.

La validación consiste en verificar que los datos que arroje el modelo de simulación sean estadísticamente iguales que lo del sistema real, con lo cual se puede aceptar la utilización del modelo para el análisis del sistema. Cabe mencionar que la validación del modelo de simulación se logró mediante la prueba de la t-apareada.

3.2.4.3.5.4.2 Aplicación de la prueba t-apareada al modelo de simulación

Se realizó la prueba t-apareada para comparar los resultados obtenidos de la simulación y de la experimentación real, tomando como medida de desempeño el café bueno obtenido al final del proceso granza-mecánicas-electrónicas, en dónde se ingresan 37,740 kg de café. Entonces, se tiene:

X_j : La cantidad de café bueno, en kilogramos, del proceso granza-mecánicas-electrónicas, en donde se ingresa 37,740 kg de café, en la realidad.

Y_j : La cantidad de café bueno, en kilogramos, del proceso granza-mecánicas-electrónicas, en donde se ingresa 37,740 kg de café, en el modelo de simulación.

Los resultados de 10 corridas se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Validación del modelo de simulación (Hernández González, 2017).

| Corridas | X_j | Y_j | $Z_j = X_j - Y_j$ | $(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$ |
|----------|-----------|-----------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 27,176.00 | 27,935.05 | -759.05 | 360,735.09 |
| 2 | 27,901.00 | 27,811.70 | 89.30 | 61,373.56 |
| 3 | 27,348.00 | 27,734.25 | -386.25 | 51,899.30 |
| 4 | 28,004.00 | 28,754.03 | -750.03 | 349,980.98 |
| 5 | 27,733.00 | 27,417.09 | 315.91 | 225,007.48 |
| 6 | 27,914.00 | 28,561.69 | -647.69 | 239,364.85 |
| 7 | 27,682.00 | 27,270.03 | 411.97 | 325,361.82 |
| 8 | 28,412.00 | 28,461.21 | -49.21 | 11,929.89 |
| 9 | 27,197.00 | 26,779.30 | 417.70 | 331,930.58 |
| 10 | 27,996.00 | 28,223.02 | -227.02 | 4,703.48 |
| Suma | | | -1,584.36 | 1,962,287.05 |
| Promedio | 27,736.30 | 27,894.74 | -158.44 | |

Ahora, se construye un intervalo de confianza al 95%, el cual se va a obtener, de acuerdo a las fórmulas utilizadas, en primer lugar, se aplica la Ecuación 3.52:

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.52}$$

$$\bar{Z}_{(10)} = -\frac{1,584.36}{10}$$

$$\bar{Z}_{(10)} = -158.43$$

El siguiente paso es calcular $\widehat{Var}[\bar{Z}_{10}]$, con la ayuda de la Ecuación 3.53 descrita a continuación:

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.53}$$

$$\widehat{Var}[\bar{Z}_{10}] = \frac{1,962,287.05}{10(10 - 1)}$$

$$\widehat{Var}[\bar{Z}_{10}] = 21,803.18$$

Inmediatamente, calcular el intervalo de confianza correspondiente, de acuerdo con los datos proporcionados con la Ecuación 3.54:

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\widehat{Var}[\bar{Z}_n]} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.54}$$

$$-158.43 \pm t_{9, 0.975} \sqrt{21,803.18}$$

$$-158.43 \pm 2.26 \sqrt{21,803.18}$$

$$-158.43 \pm 2.26 \sqrt{21,803.18}$$

$$-158.43 \pm 2.26(147.65)$$

$$(-492.46, 175.59)$$

Como se puede observar, el intervalo de confianza incluye al cero, por lo que se puede asegurar, con un índice de confianza del 95% que la diferencia entre las medias de los datos reales y los simulados no es estadísticamente significativa, y que las diferencias existentes pueden ser explicadas por fluctuaciones aleatorias, con lo que se puede aceptar el modelo de simulación elaborado.

3.2.4.3.5.4.3 Diseño de experimentos

Uno de los errores más comunes al utilizar la simulación, es tomar decisiones en base a una sola corrida del modelo, para evitar esto, es necesario calcular el número de corridas óptimo para, tomar decisiones certeramente adecuadas y válidas.

Para determinar el número óptimo de corridas de un modelo de simulación, se utiliza el procedimiento de estimación de la media $\mu = E(x)$ con un error específico, una vez que el modelo ha sido validado. La Tabla 3.8 muestra los resultados de 10 corridas piloto independientes, donde cada corrida es la cantidad de café bueno, en kilogramos, del proceso granza-mecánicas-electrónicas, en donde se ingresa 37,740 kg de café.

Tabla 3.8 Número de replicaciones del modelo de simulación (Hernández González, 2017).

| Replicaciones | Café bueno |
|----------------|-------------|
| 1 | 27,900.2004 |
| 2 | 27,907.4386 |
| 3 | 27,905.3017 |
| 4 | 27,889.3183 |
| 5 | 27,895.6686 |
| 6 | 27,853.6233 |
| 7 | 27,934.5803 |
| 8 | 27,896.9872 |
| 9 | 27,863.0423 |
| 10 | 27,889.3104 |
| Promedio | 27,894.7358 |
| Desv. Estándar | 24.9877 |

Se estimó la cantidad de café promedio que abandona el proceso, en kilogramos, con un error absoluto de $\beta = 15$ kilogramos y un nivel de confianza del 95%.

Los cálculos necesarios para calcular el número de replicaciones se muestran a continuación, aplicando la Ecuación 3.55, donde i es el número de replicaciones, y donde el cálculo realizado debe ser menor o igual al error absoluto ($\beta = 15$ kilogramos):

$$\bar{x}_n = 27,894.73$$

$$S_n^2 = 624.38$$

$$\beta = 15$$

$$\alpha = 0.05$$

$$\min \left\{ i \geq 10: t_{i-1, 0.975} \sqrt{\frac{624.38}{i}} \leq 15 \right\} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.55}$$

$$i = 10: 2.26 \sqrt{\frac{624.38}{10}} = 17.87 \geq 15$$

$$i = 11: 2.22 \sqrt{\frac{624.38}{11}} = 16.78 \geq 15$$

$$i = 12: 2.20 \sqrt{\frac{624.38}{12}} = 15.87 \geq 15$$

$$i = 13: 2.17 \sqrt{\frac{624.38}{13}} = 15.09 \geq 15$$

$$i = 14: 2.16 \sqrt{\frac{624.38}{14}} = 14.42 \leq 15$$

Por lo tanto, el número óptimo de replicaciones es de 14 corridas del modelo. Dadas estas características, se procedió a realizar el análisis con ayuda del complemento *Simulation experiments* de AnyLogic®.

3.2.4.3.5.4.4 Comprobación general

Los resultados que se analizan corresponden a varios procesos diferentes, donde la variable analizada es la salida final de café en cada proceso. La comparación se hizo utilizando los datos históricos de los diferentes procesos y los datos arrojados por el modelo propuesto en sus 14 corridas. Así pues, a priori, el valor que importa es la cantidad de café bueno que abandona el sistema, sin ser de demasiada importancia, el tiempo que se lleva en procesar el grano de café.

Debido a que todos los procesos que se elaboran en la empresa son diferentes (tanto en cantidad como en tipo), no se puede evaluar un único sistema, sino que se deben evaluar varios.

En la Tabla 3.9 se presentan los datos reales y los simulados, para cada uno de los cinco procesos que se llevan a cabo en la empresa, tomando en cuenta la cantidad de café bueno y de mancha, en kilogramos, que abandonan el sistema en su última salida.

Para realizar una comparación más adecuada, se manejan de igual manera los datos en porcentajes, donde se puede observar la diferencia existente entre los datos reales y los simulados, siendo los simulados bastantes cercanos a los reales, por lo tanto, se toma como bueno el modelo para probar escenarios propios de la empresa y mejorar procesos.

Tabla 3.9 Comparación de resultados entre datos reales y simulados (Hernández González, 2017).

| Proceso | Real | | | | | Simulado | | | | |
|-------------------------------|-----------------|----------------------|------------------|-------------------------|--------------------|-----------------|----------------------|------------------|-------------------------|--------------------|
| | Café Bueno (kg) | Total de mancha (kg) | Porcentaje bueno | Porcentaje total mancha | Total general (Kg) | Café Bueno (kg) | Total de mancha (kg) | Porcentaje bueno | Porcentaje total mancha | Total general (Kg) |
| Mecánica-electrónica | 22337 | 2032 | 86.53% | 8.34% | 24369 | 21085.93 | 1854.50 | 91.92% | 8.08% | 22940.4 |
| | 26741 | 2069 | 92.82% | 7.18% | 28810 | 26524.93 | 2285.07 | 92.07% | 7.93% | 28810 |
| | 42417.75 | 3729.75 | 91.92% | 8.08% | 46147.5 | 42285.50 | 3862.50 | 91.63% | 8.37% | 46148 |
| | 2226 | 936 | 70.40% | 29.60% | 3162 | 2843.50 | 318.50 | 89.93% | 10.07% | 3162 |
| Granza | 103 | 67 | 60.59% | 39.41% | 170 | 104.50 | 65.50 | 61.47% | 38.53% | 170 |
| | 10113 | 7791 | 56.48% | 43.52% | 17904 | 10585.79 | 7318.21 | 59.13% | 40.87% | 17904 |
| | 7314 | 2887 | 71.70% | 28.30% | 10201 | 6105.85 | 4095.15 | 59.86% | 40.14% | 10201 |
| | 6831 | 5365 | 56.01% | 43.99% | 12196 | 7283.38 | 4912.62 | 59.72% | 40.28% | 12196 |
| Electrónicas | 27901 | 294 | 98.96% | 1.04% | 28195 | 27718.62 | 476.38 | 98.31% | 1.69% | 28195 |
| | 27176 | 1917 | 93.41% | 6.59% | 29093 | 27967.15 | 1125.85 | 96.13% | 3.87% | 29093 |
| | 5401 | 297 | 94.79% | 5.21% | 5698 | 5458.00 | 240.00 | 95.79% | 4.21% | 5698 |
| | 29053 | 3545 | 89.13% | 10.87% | 32598 | 30186.85 | 2411.15 | 92.60% | 7.40% | 32598 |
| Mecánicas | 26225 | 1465 | 94.71% | 5.29% | 27690 | 24991.15 | 2698.85 | 90.25% | 9.75% | 27690 |
| | 17181 | 69 | 99.60% | 0.40% | 17250 | 15269.56 | 1980.33 | 88.52% | 11.48% | 17249.88 |
| | 3795 | 207 | 94.83% | 5.17% | 4002 | 3652.00 | 350.00 | 91.25% | 8.75% | 4002 |
| | 2321 | 74 | 96.91% | 3.09% | 2395 | 2198.00 | 197.00 | 91.77% | 8.23% | 2395 |
| Granza-mecánicas-electrónicas | 38122.5 | 9560 | 79.95% | 20.05% | 47682.5 | 37935.50 | 10004.45 | 79.13% | 20.87% | 47939.95 |
| | 36984 | 9272.5 | 79.95% | 20.05% | 46256.5 | 37506.28 | 9114.81 | 80.63% | 19.37% | 47050.31 |
| | 28586 | 6011 | 82.63% | 17.37% | 34597 | 28766.49 | 6121.83 | 82.45% | 17.55% | 34888.32 |
| | 42591 | 5654 | 88.28% | 11.72% | 48245 | 47312.91 | 5027.06 | 90.40% | 9.60% | 52339.97 |

3.2.4.3.6 Construcción de los motores de inferencia basados en lógica difusa

La técnica de lógica difusa se considera necesaria para esta investigación, debido, a que permite modelar la problemática con base en el conocimiento del experto. Para la construcción del modelo de lógica difusa se empleó el software Matlab®, el cual contiene un Toolbox de lógica difusa que permite la creación de modelos difusos empleando el sistema Mamdani.

3.2.4.3.6.1 Modelo de lógica difusa para rendimiento de café

En la Figura 3.20 se muestra el esquema general del sistema difuso respecto al rendimiento de café como parte del control de prácticas agrícolas, se muestran las variables identificadas que participan en el proceso de toma de decisiones y que son la base del sistema difuso.

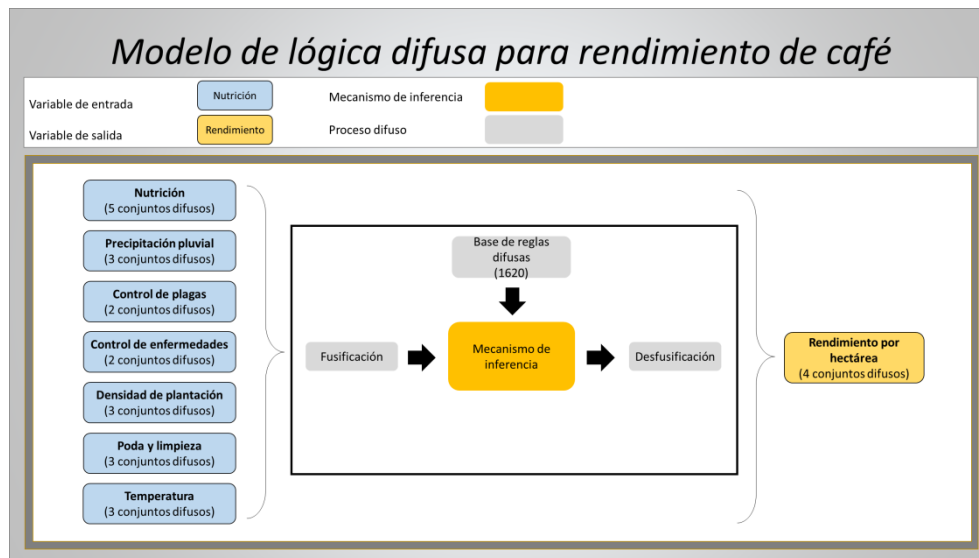


Figura 3.20 Modelo tipo Mandani para rendimiento de café (Hernández González, 2017).

3.2.4.3.6.1.1 Definición de variables lingüísticas

Para realizar el modelo de lógica difusa se contó con el apoyo de ingenieros agrónomos, expertos en café, mismos que lograron señalar prácticas agrícolas y parámetros inciertos que, con base en su experiencia, influyen en la producción de las fincas de café. Para el modelo de lógica difusa estos señalamientos representan las variables de entrada del modelo.

Es necesario modelar tanto las variables lingüísticas de entrada y salida por medio del uso de figuras geométricas, por lo que en esta sección se realiza dicha modelación como parte de la etapa de Fusificación.

- **Variable 1: Poda y limpieza**

El primer factor considerado es la Poda y limpieza, esta variable lingüística que incluye dos acciones: limpiar y podar, donde la primera se refiere a la cantidad del trabajo realizado por el jornalero al cortar la melaza que rodea al cafeto, mientras que la segunda se refiere al corte de ramas que propician la cantidad de nutrientes que la tierra pueda proveer al cafeto; lo anterior se basa en el criterio: mientras más ramas tiene un cafeto, menor es la cantidad de nutrientes que la tierra (previamente preparada con fertilizantes, compostas, etc.) puede proveerle.

En esta variable se consideran tres escenarios, mismos que definen tres conjuntos difusos, los cuales son:

- Poda y limpieza débil: se refiere a que esta acción fue realizada en menor del 20% de la plantación. El conjunto difuso es débil.
- Poda y limpieza moderada: se refiere a que esta acción se aplicó entre el 25 y 80%. El conjunto difuso es moderado.
- Poda y limpieza fuerte: se refiere a que esta acción se llevó a cabo en más del 80% de la plantación. El conjunto difuso es fuerte.

En la Figura 3.21 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que, si la Poda y limpieza realizada representó menos del 20% de la plantación, entonces pertenece al conjunto Débil; por el contrario, si esta variable afecto al 40% de ella, entonces esta pertenece al conjunto difuso Moderado, en caso que la variable afecta en más de un 90% entonces pertenece al conjunto difuso Fuerte.

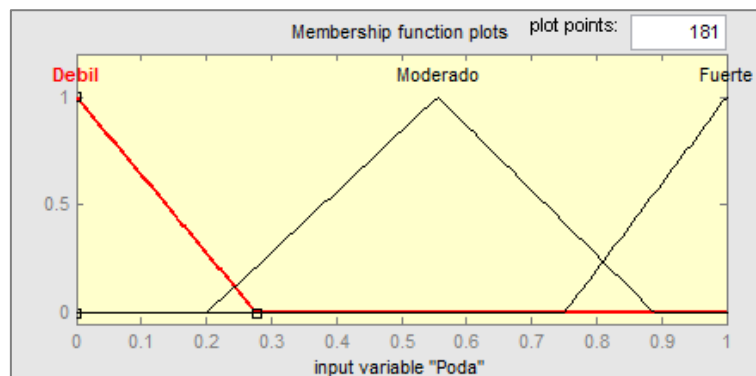


Figura 3.21 Función de membresía de la variable Poda y limpieza.

En la Ecuación 3.56, Ecuación 3.57 y Ecuación 3.58 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Poda y limpieza.

$$\mu_{Debil}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{0.27 - x}{0.27 - 0} & \text{para } 0 \leq x \leq 0.27 \\ 0 & \text{para } x > 0.27 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.56}$$

$$\mu_{Moderada}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.20 \\ 1 - \frac{x - 0.20}{0.55 - 0.20} & \text{para } 0.20 \leq x \leq 0.55 \\ 1 - \frac{0.89 - x}{0.89 - 0.57} & \text{para } 0.55 \leq x \leq 0.89 \\ 0 & \text{para } x > 0.89 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.57}$$

$$\mu_{Fuerte}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.75 \\ 1 - \frac{x - 0.75}{1.11 - 0.75} & \text{para } 0.75 \leq x \leq 1.11 \\ 0 & \text{para } x > 1.11 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.58}$$

• **Variable 2: Nutrición del suelo**

El desarrollo de un buen cafeto como el de cualquier otra planta, requiere la ayuda de nutrientes tales como el Potasio, Fosforo y Nitrógeno que pueden ser suministrados por medio de fertilizantes químicos o naturales.

Esta variable será considerada en cinco escenarios, mismos que representan cinco conjuntos difusos, denominados: Nulo, Bajo, Óptimo, Alto y Muy alto.

- Nutrición nula del suelo: quiere decir que el productor no agregó ningún tipo de fertilizante a la raíz de la mata.
- Nutrición baja del suelo: se refiere a que el productor agregó, en un sólo evento, nutrientes mediante fertilizantes a la raíz de la mata.
- Nutrición optima del suelo: se refiere a que el productor agrego nutriente a la raíz de la mata, en dos ocasiones o eventos.
- Nutrición alta del suelo: se refiere a que el productor nutrió la raíz de la mata en cuatro ocasiones o eventos.

- Nutrición muy alta del suelo: se refiere a que el productor nutrió la raíz de la mata en cinco ocasiones o eventos.

La Figura 3.22 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, puesto que no es posible representar funciones singleton en Matlab®.

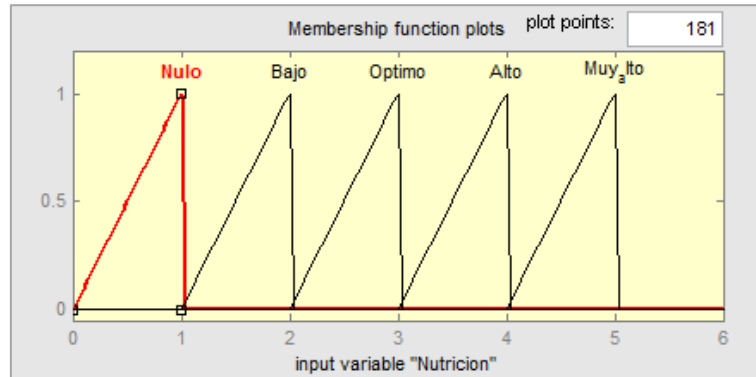


Figura 3.22 Función de membresía de la variable Nutrición del suelo.

De la Ecuación 3.59 a la Ecuación 3.63 se presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Nutrición del suelo.

$$\mu_N = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.59}$$

$$\mu_B = \begin{cases} 1 & x = 2 \\ 0 & x \neq 2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.60}$$

$$\mu_O = \begin{cases} 1 & x = 3 \\ 0 & x \neq 3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.61}$$

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x = 4 \\ 0 & x \neq 4 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.62}$$

$$\mu_{MA} = \begin{cases} 1 & x = 5 \\ 0 & x \neq 5 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.63}$$

• **Variable 3: Precipitación pluvial**

La importancia de la cantidad de precipitación pluvial o lluvia en las fincas de café, es preponderante, puesto que el agua es un factor que en cantidades adecuadas puede beneficiar

significativamente a las fincas. Este evento incierto, se ha considerado en tres conjuntos difusos: baja, óptima y alta.

- Precipitación pluvial baja: Este conjunto difuso considera desde la ausencia de precipitaciones hasta 1450 mm³ / mes.
- Precipitación pluvial optima: Este conjunto difuso considera un nivel óptimo de precipitación en un intervalo de 1400 a 1850 mm³ / mes.
- Precipitación pluvial alta: Este conjunto difuso considera un nivel alto de lluvia a partir de los 1800 y hasta 2500 mm³ / mes.

La Figura 3.23 presenta las funciones de pertenencia de los tres conjuntos difusos definidos para el evento incierto Precipitación pluvial.

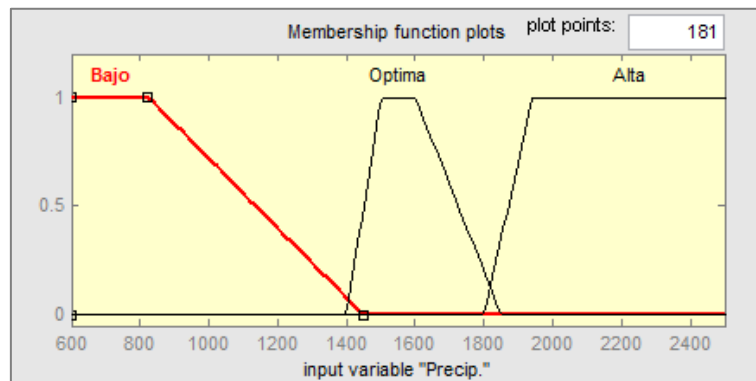


Figura 3.23 Función de membresía de la variable Precipitación pluvial.

La Ecuación 3.64, Ecuación 3.65 y Ecuación 3.66 representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal que representan a los tres conjuntos difusos definidos para la variable Precipitación pluvial.

$$\mu_{Baja}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 595 \\ 1 - \frac{x - 595}{600 - 595} & \text{para } 595 \leq x \leq 600 \\ 1 & \text{para } 600 \leq x \leq 820 \\ 1 - \frac{1445 - x}{1445 - 820} & \text{para } 820 \leq x \leq 1445 \\ 0 & \text{para } x > 1445 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.64}$$

$$\mu_{Optima}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1400 \\ 1 - \frac{x - 1400}{1500 - 1400} & \text{para } 1400 \leq x \leq 1500 \\ 1 & \text{para } 1500 \leq x \leq 1600 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.65} \\ 1 - \frac{1850 - x}{1850 - 1600} & \text{para } 1600 \leq x \leq 1850 \\ 0 & \text{para } x > 1850 \end{cases}$$

$$\mu_{Alta}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1800 \\ 1 - \frac{x - 1800}{1940 - 1800} & \text{para } 1800 \leq x \leq 1940 \\ 1 & \text{para } 1940 \leq x \leq 2500 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.66} \\ 1 - \frac{2550 - x}{2550 - 2500} & \text{para } 2500 \leq x \leq 2550 \\ 0 & \text{para } x > 2550 \end{cases}$$

• **Variable 4: Control de plagas**

El Control de plagas es una importante actividad que debe realizarse para prevenir que ciertas comunidades de insectos pueden atacar hojas, tallos, raíces y frutos del café. Entre las plagas que atacan las raíces y frutos del café. Entre las plagas que atacan las raíces se encuentran las palomillas, escamas y nematodos, el tallo y las ramas son afectados por los cortadores y taladradores, mientras que las hojas son dañadas por los cortadores y chupadores y algunos frutos por la broca.

Las plagas de las hojas son más habituales en épocas de sequía, en tanto que las de las raíces, ocurren en épocas de lluvias. Las plantas jóvenes están más expuestas a las escamas, al igual que los cafés arábigos, por otra parte, también son más propensos a palomillas y nematodos.

Es importante que esta variable considera el monitoreo y control del tamaño de tales poblaciones de insectos, ya que no se puede esperar exterminarlas, puesto que estas comunidades cumplen una importante función para conservar el equilibrio ambiental.

Para esta variable se han identificado dos conjuntos difusos, mismos que son definidos por la ocurrencia de los eventos, es decir, si es necesario o no el control de plagas.

- Control de plagas nulos: Se refiere a la no acción de llevar a cabo acciones para controlar el crecimiento de las poblaciones de insectos que afectan las fincas e café, ya sea por la falta de recursos o porque las afectaciones de la plaga no representa un riesgo.
- Control de plagas óptimo: Se refiere a la ejecución de acciones que buscan controlar disminuir el tamaño de la población de insectos e inhibir su crecimiento.

La Figura 3.24 muestra las funciones de membresía tipo singleton, de los dos conjuntos difusos para la variable Control de plagas.

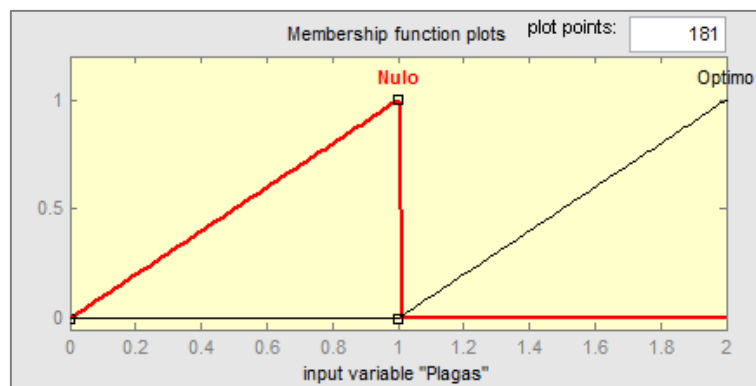


Figura 3.24 Función de membresía de la variable Control de plagas.

La Ecuación 3.67 y Ecuación 3.68 presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Control de plagas.

$$\mu_N = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.67}$$

$$\mu_O = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.68}$$

• **Variable 5: Control de enfermedades**

El control de enfermedades es una importante actividad que debe realizarse para prevenir que ciertos agentes puedan atacar las matas de café. Las enfermedades son causadas por hongos, bacterias y virus, las de mayor importancia económica son la roya, *Hemileia vastratix*; las llagas del tallo y de las raíces, *Ceratocystis fimbriata* y *Rosellinia bunodes*; la mancha de hierro, *Cercospora coffeicola*; el mal rosado, *Corticium salmonicolor*; el volcamiento, *Rhizocytionia solani*; la muerte descendente, *Phoma* sp.

El control es básicamente preventivo. Una vez que ataca la enfermedad, no se conocen productos curativos. Las matas enfermas se deben eliminar con todo y raíz y exponer a los rayos del sol mínimo durante 3 meses.

Para esta variable se han identificado dos conjuntos difusos, mismos que son definidos por la ocurrencia de los eventos, es decir, si es necesario o no el control de enfermedades.

- Control de enfermedades nulo: se refiere a la no acción de llevar a cabo acciones para controlar enfermedades que afectan las fincas de café, ya sea por la falta recursos o porque las afectaciones no representa un riesgo.
- Control de enfermedades óptimo: Se refiere a la ejecución de acciones que buscan prevenir enfermedades.

La Figura 3.25 muestra las funciones de membresía tipo singleton, de los dos conjuntos difusos para esta variable.

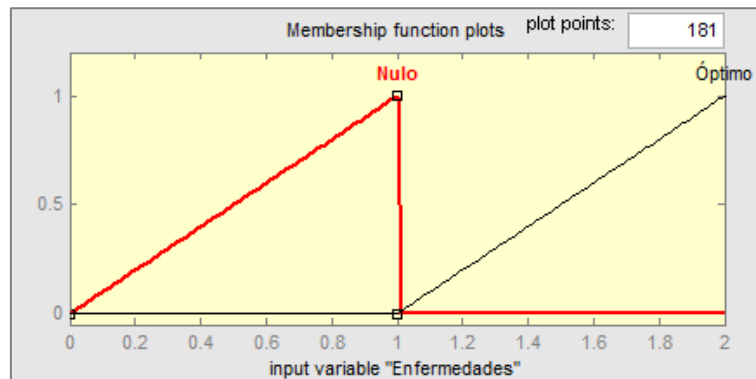


Figura 3.25 Función de membresía de la variable Control de enfermedades.

La Ecuación 3.69 y Ecuación 3.70 representan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Control de enfermedades.

$$\mu_N = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.69}$$

$$\mu_O = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.70}$$

• **Variable 6: Densidad de plantación**

Esta variable considera la cantidad de matas plantadas por hectárea, esta variable dependerá del tipo de café del que se trate, ya que existen diferencias significativas; para este trabajo se han considerado dos tipos de café, el arábigo y el robusta.

Para esta variable se han definido tres conjuntos difusos denominados como densidad baja, óptima y alta:

- Baja: considera un marco de plantación de 2.5m x 2.5m para el café tipo arábigo y de 4m x 4m para el tipo robusta.
- Óptima: considera un marco de plantación de 2m x 2m para el café arábigo y 3m x 3m para el tipo robusta.
- Alta: considera un marco de plantación de 1.5m x 1.5m para el café arábigo y 2m x 2m para el tipo robusta.

La Figura 3.26 muestra los tres conjuntos difusos de la variable Densidad de plantación, las cuales fueron descritas mediante funciones de membresía tipo singleton.

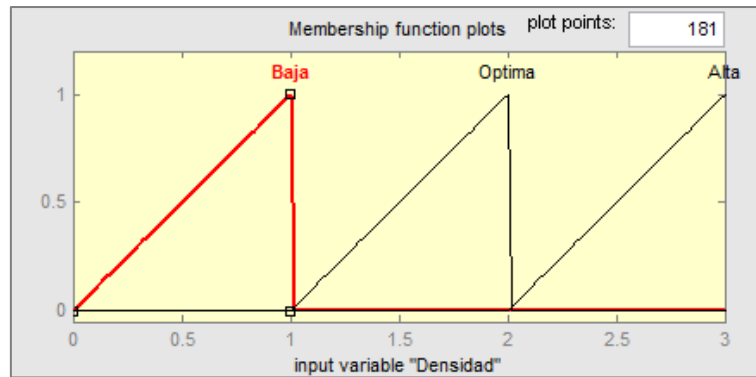


Figura 3.26 Función de membresía de la variable Densidad de plantación.

De la Ecuación 3.71 a la Ecuación 3.73 se presentan los tres conjuntos difusos de la variable Densidad de plantación, mismas que fueron representadas por variables tipo singleton.

$$\mu_B = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.71}$$

$$\mu_O = \begin{cases} 1 & x = 2 \\ 0 & x \neq 2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.72}$$

$$\mu_A = \begin{cases} 1 & x = 3 \\ 0 & x \neq 3 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.73}$$

- **Variable de salida**

Para este primer modelo de lógica difusa sólo se cuenta con la variable Rendimiento por hectárea, que se considera una variable de respuesta o salida del modelo, la cual considera la cantidad de café, en quítales por hectárea, que se obtiene por unidad de plantación. Esta variable fue representada mediante cuatro conjuntos difusos:

- **Pésimo Rendimiento de los Cafetales.** Indica que el rendimiento obtenido de los cafetales al final de la temporada no es el esperado y por lo tanto, se tienen perdidas. El conjunto difuso es Muy Malo.
- **Bajo Rendimiento de los Cafetales.** Indica que el rendimiento de los cafetales al final de la temporada no es el esperado, pero en comparación con el conjunto difuso muy malo tuvo un mejor resultado. El conjunto difuso es Malo.
- **Buen Rendimiento de Cafetales.** Indica que el rendimiento de los cafetales al final de la temporada apenas sobrepasa lo esperado por el producto, no tiene pérdidas y si ganancias. El conjunto difuso es Bueno.
- **Muy Buen Rendimiento de Cafetales.** Indica que el rendimiento de los cafetales al final de la temporada sobrepasa lo esperado por el productor y trae consigo un margen de utilidades bastante significativo El conjunto difuso es Muy Bueno.

La Figura 3.27 muestra los cuatro conjuntos difusos de la variable Rendimiento por hectárea, representados por medio de una función de membresía tipo trapezoidal.

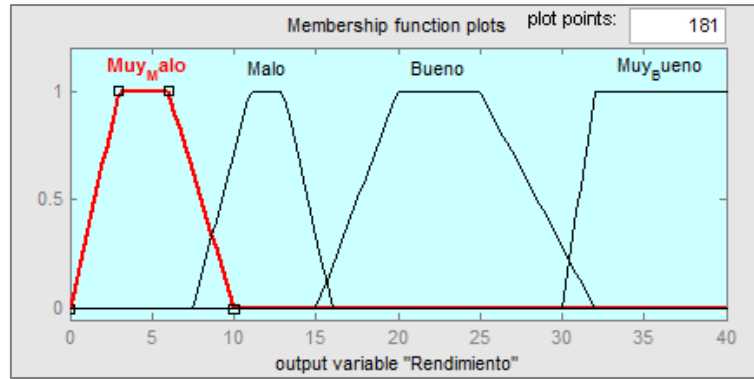


Figura 3.27 Función de membresía de la variable de salida Rendimiento por hectárea.

Se observa que cuando el valor de la variable Rendimiento por hectárea se encuentra en un valor menor o igual a 10 Qq/h, se obtiene un conjunto difuso Muy Malo en cuanto a rendimiento de producción y en consecuencia, muchas pérdidas.

Del mismo modo, se puede observar que cuando el valor de la variable de salida Rendimiento por hectárea se encuentra entre 7.5 y 16 Qq/h se dice que pertenece al conjunto difuso Malo, teniendo poco rendimiento en cultivos.

Cuando el valor de la variable se encuentra entre 15 y 32 Qq/h se dice que pertenece al conjunto difuso Bueno, lo cual indica que el rendimiento es satisfactorio para los caficultores y se comienza a ver ganancias.

Finalmente, cuando el valor de la variable se encuentra entre 30 y 40 Qq/h indica que, contrario a los casos anteriores se tienen excelentes resultados de la cosecha y por lo tanto, se tienen ganancias considerables.

De la Ecuación 3.74 a la Ecuación 3.77 se presentan matemáticamente los conjuntos difusos de la variable Rendimiento por hectárea, los cuales fueron representados por funciones de tipo trapezoidal.

$$\mu_{Muy\ malo}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{3 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 3 \\ 1 & \text{para } 3 \leq Z \leq 6 \\ 1 - \frac{10 - Z}{10 - 6} & \text{para } 6 \leq Z \leq 10 \\ 0 & \text{para } Z > 10 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.74}$$

$$\mu_{Malo}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 7.5 \\ 1 - \frac{Z - 7.5}{11 - 7.5} & \text{para } 7.5 \leq Z \leq 11 \\ 1 & \text{para } 11 \leq Z \leq 13 \\ 1 - \frac{16 - Z}{16 - 13} & \text{para } 13 \leq Z \leq 16 \\ 0 & \text{para } Z > 16 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.75}$$

$$\mu_{Bueno}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 15 \\ 1 - \frac{Z - 15}{20 - 15} & \text{para } 15 \leq Z \leq 20 \\ 1 & \text{para } 20 \leq Z \leq 25 \\ 1 - \frac{32 - Z}{32 - 25} & \text{para } 25 \leq Z \leq 32 \\ 0 & \text{para } Z > 32 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.76}$$

$$\mu_{Muy\ bueno}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 30 \\ 1 - \frac{Z - 15}{20 - 15} & \text{para } 30 \leq Z \leq 32 \\ 1 & \text{para } 32 \leq Z \leq 40 \\ 1 & \text{para } Z > 40 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.77}$$

3.2.4.3.6.1.2 Mecanismo de inferencia

Para poder relacionar la información obtenida, se idéntico la interacción de las variables de entrada respecto a la variable de salida mediante la creación de las reglas de inferencia que emplea condiciones SI-ENTONCES. Como se menciona en la sección anterior, para la creación de reglas de inferencia se emplea el modelo tipo Mamdani.

Antes de crear cada una de las reglas de inferencia, se identifica primero el número total de reglas a obtener con base en las variables lingüísticas de entrada y lo conjuntos que conforman

a cada una de ellas. En la Tabla 3.10 se muestra la obtención del número total de reglas de inferencia.

Tabla 3.10 Número de reglas de inferencia (Hernández González, 2017).

| VARIABLES LINGÜÍSTICAS | CONJUNTOS DIFUSOS |
|--|-------------------|
| Poda y limpieza | 3 |
| Nutrición del suelo | 5 |
| Precipitación pluvial | 3 |
| Control de plagas | 2 |
| Control de enfermedades | 2 |
| Densidad de plantación | 3 |
| Temperatura | 3 |
| $3 \times 5 \times 3 \times 2 \times 2 \times 3 \times 3 = 1620$ | |

Se generan en total 1620 combinaciones diferentes lo que significa un igual número de reglas, las cuales todas ellas son aplicables o válidas. En la Figura 3.28 se presenta el editor de reglas de inferencia del software y con ello queda en evidencia el comportamiento que tiene el modelo para predecir el Rendimiento por hectárea de café.

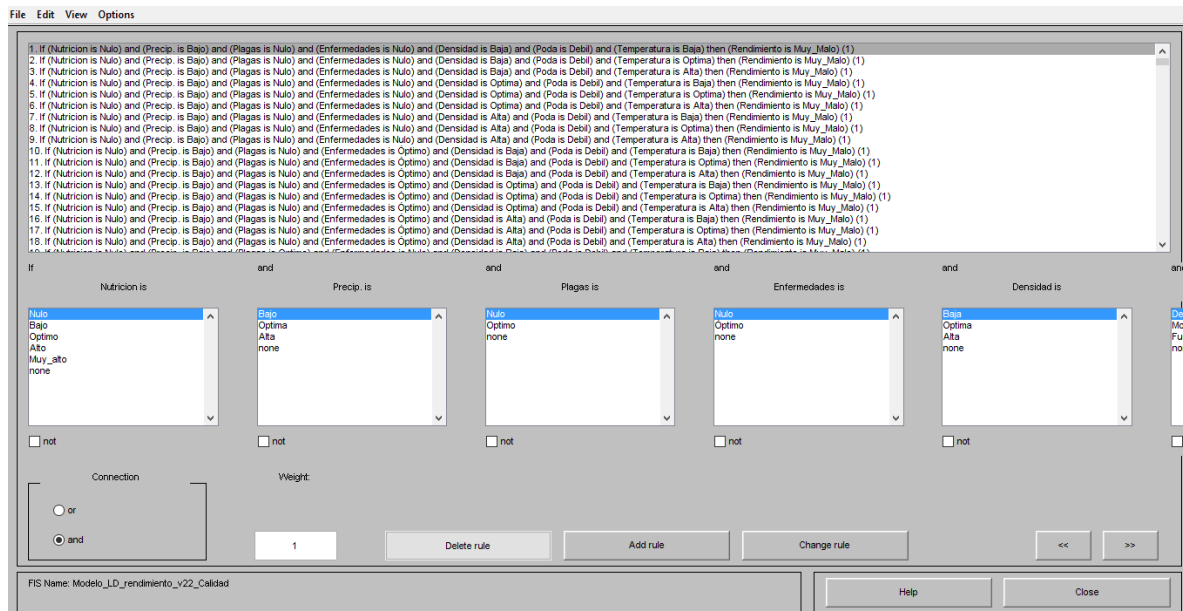


Figura 3.28 Mecanismo de inferencia del modelo rendimiento de café

Para el proceso de validación de las reglas se empleó la información recopilada en las sesiones de entrevista con los expertos, mismos que corroboraron que las 1620 reglas difusas reflejan la

realidad. En la Tabla 3.11 se presentan los datos arrojados del modelo y son comparados con la decisión del experto de manera que se valide la predicción, siendo la columna X_j los valores del modelo y la columna Y_j los valores reales.

Tabla 3.11 Datos para validación de modelo rendimiento de café

| Caso | X_j | Y_j | $Z_j = X_j - Y_j$ | $(Z_j - \bar{Z}_{10})^2$ |
|------|-------|-------|-------------------|--------------------------|
| 1 | 4.8 | 4.5 | 0.3 | 0.160453151 |
| 2 | 4.84 | 4.8 | 0.04 | 0.019758811 |
| 3 | 11.8 | 10 | 1.8 | 3.612151264 |
| 4 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 5 | 23.1 | 23 | 0.1 | 0.040226735 |
| 6 | 35.6 | 36 | -0.4 | 0.089660698 |
| 7 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 8 | 19 | 17 | 2 | 4.412377679 |
| 9 | 23.4 | 23 | 0.4 | 0.250566358 |
| 10 | 23.4 | 23 | 0.4 | 0.250566358 |
| 11 | 23.4 | 26 | -2.6 | 6.247170132 |
| 12 | 26 | 28 | -2 | 3.607849377 |
| 13 | 29 | 28 | 1 | 1.211245603 |
| 14 | 4.93 | 5 | -0.07 | 0.000934283 |
| 15 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 16 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 17 | 4.93 | 5 | -0.07 | 0.000934283 |
| 18 | 23.4 | 24 | -0.6 | 0.249434283 |
| 19 | 23.4 | 24 | -0.6 | 0.249434283 |
| 20 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 21 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 22 | 23.4 | 23 | 0.4 | 0.250566358 |
| 23 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 24 | 11.8 | 12.5 | -0.7 | 0.359321075 |
| 25 | 18.9 | 19 | -0.1 | 3.20399E-07 |

| | | | | |
|----------|------------|------------|--------------|-------------|
| 26 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 27 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 28 | 23.3 | 26 | -2.7 | 6.757056924 |
| 29 | 4.9 | 5 | -0.1 | 3.20399E-07 |
| 30 | 4.9 | 5 | -0.1 | 3.20399E-07 |
| 31 | 5 | 4.8 | 0.2 | 0.090339943 |
| 32 | 7.5 | 8 | -0.5 | 0.15954749 |
| 33 | 28.7 | 28 | 0.7 | 0.640905981 |
| 34 | 35.2 | 36 | -0.8 | 0.489207868 |
| 35 | 9 | 8 | 1 | 1.211245603 |
| 36 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 37 | 4.93 | 6 | -1.07 | 0.939802207 |
| 38 | 23.4 | 24 | -0.6 | 0.249434283 |
| 39 | 27.1 | 26 | 1.1 | 1.441358811 |
| 40 | 11.8 | 11 | 0.8 | 0.811019188 |
| 41 | 23.2 | 24.5 | -1.3 | 1.43864183 |
| 42 | 24.2 | 26 | -1.8 | 2.888075792 |
| 43 | 35.4 | 35 | 0.4 | 0.250566358 |
| 44 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 45 | 23.4 | 23 | 0.4 | 0.250566358 |
| 46 | 11.8 | 11 | 0.8 | 0.811019188 |
| 47 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 48 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 49 | 23.4 | 22 | 1.4 | 2.251698434 |
| 50 | 4.97 | 5 | -0.03 | 0.004979566 |
| 51 | 4.97 | 5 | -0.03 | 0.004979566 |
| 52 | 11.8 | 12 | -0.2 | 0.009887113 |
| 53 | 23.4 | 23 | 0.4 | 0.250566358 |
| Suma | 860.77 | 866.1 | -5.33 | 42.09208302 |
| Promedio | 16.2409434 | 16.3415094 | -0.100566038 | 0.794190246 |

Posteriormente se aplica la técnica de t apareada para comprobar estadísticamente que el modelo refleja la realidad. Ahora, se construye un intervalo de confianza al 95%, el cual se va a obtener, de acuerdo con la aplicación de una serie de fórmulas, la primera comienza con la Ecuación 3.78:

$$\bar{Z}_{(n)} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_j}{n} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.78}$$

$$\bar{Z}_{(53)} = \frac{-5.33}{53}$$

$$\bar{Z}_{(53)} = -0.100$$

El siguiente paso es calcular $\widehat{Var}[\bar{Z}_{10}]$, con la ayuda de la Ecuación 3.79 descrita a continuación.

$$\widehat{VAR} [Z_{53}] = \frac{\sum_{i=1}^{53} [Z_i - \bar{Z}_{53}]^2}{n(n - 1)} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.79}$$

$$\widehat{VAR} [\bar{Z}_{53}] = \frac{42.09}{53(53 - 1)} = 0.0152$$

Inmediatamente, calcular el intervalo de confianza correspondiente, de acuerdo con los datos proporcionados.

$$\bar{Z}_{(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\widehat{VAR} [\bar{Z}_{(n)}]} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.80}$$

$$-0.100 \pm t_{n52, 0.975} \sqrt{0.0152}$$

$$-0.100 \pm 2.01 \sqrt{0.0152}$$

$$(-0.3478, 0.147)$$

Como se puede observar, el intervalo de confianza incluye al cero, por lo que se puede asegurar, con un índice de confianza del 95% que la diferencia entre las medias de los datos reales y los del modelo no son estadísticamente significativos, y que las diferencias existentes

pueden ser explicadas por fluctuaciones aleatorias, con lo que se puede aceptar el modelo elaborado.

3.2.4.3.6.2 Modelo de lógica difusa catación de café pergamino

En la Figura 3.29 se muestra el esquema general del sistema difuso respecto a la catación de café pergamino como parte del proceso de toma de decisiones, se muestran las variables inciertas identificadas que participan en el proceso y que son la base del sistema difuso.

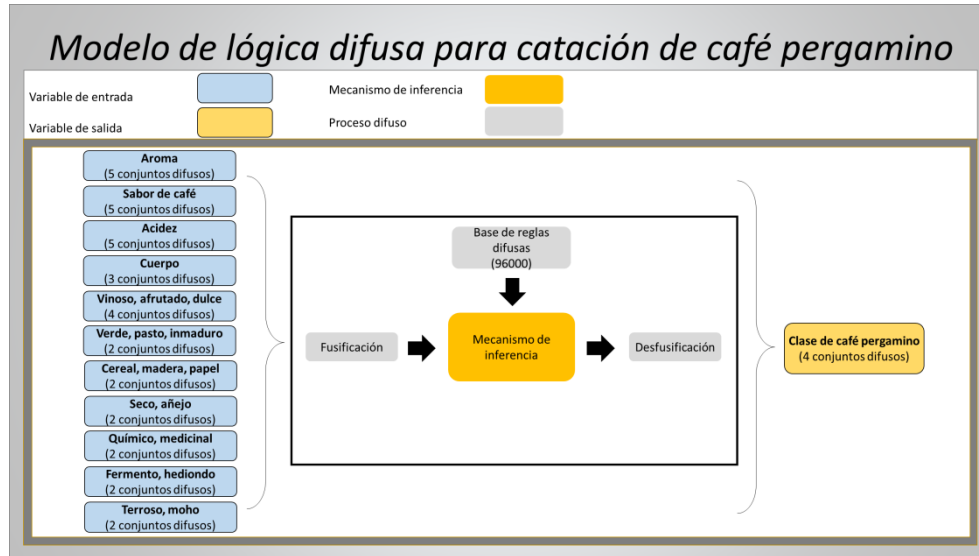


Figura 3.29 Modelo tipo Mandani para catación de café pergamino (Hernández González, 2017).

3.2.4.3.6.2.1 Definición de variables lingüísticas

Para realizar el modelo de lógica difusa se contó con el apoyo de expertos en café y catadores de la empresa, mismos que lograron señalar parámetros inciertos que, con base en su experiencia, influyen clasificación del café pergamino. Para el modelo de lógica difusa estos señalamientos representan las variables de entrada del modelo considerando las siguientes calidades intrínsecas: aroma, sabor, acidez y cuerpo, y sabores extraños como: vinoso, verde, cereal, seco, químico, fermento y terroso.

Es necesario modelar tanto las variables lingüísticas de entrada y salida por medio del uso de figuras geométricas, por lo que en esta sección se realiza dicha modelación como parte de la etapa de Fusificación.

- **Variable 1: Aroma**

Es el grado de una propiedad organoléptica que describe la impresión olfativa general de las sustancias volátiles de un café. Esta cualidad se relaciona con la fragancia que desprende la bebida. Un aroma delicadamente fino, fragante y penetrante es la manifestación de un buen café.

En esta variable se consideran cinco escenarios, mismos que definen cinco conjuntos difusos en un intervalo de 1 a 6 en puntaje de calidad, los cuales son:

- El conjunto difuso Bajo: se refiere a que el puntaje de calidad de la presencia de Aroma está acotado en un intervalo de 1 a 2.
- El conjunto difuso Medio bajo: se refiere a que el puntaje de calidad de la presencia de Aroma está acotado en un intervalo de 2 a 3.
- El conjunto difuso Medio: se refiere a que el puntaje de calidad de la presencia de Aroma está acotado en un intervalo de 3 a 4.
- El conjunto difuso Medio alto: se refiere a que el puntaje de calidad de la presencia de Aroma está acotado en un intervalo de 4 a 5.
- El conjunto difuso Alto: se refiere a que el puntaje de calidad de la presencia de Aroma está acotado en un intervalo de 5 a 6.

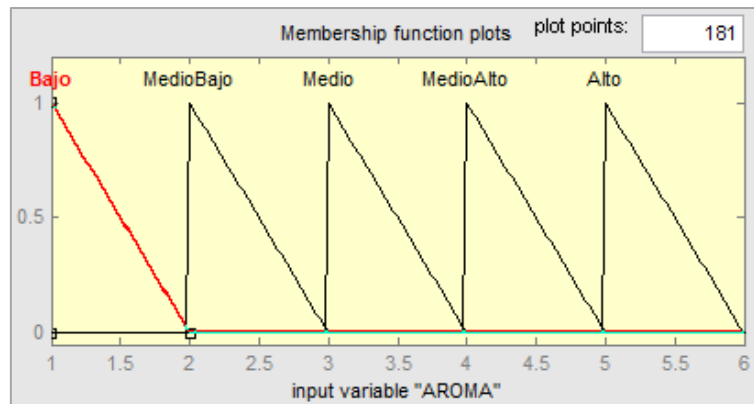


Figura 3.30 Función de membresía de la variable Aroma.

En la Figura 3.30 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que el Aroma Bajo tiene presencia hasta un puntaje de calidad 2; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 2 y 3, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo

medio, en caso que la variable se encuentre entre 3 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad del Aroma se encuentra entre 4 y 5 entonces pertenece al conjunto difuso Medio alto, en el caso de que el puntaje se encontrara entre 5 y 6 entonces el conjunto difuso de pertenencia sería Alto.

De la Ecuación 3.81 a la Ecuación 3.85 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Aroma.

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{2-x}{2-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 2 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.81}$$

$$\mu_{Medio\ bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.82}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.83}$$

$$\mu_{Medio\ alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 4 \\ 1 - \frac{5-x}{5-4} & \text{para } 4 \leq x \leq 5 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.84}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 5 \\ 1 - \frac{6-x}{6-5} & \text{para } 5 \leq x \leq 6 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 6 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.85}$$

- **Variable 2: Sabor de café**

Es el grado de una propiedad organoléptica de la bebida, que describe la combinación compleja de los atributos gustativos y olfativos percibidos en la bebida. Es la sensación, impresión global y equilibrada, propia del café que se percibe en la boca.

En esta variable se consideran cinco escenarios, mismos que definen cinco conjuntos difusos en un intervalo de 1 a 6 en puntaje de calidad, los cuales son:

- El conjunto difuso Bajo: se refiere a que el puntaje de calidad del Sabor del café está acotado en un intervalo de 1 a 2.
- El conjunto difuso Medio bajo: se refiere a que el puntaje de calidad del Sabor del café está acotado en un intervalo de 2 a 3.
- El conjunto difuso Medio: se refiere a que el puntaje de calidad del Sabor del café está acotado en un intervalo de 3 a 4.
- El conjunto difuso Medio alto: se refiere a que el puntaje de calidad del Sabor del café está acotado en un intervalo de 4 a 5.
- El conjunto difuso Alto: se refiere a que el puntaje de calidad del Sabor del café está acotado en un intervalo de 5 a 6.

En la Figura 3.31 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que el Sabor de café Bajo tiene presencia hasta un puntaje de calidad 2; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 2 y 3, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo medio, en caso que la variable se encuentre entre 3 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad del sabor se encuentra entre 4 y 5 entonces pertenece al conjunto difuso Medio alto, en el caso de que el puntaje se encontrara entre 5 y 6 entonces el conjunto difuso de pertenencia sería Alto.

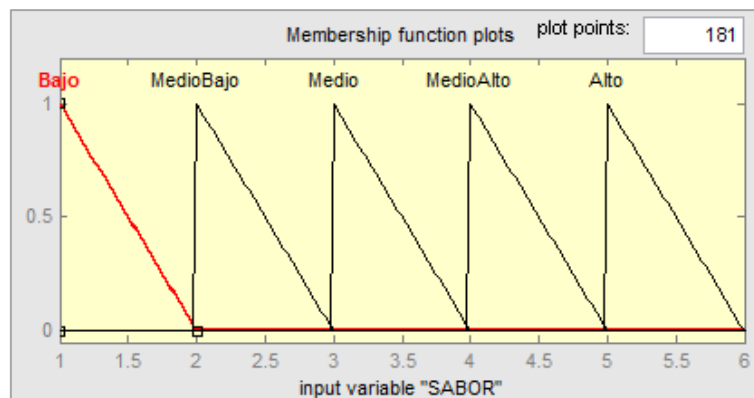


Figura 3.31 Función de membresía de la variable Sabor de café.

De la Ecuación 3.86 a la Ecuación 3.90 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Sabor de café.

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{2-x}{2-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 2 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.86}$$

$$\mu_{Medio\ bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.87}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.88}$$

$$\mu_{Medio\ alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 4 \\ 1 - \frac{5-x}{5-4} & \text{para } 4 \leq x \leq 5 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.89}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 5 \\ 1 - \frac{6-x}{6-5} & \text{para } 5 \leq x \leq 6 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 6 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.90}$$

• **Variable 3: Acidez**

Es una característica que describe la impresión gustativa causada por soluciones diluidas de la mayoría de los ácidos como el cítrico y el tartárico; así como, de ciertos ácidos orgánicos presentes en la infusión y percibidas por la lengua humana durante la cata de café.

En esta variable se consideran cinco escenarios, mismos que definen cinco conjuntos difusos en un intervalo de 1 a 6 en puntaje de calidad, los cuales son:

- El conjunto difuso Bajo: se refiere a que el puntaje de calidad de Acidez está acotado en un intervalo de 1 a 2.

- El conjunto difuso Medio bajo: se refiere a que el puntaje de calidad de Acidez está acotado en un intervalo de 2 a 3.
- El conjunto difuso Medio: se refiere a que el puntaje de calidad de Acidez está acotado en un intervalo de 3 a 4.
- El conjunto difuso Medio alto: se refiere a que el puntaje de calidad de Acidez está acotado en un intervalo de 4 a 5.
- El conjunto difuso Alto: se refiere a que el puntaje de calidad de Acidez está acotado en un intervalo de 5 a 6.

En la Figura 3.32 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que la Acidez Bajo tiene presencia hasta un puntaje de calidad 2; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 2 y 3, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo medio, en caso que la variable se encuentre entre 3 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad de Acidez se encuentra entre 4 y 5 entonces pertenece al conjunto difuso Medio alto, en el caso de que el puntaje se encontrara entre 5 y 6 entonces el conjunto difuso de pertenencia sería Alto.

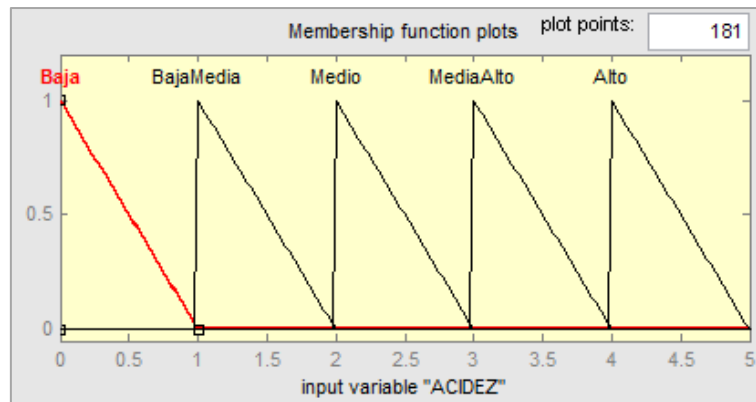


Figura 3.32 Función de membresía de la variable Acidez.

De la Ecuación 3.91 a la Ecuación 3.95 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Acidez.

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{2-x}{2-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 2 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.91} \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases}$$

$$\mu_{Medio\ bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.92}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.93}$$

$$\mu_{Medio\ alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 4 \\ 1 - \frac{5-x}{5-4} & \text{para } 4 \leq x \leq 5 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.94}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 5 \\ 1 - \frac{6-x}{6-5} & \text{para } 5 \leq x \leq 6 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 6 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.95}$$

• **Variable 4: Cuerpo**

Es el grado de la propiedad organoléptica que está determinada por la naturaleza y el contenido de solidos solubles de la infusión. La caracterización del cuerpo es el resultado de la combinación de varias percepciones captadas durante la evaluación sensorial, como la sensación de plenitud y consistencia.

En esta variable se consideran tres escenarios, mismos que definen tres conjuntos difusos en un intervalo de 1 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- El conjunto difuso Bajo: se refiere a que el puntaje de calidad Cuerpo está acotado en un intervalo de 1 a 2.
- El conjunto difuso Medio: se refiere a que el puntaje de calidad Cuerpo está acotado en un intervalo de 2 a 3.
- El conjunto difuso Alto: se refiere a que el puntaje de calidad Cuerpo está acotado en un intervalo de 3 a 4.

En la Figura 3.33 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que la característica Cuerpo Bajo tiene presencia hasta un puntaje de calidad 2; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 2 y 3, entonces esta pertenece al conjunto difuso Medio, en caso que la variable se encuentre entre 3 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

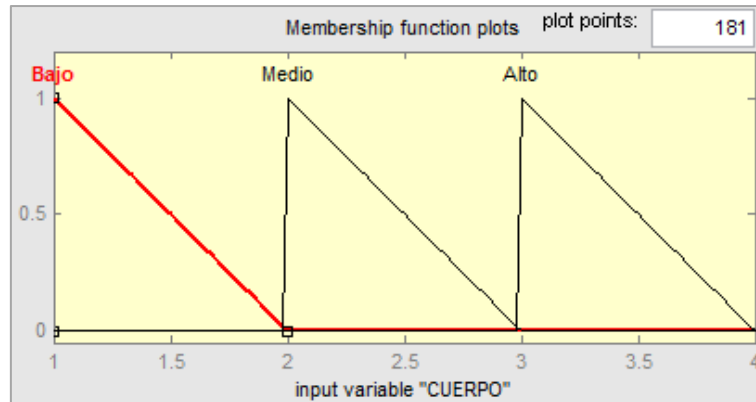


Figura 3.33 Función de membresía de la variable Cuerpo.

De la Ecuación 3.96 a la Ecuación 3.98 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Cuerpo.

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.96}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.97}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.98}$$

- **Variable 5: Vinoso, afrutado, dulce**

Tienen su origen en el café sobre madurado o en el retraso del despulpado. Mientras mas se atrase esta operación, el sabor vinoso originalmente dulzón y agradable, se hace más agrio hasta construir un defecto notable relacionado siempre con la presencia de película dorada o

rojiza. Se denomina defecto afrutado aquel que presenta aroma, sabor o fragancia que asemeja a la piña madura, ocurre cuando el grano ha permanecido mucho tiempo dentro de la cereza sobre madura

En esta variable se consideran cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 1 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- El conjunto difuso No: se refiere a que el puntaje de calidad tipo Vinoso, afrutado, dulce, está acotado en un intervalo de 0 a 1.
- El conjunto difuso Bajo: se refiere a que el puntaje de calidad tipo Vinoso, afrutado, dulce, está acotado en un intervalo de 1 a 2.
- El conjunto difuso Medio: se refiere a que el puntaje de calidad tipo Vinoso, afrutado, dulce, está acotado en un intervalo de 2 a 3.
- El conjunto difuso Alto: se refiere a que el puntaje de calidad tipo Vinoso, afrutado, dulce, está acotado en un intervalo de 3 a 4.

En la Figura 3.34 se presentan los conjuntos difusos de la variable, donde se puede apreciar que la característica Vinoso, afrutado, dulce, No tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 1 y 2, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 2 y 3 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad de Vinoso, afrutado, dulce, se encuentra entre 3 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

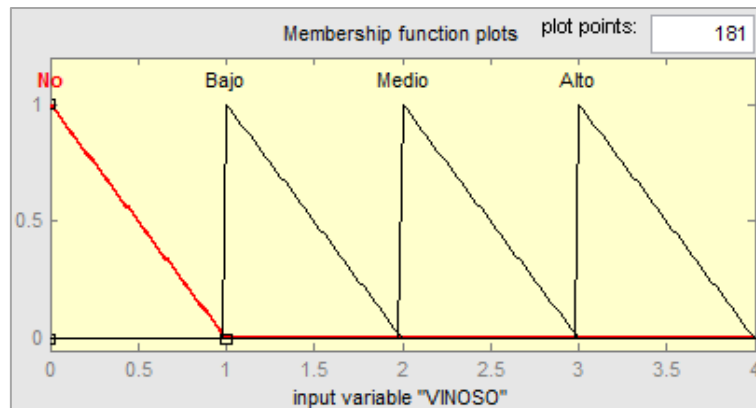


Figura 3.34 Función de membresía de la variable Vinoso, afrutado, dulce.

De la Ecuación 3.99 a la Ecuación 3.102 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Vinoso, afrutado, dulce.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{1-x}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.99}$$

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.100}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.101}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \dots\dots\dots \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \quad \text{Ecuación 3.102}$$

• **Variable 6: Verde, pasta, inmaduro**

Este defecto se caracteriza por reflejar un sabor astringente debido a la recolección de los frutos tiernos o inmaduros. El sabor verde, recuerda al heno, es más común en las recolecciones tempranas. En algunos cafés este sabor se pierde al cabo de unas semanas cuando se han secado completamente

En el caso de la variable de entrada Verde, pasta, inmaduro, se emplean funciones de tipo singleton y se encuentra acotada de en un intervalo de 0 a 2, los cuales son:

- El conjunto difuso Si: se refiere a que presenta defecto de taza tipo Verde, pasta, inmaduro, y está acotado en un intervalo de 0 a 1.
- El conjunto difuso No: se refiere a que no presenta defecto de taza tipo Verde, pasta, inmaduro, y está acotado en un intervalo de 1 a 2.

La Figura 3.35 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, donde se puede apreciar que el defecto de taza Verde, pasta, inmaduro en el conjunto difuso Si tiene presencia sólo en el puntaje de calidad 0; por el contrario, puede presentarse que la variable se encuentre sólo en el puntaje de calidad 1 que corresponde al conjunto difuso No.

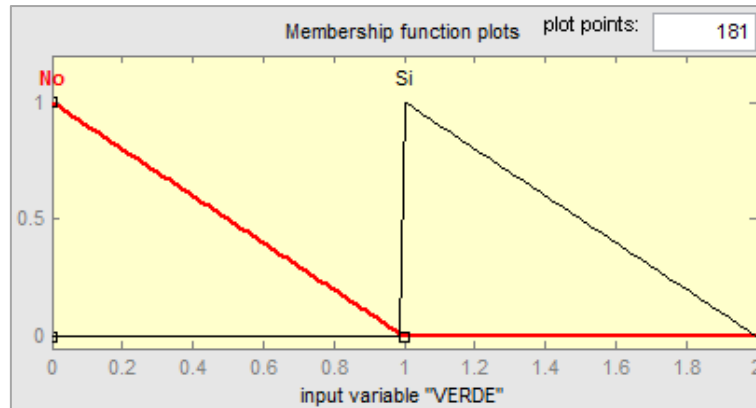


Figura 3.35 Función de membresía de la variable Verde, pasta, inmaduro.

En la Ecuación 3.103 y Ecuación 3.104 se presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Verde, pasta, inmaduro.

$$\mu_{Si} = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.103}$$

$$\mu_{No} = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.104}$$

• **Variable 7: Cereal, madera, papel**

Este defecto se caracteriza por reflejar un sabor a cereales, tales como arroz, trigo o paja debido a la cercanía del sembradío de estos cereales, el sabor se presta peculiarmente tosco de una cosecha añeja. El sabor a madera se presenta tosco, peculiar de una cosecha vieja

En el caso de la variable de entrada Cereal, madera, papel, se emplean funciones de tipo singleton y se encuentra acotada de en un intervalo de 0 a 2, los cuales son:

- El conjunto difuso Si: se refiere a que presenta defecto de taza tipo Cereal, madera, papel, y está acotado en un intervalo de 0 a 1.

- El conjunto difuso No: se refiere a que no presenta defecto de taza tipo Cereal, madera, papel, y está acotado en un intervalo de 1 a 2.

La Figura 3.36 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, donde se puede apreciar que el defecto de taza Cereal, madera, papel en el conjunto difuso Si tiene presencia sólo en el puntaje de calidad 0; por el contrario, puede presentarse que la variable se encuentre sólo en el puntaje de calidad 1 que corresponde al conjunto difuso No.

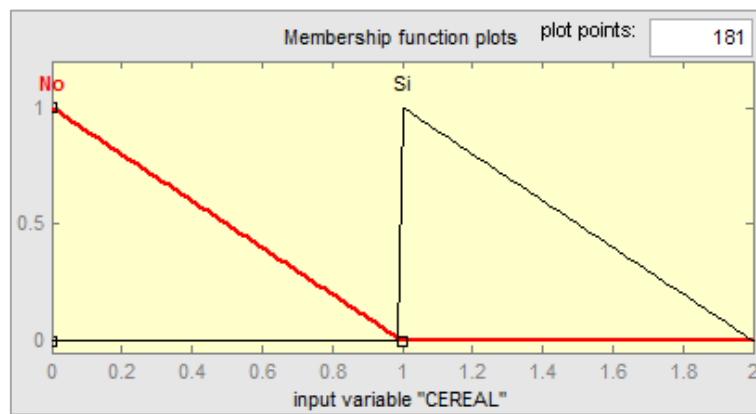


Figura 3.36 Función de membresía de la variable Cereal, madera, papel.

En la Ecuación 3.105 y Ecuación 3.106 se presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Cereal, madera, papel.

$$\mu_{Si} = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.105}$$

$$\mu_{No} = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.106}$$

- **Variable 8: Seco, añejo**

Defecto de la taza desagradable cuyo sabor característico es de un café añejo, este defecto se da por lo general cuando los lugares son muy calurosos

En el caso de la variable de entrada Seco, añejo, se emplean funciones de tipo singleton y se encuentra acotada de en un intervalo de 0 a 2, los cuales son:

- El conjunto difuso Si: se refiere a que presenta defecto de taza tipo Seco, añejo y está acotado en un intervalo de 0 a 1.
- El conjunto difuso No: se refiere a que no presenta defecto de taza tipo Seco, añejo y está acotado en un intervalo de 1 a 2.

La Figura 3.37 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, donde se puede apreciar que el defecto de taza Seco, añejo en el conjunto difuso Si tiene presencia sólo en el puntaje de calidad 0; por el contrario, puede presentarse que la variable se encuentre sólo en el puntaje de calidad 1 que corresponde al conjunto difuso No.

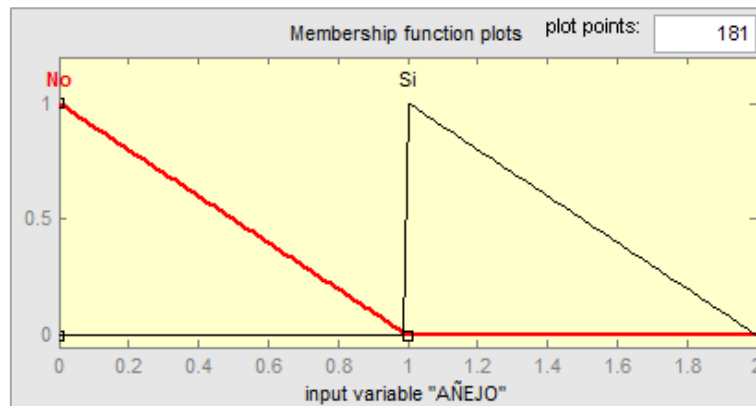


Figura 3.37 Función de membresía de la variable Seco, añejo.

La Ecuación 3.107 y Ecuación 3.108 presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Seco, añejo

$$\mu_{Si} = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.107}$$

$$\mu_{No} = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.108}$$

- **Variable 9: Químico, medicinal, fenol**

Defecto de la taza cuyo sabor característico es de un producto químico. Se produce por contaminación del café con agroquímicos

En el caso de la variable de entrada Químico, medicinal, fenol, se emplean funciones de tipo singleton y se encuentra acotada de en un intervalo de 0 a 2, los cuales son:

- El conjunto difuso Si: se refiere a que presenta defecto de taza tipo Químico, medicinal, fenol, y está acotado en un intervalo de 0 a 1.
- El conjunto difuso No: se refiere a que no presenta defecto de taza tipo Químico, medicinal, fenol, y está acotado en un intervalo de 1 a 2.

La Figura 3.38 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, donde se puede apreciar que el defecto de taza Químico, medicinal, fenol en el conjunto difuso Si tiene presencia sólo en el puntaje de calidad 0; por el contrario, puede presentarse que la variable se encuentre sólo en el puntaje de calidad 1 que corresponde al conjunto difuso No.

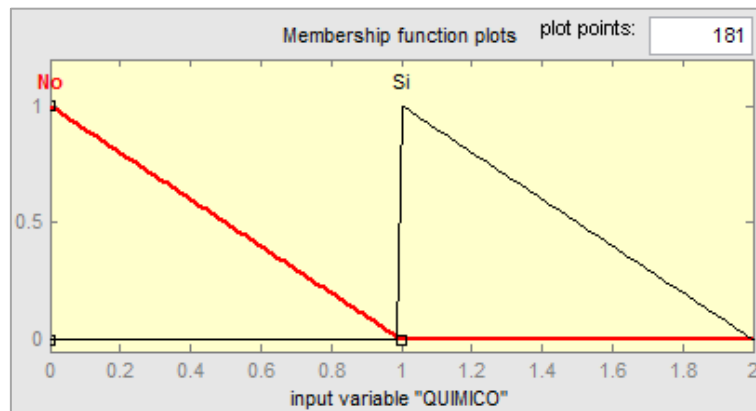


Figura 3.38 Función de membresía de la variable Químico, medicinal, fenol.

La Ecuación 3.109 y Ecuación 3.110 presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Químico, medicinal, fenol.

$$\mu_{Si} = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.109}$$

$$\mu_{No} = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.110}$$

• **Variable 10: Fermento, agrio, hediondo**

De sabor y olor desagradable debido al fermentado. Ocurre cuando el café no se lava a tiempo, sobre todo en días muy calurosos cuando ya se percibe un penetrante olor a ácido acético. Un

sabor no placentero que destaca un gusto ácido, diferente de la acidez de la taza. El sabor u olor a agrio se debe a una fermentación inadecuada, a una cereza pasada, a la demora en un secado o a un exceso de la fermentación con muchas cortezas. Pueden originarse también, debido a un mal lavado y sobre calentamiento en las secadoras.

En el caso de la variable de entrada Fermento, agrio, hediondo, se emplean funciones de tipo singleton y se encuentra acotada de en un intervalo de 0 a 2, los cuales son:

- El conjunto difuso Si: se refiere a que presenta defecto de taza tipo Fermento, agrio, hediondo, y está acotado en un intervalo de 0 a 1.
- El conjunto difuso No: se refiere a que no presenta defecto de taza tipo Fermento, agrio, hediondo, y está acotado en un intervalo de 1 a 2.

La Figura 3.39 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, donde se puede apreciar que el defecto de taza Fermento, agrio, hediondo en el conjunto difuso Si tiene presencia sólo en el puntaje de calidad 0; por el contrario, puede presentarse que la variable se encuentre sólo en el puntaje de calidad 1 que corresponde al conjunto difuso No.

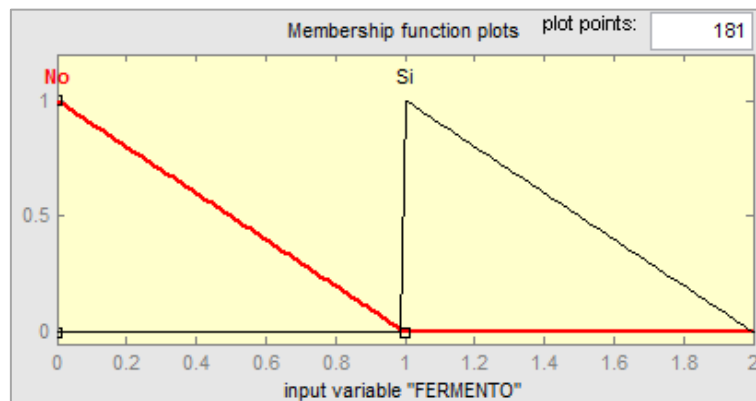


Figura 3.39 Función de membresía de la variable Fermento, agrio, hediondo.

La Ecuación 3.111 y Ecuación 3.112 presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Fermento, agrio, hediondo.

$$\mu_{Si} = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.111}$$

$$\mu_{No} = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.112}$$

- **Variable 11: Terroso, moho**

Es un defecto de la taza que se caracteriza por la percepción de un fuerte olor y sabor a tierra. Se produce porque el café entra en contacto con la tierra, especialmente en el secado. El sabor y olor a moho, tienen su origen en un secado incompleto o en humedecimiento durante el almacenaje.

En el caso de la variable de entrada Terroso, moho, se emplean funciones de tipo singleton y se encuentra acotada de en un intervalo de 0 a 2, los cuales son:

- El conjunto difuso Si: se refiere a que presenta defecto de taza tipo Terroso, moho y está acotado en un intervalo de 0 a 1.
- El conjunto difuso No: se refiere a que no presenta defecto de taza tipo Terroso, moho y está acotado en un intervalo de 1 a 2.

La Figura 3.40 muestra los conjuntos difusos de esta variable, mismos que fueron representados mediante una función triangular, donde se puede apreciar que el defecto de taza Terroso, moho en el conjunto difuso Si tiene presencia sólo en el puntaje de calidad 0; por el contrario, puede presentarse que la variable se encuentre sólo en el puntaje de calidad 1 que corresponde al conjunto difuso No.

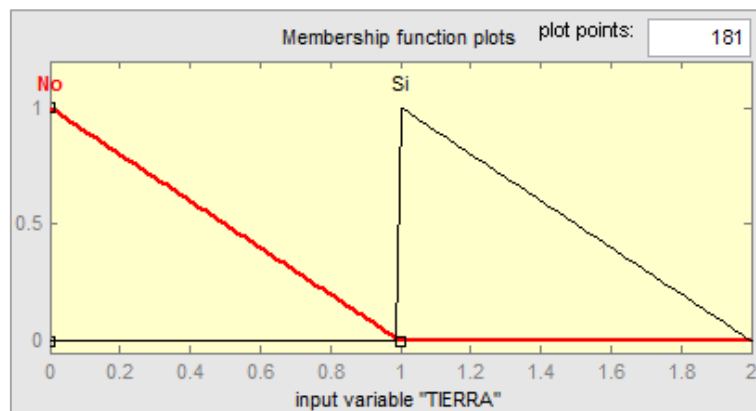


Figura 3.40 Función de membresía de la variable Terroso, moho.

La Ecuación 3.113 y Ecuación 3.114 presentan las funciones de pertenencia tipo singleton de los conjuntos difusos de la variable Terroso, moho.

$$\mu_{Si} = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ 0 & x \neq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.113}$$

$$\mu_{No} = \begin{cases} 1 & x = 1 \\ 0 & x \neq 1 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.114}$$

- **Variable de salida.**

Para este modelo de lógica difusa se cuenta con la variable de salida Clase café pergamino, la cual determina la clase o calidad del café evaluado existiendo 4 posibles niveles, los cuales son: calidad de altura, calidad extra primo, calidad oro lavado y rechazar. Esta variable fue representada mediante cuatro conjuntos difusos.

En el caso de la variable de salida, se emplean funciones de tipo trapezoidal y se encuentra acotada de en un intervalo de 2 a 6, los cuales son:

- El conjunto difuso Altura: se refiere a que el café analizado presenta una clasificación de altura y está acotado en un intervalo de 2 a 3.
- El conjunto difuso Extra prima: se refiere a que el café analizado presenta una clasificación de extra prima y está acotado en un intervalo de 2.8 a 4.
- El conjunto difuso Oro lavado: se refiere a que el café analizado presenta una clasificación de oro de tipo lavado y está acotado en un intervalo de 3.8 a 5.
- El conjunto difuso Rechazar: se refiere a que el café analizado no es apto para el cliente, por lo que se rechaza el lote y está acotado en un intervalo de 4.8 a 6.

La Figura 3.41 presenta los conjuntos difusos de la variable, donde se puede apreciar que la clase de café de Altura tiene presencia hasta un puntaje de 3; por el contrario, si el café presenta una calidad entre 2.8 y 4, entonces esta pertenece al conjunto difuso Extra prima, en caso que la variable se encuentre entre 3.8 y 5 entonces pertenece al conjunto difuso Oro Lavado, por el contrario, si el puntaje se encuentra entre 4.8 y 6 entonces pertenece al conjunto difuso Rechazar.

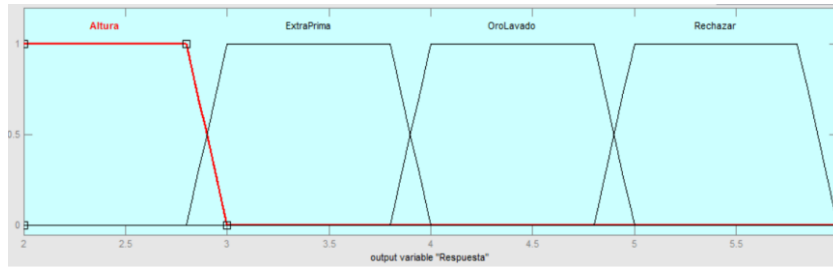


Figura 3.41 Función de membresía de la variable Clase café pergamino.

De la Ecuación 3.115 a la Ecuación 3.118 se presentan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Clase café pergamino.

$$\mu_{Altura}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 2 \\ 1 & \text{para } 2 \leq Z \leq 2.8 \\ 1 - \frac{3 - Z}{3 - 2.8} & \text{para } 2.8 \leq Z \leq 3 \\ 0 & \text{para } Z > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.115}$$

$$\mu_{Extra\ prima}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 2.8 \\ 1 - \frac{Z - 2.8}{3 - 2.8} & \text{para } 2.8 \leq Z \leq 3 \\ 1 & \text{para } 3 \leq Z \leq 3.8 \\ 1 - \frac{4 - Z}{4 - 3.8} & \text{para } 3.8 \leq Z \leq 4 \\ 0 & \text{para } Z > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.116}$$

$$\mu_{Oro\ lavado}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 3.8 \\ 1 - \frac{Z - 3.8}{4 - 3.8} & \text{para } 3.8 \leq Z \leq 4 \\ 1 & \text{para } 4 \leq Z \leq 4.8 \\ 1 - \frac{5 - Z}{5 - 4.8} & \text{para } 4.8 \leq Z \leq 5 \\ 0 & \text{para } x > 5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.117}$$

$$\mu_{Rechazar}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 4.8 \\ 1 - \frac{Z - 4.8}{5 - 4.8} & \text{para } 4.8 \leq Z \leq 5 \\ 1 & \text{para } 5 \leq Z \leq 5.8 \\ 1 - \frac{6 - Z}{6 - 5.8} & \text{para } 5.8 \leq Z \leq 6 \\ 0 & \text{para } Z > 6 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.118}$$

3.2.4.3.6.2.2 Mecanismo de inferencia catación de café pergamino

Para poder relacionar la información obtenida, se idéntico la interacción de las variables de entrada respecto a la variable de salida mediante la creación de las reglas de inferencia que emplea condiciones SI-ENTONCES. Como se menciona en la sección anterior, para la creación de reglas de inferencia se emplea el modelo tipo Mamdani.

Antes de crear cada una de las reglas de inferencia, se identifica primero el número total de reglas a obtener con base en las variables lingüísticas de entrada y lo conjuntos que conforman a cada una de ellas. En la Tabla 3.12 se muestra la obtención del número total de reglas de inferencia.

Tabla 3.12 Número de reglas de inferencia catación café pergamino (Hernández González, 2017).

| VARIABLES LINGÜÍSTICAS | CONJUNTOS DIFUSOS |
|---|-------------------|
| Aroma | 5 |
| Sabor de café | 5 |
| Acidez | 5 |
| Cuerpo | 3 |
| Vinoso, afrutado, dulce | 4 |
| Verde, pasto, inmaduro | 2 |
| Cereal, madera, papel | 2 |
| Seco, añejo | 2 |
| Químico medicinal | 2 |
| Fermento, hediondo | 2 |
| Terroso, moho | 2 |
| $5 \times 5 \times 5 \times 3 \times 4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 96000$ | |

Se generan en total 96000 combinaciones diferentes lo que significa un igual número de reglas, las cuales todas ellas son aplicables o válidas. En la Figura 3.42 se presenta el mecanismo de reglas de inferencia y con ello queda en evidencia el comportamiento que tiene el modelo para predecir la Clase de café pergamino.

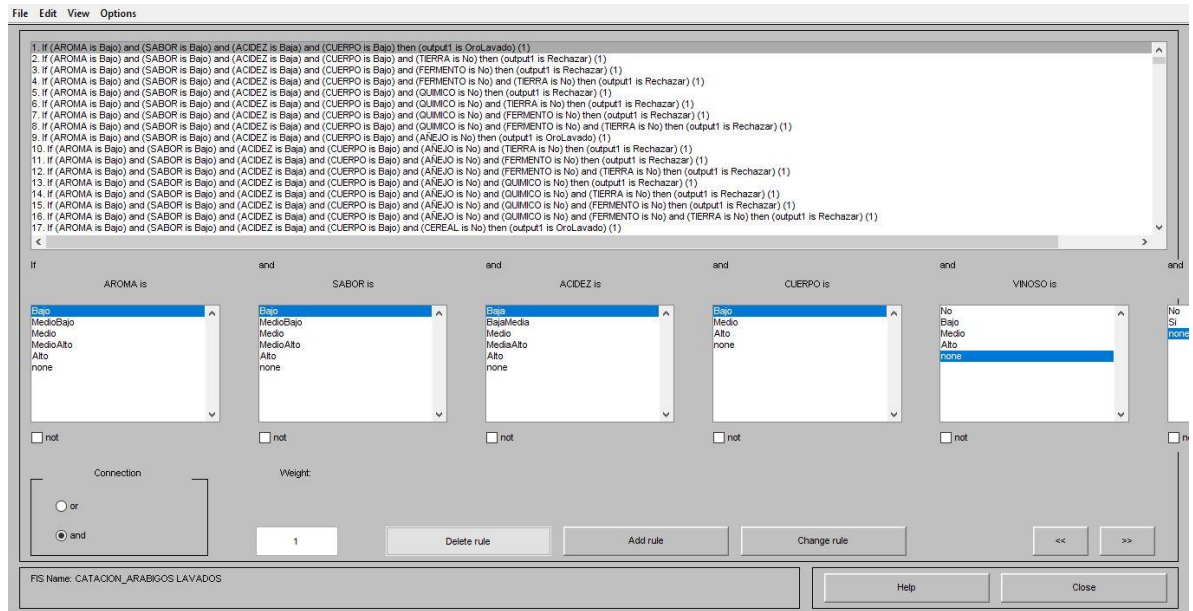


Figura 3.42 Mecanismo de inferencia del modelo catación café pergamino

Para el proceso de validación de las reglas se empleó la información recopilada en las sesiones de entrevista con los expertos, mismos que corroboraron que las 96000 reglas difusas reflejan la realidad.

A continuación, se muestra algunos de los datos elegidos al azar, con sus respectivas 11 variables de entrada y su variable de salida.

En la Tabla 3.13 se presentan los resultados obtenidos de 24 datos comprobando la similitud del modelo con la opinión del experto.

Tabla 3.13 Validación del modelo de lógica difusa catación de café pergamino (Hernández González, 2017).

| Entradas | | | | | | | | | | | Experto | Sistema difuso |
|------------|------------|------------|--------|--------|-------|--------|------|---------|----------|---------|--------------|----------------|
| Aroma | Sabor | Acidez | Cuerpo | Vinoso | Verde | Cereal | Seco | Químico | Fermento | Terroso | | |
| Medio-Alto | Medio-Alto | Alto | Medio | Alto | No | No | No | No | No | No | Altura | Altura |
| Bajo | Alto | Alto | Alto | No | Si | No | Si | No | No | No | Oro lavado | Oro lavado |
| Medio | Medio | Alto | No | Bajo | No | No | No | No | No | No | Prima lavado | Prima lavado |
| Medio | Medio-Alto | Medio-Alto | Bajo | Bajo | No | No | No | No | No | No | Prima lavado | Prima lavado |

| | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|-------|-------|----|----|----|----|----|----|--------------|--------------|
| Alto | Medio-Alto | Alto | Medio | Medio | No | No | No | No | No | No | Altura | Altura |
| Alto | Alto | Alto | Alto | Alto | Si | No | No | No | No | No | Altura | Altura |
| Medio | Bajo | Medio-Alto | Alto | Bajo | No | No | No | No | No | No | Extra prima | Extra prima |
| Medio | Bajo | Medio-Alto | Alto | Alto | No | No | No | No | No | No | Extra prima | Extra prima |
| Medio | Bajo-Medio | Medio-Alto | Medio | Alto | No | No | No | No | No | No | Extra prima | Extra prima |
| Medio-Alto | Medio | Medio-Alto | Alto | Medio | No | No | No | No | No | No | Oro lavado | Extra Prima |
| Medio | Alto | Medio-Alto | Medio | Bajo | No | No | No | No | No | No | Prima lavado | Prima lavado |
| Alto | Bajo | Alto | Alto | Bajo | No | No | No | No | No | No | Prima lavado | Prima lavado |
| Medio | Bajo | Bajo | No | Medio | Si | Si | No | Si | Si | Si | Rechazado | Rechazado |
| Medio-Alto | Medio-Alto | Medio-Alto | Alto | Alto | No | No | No | No | No | No | Oro lavado | Extra Prima |
| Alto | Alto | Alto | No | Bajo | No | No | No | No | No | No | Extra Prima | Extra Prima |
| Bajo | Bajo-Medio | Bajo-Medio | Bajo | Alto | Si | No | No | No | No | No | Oro lavado | Oro lavado |
| Bajo | Medio | Bajo | Medio | Medio | Si | Si | Si | No | No | No | Oro lavado | Oro lavado |
| Bajo | Alto | Alto | Alto | No | No | No | No | No | No | No | Oro lavado | Oro lavado |
| Medio-Alto | Bajo | Medio | Alto | Bajo | Si | No | No | Si | No | Si | Rechazado | Rechazado |
| Medio-Alto | Bajo | Medio | Alto | Bajo | Si | No | Si | Si | No | Si | Rechazado | Rechazado |
| Medio-Alto | Alto | Bajo | No | Bajo | Si | Si | No | No | Si | No | Rechazado | Rechazado |

En lo que se puede observar notoriamente que 2 de 24 datos no coinciden con la decisión del experto, dejando un grado de certeza del modelo del 91.66%, lo cual se considera bueno y valido para realizar predicciones confiables.

3.2.4.3.6.3 Modelo de lógica difusa catación de café robusto

En la Figura 3.43 se muestra el esquema general del sistema difuso respecto a la catación de café robusto como parte del proceso de toma de decisiones, se muestran las variables inciertas identificadas que participan en el proceso y que son la base del sistema difuso.

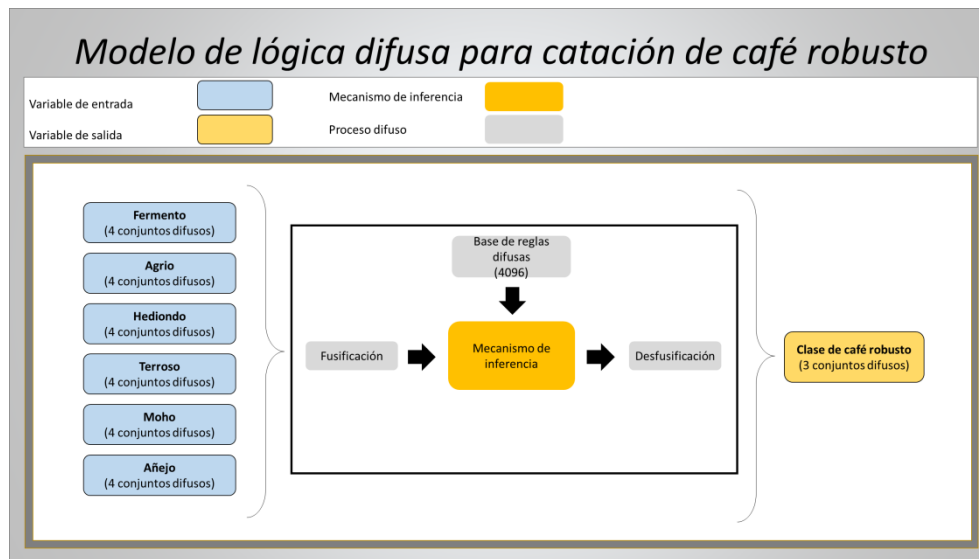


Figura 3.43 Modelo tipo Mandani para catación de café robusto (Hernández González, 2017).

3.2.4.3.6.3.1 Definición de variables lingüísticas

Para realizar el modelo de lógica difusa se contó con el apoyo de expertos en café y catadores de la empresa, mismos que lograron señalar parámetros inciertos que, con base en su experiencia, influyen clasificación del café robusto. Para el modelo de lógica difusa estos señalamientos representan las variables de entrada del modelo considerando las siguientes calidades intrínsecas: fermento, agrio, hediondo, terroso, moho y añejo.

Es necesario modelar tanto las variables lingüísticas de entrada y salida por medio del uso de figuras geométricas, por lo que en esta sección se realiza dicha modelación como parte de la etapa de Fusificación.

- **Variable 1: Fermento**

De sabor y olor desagradable debido al fermentado. Ocurre cuando el café no se lava a tiempo, sobre todo en días muy calurosos cuando ya se percibe un penetrante olor a ácido acético.

Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 0 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- Conjunto difuso No: Este conjunto difuso considera la ausencia de un nivel de fermentación hasta 1.
- Conjunto difuso Bajo: Este conjunto difuso considera un nivel bajo de fermentación en un intervalo de 0.8 a 2.
- Conjunto difuso Medio: Este conjunto difuso considera un nivel medio de fermentación en un intervalo de 1.8 a 3.
- Conjunto difuso Alto: Este conjunto difuso considera un nivel alto de fermentación en un intervalo de 2.8 a 4.

En la Figura 3.44 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que cuando el conjunto difuso es No, entonces Fermento tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 0.8 y 2 se dice que pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 1.8 y 3, entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad del Fermento se encuentra entre 2.8 y 4 se dice que pertenece al conjunto difuso Alto.

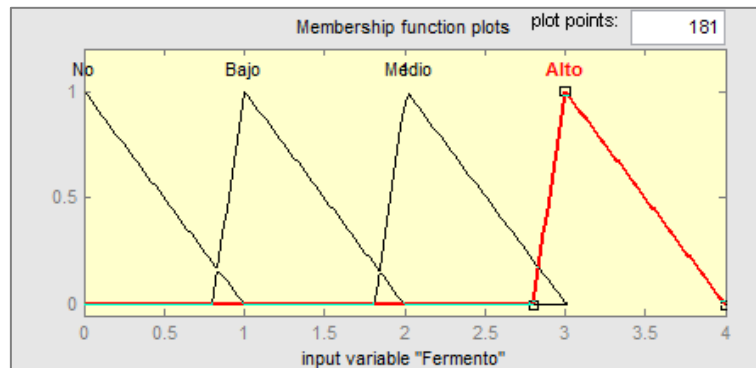


Figura 3.44 Función de membresía de la variable Fermento

De la Ecuación 3.119 a la Ecuación 3.122 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Fermento.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{x}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.119} \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{Bajo}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.8 \\ 1 - \frac{x - 0.8}{1 - 0.8} & \text{para } 0.8 \leq x \leq 1 \\ 1 - \frac{2 - x}{2 - 1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.120}$$

$$\mu_{\text{Medio}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1.8 \\ 1 - \frac{x - 1.8}{2 - 1.8} & \text{para } 1.8 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{3 - x}{3 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.121}$$

$$\mu_{\text{Alto}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.8 \\ 1 - \frac{x - 2.8}{3 - 2.8} & \text{para } 2.8 \leq x \leq 3 \\ 1 - \frac{4 - x}{4 - 3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.122}$$

• **Variable 2: Agrio**

Un sabor no placentero que destaca un gusto ácido, diferente de la acidez de la taza. Se debe a una fermentación inadecuada, a una cereza pasada, a la demora en un secado o a un exceso de la fermentación con muchas cortezas. Pueden originarse también, debido a un mal lavado y sobre calentamiento en las secadoras.

Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 0 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- Conjunto difuso No: Este conjunto difuso considera la ausencia de un nivel de Agrio hasta 1.
- Conjunto difuso Bajo: Este conjunto difuso considera un nivel bajo de Agrio en un intervalo de 0.8 a 2.
- Conjunto difuso Medio: Este conjunto difuso considera un nivel medio de Agrio en un intervalo de 1.8 a 3.

- Conjunto difuso Alto: Este conjunto difuso considera un nivel alto de Agrio en un intervalo de 2.8 a 4.

En la Figura 3.45 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que cuando el conjunto difuso es No, entonces el nivel de Agrio tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 0.8 y 2, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 1.8 y 3 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad se encuentra entre 2.8 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

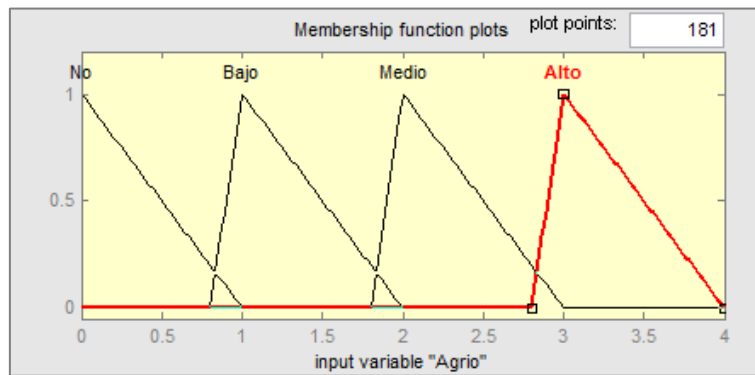


Figura 3.45 Función de membresías de la variable Agrio

De la Ecuación 3.123 a la Ecuación 3.126 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Agrio.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{1-x}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.123}$$

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.8 \\ 1 - \frac{x-0.8}{1-0.8} & \text{para } 0.8 \leq x \leq 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.124}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1.8 \\ 1 - \frac{x - 1.8}{2 - 1.8} & \text{para } 1.8 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{3 - x}{3 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.125}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.8 \\ 1 - \frac{x - 2.8}{3 - 2.8} & \text{para } 2.8 \leq x \leq 3 \\ 1 - \frac{4 - x}{4 - 3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.126}$$

• **Variable 3: Hediondo**

De sabor y olor desagradable debido al fermentado. Ocurre cuando el café no se lava a tiempo, sobre todo en días muy calurosos cuando ya se percibe un penetrante olor a ácido acético.

En esta variable se consideran cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 0 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- Conjunto difuso No: Este conjunto difuso considera la ausencia de un nivel de hediondez hasta 1.
- Conjunto difuso Bajo: Este conjunto difuso considera un nivel bajo de hediondez en un intervalo de 0.8 a 2.
- Conjunto difuso Medio: Este conjunto difuso considera un nivel medio de hediondez en un intervalo de 1.8 a 3.
- Conjunto difuso Alto: Este conjunto difuso considera un nivel alto de hediondez en un intervalo de 2.8 a 4.

En la Figura 3.46 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que cuando el conjunto difuso es No, entonces el nivel de Hediondo tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 0.8 y 2, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 1.8

y 3 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad se encuentra entre 2.8 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

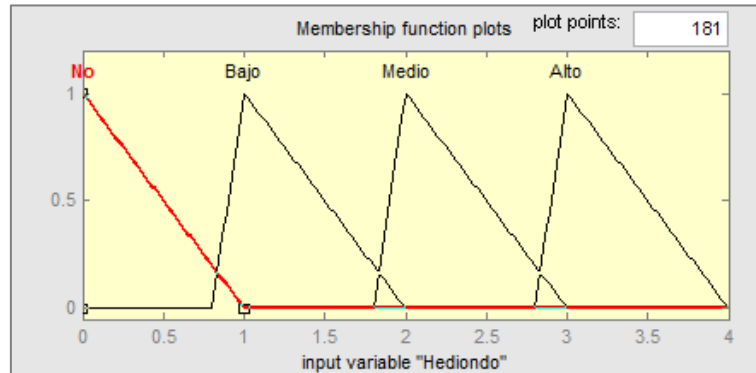


Figura 3.46 Función de membresía de la variable Hediondo.

De la Ecuación 3.127 a la Ecuación 3.130 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Hediondo.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{1-x}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.127}$$

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.8 \\ 1 - \frac{x-0.8}{1-0.8} & \text{para } 0.8 \leq x \leq 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.128}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1.8 \\ 1 - \frac{x-1.8}{2-1.8} & \text{para } 1.8 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.129}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.8 \\ 1 - \frac{x-2.8}{3-2.8} & \text{para } 2.8 \leq x \leq 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.130}$$

- **Variable 4: Tierra**

Es un defecto de la taza que se caracteriza por la percepción de un fuerte olor y sabor a tierra. Se produce porque el café entra en contacto con la tierra, especialmente en el secado.

En esta variable se consideran cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 0 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- Conjunto difuso No: Este conjunto difuso considera la ausencia de un nivel terroso hasta 1.
- Conjunto difuso Bajo: Este conjunto difuso considera un nivel terroso bajo en un intervalo de 0.8 a 2.
- Conjunto difuso Medio: Este conjunto difuso considera un nivel terroso medio en un intervalo de 1.8 a 3.
- Conjunto difuso Alto: Este conjunto difuso considera un nivel terroso alto en un intervalo de 2.8 a 4.

En la Figura 3.47 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que cuando el conjunto difuso es No, entonces el nivel de Tierra se tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 0.8 y 2, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 1.8 y 3 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad se encuentra entre 2.8 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

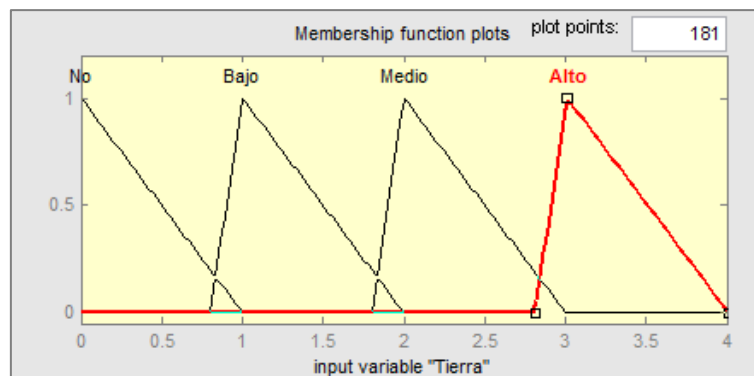


Figura 3.47 Función de membresía de la variable Tierra

De la Ecuación 3.131 a la Ecuación 3.134 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Tierra.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{1-x}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.131}$$

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.8 \\ 1 - \frac{x-0.8}{1-0.8} & \text{para } 0.8 \leq x \leq 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.132}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1.8 \\ 1 - \frac{x-1.8}{2-1.8} & \text{para } 1.8 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.133}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.8 \\ 1 - \frac{x-2.8}{3-2.8} & \text{para } 2.8 \leq x \leq 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.134}$$

• **Variable 5: Moho**

Es un defecto de la taza que se caracteriza por un sabor a moho (hongos). Este defecto se debe por la cosecha de frutos inmaduros.

En esta variable se consideran cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 0 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- Conjunto difuso No: Este conjunto difuso considera la ausencia de un nivel de Moho hasta 1.
- Conjunto difuso Bajo: Este conjunto difuso considera un nivel bajo de Moho en un intervalo de 0.8 a 2.

- Conjunto difuso Medio: Este conjunto difuso considera un nivel medio de Moho en un intervalo de 1.8 a 3.
- Conjunto difuso Alto: Este conjunto difuso considera un nivel alto de Moho en un intervalo de 2.8 a 4.

En la Figura 3.48 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que cuando el conjunto difuso es No, entonces el nivel de Moho tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 0.8 y 2, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 1.8 y 3 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad se encuentra entre 2.8 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

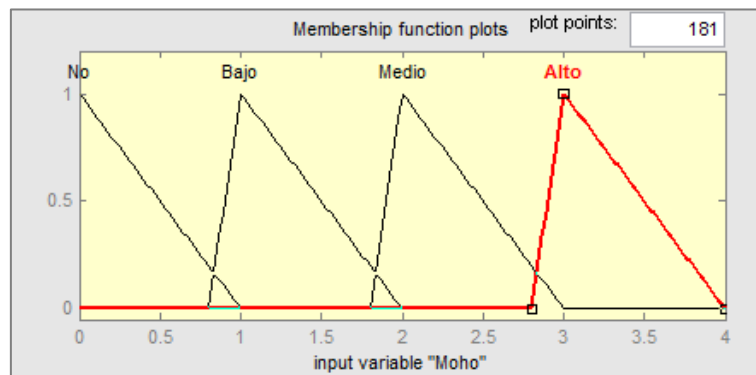


Figura 3.48 Función de membresía de la variable Moho

De la Ecuación 3.135 a la Ecuación 3.138 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Moho.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{1-x}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.135}$$

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.8 \\ 1 - \frac{x-0.8}{1-0.8} & \text{para } 0.8 \leq x \leq 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.136}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1.8 \\ 1 - \frac{x - 1.8}{2 - 1.8} & \text{para } 1.8 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{3 - x}{3 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.137}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.8 \\ 1 - \frac{x - 2.8}{3 - 2.8} & \text{para } 2.8 \leq x \leq 3 \\ 1 - \frac{4 - x}{4 - 3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.138}$$

• **Variable 6: Añejo**

Es un defecto de la taza que presenta un olor o un sabor de un café viejo o sobre fermentado. Defecto de la taza desagradable cuyo sabor característico es de un café añejo, este defecto se da por lo general cuando los lugares son muy calurosos.

En esta variable se consideran cuatro escenarios, mismos que definen cuatro conjuntos difusos en un intervalo de 0 a 4 en puntaje de calidad, los cuales son:

- Conjunto difuso No: Este conjunto difuso considera la ausencia de un nivel de añejamiento hasta 1.
- Conjunto difuso Bajo: Este conjunto difuso considera un nivel bajo de añejamiento en un intervalo de 0.8 a 2.
- Conjunto difuso Medio: Este conjunto difuso considera un nivel medio de añejamiento en un intervalo de 1.8 a 3.
- Conjunto difuso Alto: Este conjunto difuso considera un nivel alto de añejamiento en un intervalo de 2.8 a 4.

En la Figura 3.49 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que cuando el conjunto difuso es No, entonces el nivel de Añejo tiene presencia hasta un puntaje de calidad 1; por el contrario, si el café presenta un nivel de calidad entre 0.8 y 2, entonces esta pertenece al conjunto difuso Bajo, en caso que la variable se encuentre entre 1.8

y 3 entonces pertenece al conjunto difuso Medio, por el contrario, si el puntaje de calidad se encuentra entre 2.8 y 4 entonces pertenece al conjunto difuso Alto.

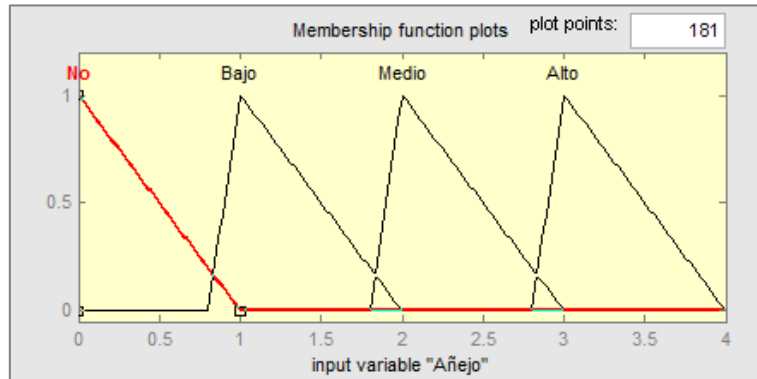


Figura 3.49 Función de membresía de la variable Añejo

En la Ecuación 3.139 a la Ecuación 3.142 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Añejo.

$$\mu_{No}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 - \frac{x-0}{1-0} & \text{para } 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{para } x > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.139}$$

$$\mu_{Bajo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.8 \\ 1 - \frac{x-0.8}{1-0.8} & \text{para } 0.8 \leq x \leq 1 \\ 1 - \frac{2-x}{2-1} & \text{para } 1 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{para } x > 2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.140}$$

$$\mu_{Medio}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1.8 \\ 1 - \frac{x-1.8}{2-1.8} & \text{para } 1.8 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{3-x}{3-2} & \text{para } 2 \leq x \leq 3 \\ 0 & \text{para } x > 3 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.141}$$

$$\mu_{Alto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.8 \\ 1 - \frac{x-2.8}{3-2.8} & \text{para } 2.8 \leq x \leq 3 \\ 1 - \frac{4-x}{4-3} & \text{para } 3 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{para } x > 4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.142}$$

- **Variable de salida.**

Para este modelo de lógica difusa se cuenta con la variable de salida Clase café robusto, la cual determina la clase o calidad del café evaluado existiendo 3 posibles niveles, los cuales son: calidad 7.2, calidad 7.3 y rechazar. Esta variable fue representada mediante tres conjuntos difusos.

En el caso de la variable de salida, se emplean funciones de tipo triangular y se encuentra acotada de en un intervalo de 7.2 a 7.7, los cuales son:

- El conjunto difuso 7.2: se refiere a que el café analizado es de tipo 7.2 y está acotado en un intervalo de 7.2 a 7.31.
- El conjunto difuso 7.3: se refiere a que el café analizado es de tipo 7.3 y está acotado en un intervalo de 7.3 a 7.41.
- El conjunto difuso Rechazar: se refiere a que el café analizado no es apto para el cliente, por lo que se rechaza el lote y está acotado en un intervalo de 7.4 a 7.5.

La Figura 3.50 presenta los conjuntos difusos de la variable de salida, donde se puede apreciar que la clase de café 7.2 tiene presencia hasta un puntaje de 7.31; por el contrario, si el café evaluado se encuentra entre 7.3 y 7.41, entonces esta pertenece al conjunto difuso 7.3, por el contrario, si el café rebasa el puntaje 7.4 entonces pertenece al conjunto difuso Rechazar.

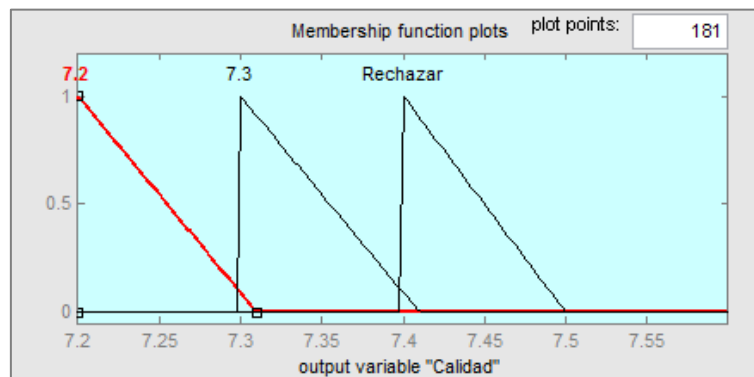


Figura 3.50 Función de membresía la variable Clase café robusto

De Ecuación 3.143 hasta la Ecuación 3.145 presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Clase café robusto.

$$\mu_{7.2}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 7.2 \\ 1 - \frac{7.31 - Z}{7.31 - 7.2} & \text{para } 7.2 \leq Z \leq 7.31 \text{ Ecuación 3.143} \\ 0 & \text{para } Z > 7.31 \end{cases}$$

$$\mu_{7.3}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 7.3 \\ 1 - \frac{7.41 - Z}{7.41 - 7.3} & \text{para } 7.3 \leq Z \leq 7.41 \text{ Ecuación 3.144} \\ 0 & \text{para } Z > 7.41 \end{cases}$$

$$\mu_{Rechazar}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 7.41 \\ 1 - \frac{7.5 - Z}{7.5 - 7.41} & \text{para } 7.41 \leq Z \leq 7.5 \text{ Ecuación 3.145} \\ 0 & \text{para } Z > 7.5 \end{cases}$$

3.2.4.3.6.3.2 Mecanismo de inferencia catación de café robusto

Para poder relacionar la información obtenida, se idéntico la interacción de las variables de entrada respecto a la variable de salida mediante la creación de las reglas de inferencia que emplea condiciones SI-ENTONCES.

Antes de crear cada una de las reglas de inferencia, se identifica primero el número total de reglas a obtener con base en las variables lingüísticas de entrada y lo conjuntos que conforman a cada una de ellas. En la Tabla 3.14 se muestra la obtención del número total de reglas de inferencia.

Tabla 3.14 Número de reglas de inferencia catación café robusto (Hernández González, 2017).

| VARIABLES LINGÜÍSTICAS | CONJUNTOS DIFUSOS |
|------------------------|-------------------|
| Fermento | 4 |
| Agrio | 4 |
| Hediondo | 4 |
| Tierra | 4 |
| Moho | 4 |
| Añejo | 4 |
| 4x4x4x4x4x4 = 4096 | |

Se generan en total 4096 combinaciones diferentes lo que significa un igual número de reglas, las cuales todas ellas son aplicables o válidas.

En la Figura 3.51 se presenta el mecanismo de reglas de inferencia y con ello queda en evidencia el comportamiento que tiene el modelo para predecir la clase de café robusto que se evalúa.

Para el proceso de validación de las reglas se empleó la información recopilada en las sesiones de entrevista con los expertos, mismos que corroboraron que las 4096 reglas difusas reflejan la realidad.

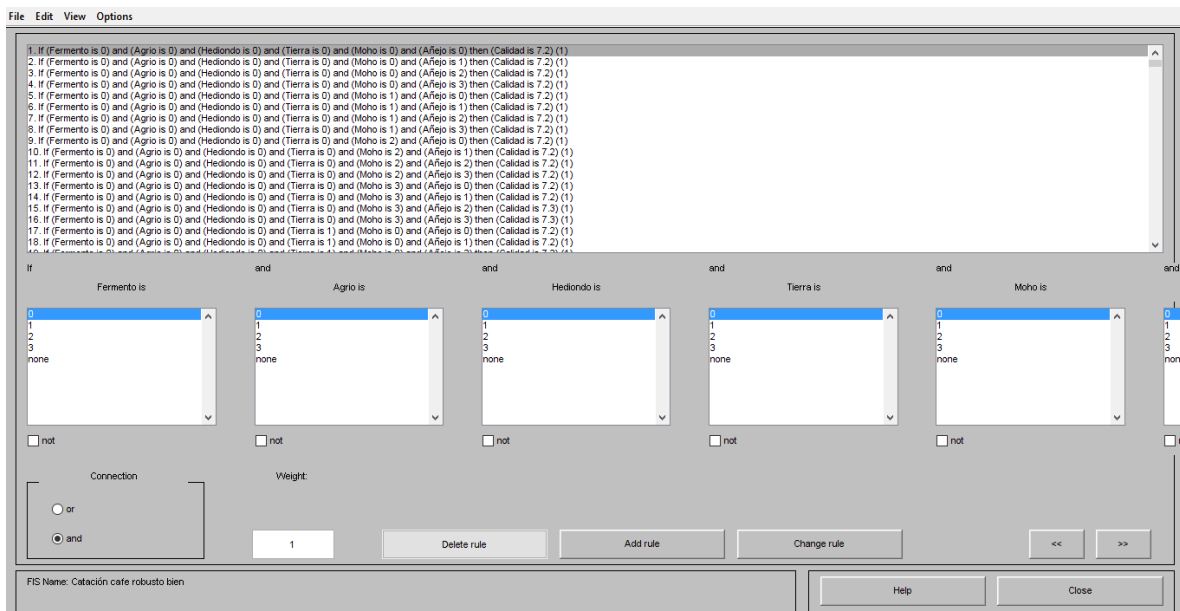


Figura 3.51 Mecanismo de inferencia del modelo catación café robusto

A continuación, se muestra algunos de los datos elegidos al azar, con sus respectivas 6 variables de entrada y su variable de salida.

En la Tabla 3.15 se presentan los resultados obtenidos de 24 datos comprobando la similitud del modelo con la opinión del experto.

Tabla 3.15 Validación del modelo de lógica difusa catación de café robusto (Hernández González, 2017).

| Entradas | | | | | | Experto | Modelo difuso |
|----------|-------|----------|--------|------|-------|---------|---------------|
| Fermento | Agrio | Hediondo | Tierra | Moho | Añejo | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 7.2 | 7.23 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 7.3 | 7.33 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 7.3 | 7.33 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 7.3 | 7.33 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 7.3 | 7.33 |
| 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 7.3 | 7.33 |
| 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 7.3 | 7.43 |
| 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 7.3 | 7.43 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7.3 | 7.33 |

En lo que se puede observar notoriamente que 2 de 24 datos no coinciden con la decisión del experto, dejando un grado de certeza del modelo del 91.66%, lo cual se considera bueno y valido para realizar predicciones confiables.

3.2.4.3.6.4 Modelo de lógica difusa para la selección de proceso del café pergamino

En la Figura 3.52 se muestra el esquema general del sistema difuso respecto al análisis físico que determina la selección del proceso productivo del café pergamino y se muestran las variables inciertas identificadas que participan en el proceso y que son la base del modelo.

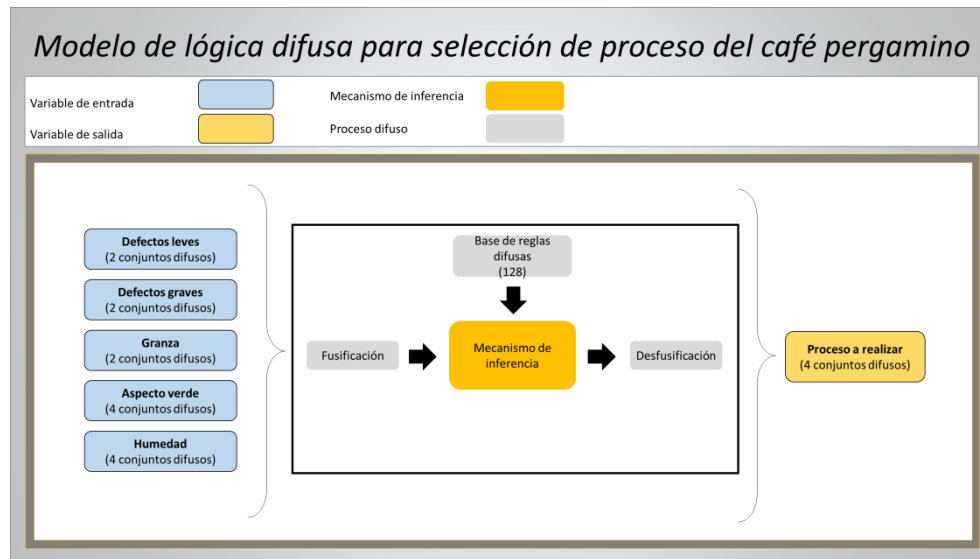


Figura 3.52 Modelo tipo Mandani para selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

3.2.4.3.6.4.1 Definición de variables lingüísticas

Para realizar el modelo de lógica difusa se contó con el apoyo de expertos en café y catadores de la empresa, mismos que lograron señalar parámetros inciertos que, con base en su experiencia, influyen en la selección de proceso. Para el modelo de lógica difusa estos señalamientos representan las variables de entrada del modelo considerando las siguientes calidades intrínsecas: defectos leves, defectos graves, granza, aspecto verde y humedad.

Es necesario modelar tanto las variables lingüísticas de entrada y salida por medio del uso de figuras geométricas, por lo que en esta sección se realiza dicha modelación como parte de la etapa de Fusificación.

- **Variable 1: Defectos leves**

Los defectos leves se consideran cuando el grano se presenta en concha, quebrados, en orejas, etc. Esta variable será considerada en dos escenarios, mismos que representan dos conjuntos difusos, denominados: Normal y Muchos.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normales los defectos leves de 0 hasta un 2.5%.
- Conjunto difuso Muchos: Este conjunto difuso considera muchos los defectos leves en un intervalo de 2% hasta 22.4%.

En la Figura 3.53 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se consideran Defectos leves Normal hasta un porcentaje del 2.5%; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 2% de calidad entonces pertenece al conjunto difuso Muchos.

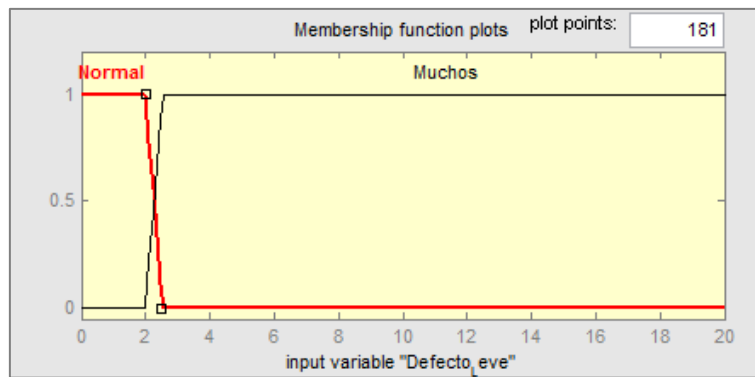


Figura 3.53 Función de membresía de la variable Defectos leves

La Ecuación 3.146 y Ecuación 3.147 representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Defectos leves.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{2.5 - x}{2.5 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 2.5 \\ 0 & \text{para } x > 2.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.146}$$

$$\mu_{Muchos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{x - 2.5}{2.5 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 2.5 \\ 1 & \text{para } 2.5 \leq x \leq 22 \\ 1 - \frac{22.4 - x}{22.4 - 22} & \text{para } 22 \leq x \leq 22.4 \\ 0 & \text{para } x > 22.4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.147}$$

• **Variable 2: Defectos graves**

Los defectos graves se consideran cuando el grano se presenta negro, fermentado, agrio, brocados, etc. Esta variable será considerada en dos escenarios, mismos que representan dos conjuntos difusos, denominados: Normal y Muchos.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normales los defectos graves de 0 hasta un 2.5%
- Conjunto difuso Muchos: Este conjunto difuso considera muchos los defectos graves en un intervalo de 2% hasta 21.4%

En la Figura 3.54 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se consideran Defectos graves Normal hasta un porcentaje del 2.5%; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 2% de calidad entonces pertenece al conjunto difuso Muchos.

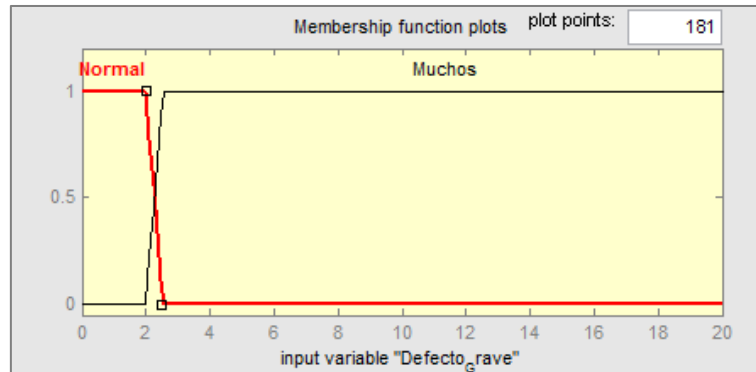


Figura 3.54 Función de membresía de la variable Defectos graves

La Ecuación 3.148 y Ecuación 3.149 representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Defectos graves.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 2 \\ 1 - \frac{2.5 - x}{2.5 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 2.5 \\ 0 & \text{para } x > 2.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.148}$$

$$\mu_{Muchos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2 \\ 1 - \frac{x - 2.5}{2.5 - 2} & \text{para } 2 \leq x \leq 2.5 \\ 1 & \text{para } 2.5 \leq x \leq 20.5 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.149} \\ 1 - \frac{21.4 - x}{21.4 - 20.5} & \text{para } 20.5 \leq x \leq 21. \\ 0 & \text{para } x > 21.4 \end{cases}$$

• **Variable 3: Granza**

La granza es el grano roto de café. Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Normal y Mucha.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normal la granza de 0 hasta un 0.75%
- Conjunto difuso Mucha: Este conjunto difuso considera mucha la granza en un intervalo de 0.5% hasta 11%

En la Figura 3.55 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se considera Granza Normal hasta un porcentaje menor del 0.5%; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 0.5% de calidad entonces pertenece al conjunto difuso Mucha.

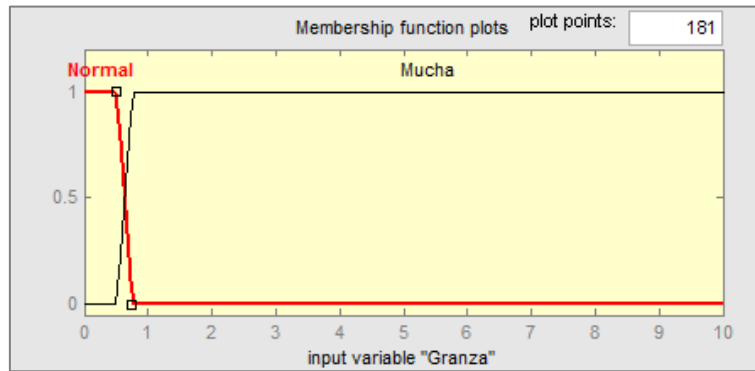


Figura 3.55 Función de membresía de la variable Granza

La Ecuación 3.150 y Ecuación 3.151 representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Granza.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1 - \frac{0.75 - x}{0.75 - 0.5} & \text{para } 0.5 \leq x \leq 0.75 \\ 0 & \text{para } x > 0.75 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.150}$$

$$\mu_{Mucha}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0.5 \\ 1 - \frac{x - 0.75}{0.75 - 0.5} & \text{para } 0.5 \leq x \leq 0.75 \\ 1 & \text{para } 0.75 \leq x \leq 11 \\ 0 & \text{para } x > 11 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.151}$$

• **Variable 4: Humedad**

La humedad, es el contenido de agua que presenta el grano café en el momento de evaluación dentro de la empresa.

Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que representan cuatro conjuntos difusos, denominados: Pasado de Seco, Permitido, Ligero Falto y Falto de Secado.

- Conjunto difuso Pasado de Seco: Este conjunto difuso considera pasado de seco la humedad en un intervalo de 7.87% hasta un 11.4%
- Conjunto difuso Permitido: Este conjunto difuso considera permitido la humedad en un intervalo de 10.8% hasta 12.75%
- Conjunto difuso Ligero Falto: Este conjunto difuso considera ligero fallo la humedad en un intervalo de 12.5% hasta 13%
- Conjunto difuso Falto de Secado: Este conjunto difuso considera fallo de secado la humedad en un intervalo de 12.75% hasta 17.9%

En la Figura 3.56 se presentan los conjuntos difusos de esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

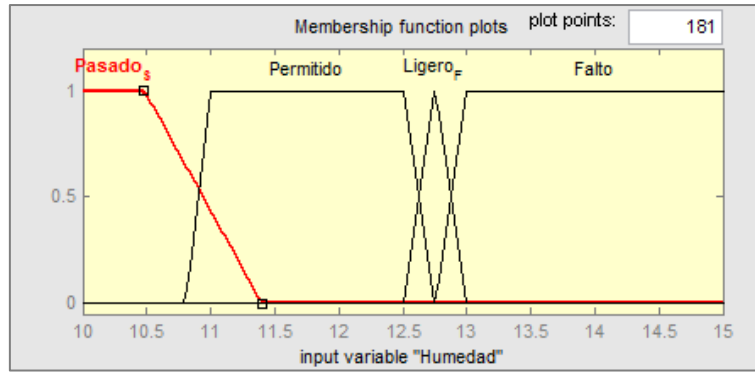


Figura 3.56 Función de membresía de la variable Humedad

De la Ecuación 3.152 hasta la Ecuación 3.155 se representan las funciones de pertenencia tipo trapecoidal de los conjuntos difusos de la variable Humedad.

$$\mu_{Pasado\ de\ Seco}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 7.87 \\ 1 - \frac{x - 9.47}{9.47 - 7.87} & \text{para } 7.87 \leq x \leq 9.47 \\ 1 & \text{para } 9.47 \leq x \leq 10.48 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.152} \\ 1 - \frac{11.4 - x}{11.4 - 10.48} & \text{para } 10.48 \leq x \leq 11.4 \\ 0 & \text{para } x > 11.4 \end{cases}$$

$$\mu_{Permitido}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 10.8 \\ 1 - \frac{x - 11}{11 - 10.8} & \text{para } 10.8 \leq x \leq 11 \\ 1 & \text{para } 11 \leq x \leq 12.5 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.153} \\ 1 - \frac{12.75 - x}{12.75 - 12.5} & \text{para } 12.5 \leq x \leq 12.75 \\ 0 & \text{para } x > 12.75 \end{cases}$$

$$\mu_{Ligero\ Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.5 \\ 1 - \frac{x - 12.75}{12.75 - 12.5} & \text{para } 12.5 \leq x \leq 12.75 \\ 1 - \frac{13 - x}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.154} \\ 0 & \text{para } x > 13 \end{cases}$$

$$\mu_{Falto\ de\ Secado}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.75 \\ 1 - \frac{x - 13}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \\ 1 & \text{para } 13 \leq x \leq 15.7 \\ 1 - \frac{17.9 - x}{17.9 - 15.7} & \text{para } 15.7 \leq x \leq 17.9 \\ 0 & \text{para } x > 17.9 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.155}$$

• **Variable 5: Aspecto verde**

El Aspecto Verde, es el color que presenta el grano de café en el análisis organoléptico, este también se representa por medio de la humedad que tiene el grano. Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que representan cuatro conjuntos difusos, denominados: Bueno, Ligeramente Falto, Falto y Muy Falto.

- Conjunto difuso Bueno: Este conjunto difuso considera bueno el aspecto verde en un intervalo de 7.32% hasta 12.75%
- Conjunto difuso Ligeramente Falto: Este conjunto difuso considera ligeramente falto el aspecto verde en un intervalo de 12.5% hasta 13%
- Conjunto difuso Falto: Este conjunto difuso considera falto el aspecto verde en un intervalo de 12.75% hasta 14%
- Conjunto difuso Muy Falto: Este conjunto difuso considera muy falto el aspecto verde en un intervalo de 13% hasta 18%

En la Figura 3.57 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

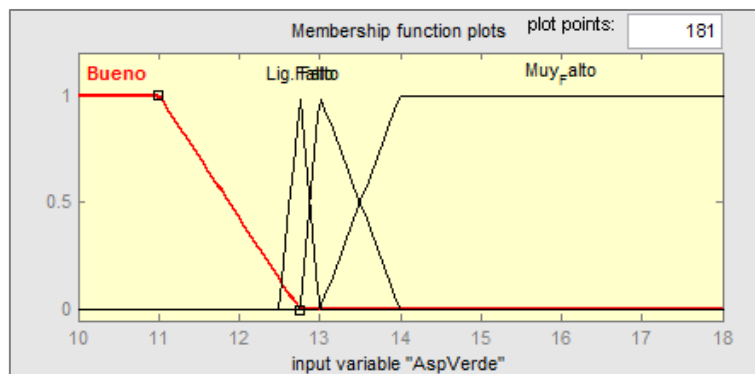


Figura 3.57 Función de membresía de la variable Aspecto verde

De la Ecuación 3.156 hasta la Ecuación 3.159 se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de la variable Aspecto verde.

$$\mu_{Bueno}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 7.32 \\ 1 - \frac{x - 8.95}{8.95 - 7.32} & \text{para } 7.32 \leq x \leq 8.95 \\ 1 & \text{para } 8.95 \leq x \leq 11 \\ 1 - \frac{12.75 - x}{12.75 - 11} & \text{para } 11 \leq x \leq 12.75 \\ 0 & \text{para } x > 12.75 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.156}$$

$$\mu_{Ligeramente Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.5 \\ 1 - \frac{x - 12.75}{12.75 - 12.5} & \text{para } 12.5 \leq x \leq 12.75 \\ 1 - \frac{13 - x}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \\ 0 & \text{para } x > 13 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.157}$$

$$\mu_{Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.75 \\ 1 - \frac{x - 13}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \\ 1 - \frac{14 - x}{14 - 13} & \text{para } 13 \leq x \leq 14 \\ 0 & \text{para } x > 14 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.158}$$

$$\mu_{Muy Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 13 \\ 1 - \frac{x - 14}{14 - 13} & \text{para } 13 \leq x \leq 14 \\ 1 & \text{para } 14 \leq x \leq 18 \\ 0 & \text{para } x > 18 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.159}$$

• **Variable de salida**

Para este modelo de lógica difusa se cuenta con la variable de salida Selección de proceso café pergamino, la cual determina la combinación de procesos que debe seguir el grano existiendo:

- Mezcla, el café de entrada es tiene muy buenas características por lo que pasa directamente a la mezcla.
- Mecánico el café contiene algunos defectos leves por lo que se realiza un repaso mecánico para quitarlos.
- Electrónico cuando el café presenta muchos defectos graves, en su mayoría grano negro o rojo.

- Granza cuando en la muestra representativa se presenta mucho grano quebrado.
- Secar cuando el índice de humedad del grano es muy elevado.
- Secar poco cuando el índice de humedad del grano sea mínimo.

Se tienen 4 salidas para poder realizar la combinación de los procesos que corresponden:

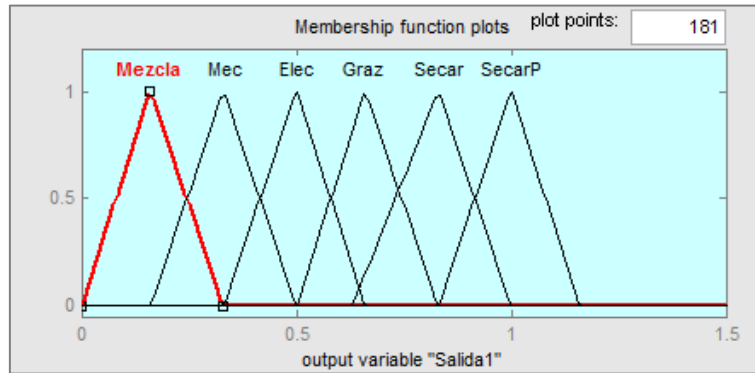


Figura 3.58 Función de membresía para la variable de salida 1

En la salida 1 que se muestra en la Figura 3.58, muestra los conjuntos difusos mezcla, mecánica, electrónica, granza y los procesos de secado. De la Ecuación 3.160 a la Ecuación 3.165 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Salida 1.

$$\mu_{Mezcla}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{0.16 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 0.16 \\ 1 - \frac{0.33 - Z}{0.33 - 0.16} & \text{para } 0.16 \leq Z \leq 0.33 \\ 0 & \text{para } Z > 0.33 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.160}$$

$$\mu_{Mecánica}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.17 \\ 1 - \frac{Z - 0.17}{0.34 - 0.17} & \text{para } 0.17 \leq Z \leq 0.34 \\ 1 - \frac{0.51 - Z}{0.51 - 0.34} & \text{para } 0.34 \leq Z \leq 0.51 \\ 0 & \text{para } Z > 0.51 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.161}$$

$$\mu_{Electrónica}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.33 \\ 1 - \frac{Z - 0.33}{0.50 - 0.33} & \text{para } 0.33 \leq Z \leq 0.50 \\ 1 - \frac{0.66 - Z}{0.66 - 0.50} & \text{para } 0.50 \leq Z \leq 0.66 \\ 0 & \text{para } Z > 0.66 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.162}$$

$$\mu_{Granza}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.50 \\ 1 - \frac{Z - 0.5}{0.66 - 0.50} & \text{para } 0.50 \leq Z \leq 0.66 \\ 1 - \frac{0.83 - Z}{0.83 - 0.66} & \text{para } 0.66 \leq Z \leq 0.83 \\ 0 & \text{para } Z > 0.83 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.163}$$

$$\mu_{Secar}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.63 \\ 1 - \frac{Z - 0.63}{0.83 - 0.63} & \text{para } 0.63 \leq Z \leq 0.83 \\ 1 - \frac{1 - Z}{1 - 0.83} & \text{para } 0.83 \leq Z \leq 1 \\ 0 & \text{para } Z > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.164}$$

$$\mu_{SecarP}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.83 \\ 1 - \frac{Z - 0.83}{1 - 0.83} & \text{para } 0.83 \leq Z \leq 1 \\ 1 - \frac{1.16 - Z}{1.16 - 1} & \text{para } 1 \leq Z \leq 1.16 \\ 0 & \text{para } Z > 1.16 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.165}$$

En la salida 2 que se muestra en la Figura 3.59, muestra los conjuntos difusos mecánica, electrónica, granza y los procesos de secado.

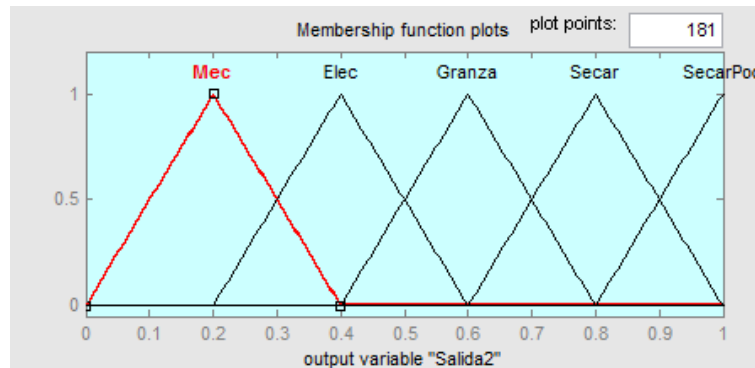


Figura 3.59 Función de membresía para la variable de salida 2

De la Ecuación 3.166 a la Ecuación 3.170 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Salida 2.

$$\mu_{Mecanicas}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{0.2 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 0.2 \\ 1 - \frac{0.4 - Z}{0.4 - 0.2} & \text{para } 0.2 \leq Z \leq 0.4 \\ 0 & \text{para } Z > 0.4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.166}$$

$$\mu_{Electronicas}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.2 \\ 1 - \frac{Z - 0.2}{0.4 - 0.2} & \text{para } 0.2 \leq Z \leq 0.4 \\ 1 - \frac{0.6 - Z}{0.6 - 0.4} & \text{para } 0.4 \leq Z \leq 0.6 \\ 0 & \text{para } Z > 0.6 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.167}$$

$$\mu_{Granza}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.4 \\ 1 - \frac{Z - 0.4}{0.6 - 0.4} & \text{para } 0.4 \leq Z \leq 0.6 \\ 1 - \frac{0.8 - Z}{0.8 - 0.6} & \text{para } 0.6 \leq Z \leq 0.8 \\ 0 & \text{para } Z > 0.8 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.168}$$

$$\mu_{Secar}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.6 \\ 1 - \frac{Z - 0.6}{0.8 - 0.6} & \text{para } 0.6 \leq Z \leq 0.8 \\ 1 - \frac{1.0 - Z}{1.0 - 0.8} & \text{para } 0.8 \leq Z \leq 1.0 \\ 0 & \text{para } Z > 1.0 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.169}$$

$$\mu_{SecarP}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.8 \\ 1 - \frac{Z - 0.8}{1.0 - 0.8} & \text{para } 0.8 \leq Z \leq 1.0 \\ 1 - \frac{1.2 - Z}{1.2 - 1.0} & \text{para } 1.0 \leq Z \leq 1.2 \\ 0 & \text{para } Z > 1.2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.170}$$

En la salida 3 que se muestra en la Figura 3.60, y la salida 4 que se muestra en la Figura 3.61, tienen el mismo comportamiento que la salida 2.

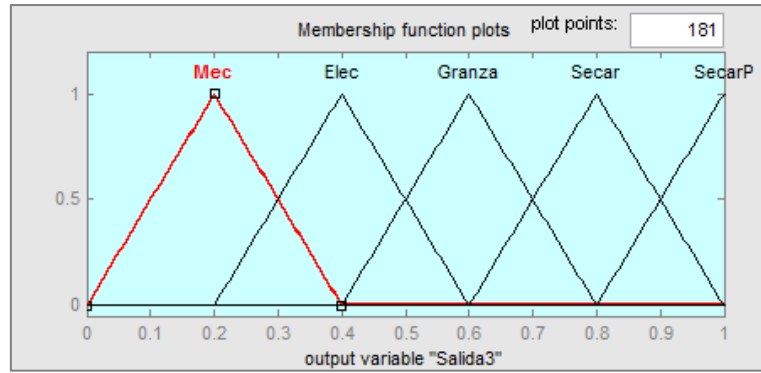


Figura 3.60 Función de membresía para la variable de salida 3

Por lo tanto la descripción de los conjuntos difusos para la salida 3 y 4 son idénticos a los presentados en la Ecuación 3.166 a la Ecuación 3.170.

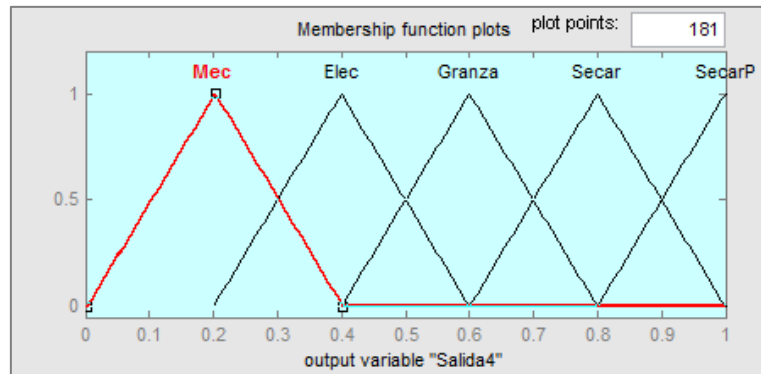


Figura 3.61 Función de membresía para la variable de salida 4

3.2.4.3.6.4.2 Mecanismo de inferencia selección de proceso café pergamino

Para poder relacionar la información obtenida, se idéntico la interacción de las variables de entrada respecto a la variable de salida mediante la creación de las reglas de inferencia que emplea condiciones SI-ENTONCES. Como se menciona en la sección anterior, para la creación de reglas de inferencia se emplea el modelo tipo Mamdani.

Antes de crear cada una de las reglas de inferencia, se identifica primero el número total de reglas a obtener con base en las variables lingüísticas de entrada y lo conjuntos que conforman a cada una de ellas. En la Tabla 3.16 se muestra la obtención del número total de reglas de inferencia.

Tabla 3.16 Número de reglas de inferencia selección de proceso café pergamino (Hernández González, 2017).

| Variables lingüísticas | Conjuntos difusos |
|---|-------------------|
| Defectos leves | 2 |
| Defectos graves | 2 |
| Granza | 2 |
| Aspecto verde | 4 |
| Humedad | 4 |
| $2 \times 2 \times 2 \times 4 \times 4 = 128$ | |

Se generan en total 128 combinaciones diferentes lo que significa un igual número de reglas, las cuales todas ellas son aplicables o válidas. En la Figura 3.62 se presenta el editor de reglas de inferencia del software y con ello queda en evidencia el comportamiento que tiene el modelo para predecir la combinación de procesos a seguir del café pergamino.

Para el proceso de validación de las reglas se empleó la información recopilada en las sesiones de entrevista con los expertos, mismos que corroboraron que las 128 reglas difusas reflejan la realidad. A continuación se muestra algunos de los datos elegidos al azar, con sus respectivas variables de entrada y salida.

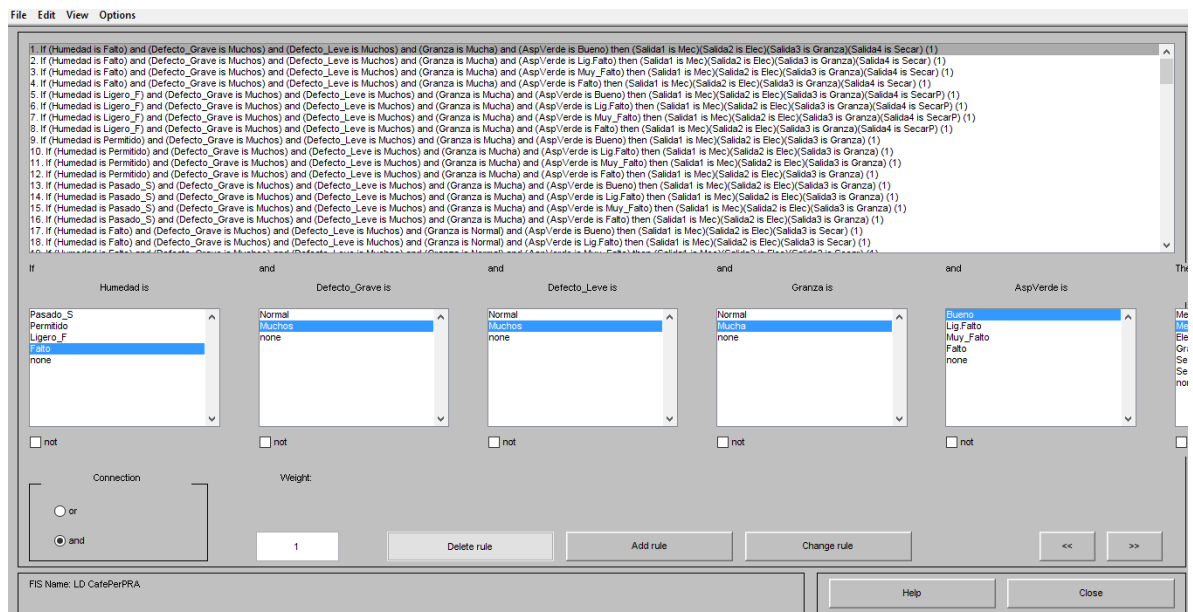


Figura 3.62 Mecanismo de inferencia del modelo selección de proceso café pergamino

En la Tabla 3.17 se presentan los resultados obtenidos de 25 datos comprobando la similitud del modelo con la opinión del experto.

Tabla 3.17 Validación del modelo de lógica difusa selección de proceso café pergamino (Hernández González, 2017).

| | Proceso real | Proceso Modelo de lógica difusa |
|----|--|--|
| 1 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar |
| 2 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar poco |
| 3 | Mecánico / Granza | Mecánico / Granza |
| 4 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 5 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 6 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 7 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 8 | Mecánico / Granza / Secar | Mecánico / Granza / Secar |
| 9 | Mezcla | Mezcla |
| 10 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 11 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 12 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 13 | Mecánico / Granza / Secar | Mecánico / Granza / Secar |
| 14 | Mezcla | Mezcla |
| 15 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 16 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar |
| 17 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar poco |
| 18 | Mecánico / Granza | Mecánico / Granza |
| 19 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 20 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 21 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 22 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 23 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 24 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 25 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |

En lo que se puede observar notoriamente que todos datos coinciden con la decisión del experto, dejando un grado de certeza del modelo del 100%, lo cual se considera bueno y valido para realizar predicciones confiables.

3.2.4.3.6.5 Modelo de lógica difusa para la selección de proceso del café bola robusto robusto

En la Figura 3.63 se muestra el esquema general del sistema difuso respecto al análisis físico que determina la selección del proceso productivo del café bola robusto y se muestran las variables inciertas identificadas que participan en el proceso y que son la base del modelo.

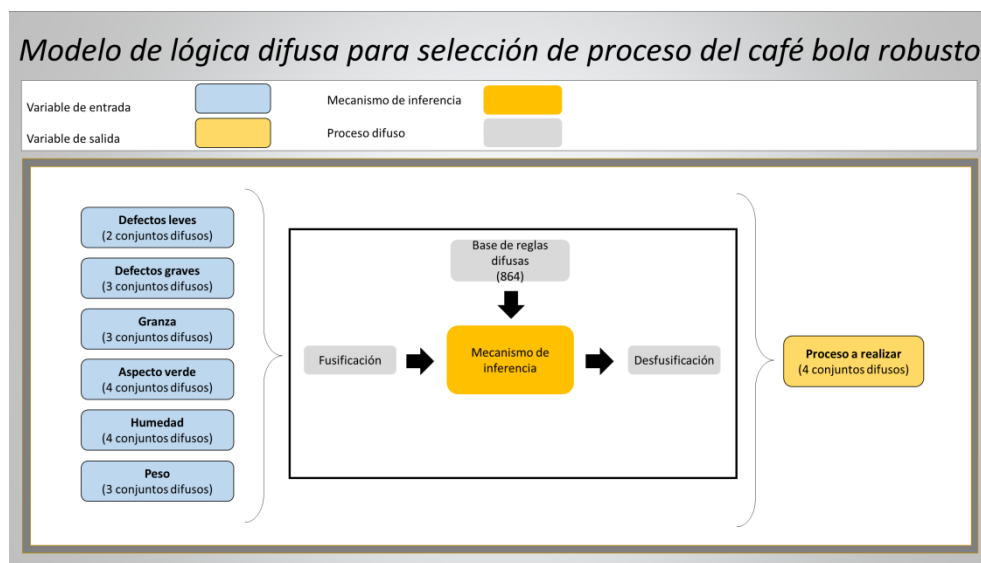


Figura 3.63 Modelo tipo Mandani para selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

3.2.4.3.6.5.1 Definición de variables lingüísticas

Para realizar el modelo de lógica difusa se contó con el apoyo de expertos en café y catadores de la empresa, mismos que lograron señalar parámetros inciertos que, con base en su experiencia, influyen selección del proceso. Para el modelo de lógica difusa estos señalamientos representan las variables de entrada del modelo considerando las siguientes calidades intrínsecas: defectos leves, defectos graves, granza, aspecto verde y humedad.

- **Variable 1: Defectos leves**

Los defectos leves se consideran cuando el grano se presenta en concha, quebrados, en orejas, etc. Esta variable será considerada en dos escenarios, mismos que representan dos conjuntos difusos, denominados: Normal y Muchos.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normales los defectos leves de 0 hasta un 10.5%
- Conjunto difuso Muchos: Este conjunto difuso considera muchos los defectos leves en un intervalo de 10% hasta 20.23%

En la Figura 3.64 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se consideran Defectos leves Normal hasta un porcentaje del 10.5%; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 10% entonces pertenece al conjunto difuso Muchos.

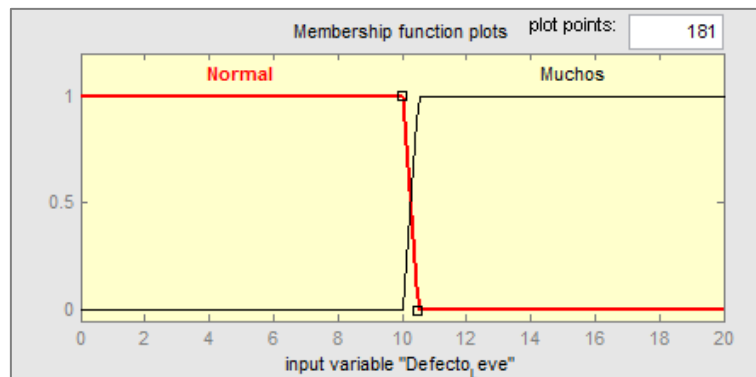


Figura 3.64 Función de membresía de la variable Defectos leves

La Ecuación 3.171 y Ecuación 3.172 representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Defectos leves.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 10 \\ 1 - \frac{10.5 - x}{10.5 - 10} & \text{para } 10 \leq x \leq 10.5 \\ 0 & \text{para } x > 10.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.171}$$

$$\mu_{Muchos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 10 \\ 1 - \frac{x - 10}{10.5 - 10} & \text{para } 10 \leq x \leq 10.5 \\ 1 & \text{para } 10.5 \leq x \leq 20.23 \\ 0 & \text{para } x > 20.23 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.172}$$

• **Variable 2: Defectos graves**

Los defectos graves se consideran cuando el grano se presenta negro, fermentado, agrio, brocados, etc. Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Normal, Más o Menos y Muchos.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normales los defectos graves de 0 hasta un 9.81%
- Conjunto difuso Mas o Menos: Este conjunto difuso considera más o menos los defectos graves en un intervalo de 9.5% hasta 13%
- Conjunto difuso Muchos: Este conjunto difuso considera muchos los defectos graves en un intervalo de 12.83 hasta 30%

En la Figura 3.65 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se consideran Defectos graves Normal hasta un porcentaje del 9.81%, en el caso de que el porcentaje sea entre 9.5% y 13% entonces se considera del conjunto difuso Mas o menos; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 12.83% entonces pertenece al conjunto difuso Muchos.

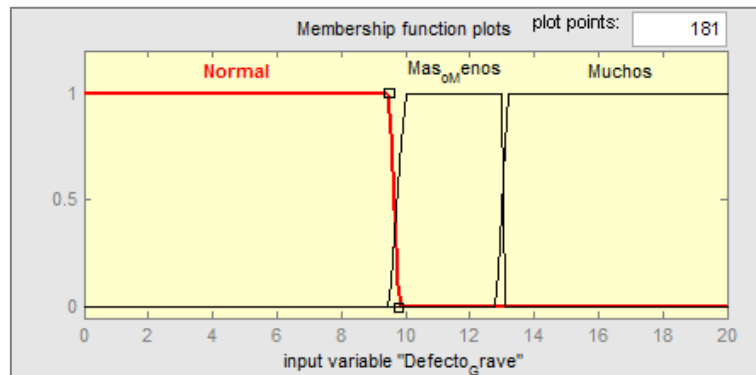


Figura 3.65 Función de membresía de la variable Defectos graves

De la Ecuación 3.173 a la Ecuación 3.175 se representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Defectos graves.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 9.49 \\ 1 - \frac{9.81 - x}{9.81 - 9.49} & \text{para } 9.49 \leq x \leq 9.81 \\ 0 & \text{para } x > 9.81 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.173}$$

$$\mu_{Mas\ o\ menos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 9.50 \\ 1 - \frac{x - 9.50}{10 - 9.50} & \text{para } 9.50 \leq x \leq 10 \\ 1 & \text{para } 10 \leq x \leq 13 \\ 0 & \text{para } x > 13 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.174}$$

$$\mu_{Muchos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.83 \\ 1 - \frac{x - 12.83}{13.2 - 12.83} & \text{para } 12.83 \leq x \leq 13.2 \\ 1 & \text{para } 13.2 \leq x \leq 20.5 \\ 1 - \frac{30 - x}{30 - 20.5} & \text{para } 20.5 \leq x \leq 30 \\ 0 & \text{para } x > 30 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.175}$$

• **Variable 3: Granza**

La granza es el grano roto de café. Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Normal, Más o Menos y Mucha.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normal la granza de 0 hasta un 2.536%
- Conjunto difuso Más o Menos: Este conjunto difuso considera más o menos la granza en un intervalo de 2.29% hasta 3.779%
- Conjunto difuso Mucha: Este conjunto difuso considera mucha la granza en un intervalo de 3.5% hasta 10%

En la Figura 3.66 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se considera Granza Normal hasta un porcentaje menor del 2.53%; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 2.29% y hasta 3.77% de calidad entonces pertenece al conjunto difuso Más o menos, sin embargo, cuando el puntaje excede el 3.5% se dice que pertenece al conjunto difuso Mucha.

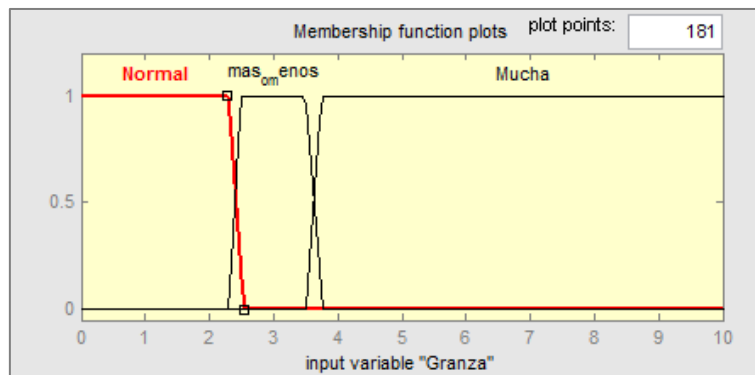


Figura 3.66 Función de membresía de la variable Granza

De la Ecuación 3.176 a la Ecuación 3.178 se presentan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Granza.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 2.286 \\ 1 - \frac{2.536 - x}{2.536 - 2.286} & \text{para } 2.286 \leq x \leq 2.536 \\ 0 & \text{para } x > 2.536 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.176}$$

$$\mu_{Mas\ o\ menos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 2.29 \\ 1 - \frac{x - 2.49}{2.49 - 2.29} & \text{para } 2.29 \leq x \leq 2.49 \\ 1 & \text{para } 2.49 \leq x \leq 3.491 \\ 1 - \frac{3.779 - x}{3.779 - 3.491} & \text{para } 3.491 \leq x \leq 3.779 \\ 0 & \text{para } x > 3.779 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.177}$$

$$\mu_{Mucha}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3.5 \\ 1 - \frac{x - 3.75}{3.75 - 3.5} & \text{para } 3.5 \leq x \leq 3.75 \\ 1 & \text{para } 3.75 \leq x \leq 10 \\ 0 & \text{para } x > 10 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.178}$$

• **Variable 4: Humedad**

La humedad, es el contenido de agua que presenta el grano café en ese momento. Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que representan cuatro conjuntos difusos, denominados: Pasado de Seco, Permitido, Ligeramente Falto y Falto de Secado.

- Conjunto difuso Pasado de Seco: Este conjunto difuso considera pasado de seco la humedad en un intervalo de 7.87% hasta un 11.4%
- Conjunto difuso Permitido: Este conjunto difuso considera permitido la humedad en un intervalo de 10.8% hasta 12.75%
- Conjunto difuso Ligeramente Falto: Este conjunto difuso considera ligeramente falto la humedad en un intervalo de 12.5% hasta 13%
- Conjunto difuso Falto de Secado: Este conjunto difuso considera falto de secado la humedad en un intervalo de 12.75% hasta 17.9%

En la Figura 3.67 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

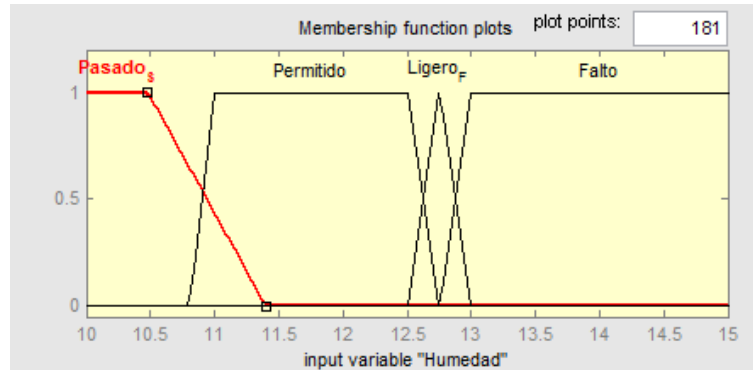


Figura 3.67 Función de membresía de la variable Humedad

De la Ecuación 3.179 hasta la Ecuación 3.182 se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de la variable Humedad.

$$\mu_{Pasado\ de\ Seco}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 7.87 \\ 1 - \frac{x - 9.47}{9.47 - 7.87} & \text{para } 7.87 \leq x \leq 9.47 \\ 1 & \text{para } 9.47 \leq x \leq 10.48 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.179} \\ 1 - \frac{11.4 - x}{11.4 - 10.48} & \text{para } 10.48 \leq x \leq 11.4 \\ 0 & \text{para } x > 11.4 \end{cases}$$

$$\mu_{Permitido}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 10.8 \\ 1 - \frac{x - 11}{11 - 10.8} & \text{para } 10.8 \leq x \leq 11 \\ 1 & \text{para } 11 \leq x \leq 12.5 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.180} \\ 1 - \frac{12.75 - x}{12.75 - 12.5} & \text{para } 12.5 \leq x \leq 12.75 \\ 0 & \text{para } x > 12.75 \end{cases}$$

$$\mu_{Ligero\ Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.5 \\ 1 - \frac{x - 12.75}{12.75 - 12.5} & \text{para } 12.5 \leq x \leq 12.75 \\ 1 - \frac{13 - x}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.181} \\ 0 & \text{para } x > 13 \end{cases}$$

$$\mu_{Falto\ de\ Secado}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.75 \\ 1 - \frac{x - 13}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \\ 1 & \text{para } 13 \leq x \leq 15.7 \\ 1 - \frac{17.9 - x}{17.9 - 15.7} & \text{para } 15.7 \leq x \leq 17.9 \\ 0 & \text{para } x > 17.9 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.182}$$

• **Variable 5: Aspecto verde**

El Aspecto Verde, es el color que presenta el grano de café en el análisis organoléptico, este también se representa por medio de la humedad que tiene el grano.

Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que representan cuatro conjuntos difusos, denominados: Bueno, Ligeramente Falto, Falto y Muy Falto.

- Conjunto difuso Bueno: Este conjunto difuso considera bueno el aspecto verde en un intervalo de 7.32% hasta 12.75%
- Conjunto difuso Ligeramente Falto: Este conjunto difuso considera ligeramente falto el aspecto verde en un intervalo de 12.5% hasta 13%
- Conjunto difuso Falto: Este conjunto difuso considera falto el aspecto verde en un intervalo de 12.75% hasta 14%
- Conjunto difuso Muy Falto: Este conjunto difuso considera muy falto el aspecto verde en un intervalo de 13% hasta 18%

En la Figura 3.68 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

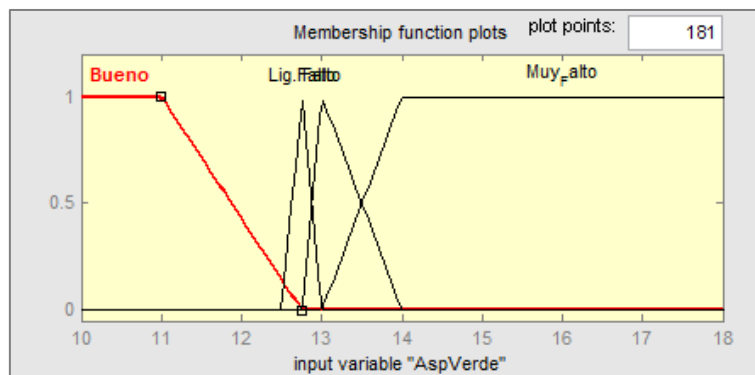


Figura 3.68 Función de membresía de la variable Aspecto verde

De la Ecuación 3.183 hasta la Ecuación 3.186 se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de la variable Aspecto verde.

$$\mu_{Bueno}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 7.32 \\ 1 - \frac{x - 8.95}{8.95 - 7.32} & \text{para } 7.32 \leq x \leq 8.95 \\ 1 & \text{para } 8.95 \leq x \leq 11 \\ 1 - \frac{12.75 - x}{12.75 - 11} & \text{para } 11 \leq x \leq 12.75 \\ 0 & \text{para } x > 12.75 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.183}$$

$$\mu_{Ligeramente Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.5 \\ 1 - \frac{x - 12.75}{12.75 - 12.5} & \text{para } 12.5 \leq x \leq 12.75 \\ 1 - \frac{13 - x}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \\ 0 & \text{para } x > 13 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.184}$$

$$\mu_{Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 12.75 \\ 1 - \frac{x - 13}{13 - 12.75} & \text{para } 12.75 \leq x \leq 13 \\ 1 - \frac{14 - x}{14 - 13} & \text{para } 13 \leq x \leq 14 \\ 0 & \text{para } x > 14 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.185}$$

$$\mu_{Muy Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 13 \\ 1 - \frac{x - 14}{14 - 13} & \text{para } 13 \leq x \leq 14 \\ 1 & \text{para } 14 \leq x \leq 18 \\ 0 & \text{para } x > 18 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.186}$$

• **Variable 6: Peso**

Se considera a la cantidad de café en kilogramos que ingresa al sistema, pudiendo afectar el tipo de proceso que tiene que seguir el café.

Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Poco, Normal y Mucho.

- Conjunto difuso Poco: Este conjunto difuso considera poco el peso en un intervalo de 0 hasta 7012 kg.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normal el peso en un intervalo de 5214 hasta 19410 kg.
- Conjunto difuso Mucho: Este conjunto difuso considera mucho el peso en un intervalo de 18770 hasta 54070 kg.

En la Figura 3.68 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

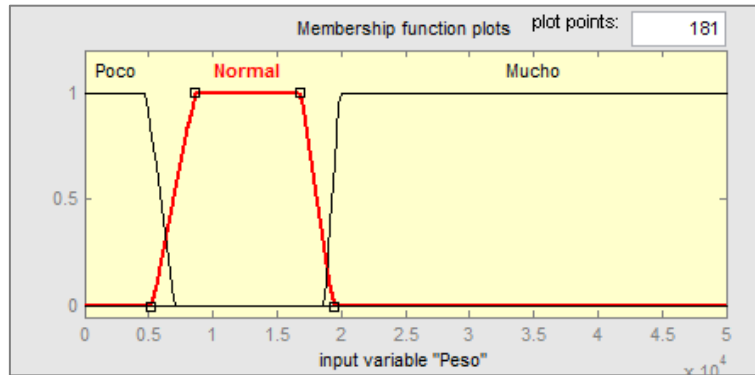


Figura 3.69 Función de membresía de la variable Peso

De la Ecuación 3.187 hasta la Ecuación 3.189 se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de la variable Peso.

$$\mu_{Poco}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 4812 \\ 1 - \frac{7012 - x}{7012 - 4812} & \text{para } 4812 \leq x \leq 7012 \\ 0 & \text{para } x > 7012 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.187}$$

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 5214 \\ 1 - \frac{x - 8614}{8614 - 5214} & \text{para } 5214 \leq x \leq 8614 \\ 1 & \text{para } 8614 \leq x \leq 16810 \\ 1 - \frac{19410 - x}{19410 - 16810} & \text{para } 16810 \leq x \leq 19410 \\ 0 & \text{para } x > 19410 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.188}$$

$$\mu_{Mucho}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 19000 \\ 1 - \frac{x - 20000}{20000 - 19000} & \text{para } 19000 \leq x \leq 20000 \\ 1 & \text{para } 20000 \leq x \leq 54200 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.189} \\ 1 - \frac{54300 - x}{54300 - 54200} & \text{para } 54200 \leq x \leq 54300 \\ 0 & \text{para } x > 54300 \end{cases}$$

• **Variable de salida**

Para este modelo de lógica difusa se cuenta con la variable de salida Selección de proceso café bola robusta, la cual determina la combinación de procesos que debe seguir el grano existiendo:

- Mezcla, el café de entrada es tiene muy buenas características por lo que pasa directamente a la mezcla.
- Mecánico el café contiene algunos defectos leves por lo que se realiza un repaso mecánico para quitarlos.
- Electrónico cuando el café presenta muchos defectos graves, en su mayoría grano negro o rojo.
- Granza cuando en la muestra representativa se presenta mucho grano quebrado.
- Secar cuando el índice de humedad del grano es muy elevado.
- Secar poco cuando el índice de humedad del grano sea mínimo.

Se tienen 4 salidas para poder realizar la combinación de los procesos que corresponden:

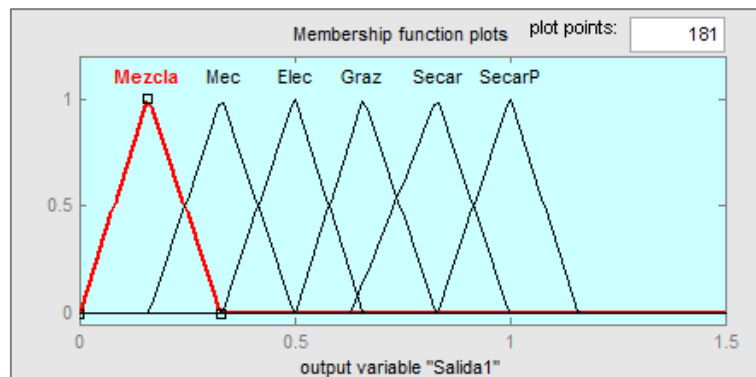


Figura 3.70 Función de membresía para la variable de salida 1

En la salida 1 que se muestra en la Figura 3.70, muestra los conjuntos difusos mezcla, mecánica, electrónica, granza y los procesos de secado. De la Ecuación 3.190 a la Ecuación 3.195 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Salida 1.

$$\mu_{Mezcla}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{0.16 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 0.16 \\ 1 - \frac{0.33 - Z}{0.33 - 0.16} & \text{para } 0.16 \leq Z \leq 0.33 \\ 0 & \text{para } Z > 0.33 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.190}$$

$$\mu_{Mecánica}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.16 \\ 1 - \frac{Z - 0.16}{0.33 - 0.16} & \text{para } 0.16 \leq Z \leq 0.33 \\ 1 - \frac{0.5 - Z}{0.5 - 0.33} & \text{para } 0.33 \leq Z \leq 0.5 \\ 0 & \text{para } Z > 0.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.191}$$

$$\mu_{Electrónica}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.33 \\ 1 - \frac{Z - 0.33}{0.50 - 0.33} & \text{para } 0.33 \leq Z \leq 0.50 \\ 1 - \frac{0.66 - Z}{0.66 - 0.50} & \text{para } 0.50 \leq Z \leq 0.66 \\ 0 & \text{para } Z > 0.66 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.192}$$

$$\mu_{Granza}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.50 \\ 1 - \frac{Z - 0.50}{0.66 - 0.50} & \text{para } 0.50 \leq Z \leq 0.66 \\ 1 - \frac{0.83 - Z}{0.83 - 0.66} & \text{para } 0.66 \leq Z \leq 0.83 \\ 0 & \text{para } Z > 0.83 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.193}$$

$$\mu_{Secar}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.63 \\ 1 - \frac{Z - 0.63}{0.83 - 0.63} & \text{para } 0.63 \leq Z \leq 0.83 \\ 1 - \frac{1 - Z}{1 - 0.83} & \text{para } 0.83 \leq Z \leq 1 \\ 0 & \text{para } Z > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.194}$$

$$\mu_{SecarP}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.83 \\ 1 - \frac{Z - 0.83}{1 - 0.83} & \text{para } 0.83 \leq Z \leq 1 \\ 1 - \frac{1.16 - Z}{1.16 - 1} & \text{para } 1 \leq Z \leq 1.16 \\ 0 & \text{para } Z > 1.16 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.195}$$

En la salida 2 que se muestra en la Figura 3.71, se presentan los conjuntos difusos mecánica, electrónica, granza y los procesos de secado.

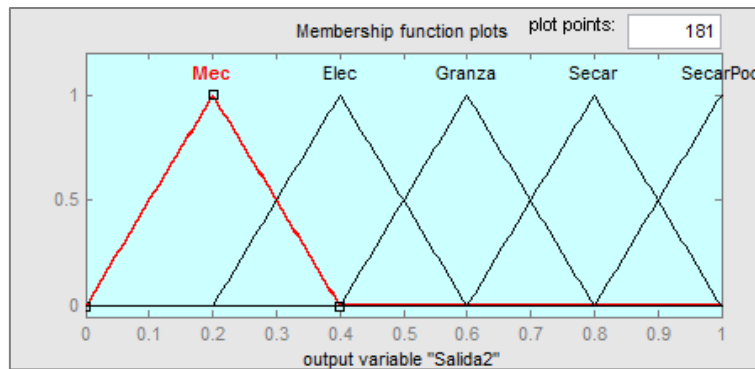


Figura 3.71 Función de membresía para la variable de salida 2

De la Ecuación 3.196 a la Ecuación 3.200 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Salida 2.

$$\mu_{Mecanicas}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{0.2 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 0.2 \\ 1 - \frac{0.4 - Z}{0.4 - 0.2} & \text{para } 0.2 \leq Z \leq 0.4 \\ 0 & \text{para } Z > 0.4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.196}$$

$$\mu_{Electrónicas}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.2 \\ 1 - \frac{Z - 0.2}{0.4 - 0.2} & \text{para } 0.2 \leq Z \leq 0.4 \\ 1 - \frac{0.6 - Z}{0.6 - 0.4} & \text{para } 0.4 \leq Z \leq 0.6 \\ 0 & \text{para } Z > 0.6 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.197}$$

$$\mu_{Granza}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.4 \\ 1 - \frac{Z - 0.4}{0.6 - 0.4} & \text{para } 0.4 \leq Z \leq 0.6 \\ 1 - \frac{0.8 - Z}{0.8 - 0.6} & \text{para } 0.6 \leq Z \leq 0.8 \\ 0 & \text{para } Z > 0.8 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.198}$$

$$\mu_{Secar}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.6 \\ 1 - \frac{Z - 0.6}{0.8 - 0.6} & \text{para } 0.6 \leq Z \leq 0.8 \\ 1 - \frac{1 - Z}{1 - 0.8} & \text{para } 0.8 \leq Z \leq 1 \\ 0 & \text{para } Z > 1 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.199}$$

$$\mu_{SecarP}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.8 \\ 1 - \frac{Z - 0.8}{1 - 0.8} & \text{para } 0.8 \leq Z \leq 1 \\ 1 - \frac{1.2 - Z}{1.2 - 1} & \text{para } 1 \leq Z \leq 1.2 \\ 0 & \text{para } Z > 1.2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.200}$$

En la salida 3 que se muestra en la Figura 3.72 , y la salida 4 que se muestra en la Figura 3.73, tienen el mismo funcionamiento que la salida 2.

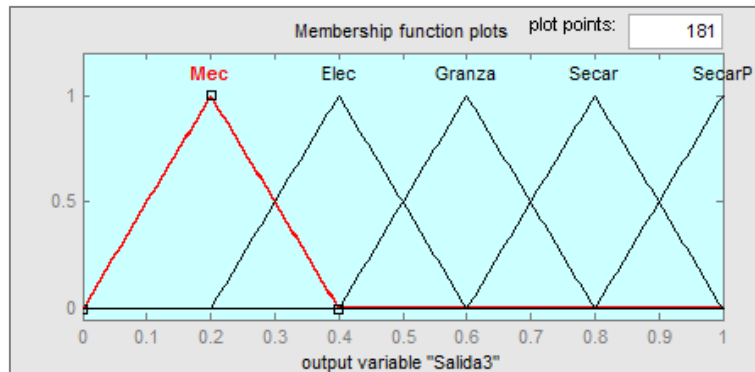


Figura 3.72 Función de membresía para la variable de salida 3

Por lo tanto, la descripción de los conjuntos difusos para la salida 3 y 4 son idénticos a los presentados en la Ecuación 3.195 a la Ecuación 3.200.

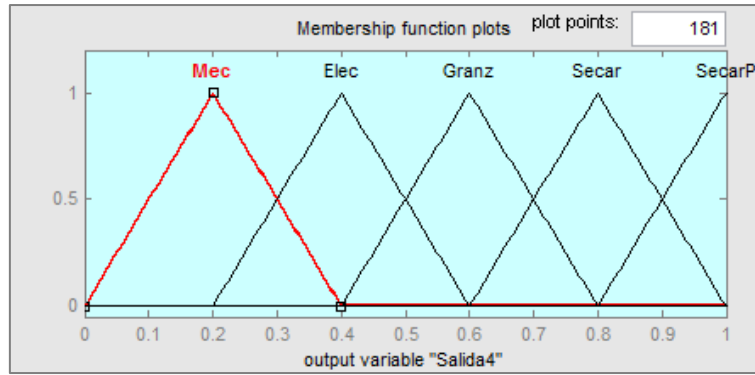


Figura 3.73 Función de membresía para la variable de salida 4

3.2.4.3.6.5.2 Mecanismo de inferencia para selección de proceso del café bola robusto

Para poder relacionar la información obtenida, se idéntico la interacción de las variables de entrada respecto a la variable de salida mediante la creación de las reglas de inferencia que emplea condiciones SI-ENTONCES. Como se menciona en la sección anterior, para la creación de reglas de inferencia se emplea el modelo tipo Mamdani.

Antes de crear cada una de las reglas de inferencia, se identifica primero el número total de reglas a obtener con base en las variables lingüísticas de entrada y lo conjuntos que conforman a cada una de ellas. En la Tabla 3.18 se muestra la obtención del número total de reglas de inferencia.

Tabla 3.18 Número de reglas de inferencia selección de proceso café robusto (Hernández González, 2017).

| Variabes lingüísticas | Conjuntos difusos |
|--|-------------------|
| Defectos leves | 2 |
| Defectos graves | 3 |
| Granza | 3 |
| Aspecto verde | 4 |
| Humedad | 4 |
| Peso | 3 |
| $2 \times 3 \times 3 \times 4 \times 4 \times 3 = 864$ | |

Se generan en total 864 combinaciones diferentes lo que significa un igual número de reglas, las cuales todas ellas son aplicables o válidas. En la Figura 3.74 se presenta el editor de reglas de inferencia del software y con ello queda en evidencia el comportamiento que tiene el modelo para predecir la combinación de procesos a seguir del café bola robusto.

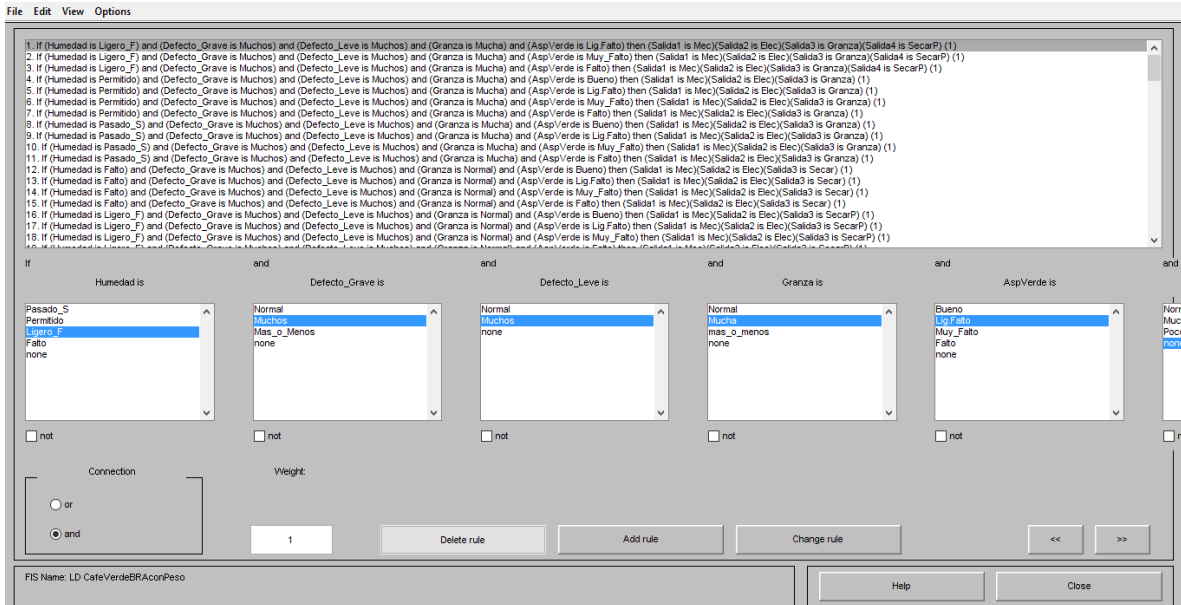


Figura 3.74 Mecanismo de inferencia del modelo selección de proceso café bola robusto

Para el proceso de validación de las reglas se empleó la información recopilada en las sesiones de entrevista con los expertos, mismos que corroboraron que las 864 reglas difusas reflejan la realidad.

A continuación, se muestra algunos de los datos elegidos al azar, con sus respectivas variables. En la Tabla 3.19 se presentan los resultados obtenidos de 25 datos comprobando la similitud del modelo con la opinión del experto.

Lo que se puede observar notoriamente que dos procesos no coinciden con la decisión del experto, dejando un grado de certeza del modelo del 92%, lo cual se considera bueno y valido para realizar predicciones confiables.

Tabla 3.19 Validación del modelo de lógica difusa selección de proceso café bola robusto (Hernández González, 2017).

| | Proceso real | Proceso Modelo de lógica difusa |
|----|---|---|
| 1 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar |
| 2 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 3 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 4 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 5 | Mecánico / Granza / Secar | Mecánico / Granza / Secar |
| 6 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 7 | Mezcla | Mezcla |
| 8 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 9 | Mezcla / Electrónico / Granza | Mezcla / Electrónico / Granza |
| 10 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 11 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar |
| 12 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 13 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 14 | Mecánico / Granza / Secar | Mecánico / Granza / Secar |
| 15 | Mezcla | Mezcla |
| 16 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 17 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 18 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 19 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 20 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar |
| 21 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |
| 22 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 23 | Mecánico / Electrónico / Secar poco | Mecánico / Electrónico / Secar poco |
| 24 | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar | Mecánico / Electrónico / Granza / Secar |
| 25 | Mecánico / Electrónico / Secar | Mecánico / Electrónico / Secar |

3.2.4.3.6.6 Modelo de lógica difusa del análisis físico para selección de proceso café oro natural robusto

En la Figura 3.75 se muestra el esquema general del sistema difuso respecto al análisis físico que determina la selección del proceso productivo del café oro natural robusto. Cabe mencionar que en este modelo no se utiliza la variable de humedad ya que el grano oro natural robusto no se puede someter al proceso de secado.

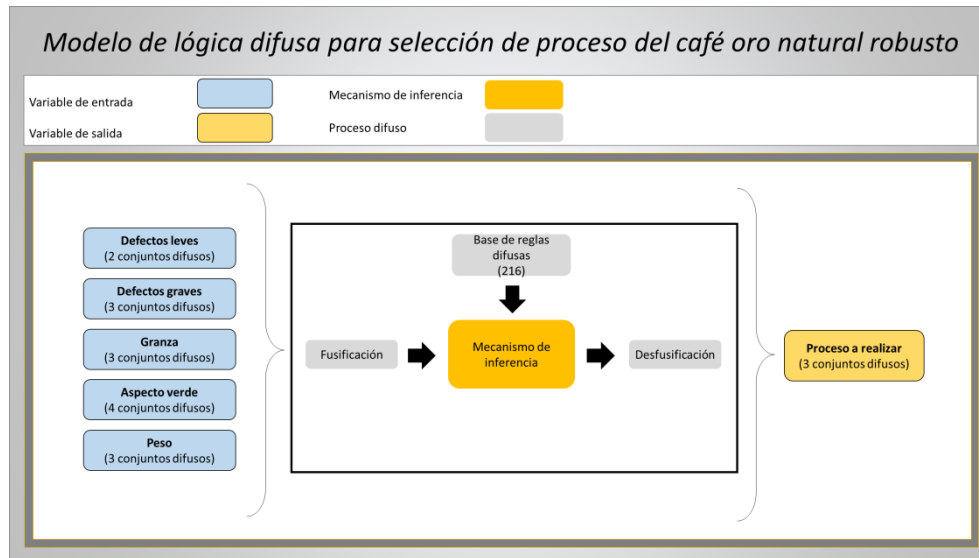


Figura 3.75 Modelo tipo Mandani para selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

3.2.4.3.6.6.1 Definición de variables lingüísticas

Para realizar el modelo de lógica difusa se contó con el apoyo de expertos en café y catadores de la empresa, mismos que lograron señalar parámetros inciertos que, con base en su experiencia, influyen selección del proceso. Para el modelo de lógica difusa estos señalamientos representan las variables de entrada del modelo considerando las siguientes calidades intrínsecas: defectos leves, defectos graves, granza, aspecto verde y peso.

Es necesario modelar tanto las variables lingüísticas de entrada y salida por medio del uso de figuras geométricas, por lo que se realiza dicha modelación como parte de la etapa de Fusificación.

• **Variable 1: Defectos leves**

Los defectos leves se consideran cuando el grano se presenta en concha, quebrados, en orejas, etc. Esta variable será considerada en dos escenarios, mismos que representan dos conjuntos difusos, denominados: Normal y Muchos.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normales los defectos leves de 0 hasta un 9.15%
- Conjunto difuso Muchos: Este conjunto difuso considera muchos los defectos leves en un intervalo de 9% hasta 20.23%

En la Figura 3.76 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se consideran Defectos leves Normal hasta un porcentaje del 9.15%; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 9% entonces pertenece al conjunto difuso Muchos.

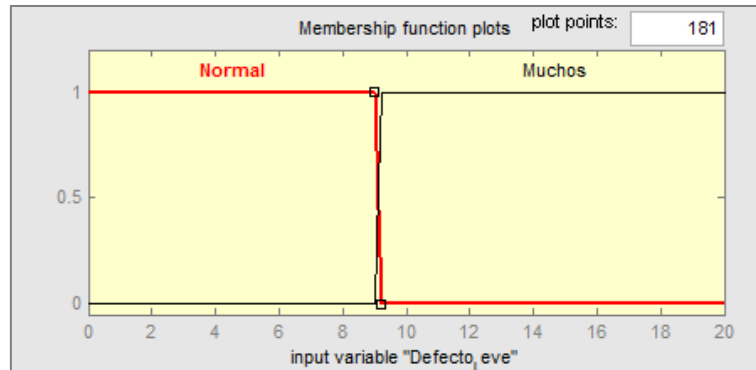


Figura 3.76 Función de membresía de la variable Defectos leves

La Ecuación 3.201 y Ecuación 3.202 representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Defectos leves.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 9.15 \\ 1 - \frac{9.2 - x}{9.2 - 9.15} & \text{para } 9.15 \leq x \leq 9.2 \\ 0 & \text{para } x > 9.2 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.201}$$

$$\mu_{\text{Muchos}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 9 \\ 1 - \frac{x - 9.2}{9.2 - 9} & \text{para } 9 \leq x \leq 9.2 \\ 1 & \text{para } 9.2 \leq x \leq 20.23 \\ 0 & \text{para } x > 20.23 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.202}$$

• **Variable 2: Defectos graves**

Los defectos graves se consideran cuando el grano se presenta negro, fermentado, agrio, brocados, etc. Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Normal, Más o Menos y Muchos.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normales los defectos graves de 0 hasta un 10.53%
- Conjunto difuso Mas o Menos: Este conjunto difuso considera más o menos los defectos graves en un intervalo de 10.3% hasta 13.5%
- Conjunto difuso Muchos: Este conjunto difuso considera muchos los defectos graves en un intervalo de 13% hasta 22%

En la Figura 3.77 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se consideran Defectos graves Normal hasta un porcentaje del 10.53%, en el caso de que el porcentaje sea entre 10.3 y 13.5 entonces se considera del conjunto difuso Mas o menos; por el contrario, si el porcentaje rebasa el 13% de calidad entonces pertenece al conjunto difuso Muchos.

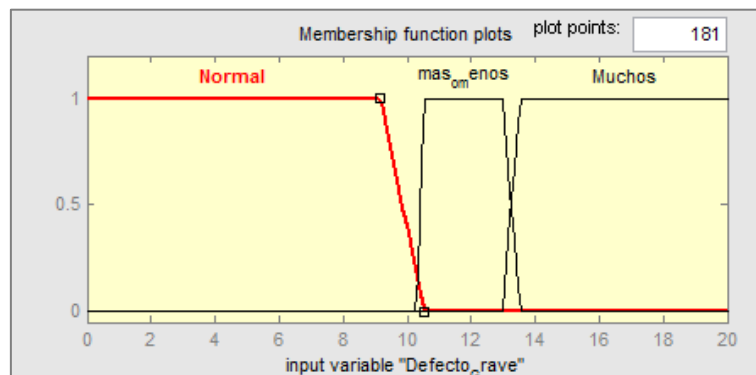


Figura 3.77 Función de membresía de la variable Defectos graves

De la Ecuación 3.203 a la Ecuación 3.205 se representan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Defectos graves.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 9.17 \\ 1 - \frac{10.53 - x}{10.53 - 9.17} & \text{para } 9.17 \leq x \leq 10.53 \\ 0 & \text{para } x > 10.53 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.203}$$

$$\mu_{M\acute{a}s\ o\ m\acute{e}n\acute{o}s}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 10.30 \\ 1 - \frac{x - 10.30}{10.50 - 10.30} & \text{para } 10.30 \leq x \leq 10.50 \\ 1 & \text{para } 10.50 \leq x \leq 13 \\ 1 - \frac{13.50 - x}{13.50 - 13} & \text{para } 13 \leq x \leq 13.50 \\ 0 & \text{para } x > 13.50 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.204}$$

$$\mu_{M\acute{u}ch\acute{o}s}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 13 \\ 1 - \frac{x - 13}{13.5 - 13} & \text{para } 13 \leq x \leq 13.5 \\ 1 & \text{para } 13.5 \leq x \leq 22 \\ 0 & \text{para } x > 22 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.205}$$

• **Variable 3: Granza**

La granza es el grano roto de café. Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Normal, Más o Menos y Mucha.

- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normal la granza de 0 hasta un 3.5%
- Conjunto difuso Mas o Menos: Este conjunto difuso considera más o menos la granza en un intervalo de 3.29% hasta 4.5%
- Conjunto difuso Mucha: Este conjunto difuso considera mucha la granza en un intervalo de 4.3% hasta 11.9%

En la Figura 3.78 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar que se considera Granza Normal hasta un porcentaje menor del 3.5%; pero si el porcentaje se encuentra entre 3.29% y 4.5% entonces corresponde al conjunto difuso Mas o menos, por el contrario, si el porcentaje rebasa el 4.3% de calidad entonces pertenece al conjunto difuso Mucha.

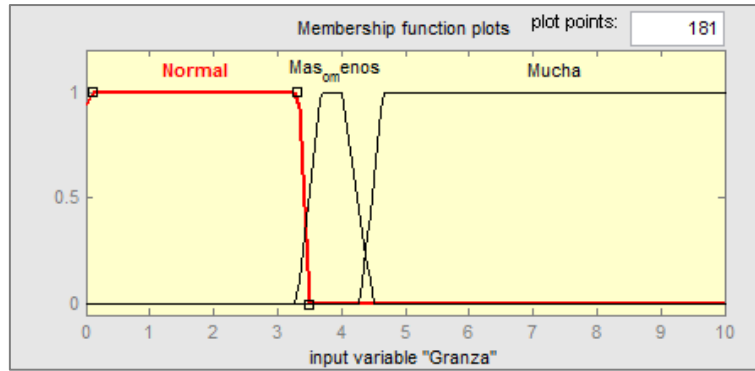


Figura 3.78 Función de membresía de la variable Granza

De la Ecuación 3.206 a la Ecuación 3.208 se presentan las funciones de pertenencia tipo trapezoidal de los conjuntos difusos de la variable Granza.

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 3.32 \\ 1 - \frac{3.5 - x}{3.5 - 3.32} & \text{para } 3.32 \leq x \leq 3.5 \\ 0 & \text{para } x > 3.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.206}$$

$$\mu_{Mas\ o\ menos}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3.29 \\ 1 - \frac{x - 3.68}{3.68 - 3.29} & \text{para } 3.29 \leq x \leq 3.68 \\ 1 & \text{para } 3.68 \leq x \leq 4 \\ 1 - \frac{4.5 - x}{4.5 - 4} & \text{para } 4 \leq x \leq 4.5 \\ 0 & \text{para } x > 4.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.207}$$

$$\mu_{Mucha}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 4.3 \\ 1 - \frac{x - 4.64}{4.64 - 4.3} & \text{para } 4.3 \leq x \leq 4.64 \\ 1 & \text{para } 4.64 \leq x \leq 11.9 \\ 0 & \text{para } x > 11.9 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.208}$$

• **Variable 4: Aspecto verde**

El Aspecto Verde, es el color que presenta el grano de café en el análisis organoléptico, este también se representa por medio de la humedad que tiene el grano.

Esta variable será considerada en cuatro escenarios, mismos que representan cuatro conjuntos difusos, denominados: Bueno, Ligeramente Falto, Falto y Muy Falto.

- Conjunto difuso Bueno: Este conjunto difuso considera bueno el aspecto verde en un intervalo de 0% hasta 14.9%
- Conjunto difuso Ligeramente Falto: Este conjunto difuso considera ligeramente falto el aspecto verde en un intervalo de 14.7% hasta 15.8%
- Conjunto difuso Falto: Este conjunto difuso considera falto el aspecto verde en un intervalo de 15.5% hasta 16.86%
- Conjunto difuso Muy Falto: Este conjunto difuso considera muy falto el aspecto verde en un intervalo de 16.2% hasta 20%

En la Figura 3.79 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

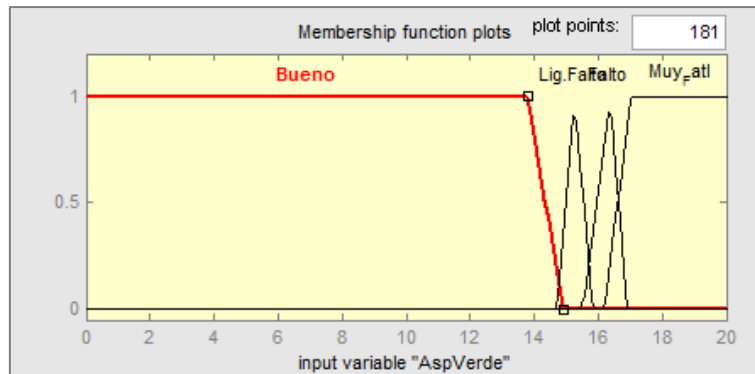


Figura 3.79 Función de membresía de la variable Aspecto verde

De la Ecuación 3.209 hasta la Ecuación 3.212 se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de la variable Aspecto verde.

$$\mu_{Bueno}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 13.80 \\ 1 - \frac{14.90 - x}{14.90 - 13.80} & \text{para } 13.8 \leq x \leq 14.9 \\ 0 & \text{para } x > 14.90 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.209}$$

$$\mu_{Ligeramente\ fallo}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 14.7 \\ 1 - \frac{x - 15.27}{15.27 - 14.7} & \text{para } 14.7 \leq x \leq 15.27 \\ 1 - \frac{15.8 - x}{15.8 - 15.27} & \text{para } 15.27 \leq x \leq 15.8 \\ 0 & \text{para } x > 15.8 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.210}$$

$$\mu_{Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 15.5 \\ 1 - \frac{x - 16.4}{16.4 - 15.5} & \text{para } 15.5 \leq x \leq 16.4 \\ 1 - \frac{16.86 - x}{16.86 - 16.4} & \text{para } 16.4 \leq x \leq 16.86 \\ 0 & \text{para } x > 16.86 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.211}$$

$$\mu_{Muy\ Falto}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 16.2 \\ 1 - \frac{x - 17.01}{17.01 - 16.2} & \text{para } 16.2 \leq x \leq 17.01 \\ 1 & \text{para } 17.01 \leq x \leq 20 \\ 0 & \text{para } x > 20 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.212}$$

• **Variable 6: Peso**

Se considera a la cantidad de café en kilogramos que ingresa al sistema, pudiendo afectar el tipo de proceso que tiene que seguir el café.

Esta variable será considerada en tres escenarios, mismos que representan tres conjuntos difusos, denominados: Poco, Normal y Mucho.

- Conjunto difuso Poco: Este conjunto difuso considera poco el peso en un intervalo de 0 hasta 1200 kg.
- Conjunto difuso Normal: Este conjunto difuso considera normal el peso en un intervalo de 1205 hasta 4050 kg.
- Conjunto difuso Mucho: Este conjunto difuso considera mucho el peso en un intervalo de 3690 hasta 29800 kg.

En la Figura 3.80 se presentan los conjuntos difusos es esta variable, en ella, se puede apreciar las consideraciones descritas para cada conjunto difuso.

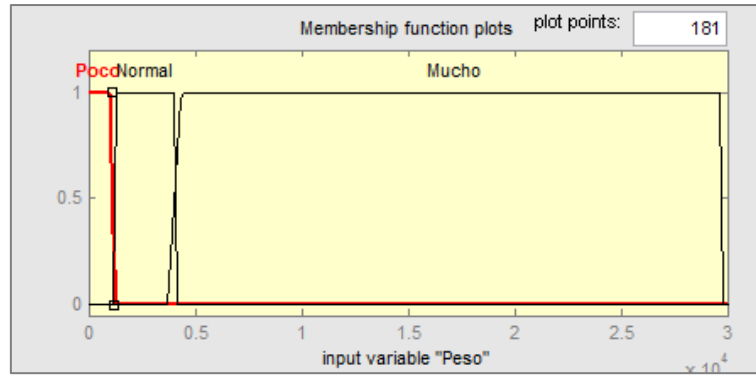


Figura 3.80 Función de membresía de la variable Peso

De la Ecuación 3.213 hasta la Ecuación 3.215 se representan las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos de la variable Peso.

$$\mu_{Poco}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 0 \\ 1 & \text{para } 0 \leq x \leq 1100 \\ 1 - \frac{1200 - x}{1200 - 1100} & \text{para } 1100 \leq x \leq 1200 \\ 0 & \text{para } x > 1200 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.213}$$

$$\mu_{Normal}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 1205 \\ 1 - \frac{x - 1260}{1260 - 1205} & \text{para } 1205 \leq x \leq 1260 \\ 1 & \text{para } 1260 \leq x \leq 4000 \\ 1 - \frac{4050 - x}{4050 - 4000} & \text{para } 4000 \leq x \leq 4050 \\ 0 & \text{para } x > 4050 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.214}$$

$$\mu_{Mucho}(x) = \begin{cases} 0 & \text{para } x < 3690 \\ 1 - \frac{x - 4350}{4350 - 3690} & \text{para } 3690 \leq x \leq 4350 \\ 1 & \text{para } 4350 \leq x \leq 29700 \\ 1 - \frac{29800 - x}{29800 - 29700} & \text{para } 29700 \leq x \leq 29800 \\ 0 & \text{para } x > 29800 \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.215}$$

• **Variable de salida**

Para este modelo de lógica difusa se cuenta con la variable de salida Selección de proceso café oro natural robusto, la cual determina la combinación de procesos que debe seguir el grano existiendo:

- Mezcla, el café de entrada es tiene muy buenas características por lo que pasa directamente a la mezcla.
- Mecánico el café contiene algunos defectos leves por lo que se realiza un repaso mecánico para quitarlos.
- Electrónico cuando el café presenta muchos defectos graves, en su mayoría grano negro o rojo.
- Granza cuando en la muestra representativa se presenta mucho grano quebrado.

Se tienen 3 salidas para poder realizar la combinación de los procesos que corresponden:

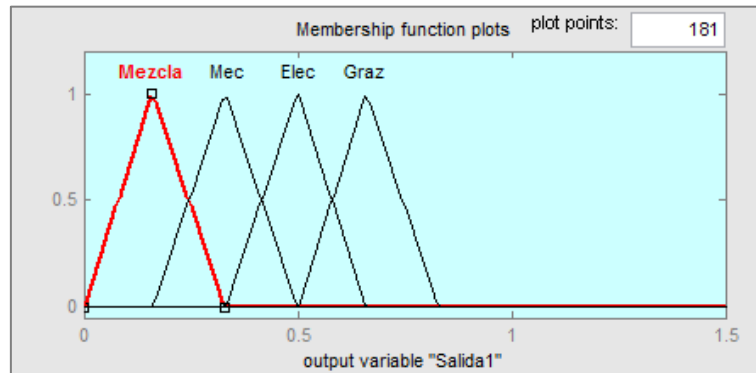


Figura 3.81 Función de membresía para la variable de salida 1

En la salida 1 que se muestra en la Figura 3.81, muestra los conjuntos difusos mezcla, mecánica, electrónica y granza. De la Ecuación 3.216 a la Ecuación 3.219 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Salida 1.

$$\mu_{Mezcla}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{0.16 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 0.16 \\ 1 - \frac{0.33 - Z}{0.33 - 0.16} & \text{para } 0.16 \leq Z \leq 0.33 \\ 0 & \text{para } Z > 0.33 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.216}$$

$$\mu_{Mecánica}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.16 \\ 1 - \frac{Z - 0.16}{0.33 - 0.16} & \text{para } 0.16 \leq Z \leq 0.33 \\ 1 - \frac{0.5 - Z}{0.5 - 0.33} & \text{para } 0.33 \leq Z \leq 0.5 \\ 0 & \text{para } Z > 0.5 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.217}$$

$$\mu_{Electrónica}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.33 \\ 1 - \frac{Z - 0.33}{0.50 - 0.33} & \text{para } 0.33 \leq Z \leq 0.50 \\ 1 - \frac{0.66 - Z}{0.66 - 0.50} & \text{para } 0.50 \leq Z \leq 0.66 \\ 0 & \text{para } Z > 0.66 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.218}$$

$$\mu_{Granza}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.5 \\ 1 - \frac{Z - 0.5}{0.66 - 0.5} & \text{para } 0.5 \leq Z \leq 0.66 \\ 1 - \frac{0.83 - Z}{0.83 - 0.66} & \text{para } 0.66 \leq Z \leq 0.83 \\ 0 & \text{para } Z > 0.83 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.219}$$

En la salida 2 que se muestra en la Figura 3.82, se presentan los conjuntos difusos mecánica, electrónica y granza.

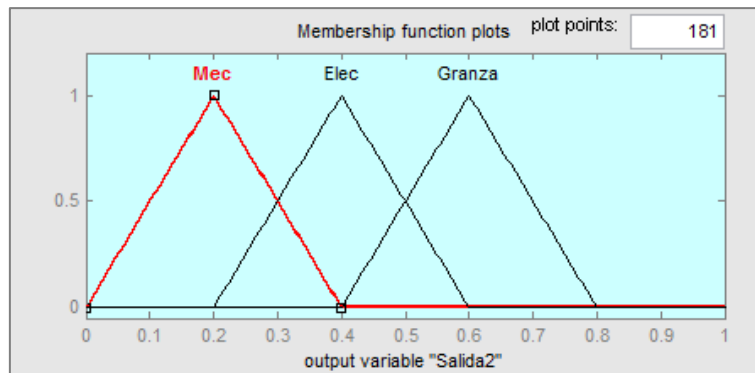


Figura 3.82 Función de membresía para la variable de salida 2

De la Ecuación 3.220 a la Ecuación 3.222 se presentan las funciones de pertenencia tipo triangular de los conjuntos difusos de la variable Salida 2.

$$\mu_{Mecánicas}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0 \\ 1 - \frac{Z - 0}{0.2 - 0} & \text{para } 0 \leq Z \leq 0.2 \\ 1 - \frac{0.4 - Z}{0.4 - 0.2} & \text{para } 0.2 \leq Z \leq 0.4 \\ 0 & \text{para } Z > 0.4 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.220}$$

$$\mu_{Electrónicas}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.2 \\ 1 - \frac{Z - 0.2}{0.4 - 0.2} & \text{para } 0.2 \leq Z \leq 0.4 \\ 1 - \frac{0.6 - Z}{0.6 - 0.4} & \text{para } 0.4 \leq Z \leq 0.6 \\ 0 & \text{para } Z > 0.6 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.221}$$

$$\mu_{Granza}(Z) = \begin{cases} 0 & \text{para } Z < 0.4 \\ 1 - \frac{Z - 0.4}{0.6 - 0.4} & \text{para } 0.4 \leq Z \leq 0.6 \\ 1 - \frac{0.8 - Z}{0.8 - 0.6} & \text{para } 0.6 \leq Z \leq 0.8 \\ 0 & \text{para } Z > 0.8 \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.222}$$

En la salida 3 que se muestra en la Figura 3.83, tiene el mismo funcionamiento que la salida 2 detallada anteriormente.

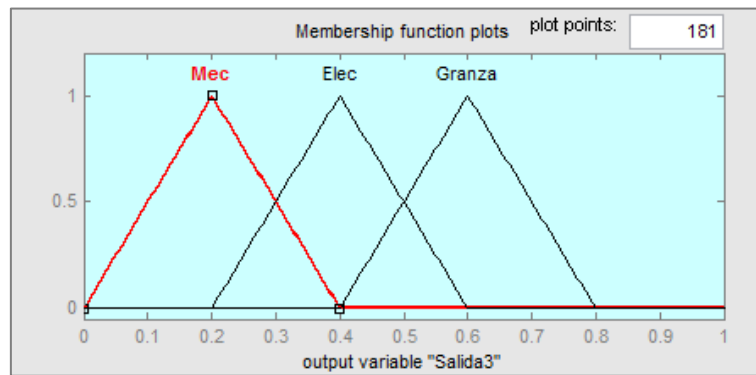


Figura 3.83 Función de membresía para la variable de salida 3

Por lo tanto, la descripción de los conjuntos difusos para la salida 3 es idéntica a los presentados en la Ecuación 3.220 a la Ecuación 3.222.

3.2.4.3.6.6.2 Mecanismo de inferencia selección de proceso café bola robusto.

Para poder relacionar la información obtenida, se idéntico la interacción de las variables de entrada respecto a la variable de salida mediante la creación de las reglas de inferencia que emplea condiciones SI-ENTONCES. Como se menciona en la sección anterior, para la creación de reglas de inferencia se emplea el modelo tipo Mamdani.

Antes de crear cada una de las reglas de inferencia, se identifica primero el número total de reglas a obtener con base en las variables lingüísticas de entrada y lo conjuntos que conforman

a cada una de ellas. En la Tabla 3.20 se muestra la obtención del número total de reglas de inferencia.

Tabla 3.20 Número de reglas de inferencia selección de proceso café robusto (Hernández González, 2017).

| Variables lingüísticas | Conjuntos difusos |
|---|-------------------|
| Defectos leves | 2 |
| Defectos graves | 3 |
| Granza | 3 |
| Aspecto verde | 4 |
| Peso | 3 |
| $2 \times 3 \times 3 \times 4 \times 3 = 216$ | |

Se generan en total 216 combinaciones diferentes lo que significa un igual número de reglas, las cuales todas ellas son aplicables o válidas. En la Figura 3.84 se presenta el editor de reglas de inferencia del software y con ello queda en evidencia el comportamiento que tiene el modelo para predecir la combinación de procesos a seguir del café bola robusto.

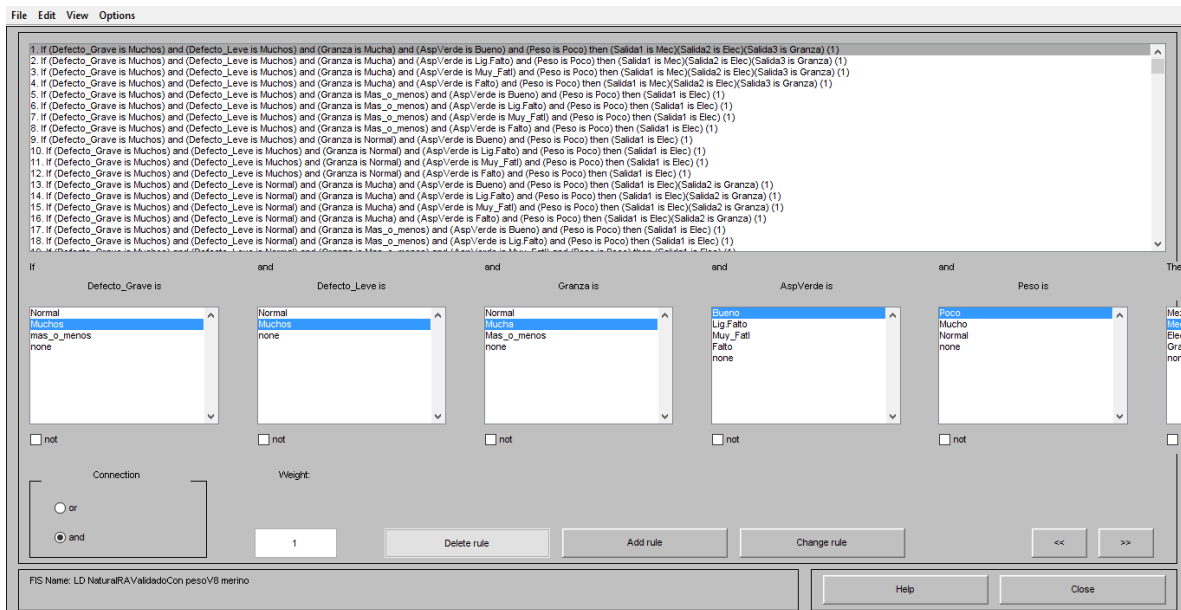


Figura 3.84 Mecanismo de inferencia del modelo selección de proceso café bola robusto

Para el proceso de validación de las reglas se empleó la información recopilada en las sesiones de entrevista con los expertos, mismos que corroboraron que las 216 reglas difusas reflejan la realidad. A continuación, se muestra algunos de los datos elegidos al azar, con sus respectivas

variables. En la Tabla 3.21 se presentan los resultados obtenidos de 25 datos comprobando la similitud del modelo con la opinión del experto.

Tabla 3.21 Validación del modelo de lógica difusa selección de proceso café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

| | Proceso real | Proceso Modelo de lógica difusa |
|----|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 2 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 3 | Mecánico / Granza | Mecánico / Granza |
| 4 | Mecánico | Mecánico |
| 5 | Electrónico / Granza | Electrónico / Granza |
| 6 | Electrónico | Electrónico |
| 7 | Granza | Granza |
| 8 | Mezcla | Mezcla |
| 9 | Mezcla | Mezcla |
| 10 | Mecánico / Electrónico | Mecánico / Electrónico |
| 11 | Mecánico | Mecánico |
| 12 | Mecánico | Mecánico |
| 13 | Mecánico / Granza | Mecánico / Granza |
| 14 | Granza | Granza |
| 15 | Mecánico | Mecánico |
| 16 | Electrónico / Granza | Electrónico / Granza |
| 17 | Mecánico / Granza | Mecánico / Granza |
| 18 | Mecánico | Mecánico |
| 19 | Electrónico / Granza | Electrónico / Granza |
| 20 | Electrónico | Electrónico |
| 21 | Granza | Granza |
| 22 | Mezcla | Mezcla |
| 23 | Granza | Granza |
| 24 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |
| 25 | Mecánico / Electrónico / Granza | Mecánico / Electrónico / Granza |

En lo que se puede observar notoriamente que sólo un proceso no coincide con la decisión del experto, dejando un grado de certeza del modelo del 96%, lo cual se considera bueno y valido para realizar predicciones confiables.

3.2.4.3.6.7 Interfaz del usuario

Una vez creados los comportamientos de las variables, motores de inferencia y agentes, se realizó una interfaz gráfica amigable con el usuario, para lo cual se emplearon en su mayoría elementos de la librería Controls, como lo son Radio Buttons, Edit box y Buttons. Así mismo se emplearon elementos de la librería Presentation como lo son Text, Imagen y View área.

En la Figura 3.85 se presenta la interfaz de inicio del modelo, mostrando un breve resumen de la empresa, los logos de algunos de los principales clientes nacionales e internacionales y se presentan unas breves indicaciones en la parte superior del botón *RUN*, el cual tiene programado en código Java el inicio del modelo que en primer instancia no comienza la simulación, sino manda a la interfaz gráfica principal de usuario con la finalidad de que se ingresen las características que trae el café de acuerdo a las prácticas agrícolas, así como los resultados de las evaluaciones físicas y de catación.



Figura 3.85 Interfaz de inicio (Hernández González, 2017).

La interfaz gráfica principal de usuario es la que se muestra en la Figura 3.86, la cual esta seccionada en tres módulos que corresponden a los agentes recurso descritos con anterioridad (módulo de prácticas agrícolas, módulo de catación y módulo de selección de proceso).

The image shows a user interface for a coffee simulation, divided into three main modules. At the top left is the logo for 'grupo merino metecafe'.
Prácticas agrícolas: This module allows users to select their knowledge of agricultural practices. It includes input fields for 'Nutrición' (0.0), 'Precipitación' (600.0), 'Plagas' (0.0), 'Enfermedades' (0.0), 'Densidad' (0.0), 'Poda' (0.0), 'Temperatura' (10.0), and 'Hectáreas disponibles' (0.0). It also shows 'Rendimiento por hectárea (Oq): 0' and 'Cantidad a procesar (kg): 0'. A 'Calcular rendimiento' button is at the bottom.
Módulo catación: This module is for coffee quality assessment. It has two sections: 'Valores de la intensidad del defecto de taza (café robusto)' and 'Valores de la intensidad del defecto de taza (café pergamino)'. Each section includes input fields for 'Fermento', 'Agrido', 'Hediondo', 'Terroso', 'Moho', and 'Añejo'. There are 'Obtener clase de café' buttons for each section.
Módulo selección de proceso: This module is for selecting a processing method. It has two sections: 'Obtener proceso de café bola robusto' and 'Obtener proceso de café pergamino'. Each section includes input fields for '% de defectos leves', '% de defectos graves', '% de granza', '% de humedad', and '% de basura'. There are 'Obtener el proceso' buttons for each section. Below these is a 'Cantidad de café a procesar (kg)' section with a 'Start' button and radio button options for different processing methods (e.g., 'Ninguno', 'Granza sin secadora', etc.). A 'Resumen Empresa' button is also present.

Figura 3.86. Interfaz gráfica de usuario (Hernández González, 2017).

En el primer módulo de prácticas agrícolas o aprovisionamiento se puede seleccionar si se conocen las actividades de cultivo del caficultor, en caso de saberlo se habilitan los Edit box y se ingresan los valores de las variables inciertas inmersas en las actividades del agricultor y que se modelaron mediante lógica difusa, anteriormente descrito, con el propósito de saber cuál es la cantidad de café que ingresara a la empresa de acuerdo con un comportamiento de cultivo específico. El comportamiento de este módulo inicia al accionar el botón “Calcular rendimiento” y consiste en capturar los valores de las variables inciertas, abre el motor de inferencia basado en lógica difusa mediante un enlace al software Matlab®, ingresa los valores capturados (fusificación) al motor de inferencia para realizar la evaluación (reglas de inferencia) correspondiente y predice la cantidad en quintales por hectárea (desfusificación) que el caficultor entregará a la empresa; el resultado numérico es registrado en la plataforma de AnyLogic® y presentado al usuario de acuerdo a las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos de salida de del modelo de lógica difusa rendimiento de café

El café una vez ingresado a la empresa, se somete al proceso de catación o análisis organoléptico, que es el segundo punto subjetivo detectado en el proceso de toma de decisiones de la empresa. Dicho proceso se concentra en el segundo módulo de la interfaz, el cual se encuentra segmentado en dos partes, la primera corresponde a la catación de café robusto, en donde el usuario ingresa los valores de la intensidad de defecto de taza resultantes del análisis en las variables inciertas correspondientes con el fin de obtener la clasificación de café (bola robusto, oro natural robusto, rechazar). La segunda parte corresponde al mismo proceso pero para obtener la clasificación de café pergamino (extra prima, prima lavado, altura, rechazar). El comportamiento de cada parte del módulo inicia al accionar el botón “Obtener clase de café”, de acuerdo al tipo de café, y consiste en capturar los valores ingresados de las variables inciertas, abre el motor de inferencia basado en lógica difusa mediante un enlace al software Matlab[®], ingresa los valores capturados (fusificación) al motor de inferencia para realizar la evaluación (reglas de inferencia) correspondiente y predice la clase de café evaluado (desfusificación) que será posteriormente procesado; el resultado numérico es registrado en la plataforma de AnyLogic[®] y presentado al usuario de acuerdo a las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos de salida de los modelos de lógica difusa catación de café robusto y catación de café pergamino, según sea el caso.

El tercer módulo corresponde al análisis físico del café o selección de proceso, el cual se encuentra un apartado para café bola robusto, uno para oro natural robusto y café pergamino, con el fin de obtener, en conjunto con el resultado del módulo catación, la combinación de procesos productivos (ver Tabla 3.4) que debe seguir el café para alcanzar una mayor calidad y pueda comercializarse con el menor uso de recursos. El comportamiento de este módulo inicia al accionar el botón “Obtener proceso” y consiste en capturar los valores de las variables inciertas, abre el motor de inferencia basado en lógica difusa mediante un enlace al software Matlab[®], ingresa los valores capturados (fusificación) al motor de inferencia para realizar la evaluación (reglas de inferencia) correspondiente y determina el proceso óptimo (desfusificación) a seguir para obtener un café de calidad con el menor uso de recursos; el resultado numérico es registrado en la plataforma de AnyLogic[®] y presentado al usuario de acuerdo a las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos de salida de los modelos de lógica

difusa selección de proceso café bola robusto, selección de proceso café oro natural robusto y selección de proceso café pergamino según sea el caso.

Una vez ingresados los valores en todos los módulos descritos, el usuario debe seleccionar el proceso recomendado, ingresar la calidad inicial de café y la calidad final deseada para finalmente accionar el botón “Start” y comenzar la simulación del proceso productivo de la empresa con las características ingresadas. Existe también un botón denominado “Regresar”, el cual tiene la configuración de borrar todas las estadísticas, datos del modelo y mandar al usuario a la interfaz de inicio mostrada en la Figura 3.85.

Cabe mencionar que a un costado de la lista de procesos a selección se encuentran las etiquetas “Resumen”, que manda al usuario al listado general de resultados que se muestra con anterioridad en la Figura 3.18; la etiqueta “Empresa” manda al usuario al inicio del proceso productivo, que se muestra en la Figura 3.19. Modelo de simulación final de la empresa se puede ver en la Figura 3.19. Así mismo dentro del modelo se encuentran más etiquetas que al accionarlas mandan a un punto específico del proceso productivo, a la página principal, a los gráficos de rendimiento o a la sección de resumen, el objetivo principal es gestionar una navegación entendible y fluida dentro del modelo.

3.2.4.3.7 Modelo complementario

Como parte del análisis de la cadena de suministro de la empresa, se busca monitorear el tiempo de respuesta que tiene la empresa para atender a sus principales clientes nacionales en primera instancia; para lo cual se realiza un modelo de agentes complementario para distribución que es alimentado por información del modelo de agentes de la empresa (modelo desarrollado con anterioridad).

En la Tabla 3.22 se indican en específico los objetos utilizados para el desarrollo del modelo complementario de distribución en la plataforma de software AnyLogic®, indicando la cantidad y la función que representan.

Tabla 3.22 Objetos del modelo de simulación (Hernández González, 2017) con información de AnyLogic®.

| Objeto | Cantidad | Descripción | Librería |
|------------|----------|---|-------------------|
| Agent Main | 1 | Es el agente principal que contiene a la empresa y sirve para 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 | 5 | Agente es una unidad de diseño de modelo que puede tener comportamiento, memoria (historia), tiempo, contactos, etc. Dentro de un agente se puede definir variables, eventos, diagramas de estado. En el modelo complementario se utilizan los agentes, café, orden, cliente, empresa MT y trucks, | Agent |
| Parameter | 3 | Los parámetros se utilizan con frecuencia para representar algunas características del objeto modelado. | Agent |
| Variable | 1 | Una variable representa un estado del modelo, y puede cambiar durante la simulación, pudiendo ser variables locales o globales. | Agent |
| Connector | 15 | Sirve para unir objetos del modelo, teniendo en cuenta que no ocupan tiempo ni distancia. | Agent |
| Event | 1 | Es una forma simple de programar acciones en el modelo, comúnmente se ejecutan por restricciones de tiempo. | Agent |
| Sink | 1 | Este objeto se encarga de retirar los agentes tipo del modelo, siendo café en diferentes modalidades. En este modelo, no sólo indican el fin de cada uno de los procesos, sino que además también se encarga de sacar del sistema todo el café que resulta como desperdicio, de cada una de las máquinas. | Modelling process |
| Delay | 4 | Representa estaciones de trabajo que procesan agentes en un tiempo establecido. En el modelo complementario, simula el comportamiento general de la empresa. | Modelling process |
| Queue | 2 | Es una cola (un búfer) de agentes que esperan ser aceptados por el siguiente objeto en el flujo del proceso, o | Modelling process |

| | | | |
|-------------------|---|---|-------------------|
| | | un almacenamiento de propósito general para los agentes. | |
| Resource pool | 1 | Define un conjunto de unidades de recurso que pueden ser aprovechados y liberados por entidades. En el modelo complementario se emplea para gestionar los trucks o vehículos de la empresa | Modelling process |
| Seize | 1 | Agrupar un número determinado de unidades desde un Resource pool | Modelling process |
| Release | 1 | Libera un número determinado de unidades que fueron agrupadas por un Seize para un Resource pool | Modelling process |
| Enter | 1 | Inserta unidades existentes en algún punto específico del modelo. Para el caso específico, se emplea para introducir la orden del cliente a la empresa. | Modelling process |
| TimeMeasure Start | 2 | Este objeto recuerda el tiempo cuando una entidad lo atraviesa. Más adelante, cuando la entidad pasa por uno de los objetos TimeMeasureEnd correspondientes, se mide el tiempo que la entidad ha pasado entre estos dos objetos "marcadores". | Modelling process |
| TimeMeasure End | 2 | TimeMeasureEnd así como TimeMeasureStart componen un par de objetos que miden el tiempo que las entidades pasan entre ellos (puntos dados en un diagrama de flujo), como "tiempo en el sistema", "duración de la estancia", etc. | Modelling process |
| GIS map | 1 | Es una parte de mapa satelital que es descargado y ejecutado en tiempo real para servicios de ubicación, teniendo la opción de navegar en el mapa. En el caso del modelo complementario, se emplea para localizar la empresa y sus clientes nacionales. | Space markup |
| GIS point | 1 | GIS point se emplea para definir en el mapa varios puntos de cualquier destino. Cada punto tiene coordenadas de latitud y longitud. | Space markup |
| Time plot | 3 | El gráfico de tiempo muestra la historia de varios elementos de datos durante el último horizonte de tiempo como líneas. El eje de tiempo es siempre horizontal y dirigido a la derecha. | Analysis |

| | | | |
|-----------|---|---|----------|
| | | | |
| Histogram | 1 | El histograma visualiza las estadísticas recopiladas por una serie de datos de objetos. El eje X siempre se escala para ajustarse a todos los rangos de datos del histograma. | Analysis |

3.2.4.3.7.1 Comportamiento del modelo

Para el control y ejecución de actividades se programa a través de la sección *Action* de cada elemento configurable del software, como se vio con anterioridad, para este caso se añade el comportamiento del modelo mediante *Stepcharts* como se puede ver en la Figura 3.87 un ejemplo de la programación.

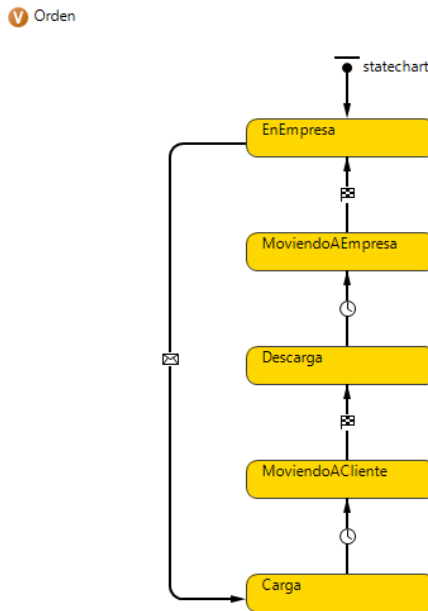


Figura 3.87 Ejemplo de programación para el comportamiento del modelo complementario (Hernández González, 2017)

El comportamiento consiste en que el cliente genera la orden de café, la cual va hasta la empresa y espera a ser atendida de acuerdo con los procesos que realiza, posteriormente, la orden se carga en algún vehículo disponible, se mueve la carga hasta el cliente con la mejor ruta disponible de acuerdo a los servicios de ubicación de GIS map, se descarga el café en la ubicación del cliente y se regresa el vehículo a la empresa a espera de ser cargado.

3.2.4.3.7.2 Modelo final complementario

Se presenta en la Figura 3.88 el modelo de agentes que ayuda a determinar el tiempo de respuesta de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V. y muestra de igual forma la distribución del producto a los clientes nacionales, en donde el usuario puede monitorear la mejor ruta. Cabe mencionar el software profesional AnyLogic® tiene la capacidad de manipular y gestionar rutas de transporte sin necesidad de programarlas, esto gracias al uso de servicios de ubicación en tiempo real por mapas satelitales.

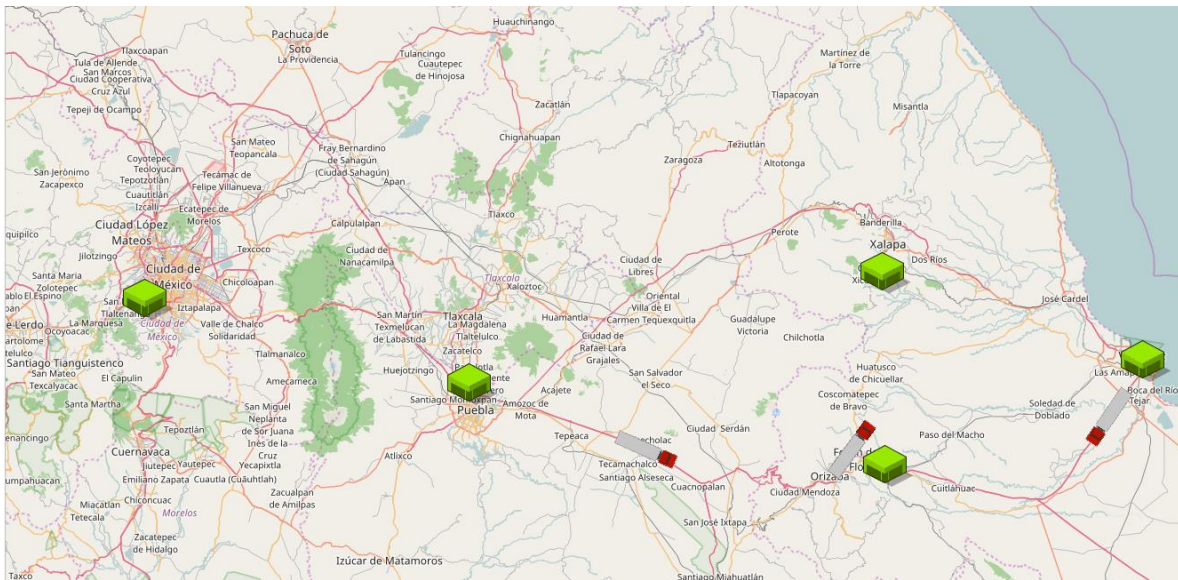


Figura 3.88 Vista general del funcionamiento del modelo complementario para distribución (Hernández González, 2017)

3.2.4.3.8 Indicadores clave de rendimiento

Con la finalidad de medir la eficiencia del sistema de apoyo a la decisión propuesto, se determinan indicadores clave que ayudarán a cuantificar y comparar la mejora de los eslabones de la cadena de suministro.

Un KPI (key performance indicator), conocido también como indicador clave o medidor de desempeño, es una medida del nivel del desempeño de un proceso.

En la Tabla 3.23 se presentan los principales indicadores de desempeño detectados para su medición y mejora, en tanto sea posible. Cabe resaltar que los indicadores detectados en el desarrollo de este trabajo se ajustan al modelo SCOR.

Tabla 3.23. Indicadores de desempeño (Hernández González, 2017).

| Indicador clave de desempeño | Descripción |
|----------------------------------|--|
| Cantidad correcta de café bueno | Cantidad de café que ingresa a la empresa para ser procesado de acuerdo a las prácticas agrícolas de los caficultores. |
| Tiempo de ciclo | Tiempo en horas que tarda el café en ser procesado hasta la calidad deseada. |
| Tipo de proceso | Combinación de procesos mínimo necesario para el proceso del grano |
| Capacidad de utilización | Utilización general de la maquinaria al procesar un lote de café |
| Cumplimiento perfecto de pedidos | Numero de órdenes que satisface la empresa de acuerdo con las características del cliente. |
| Costo de bienes | Cantidad monetaria utilizada para realizar un proceso productivo específico. |

3.3 Conclusiones

Como resultado de este capítulo, se desarrolló el sistema de apoyo a la decisión propuesto para la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., el cual consiste en un modelo de simulación multi-método que involucra agentes inteligentes con sus respectivos motores de inferencia basados en lógica difusa y un modelo de eventos discretos.

La propuesta de agentes se estableció como agente Coordinación, encargado de gestionar enlaces en el medio; un agente Proveedor que esta optimizado por el motor difuso de inferencia rendimiento de café para predecir el rendimiento de cultivos por hectárea; se creó un agente Beneficio seco que representa simbólicamente la empresa productora donde se realizan las actividades de valor agregado; el agente recurso proceso organoléptico esta optimizado por dos motores difusos de inferencia que realizan la evaluación sensorial o proceso de catación y determina la clase de café que se evalúa, pudiendo ser café pergamino o robusto; por otro lado el agente selección de proceso realiza la evaluación física del grano con

soporte en tres motores difusos de inferencia que determinan la secuencia de procesos que deben realizarse a un lote de café dependiendo de la clase de café que el agente proceso organoléptico determine; el agente proceso productivo contiene el modelo de eventos discretos que representa toda la maquinaria y equipo existente de la empresa para realizar los procesos recomendados por el agente selección de proceso. Los agentes Demanda y Distribución se crearon en el modelo complementario de distribución, el cual se emplea para medir el impacto de la demanda y tiempo de respuesta de la empresa.

Se desarrolló de igual manera la interfaz gráfica de usuario del sistema de apoyo a la decisión, la cual se diseñó para contener el módulo de prácticas agrícolas, módulo de catación y el módulo de selección de proceso, que corresponde a los agentes recurso proveedor, proceso organoléptico y selección de proceso respectivamente.

El primer módulo de la interfaz gráfica de usuario corresponde a las prácticas agrícolas o aprovisionamiento, donde se puede seleccionar si se conocen las actividades de cultivo del caficultor, en caso de saberlo se habilitan los campos necesarios y se ingresan los valores de las prácticas agrícolas requeridas que se gestionaron en el modelo rendimiento de café, con el propósito de saber cuál es la cantidad de café que ingresara a la empresa de acuerdo a un comportamiento de cultivo específico. El comportamiento de este módulo inicia al accionar el botón “Calcular rendimiento” y consiste en capturar los valores ingresados, abrir el motor de inferencia basado en lógica difusa mediante un enlace al software Matlab[®], ingresa los valores capturados (fusificación) al motor de inferencia para realizar la evaluación (reglas de inferencia) correspondiente y predecir la cantidad en quintales por hectárea (desfusificación) que el caficultor entregará a la empresa; el resultado numérico es registrado en la plataforma de AnyLogic[®] y presentado al usuario de acuerdo a las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos de salida del modelo rendimiento de café

El segundo módulo de la interfaz gráfica de usuario se refiere a la catación de café, el cual se encuentra segmentado en dos partes, la primera corresponde a la catación de café robusto, en donde el usuario ingresa los valores de la intensidad de defecto de taza resultantes del análisis

sensorial en las variables inciertas correspondientes, con el fin de obtener la clase de café (bola robusto, oro natural robusto, rechazar). La segunda parte corresponde al mismo proceso pero para obtener la clase de café pergamino (extra prima, prima lavado, altura, rechazar). Ambos procesos de catación son los modelos de lógica difusa (catación de café pergamino y catación de café robusto) que el agente proceso organoléptico gestiona mediante el segundo módulo de la interfaz gráfica de usuario. El comportamiento de cada parte del módulo inicia al accionar el botón “Obtener clase de café”, de acuerdo al tipo de café, y consiste en capturar los valores ingresados de las variables inciertas, abre el motor de inferencia basado en lógica difusa mediante un enlace al software Matlab[®], ingresa los valores capturados (fusificación) al motor de inferencia para realizar la evaluación (reglas de inferencia) correspondiente y predice la clase de café evaluado (desfusificación) que será posteriormente procesado; el resultado numérico es registrado en la plataforma de AnyLogic[®] y presentado al usuario de acuerdo a las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos de salida de los modelos de lógica difusa catación de café robusto y catación de café pergamino, según sea el caso.

El tercer módulo corresponde al análisis físico del café o selección de proceso, el cual contiene un apartado para café bola robusto, uno para oro natural robusto y café pergamino, con el fin de obtener, en conjunto con el resultado del módulo catación, la combinación de procesos productivos que debe seguir el café para alcanzar una mayor calidad y pueda comercializarse con el menor uso de recursos. El comportamiento de este módulo inicia al accionar el botón “Obtener proceso” y consiste en capturar los valores de las variables inciertas, abre el motor de inferencia basado en lógica difusa mediante un enlace al software Matlab[®], ingresa los valores capturados (fusificación) al motor de inferencia para realizar la evaluación (reglas de inferencia) correspondiente y determina el proceso óptimo (desfusificación) a seguir para obtener un café de calidad con el menor uso de recursos; el resultado numérico es registrado en la plataforma de AnyLogic[®] y presentado al usuario de acuerdo a las etiquetas lingüísticas de los conjuntos difusos de salida de los modelos de lógica difusa selección de proceso café bola robusto, selección de proceso café oro natural robusto y selección de proceso café pergamino según sea el caso.

Cabe mencionar que, a un costado de la interfaz gráfica de usuario, junto a la lista de procesos a selección, se encuentran las etiquetas “Resumen”, la cual dirige al usuario al listado general de resultados; la etiqueta “Empresa” direcciona al usuario al inicio del agente proceso productivo que contiene el modelo de eventos discretos. Así mismo dentro del sistema de apoyo a la decisión se encuentran más etiquetas que al accionarlas mandan a un punto específico del proceso productivo, a la página principal, a los gráficos de rendimiento o al apartado de resumen, con el objeto de hacer fluida y amigable la navegación.

Finalmente se concreta este capítulo con la determinación de los indicadores clave de desempeño que ayudan a cuantificar el impacto del sistema de apoyo a la decisión en los procesos productivos y de toma de decisiones en la cadena de suministro de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V.

Capítulo 4

Análisis de resultados

En este capítulo se muestra el análisis de patrones de comportamiento de decisión en los modelos difusos que describen la gestión del conocimiento de los tomadores de decisiones (expertos) en sus respectivos procesos y que son la base de la función de los agentes inteligentes, esto como parte de la fase 4 de la referencia metodológica propuesta en Figura 2.1, así mismo se analizan los indicadores clave de desempeño seleccionados mediante la aplicación de escenarios como parte de la fase 5 de la referencia metodológica propuesta.

En una forma breve, la aplicación de agentes y demás herramientas de apoyo para el proceso de decisiones de este trabajo, se muestra en el siguiente orden:

- Predecir el rendimiento esperado de café por hectárea a partir del motor de inferencia en lógica difusa.
- Evaluación organoléptica del café pergamino y café robusto a partir de motores de inferencia en lógica difusa
- Seleccionar el proceso de producción a utilizar para el grano que se está comprando mediante la evaluación física y organoléptica, con motores de inferencia en lógica difusa
- Determinar el tiempo de respuesta general de la empresa.

4.1 Análisis de los patrones de comportamiento de decisión basados en la gestión del conocimiento del modelo de agentes

Una vez desarrollado el modelo de agentes propuesto con sus respectivos motores de inferencia verificados y validados, se realiza un análisis sobre el patrón de comportamiento de decisión de acuerdo con el impacto de las variables de entrada de cada modelo de lógica difusa propuesto, para lo cual se emplean los gráficos de superficies de respuesta que el software Matlab[®] ofrece. Cabe resaltar que se muestra el análisis de la relación de variables con mayor importancia para la empresa.

4.1.1 Superficies de respuesta del modelo difuso rendimiento de café (gestión del conocimiento del agente proveedor)

En la Figura 4.1 se muestra el gráfico de superficie de respuesta donde se analizan la relación entre la variable Nutrición del suelo y Precipitación pluvial, las cuales interfieren en la variable de salida Rendimiento por hectárea del modelo difuso rendimiento de café. Se puede observar que generalmente la variable Nutrición del suelo es una práctica agrícola de impacto positivo al Rendimiento por hectárea siempre y cuando exista precipitación pluvial, teniendo puntos óptimos cuando la Nutrición tenga valores entre 0 - 1, 3 - 4 y 5 -6. Cabe destacar que, si la Nutrición tiene un valor de 1, entonces el impacto al rendimiento de cultivo es negativo.

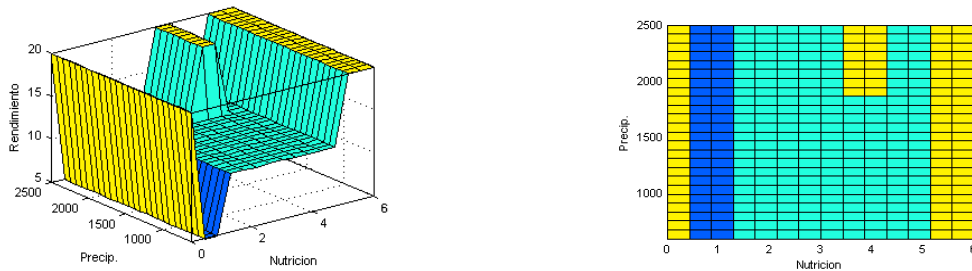


Figura 4.1 Superficie de respuesta de la relación Nutrición del suelo y Precipitación pluvial para el rendimiento de café (Hernández González, 2017).

Por otro lado, se presenta la Figura 4.2 con el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Control de enfermedades y Poda, las cuales interfieren en la variable de salida Rendimiento por hectárea del modelo rendimiento de café. Se puede notar que la práctica agrícola Poda ejecutada de forma estratégica se considera positiva y determinante en el aumento del rendimiento de cultivo y aunque el Control de enfermedades es una práctica determinada como de acción o inacción, se nota que la ocurrencia de alguna enfermedad no tiene impacto significativo en el rendimiento de cultivo con la relación de la variable Poda.

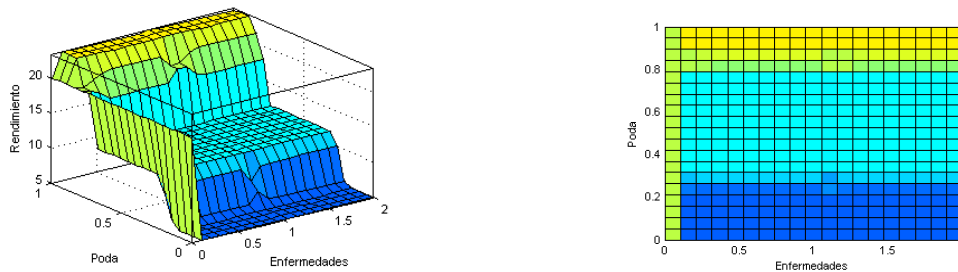


Figura 4.2 Superficie de respuesta de la relación Control de enfermedades y Poda para el rendimiento de café (Hernández González, 2017)

Se presenta la Figura 4.3 con el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Control de plagas y Temperatura, las cuales interfieren en la variable de salida Rendimiento por hectárea del modelo rendimiento de café. Se observa que la Temperatura influye positivamente en el rendimiento de cultivo siempre y cuando no existan plagas que infesten el área de cafetales, puesto que es contraproducente y dejaría muy malos rendimientos para los caficultores; por tal motivo se considera de alto impacto el Control de plagas.

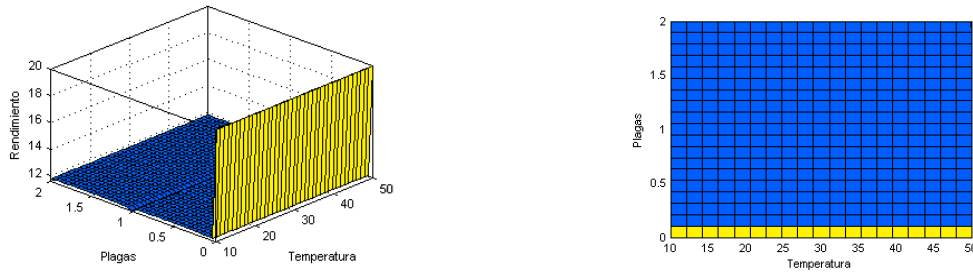


Figura 4.3 Superficie de respuesta de la relación Control de plagas y Temperatura para el rendimiento de café (Hernández González, 2017).

En otro aspecto, se muestra la Figura 4.4 con el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Precipitación pluvial y Temperatura, donde se puede observar que ambas variables impactan positivamente siempre y cuando la variable Temperatura se encuentre entre 10°C - 20°C y 25°C - 50°C, conjuntamente la variable Precipitación pluvial debe estar en valores menores a 1400 mm/m³, entre 1500 mm/m³ y 1800 mm/m³, y valores superiores a 2000 mm/m³.

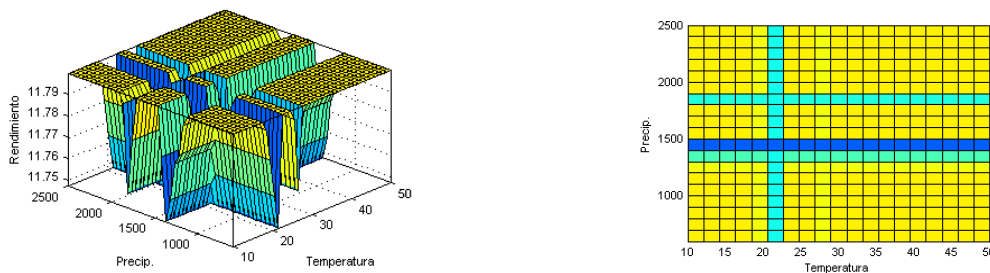


Figura 4.4 Superficie de respuesta de la relación Precipitación pluvial y Temperatura para el rendimiento de café (Hernández González, 2017).

Finalmente se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Nutrición del suelo y Densidad de plantación, la cual se muestra en la Figura 4.5 y se determina que los rendimientos óptimos se obtienen cuando la variable Densidad se encuentra entre 0 - 3 y la variable Nutrición de suelo entre 0 y 5 - 6, Densidad en 0 y Nutrición de suelo

entre 0 – 6 y cuando ambas variables se encuentran en valor 0. Rendimientos regulares se encuentran cuando Densidad se encuentra entre 0.2 - 3 y la variable Nutrición de suelo entre 1.1 – 5.

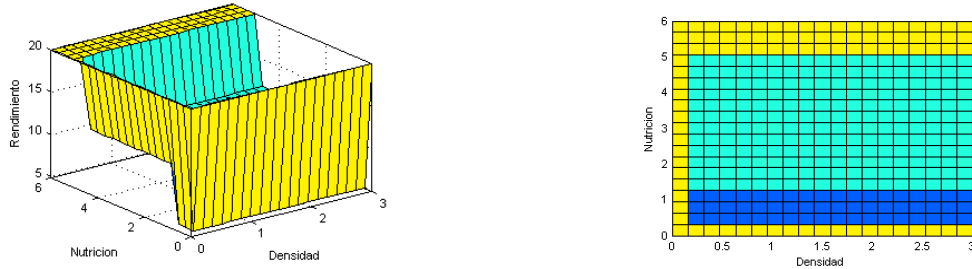


Figura 4.5 Superficie de respuesta de la relación Nutrición del suelo y Densidad de plantación para el rendimiento de café(Hernández González, 2017).

Los rendimientos nulos se obtienen cuando Densidad esta entre 0.2 – 3 y la variable Nutrición de suelo se encuentra entre 0.1 – 1.1.

4.1.1.1 Conclusiones del análisis

Durante el análisis de superficies de respuesta del sistema experto para determinar el rendimiento de café basado en lógica difusa, se puede deducir las siguientes afirmaciones:

- El factor incierto que más afecta al Rendimiento por hectárea de café es Nutrición del suelo, Poda y Control de Plagas, puesto que determinan el buen o mal rendimiento del cultivo.
- El factor incierto que afecta significativamente a partir de intensidades altas es Nutrición del suelo y Poda.
- El factor incierto que afecta significativamente a partir de intensidades bajas es el Control de plagas.
- Los factores que no afectan negativamente al rendimiento de café son Precipitación pluvial y Temperatura.
- Los factores que no afectan significativamente al rendimiento de café son Densidad y Control de enfermedades.

4.1.2 Superficies de respuesta del modelo difuso catación de café pergamino (gestión del conocimiento del agente proceso organoléptico)

Los procesos de catación o de análisis organolépticos son cruciales para conocer el tipo de café que se comercializa y se encuentran sujetos a una elevada subjetividad del catador. En este punto se analiza el impacto de las variables de entrada o defectos de taza del módulo de catación para café pergamino, en donde se muestra la Figura 4.6 que representa el análisis de la relación Acidez y Sabor, notando que la mejor calidad de café pergamino, es decir, un café de altura, se obtienen cuando la Acidez presente valores medios o medio alto en combinación con un Sabor entre bajo y medio alto. Una calidad de tipo extra prima se obtiene cuando el defecto de taza Acidez supere un valor de 3 o valores medios y el Sabor sea bajo o menor de 2, así mismo cuando Acidez supere el valor de 4.3 y el Sabor sea menor de 4. Para el caso de obtener un café tipo oro lavado se aprecia que la variable Acidez debe superar debe superara la media o el valor de 3 y el Sabor debe superar el valor de 4.3. La Acidez impacta negativamente en la variable de salida siempre y cuando se presente en valores por debajo de los medios, puesto que se rechaza todo el café que entra a la empresa.

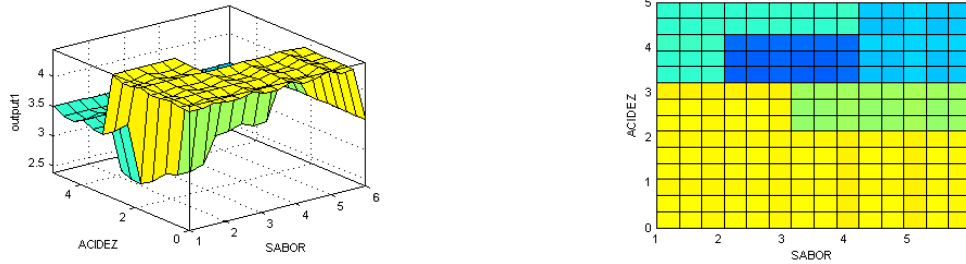


Figura 4.6 Superficie de respuesta de la relación Acidez y Sabor para cata de café pergamino (Hernández González, 2017).

En otro aspecto, se muestra la Figura 4.7 con el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Cuerpo y Acidez, donde se puede ver que la mejor calidad se encuentra cuando Cuerpo sobrepase el valor 2 y Acidez sobre pase el valor 3, un café con calidad oro lavado se encuentra cuando el impacto de Cuerpo sea inferior a 3 conjuntamente con Acidez mayor a 3 y cuando Cuerpo sea menor que 2 con el mismo valor de Acidez. El café de mala calidad se localiza en el punto que Acidez sea menor al valor 3 o valores medios.

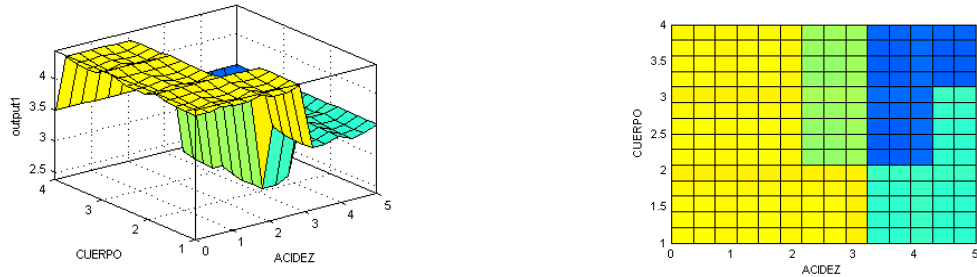


Figura 4.7 Superficie de respuesta de la relación Cuerpo y Acidez para cata de café pergamino (Hernández González, 2017)

En cuanto a la Figura 4.8 se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Sabor y Aroma, donde se determina que el impacto de la variable Aroma es benéfico para la obtención de calidad oro lavado siempre y cuando sobrepase los valores medio bajo y el Sabor supere el valor 3.

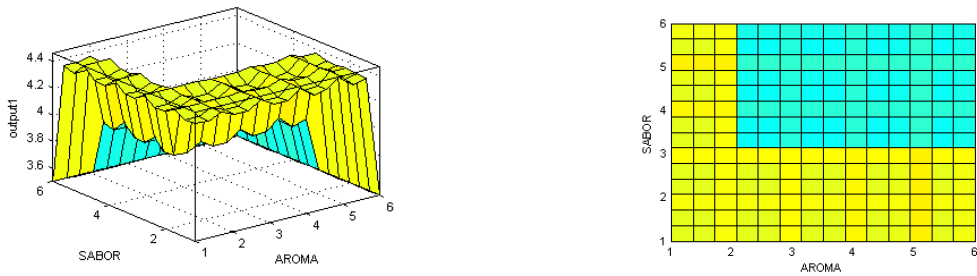


Figura 4.8 Superficie de respuesta de la relación Sabor y Aroma para cata de café pergamino

En cuanto a la Figura 4.9 se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Sabor y Vinoso, donde se determina que el impacto de las variables benéfico para la obtención de calidad oro lavado siempre y cuando Sabor sobrepase el valor de 3 y Vinoso se encuentre entre 1.3 y 3.

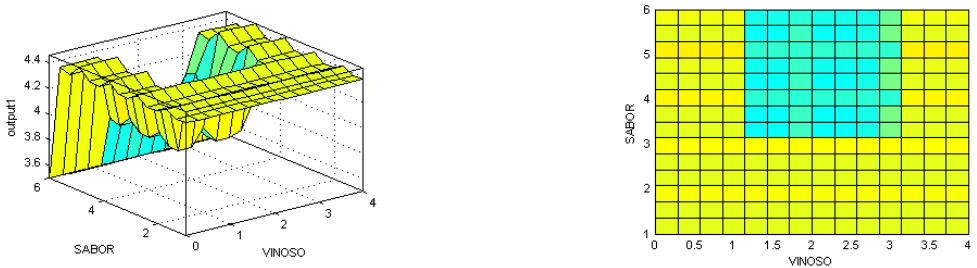


Figura 4.9 Superficie de respuesta de la relación Sabor y Vinoso para cata de café pergamino (Hernández González, 2017).

En la Figura 4.10 se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Químico y Añejo, donde se determina que el impacto de la variable Químico es positivo cuando se presenta este defecto de taza, por el contrario, si no se presenta esta variable en el análisis entonces el café puede ser de calidad extra prima, oro lavado o rechazar.

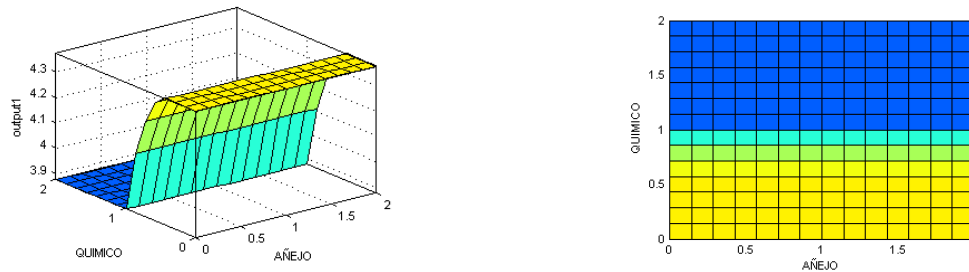


Figura 4.10 Superficie de respuesta de la relación Químico y Añejo para cata de café pergamino (Hernández González, 2017).

En la Figura 4.11 se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Tierra y Fermento, donde se determina que el impacto de la variable Químico se positivo cuando se presenta este defecto de taza, por el contrario, si no se presenta esta variable en el análisis entonces el café puede ser de calidad extra prima, oro lavado o rechazar.

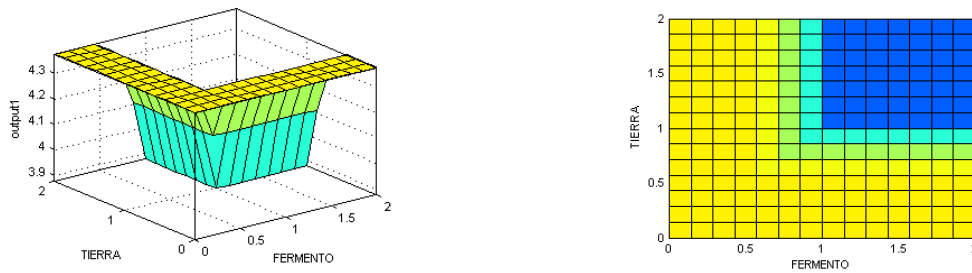


Figura 4.11 Superficie de respuesta de la relación Tierra y Fermento para cata de café pergamino (Hernández González, 2017).

En otro aspecto, la Figura 4.12 presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Fermento y Añejo, donde se determina que el impacto de la variable Fermento es positivo cuando se presenta este defecto de taza en valores superiores a 1, por el contrario, el café puede ser de calidad inferior o se puede rechazar el grano.

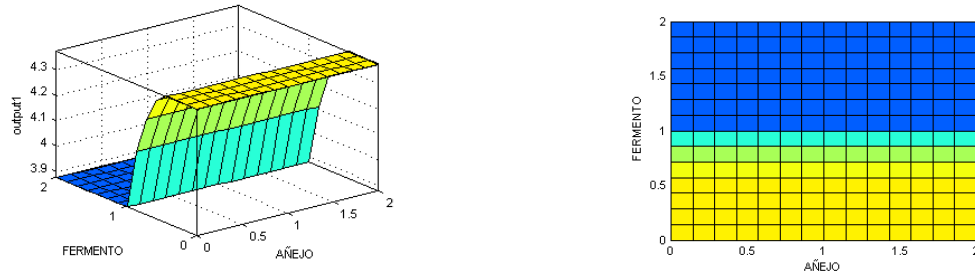


Figura 4.12 Superficie de respuesta de la relación Fermento y Añejo para cata de café pergamino (Hernández González, 2017)

En otro aspecto, la Figura 4.13 presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza dos variables intrínsecas, la variable Cuerpo y Aroma, donde se determina que el impacto de ambas variables es negativo cuando se presentan en valores medio bajo o menores a 2. Por el contrario, se obtiene un café de calidad oro lavado.

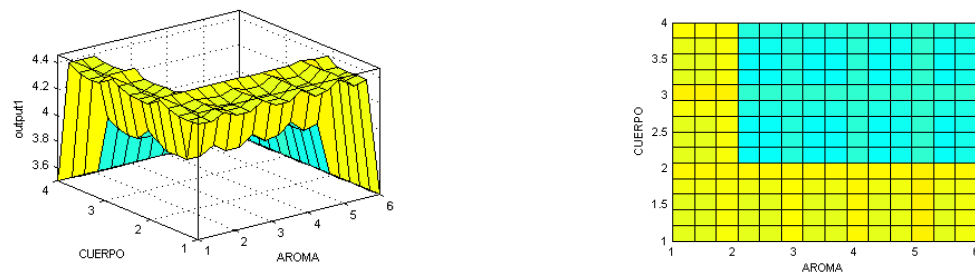


Figura 4.13 Superficie de respuesta de la relación Cuerpo y Aroma para cata de café pergamino (Hernández González, 2017).

4.1.2.1 Conclusiones del análisis

Durante el análisis de superficies de respuesta del sistema experto para catación de café pergamino basado en lógica difusa, se puede deducir las siguientes afirmaciones:

- El defecto en taza que más afecta a este tipo de cafés, es el Fermento cuando se presenta en valores medios, llegando a determinar el rechazo completo del lote de café.
- Para la obtención de un café de altura, no se permite la presencia de ningún defecto en taza, sin embargo, la Acidez, el Químico, Sabor, Aroma y Cuerpo deben de tener un alto grado de presencia.
- Un café prima lavado debe contener intensidades medias de Aroma, Acidez, Cuerpo, sin embargo, no debe haber presencia alguna de los defectos en taza.
- Un café oro lavado, si permite la presencia de defectos de taza a excepción del fermentado.

4.1.3 Superficies de respuesta del modelo difuso catación de café robusto (gestión del conocimiento del agente proceso organoléptico)

Para el análisis de superficies de respuesta del proceso organoléptico del café robusto, se muestra la Figura 4.14 con el gráfico que analiza la relación entre la variable Agrio y Fermento, donde se puede observar que ambas variables impactan positivamente para obtener una mejor calidad de café siempre y cuando ambas variables tengan valores mínimos, es decir, se determina que mientras no se encuentre el sabor Agrio o Fermento en la cata de café, la calidad será alta, por el contrario, cuando se presente un Fermento arriba de la intensidad media y un sabor Agrio con intensidad fuerte o cuando ambas variables presenten un valor de 1, entonces la calidad de café será mínima.

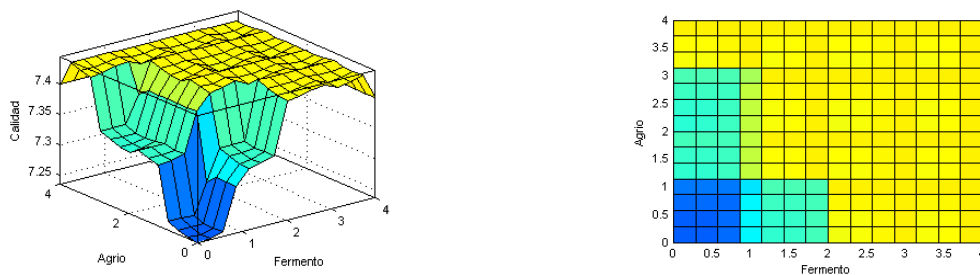


Figura 4.14 Superficie de respuesta de la relación Agrio y Fermento para cata de café robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Tierra y Hediondo, la cual se muestra en la Figura 4.15. Se sabe que un buen café es cuando presenta una intensidad baja o inclusive media, por tal motivo la superficie de respuesta muestra que la mejor calidad de café se obtiene cuando los valores de Hediondo no superen el valor de 1 y sin importar el valor de la variable Tierra.

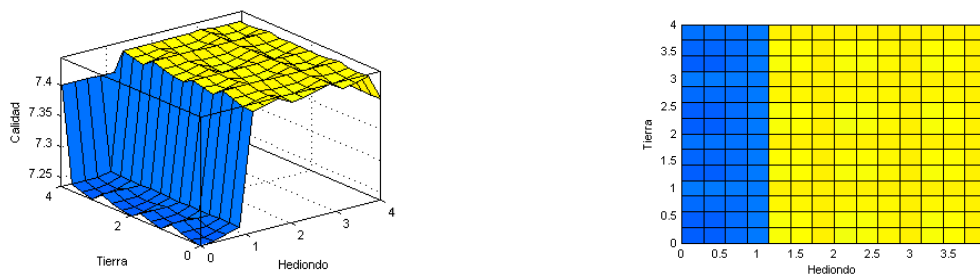


Figura 4.15 Superficie de respuesta de la relación Tierra y Hediondo para cata de café robusto (Hernández González, 2017).

En otro aspecto se presenta la Figura 4.16, la cual contiene el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Fermento y Añejo, donde se aprecia que la mejor calidad de café se obtiene cuando sean mínimos los valores de Fermento, se obtendrá un café de calidad media cuando Fermento supera el valor de 1 y la variable Añejo se encuentre entre 0 – 1, por el contrario, si ambas variables superan el valor de 1 entonces la calidad del café es mínima y se rechaza el grano.

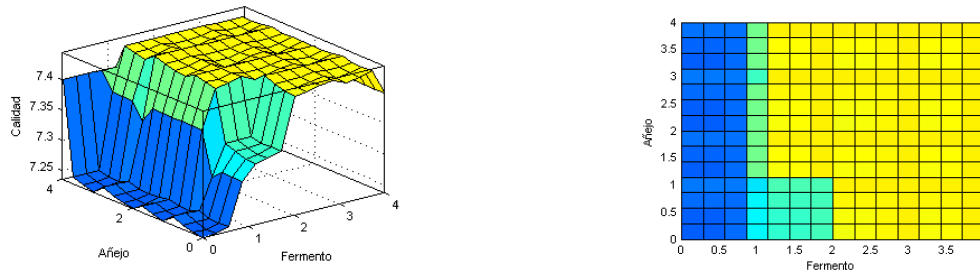


Figura 4.16 Superficie de respuesta de la relación Añejo y Fermento para cata de café robusto (Hernández González, 2017).

Finalmente se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Añejo y Moho, la cual se muestra en la Figura 4.17 y se determina que la mejor calidad se encuentra cuando la variable Añejo este por debajo del valor 2 y cuando la variable Moho se encuentre por debajo del valor 3.

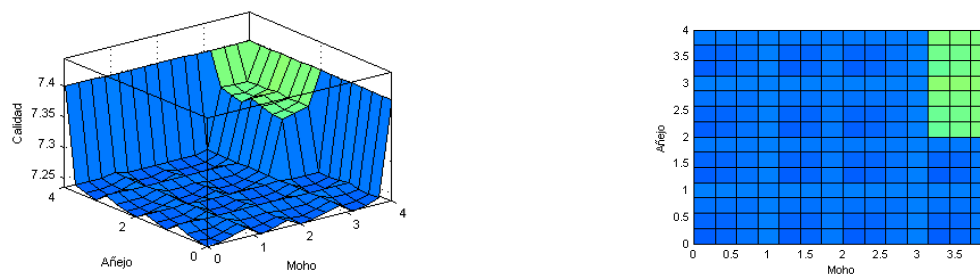


Figura 4.17 Superficie de respuesta de la relación Añejo y Moho para cata de café robusto (Hernández González, 2017).

Por el contrario, cuando se presenten intensidades fuertes de ambas variables, el café será rechazado.

4.1.3.1 Conclusiones del análisis

Durante el análisis de superficies de respuesta del sistema experto para catación de café robusto basado en lógica difusa, se puede deducir las siguientes afirmaciones:

- El defecto en taza que más afecta en la calidad del café robusta es la variable Hediondo, con la presencia de esta variable en una intensidad media, puede ser rechazado, así mismo cuando Agrio se encuentra en valores altos y Fermento en valores medio bajo.
- El defecto en taza que no afecta significativamente la calidad del café es el Añejo y Tierra.
- El defecto que afecta considerablemente a partir de una intensidad alta, es el defecto Moho y Agrio.
- La presencia en conjunto de los defectos de taza, Moho y Añejo afectan considerablemente la calidad del café cuando estos se presentan en intensidades altas.

4.1.4 Superficies de respuesta del modelo difuso selección de proceso café pergamino (gestión del conocimiento del agente selección de proceso)

En este punto se analiza el impacto de las variables de entrada o porcentajes resultantes del análisis físico del grano del módulo selección de proceso del café pergamino, en donde se muestra la Figura 4.18 que representa el análisis de impacto entre las variables Defectos leves y Humedad, donde se determina que si no se presentan defectos y la Humedad es por debajo del 12.5% entonces se determinan procesos simples como el proceso de mezcla, el cual consiste en no realizar ningún proceso productivo y sólo se combina con los lotes de café que se almacenaran o comercializaran, por el contrario si la Humedad supera el 12,5 % se recomienda el uso de proceso de secado. Por otro lado, si se encuentran Defectos leves por arriba de 2.5%, sin importar la Humedad, se recomiendan procesos un poco más elaborados como mecánicas.

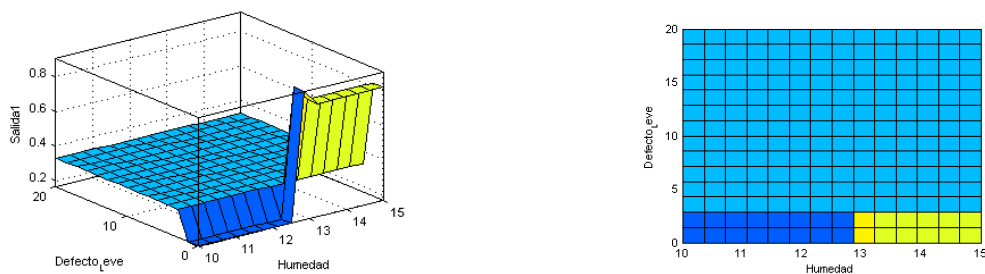


Figura 4.18 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Humedad de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Defectos leves, la cual se muestra en la Figura 4.19 y se determina que

cuando se presenten Defectos leves superiores al 3% se dice que el proceso a elegir será de tipo mecánicas, por el contrario, cuando sea inferior al 3% y los Defectos graves sean menores a 2.5% entonces el proceso será de tipo mezcla o mecánicas, ahora si los Defectos graves superan el 2.5% entonces el proceso recomendado será de tipo electrónicas.

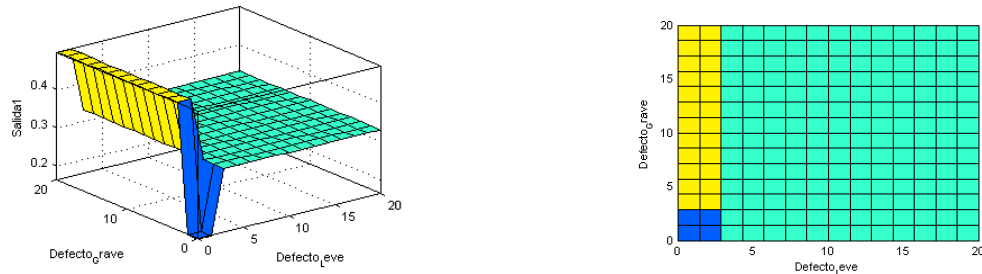


Figura 4.19 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Defectos leves de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Por otro lado, se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Humedad y Granza en la Figura 4.20, y se determina que cuando se presenta Granza superior al 1.5% se dice que el proceso a elegir será de tipo granza, por el contrario, cuando sea inferior al 1.5% y la Humedad sea menor a 12% entonces el proceso será de tipo mecánicas, ahora si la Humedad supera el 12% entonces el proceso recomendado será de secado.

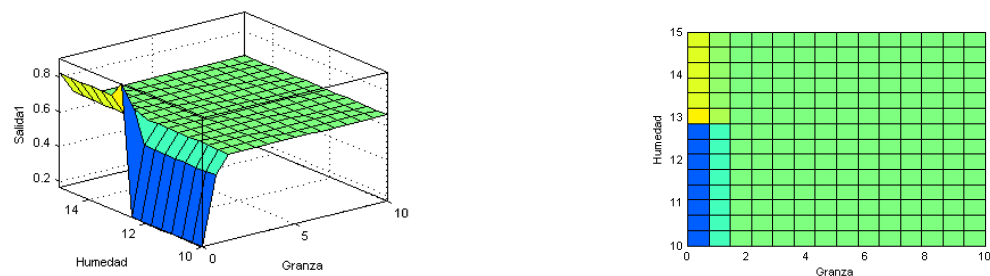


Figura 4.20 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Aspecto verde y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.21 y se determina que el impacto de la variable Granza es positivo para obtener procesos sencillos siempre y cuando supere el 1% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos más complejos como electrónicas o procesos de secado.

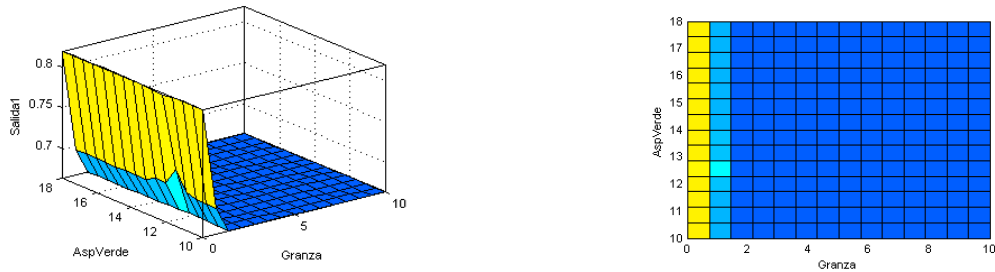


Figura 4.21 Superficie de respuesta de la relación Aspecto verde y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Humedad, la cual se muestra en la Figura 4.22 y se determina que el impacto de la variable Granza es positivo para obtener procesos de tipo electrónicas siempre y cuando supere el 2% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos de tipo mezcla cuando se combina con la variable Humedad con valor menor al 13% y se obtienen procesos de secado cuando Humedad supera el 13% de presencia.

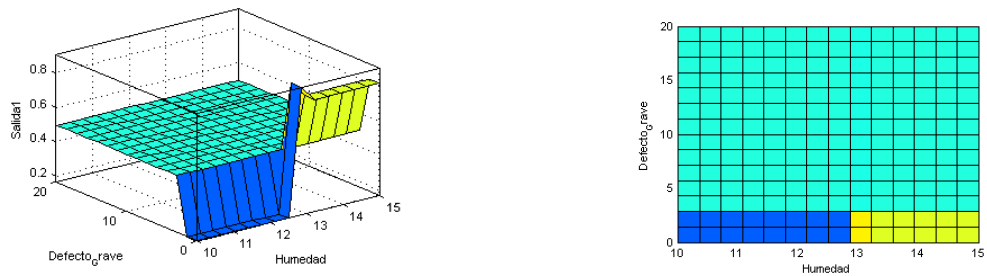


Figura 4.22 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Humedad de la salida 1 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

4.1.4.1 Variables de Salida 2, 3 y 4

El comportamiento de las variables de salida 2,3 y 4 es semejante entre ellas, por ello se describe sólo el impacto de la variable de salida 2. Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Humedad y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.23 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de tipo mecánicas siempre y cuando supere el 2% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos de tipo granza.

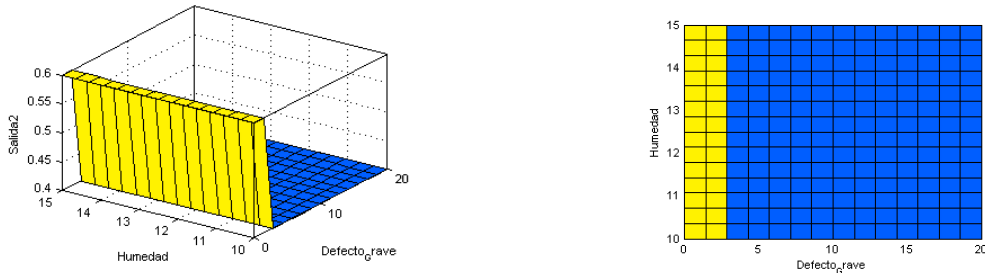


Figura 4.23 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Humedad y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.24 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de tipo granza siempre y cuando supere el 0.33% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos de tipo electrónicas cuando se combina la variable Humedad con valor menor al 13% y se obtienen procesos de secado cuando Humedad es mayor al 13%.

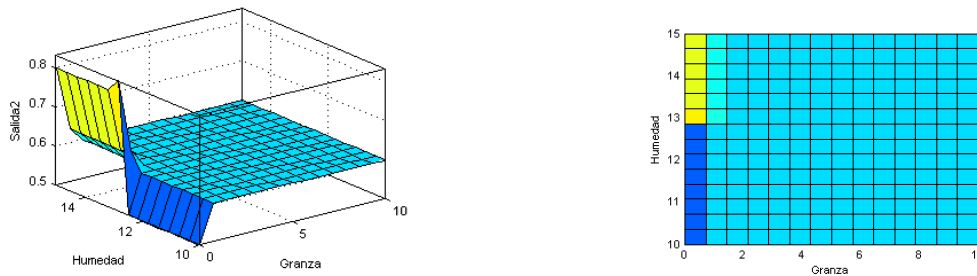


Figura 4.24 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Granza de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Defectos leves, la cual se muestra en la Figura 4.25 y se determina que el impacto de ambas variables es positivo para obtener procesos de tipo mecánicas siempre y cuando superen el 2% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos de secado y procesos de tipo granza cuando Defectos leves sea mayor al 2% y Defectos graves menor al 2% e inversamente.

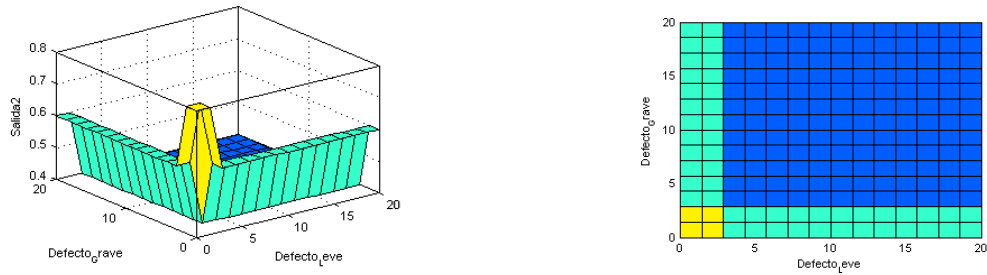


Figura 4.25 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Defectos leves de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Aspecto verde y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.26.

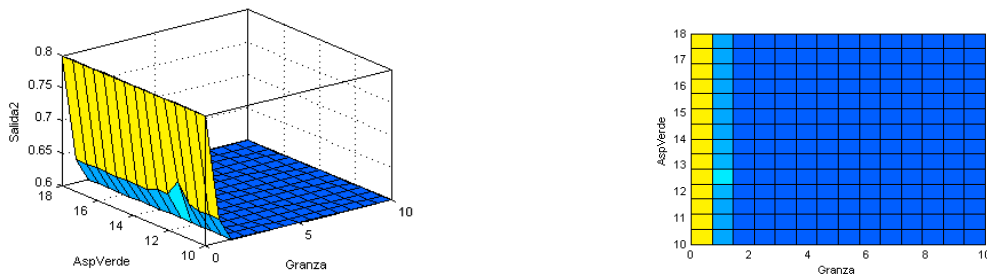


Figura 4.26 Superficie de respuesta de la relación Aspecto verde y Granza de la salida 2 para la selección de proceso del café pergamino (Hernández González, 2017).

Se determina que el impacto de la variable Granza impacta positivamente para obtener procesos de tipo granza siempre y cuando se tenga presencia superior al 1%, por el contrario, se recomiendan procesos de secado.

4.1.4.2 Conclusiones del análisis

Durante el análisis de superficies de respuesta del sistema experto para determinar el proceso productivo del grano basado en lógica difusa, se puede deducir las siguientes afirmaciones:

- Las variables con mayor impacto en la determinación de un proceso productivo a realizar son los Defectos grave y los defectos leves.
- El porcentaje de Aspecto verde no resulta ser una variable de alto impacto.
- El porcentaje de Granza resulta ser de alto impacto para determinar un proceso productivo en situación de presencia baja.

- El porcentaje de Humedad se considera como una variable significativa para determinar el proceso productivo del grano cuando se presentan valores medio alto y resulta en procesos complejos.

4.1.5 Superficies de respuesta del modelo difuso selección de proceso café bola robusto (gestión del conocimiento del agente selección de proceso)

En el caso de la selección de proceso para el café bola robusto, se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Humedad, la cual se muestra en la Figura 4.27 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de granza en valores inferiores al 10%, se obtienen procesos de secado cuando Defectos graves se encuentra entre el 10% y 12% y finalmente se obtienen procesos de tipo electrónicos cuando supera el 12% de presencia los Defectos graves.

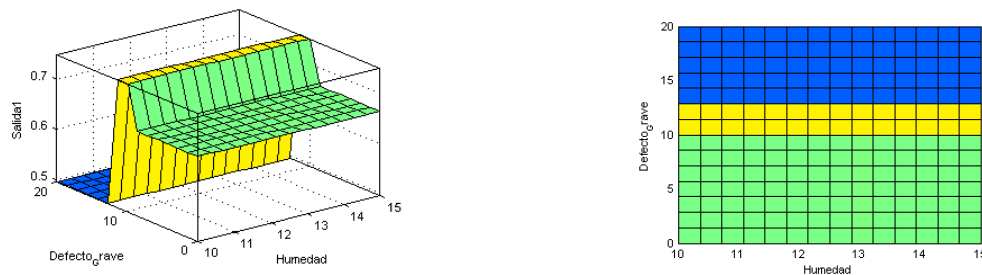


Figura 4.27 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Humedad de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Defectos leves, la cual se muestra en la Figura 4.28 y se determina que el impacto de ambas variables es positivo para obtener procesos de tipo granza siempre y cuando Defectos graves sea menor al 10% y Defectos leves menor al 11%, por otro lado, si Defectos graves supera el 12% y Defectos leves es menor del 11% entonces se obtienen procesos de tipo electrónicos, caso contrario cuando se presentan Defectos leves mayor al 11% y Defectos graves menor al 10% y mayor al 12%, puesto que se obtienen procesos de tipo mezcla, en el caso de que Defectos graves se encuentre entre 10% y 12% se dice que los procesos a obtener son de secado.

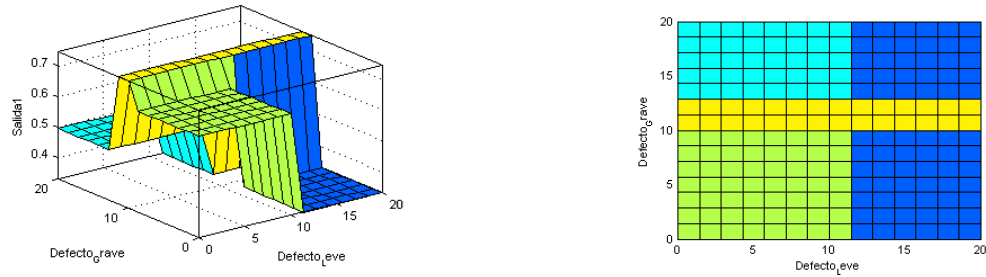


Figura 4.28 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Defectos leves de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.29 y se determina que el impacto de ambas variables es positivo para obtener procesos de tipo mezcla siempre y cuando Defectos graves sea menor al 10% y Granza sea menor al 3%, por otro lado, si Defectos graves supera el 12% y Granza es menor del 3% y mayor que el 3.5% entonces se obtienen procesos de tipo electrónicas, caso contrario cuando se presentan Defectos graves mayor al 10% pero menor que el 12% sin importar Granza, puesto que se obtienen procesos de secado, así mismo sucede cuando Granza es mayor que el 3.5% y Defectos graves menor que el 10%.

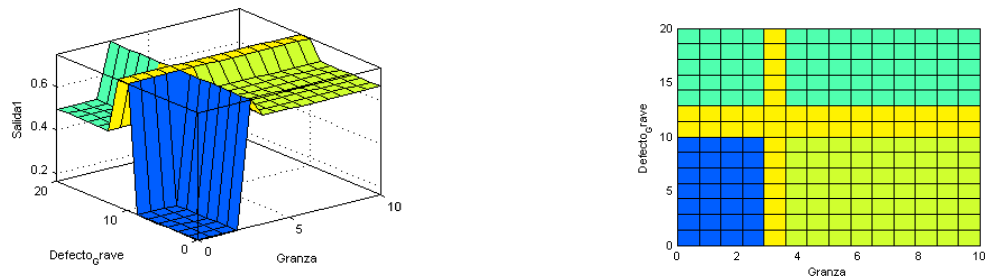


Figura 4.29 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Peso, la cual se muestra en la Figura 4.30 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para procesos de tipo granza y secado cuando es menor del 10%, por otro sentido, se obtienen procesos de secado cuando Defectos graves se encuentra entre 10% y 12%, y finalmente se obtienen procesos de tipo mezcla cuando supera el 12% de presencia.

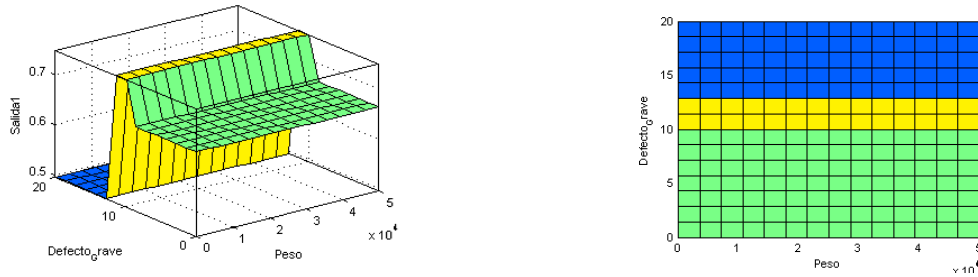


Figura 4.30 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Peso de la salida 1 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

4.1.5.1 Variables de Salida 2, 3 y 4

El comportamiento de las variables de salida 2, 3 y 4 es semejante entre ellas, por ello se describe sólo el impacto de la variable de salida 2. Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Humedad y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.31 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de tipo granza siempre y cuando supere el 12% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos de tipo granza o electrónicas cuando Humedad es menor del 13% y Defectos graves menor que 10%, de igual manera sucede cuando Humedad es menor del 15% y Defectos graves menor que 13%, por otro lado, se obtienen procesos de secado cuando Humedad sea mayor del 13% y Defectos graves menor que 10%.

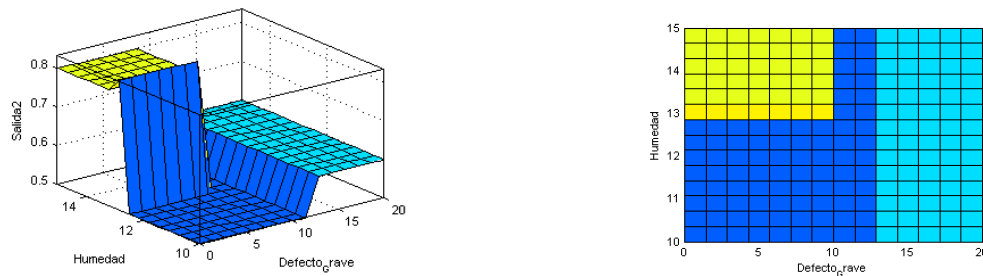


Figura 4.31 Superficie de respuesta de la relación Humedad y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos leves y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.32 y se determina que el impacto de ambas variables es positivo para obtener procesos de tipo electrónicas siempre y cuando supere el 12.85% de presencia los Defectos graves y 11.3% los Defectos leves, por el contrario, se obtienen procesos de tipo granza o electrónicas cuando disminuyen los valores

anteriores y cuando Defectos leves supera 11.3% de presencia en combinación con Defectos graves entre 10% y 12.85%, por otro lado, se obtienen procesos de tipo granza cuando Defectos graves sea menor que 10% y Defectos leves supere el 11.3% y cuando Defectos graves supere el 12.85% y Defectos leves sea menor del 11.3%.

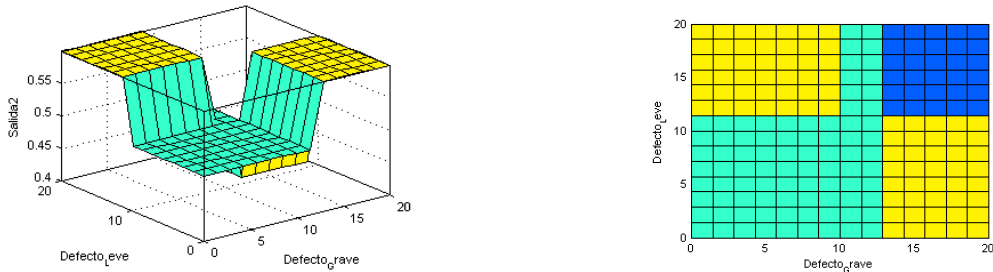


Figura 4.32 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Granza y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.33 y se determina que el impacto de ambas variables es positivo para obtener procesos de tipo granza cuando Granza supere el 3% de presencia y Defectos graves supere el 13%, por el contrario, se obtendrán procesos de tipo electrónicas o granza.

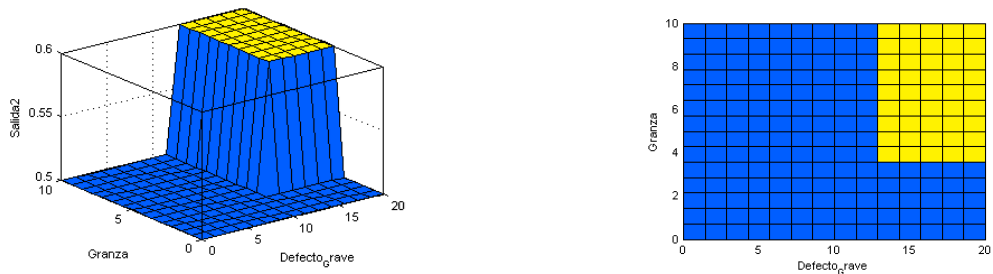


Figura 4.33 Superficie de respuesta de la relación Granza y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Peso y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.34. Se determina que el impacto de ambas variables es positivo para obtener procesos de tipo granza cuando Defectos graves supere el 13% de presencia, por el contrario, se obtendrán procesos de tipo electrónicas o granza.

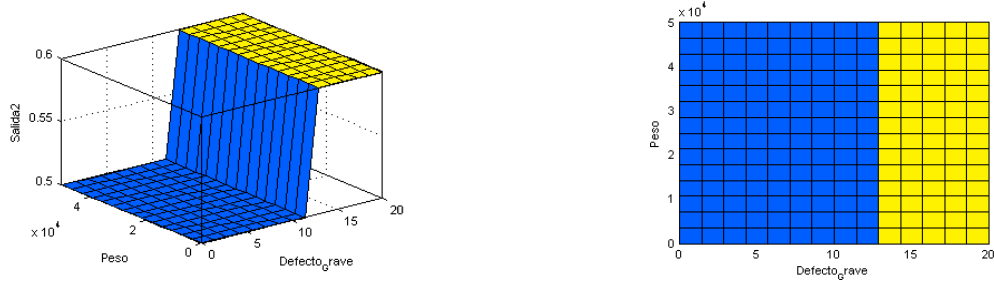


Figura 4.34 Superficie de respuesta de la relación Peso y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café bola robusto (Hernández González, 2017).

4.1.5.2 Conclusiones del análisis

Durante el análisis de superficies de respuesta del sistema experto para determinar el proceso productivo del grano basado en lógica difusa, se puede deducir las siguientes afirmaciones:

- Las variables con mayor impacto en la determinación de un proceso productivo a realizar son los Defectos graves y los Defectos leves en valores por encima de la media.
- El porcentaje de Granza resulta ser de alto impacto para determinar un proceso productivo a partir de valores medio bajo.
- El porcentaje de Humedad resulta ser muy significativo en la determinación de procesos productivos complejos en porcentajes elevados.
- El Peso resulta ser una variable poco significativa en la determinación de proceso productivo.
- Los procesos más simples como de tipo mezcla, se obtienen cuando existe menor presencia de Defectos Leves, Defectos graves y Granza.

4.1.6 Superficies de respuesta del modelo difuso selección de proceso café oro natural robusto (gestión del conocimiento del agente selección de proceso)

En el caso de la selección de proceso para el café oro natural robusto, se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos leves y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.35 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de granza cuando los valores sean inferiores al 12%, cuando Defectos graves supere el 14% en combinación con Defectos leves mayor al 10% se tendrán procesos de tipo electrónicas, de igual manera sucede cuando Defectos graves este entre 12% y 14% en combinación con Defectos leves menor al 10%, por otro lado,

cuando Defectos leves supere el 10% y Defectos graves se encuentre entre 12% y 14% entonces se tendrán procesos de tipo mezcla.

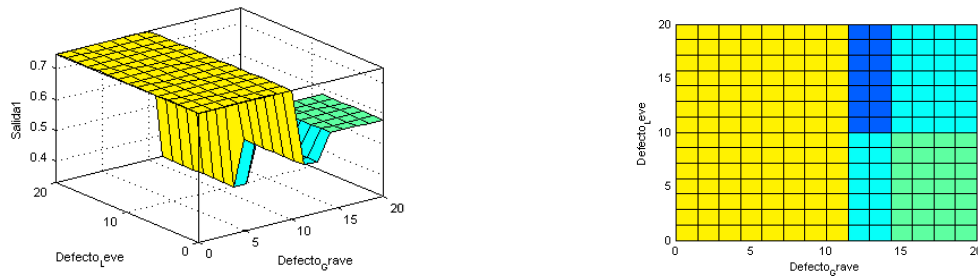


Figura 4.35 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Defectos graves de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.36 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de granza cuando los valores sean inferiores al 12%, por otro lado, se obtienen procesos de tipo electrónicas cuando Granza supere el 4% en combinación con Defectos graves mayor que 14%, de igual manera sucede cuando Granza es menor que 4% en combinación con Defectos graves entre 11% y 14%, por otro rubro, se presentan procesos de tipo mezcla cuando Granza es mayor a 4% y Defectos graves esta entre 11% y 14%, de igual manera cuando Granza es menor del 4% en combinación con Defectos graves superior al 14%.

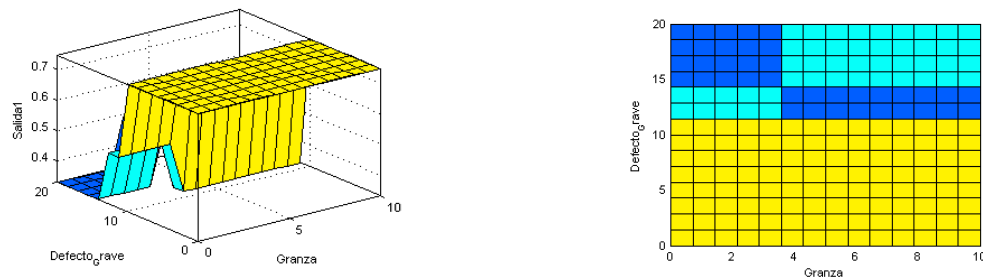


Figura 4.36 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Peso, la cual se muestra en la Figura 4.37 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de granza cuando los valores sean inferiores al 12%, por otro lado, se obtienen procesos de tipo electrónicas cuando Peso supere los 2000 kg en combinación con Defectos graves mayor que 14%, de igual manera

sucede cuando Peso esta entre 2000 kg y 4000 kg en combinación con Defectos graves entre 11% y 14%, por otro rubro, se presentan procesos de tipo mezcla cuando Peso sea menor a 2000 kg y Defectos graves supere el 14%, en el caso que se obtengan procesos de tipo granza será cuando Peso supere los 5000 kg y Defectos graves se encuentre entre 12 y 14%.

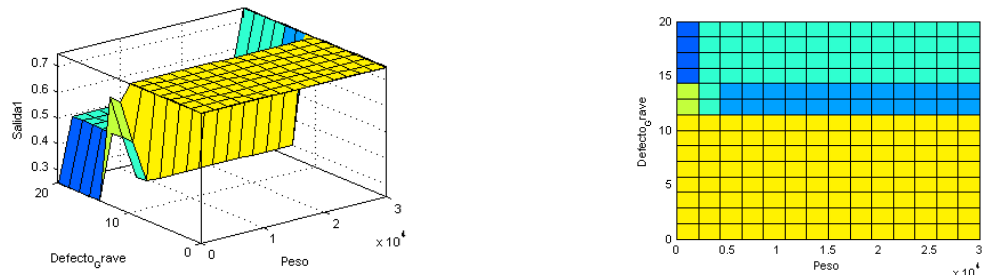


Figura 4.37 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Peso de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.38 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de granza cuando los valores sean inferiores al 12%, por otro lado, se obtienen procesos de tipo mecánicas y electrónicas cuando Granza supere el 3.5% en combinación con Defectos graves mayor que 14%, de igual manera sucede cuando Granza es menor que 3.5% en combinación con Defectos graves entre 11% y 14%, por otro rubro, se presentan procesos de tipo mezcla cuando Granza sea menor a 3.5% y Defectos graves supere el 14%, de igual manera cuando Granza supere el 3.5% y Defectos graves se encuentre entre 12 y 14%.

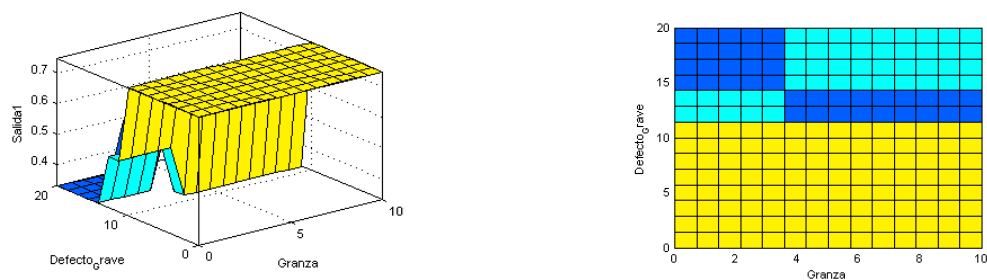


Figura 4.38 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Aspecto verde, la cual se muestra en la Figura 4.39 y se determina que el aspecto verde no tiene impacto en esta relación para la selección de proceso.

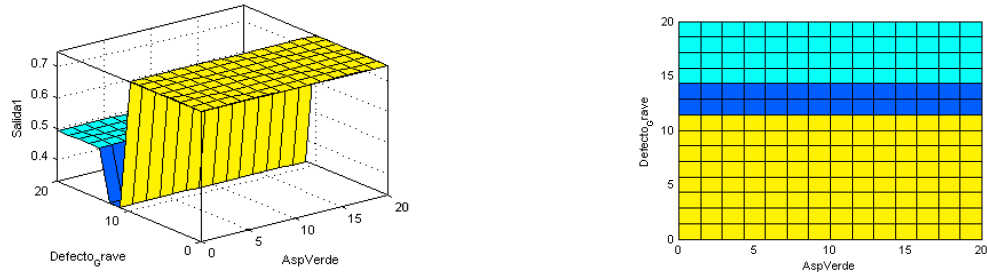


Figura 4.39 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Aspecto verde de la salida 1 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Así mismo se determina que se obtienen procesos de tipo granza cuando Defectos graves sean menores al 12%, cuando la variable se encuentre entre 12% y 14%, entonces se obtienen procesos de tipo mezcla y finalmente cuando Defectos graves supere el 14% se obtendrán procesos de tipo electrónicas.

4.1.6.1 Variables de Salida 2 y 3

El comportamiento de las variables de salida 2 y 3 es semejante entre ellas, por ello se describe sólo el impacto de la variable de salida 2. Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos leves y Defectos graves, la cual se muestra en la Figura 4.40 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de tipo granza y electrónicas siempre y cuando sea menor al 12% de presencia, por el contrario, se obtienen procesos de tipo granza cuando Defectos leves sea menor a 10% en combinación con Defectos graves mayor al 12%, de igual manera cuando Defectos leves es superior al 10% en combinación con Defectos graves entre 12% y 14%, por otro lado, se obtienen procesos de tipo mecánicas y electrónicas cuando Defectos leves es mayor al 10% y defectos graves superen el 14%.

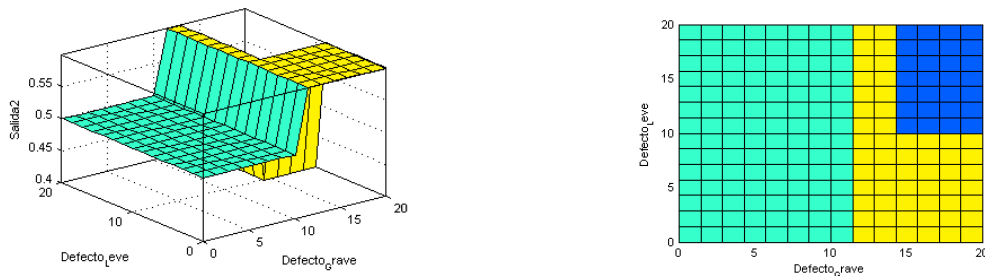


Figura 4.40 Superficie de respuesta de la relación Defectos leves y Defectos graves de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Granza, la cual se muestra en la Figura 4.41 y se determina que el impacto de las variables es positivo para obtener procesos de tipo electrónicas siempre y cuando sea Defectos graves mayor al 12% de presencia en combinación con Granza mayor al 3.5%, por el contrario, cuando Defectos graves se encuentra entre 12% y 14% en combinación con Granza mayor al 3.5% , entonces se tienen procesos de tipo granza, por otro lado, para los demás valores combinados se obtienen procesos de tipo electrónicas y granza.

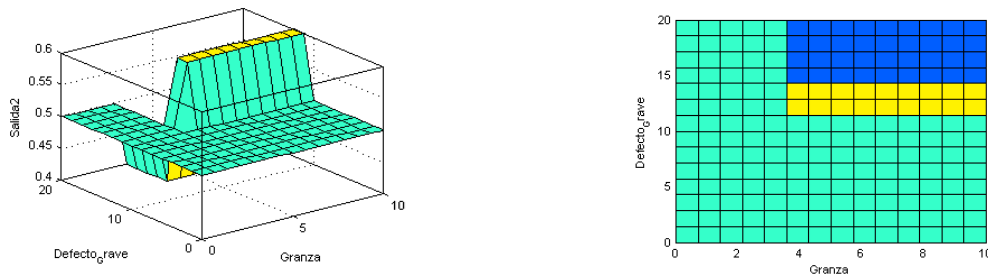


Figura 4.41 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Granza de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Peso, la cual se muestra en la Figura 4.42 y se determina que el impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de tipo granza y electrónicas siempre y cuando sea menor al 12% de presencia, en otro aspecto, cuando Defectos graves supere el 14%, entonces se tendrán procesos de tipo electrónicas y finalmente cuando Defectos graves este entre 12% y 14% en combinación con Peso mayor a 2000 kg, entonces se tendrán procesos de tipo granza.

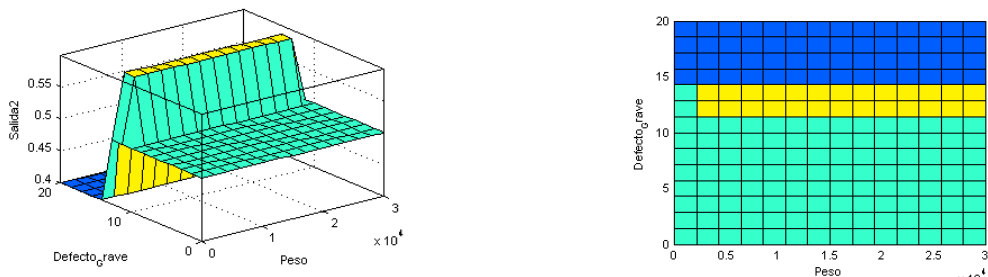


Figura 4.42 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Peso de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

Se presenta el gráfico de superficie de respuesta que analiza la relación entre la variable Defectos graves y Aspecto verde, la cual se muestra en la Figura 4.43 y se determina que el

impacto de la variable Defectos graves es positivo para obtener procesos de tipo granza y electrónicas siempre y cuando sea menor al 12% de presencia, en otro aspecto, cuando Defectos graves supere el 14%, entonces se tendrán procesos de tipo electrónicas y finalmente cuando Defectos graves este entre 12% y 14%, entonces se tendrán procesos de tipo granza.

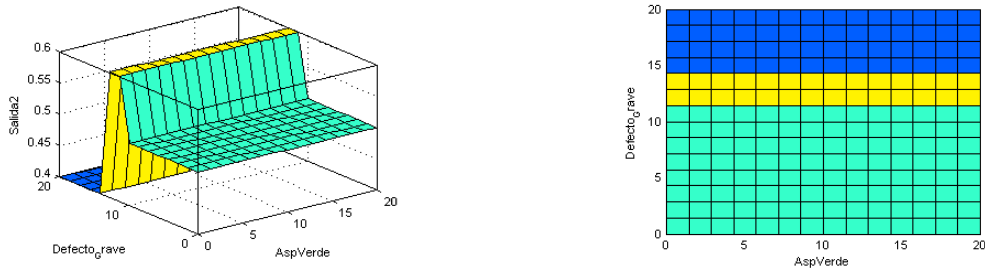


Figura 4.43 Superficie de respuesta de la relación Defectos graves y Aspecto verde de la salida 2 para la selección de proceso del café oro natural robusto (Hernández González, 2017).

4.1.6.2 Conclusiones del análisis

Durante el análisis de superficies de respuesta del sistema experto para determinar el proceso productivo del grano basado en lógica difusa, se puede deducir las siguientes afirmaciones:

- Las variables con mayor impacto en la determinación de un proceso productivo a realizar son los Defectos graves y los Defectos leves.
- El porcentaje de Granza y el Peso resultan variables de mediano impacto para determinar un proceso productivo.
- El porcentaje de Aspecto verde se considera poco significativo para la determinación del proceso productivo.
- No influye el factor Humedad en la determinación del proceso productivo de este tipo de café.
- Los procesos más simples como de tipo mezcla, se obtienen cuando existe menor presencia de Granza y Peso.
- Los procesos más complejos como electrónicas se obtienen cuando hay presencia media o media alta de Defectos graves y Defectos leves.

4.2 Análisis de escenarios e indicadores clave de desempeño

Como se plantea en la metodología, el primer paso a realizar es cuantificar la cantidad de café esperada, esto gracias al agente proveedor que tiene integrado un modelo de lógica difusa que

predice los rendimientos de las fincas de café por hectárea. A fin de ejemplificar la propuesta de este trabajo, en la Tabla 4.1 se presentan los casos correspondientes las actividades agrícolas de cinco proveedores de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., los cuales no se mencionan nombres para evitar preferencias o favoritismos al realizar el proceso de toma de decisiones.

Tabla 4.1 Casos para toma de decisiones de prácticas agrícolas

| Prácticas agrícolas | | | | | | | |
|---------------------|-----------|------------------------|--------|--------------|----------|------|-------------|
| Caso | Nutrición | Precipitación | Plagas | Enfermedades | Densidad | Poda | Temperatura |
| 1 | 4 | 1500 mm/m ³ | Si | Si | Alta | 100% | 23°C |
| 2 | 2 | 600 mm/m ³ | Si | Si | Media | 80% | 25°C |
| 3 | 1 | 600 mm/m ³ | No | No | Media | 25% | 28°C |
| 4 | 4 | 1500 mm/m ³ | Si | Si | Media | 25% | 23°C |
| 5 | 3 | 1500 mm/m ³ | Si | Si | Media | 90% | 25°C |

Como se puede notar, cada proveedor maneja diferentes prácticas agrícolas en sus plantíos, lo que conlleva una variación en la cantidad de quintales por hectárea a obtener de café.

En el primer ejemplo se considera un panorama óptimo para cada una de las variables que afectan el rendimiento de las fincas cafetaleras, es decir, se realizaron cuatro aplicaciones de Nutrición del suelo, hubo en promedio una Precipitación pluvial de 1500 mm/m³, se considera que hubo Control de plagas y Control de enfermedades, una Densidad de plantación alta, la realización de Poda a la finca y una Temperatura promedio de 23°C.

Al ingresar los valores de las prácticas agrícolas de cada proveedor en el módulo 1 de la interfaz gráfica del sistema de apoyo a la decisión propuesto, se obtuvieron con rapidez y facilidad los quintales por hectárea esperados que se venden a la empresa, lo cual se muestra en la segunda columna de la Tabla 4.2, así mismo, de acuerdo a la cantidad de hectáreas disponibles por proveedor, se obtiene los kilogramos del total de café cultivado, como en el primer ejemplo que considera la disponibilidad de 17 hectáreas para plantación, por lo que se espera 600.95 Qq de café, lo que equivale a 27,643.7 kg.

Tabla 4.2 Resultado del sistema de apoyo a la decisión para el rendimiento de café

| Rendimiento por hectárea | | | | |
|--------------------------|-----------------|----------------|------------|------------|
| Caso | Qq por hectárea | Ha disponibles | Total (Qq) | Total (kg) |
| 1 | 35.35 | 17 | 600.95 | 27643.7 |
| 2 | 20 | 17 | 340 | 15640 |
| 3 | 4.954 | 35 | 173.39 | 7975.94 |
| 4 | 20.4448 | 35 | 715.568 | 32916.128 |
| 5 | 35.3554 | 33 | 1166.7282 | 53669.497 |

Posterior a que cada proveedor envía a la empresa el tipo de café que cultiva, la empresa lo recibe en el tiempo negociado para que el grano pueda procesarse de manera adecuada, por lo que se requiere realizar el análisis organoléptico para determinar y corroborar la calidad del grano que el proveedor asegura que entrega.

En la Tabla 4.3 se presenta a detalle los resultados de la evaluación organoléptica de cada lote de café tipo pergamino que ha entregado cada proveedor, posteriormente se ingresan esos datos en el módulo 2 de la interfaz gráfica de usuario para obtener el resultado que arroja el agente proceso organoléptico, cabe mencionar que en la última columna se puede apreciar la Clase de café pergamino a la que pertenece, en el caso particular, sólo el tercer proveedor entrega café pergamino.

Tabla 4.3 Proceso de catación de café pergamino (Hernández González, 2017).

| Catación de café pergamino | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|------|---------|---------|-------------------|
| Caso | Aroma | Sabor | Acidez | Cuerpo | Vinoso | Verde | Cereal | Seco | Químico | Terroso | Clase café |
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Oro Lavado |
| 4 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |

En la Tabla 4.4 se presenta a detalle los resultados de la evaluación sensorial de cada lote de café tipo robusto que ha entregado cada proveedor, posteriormente se ingresan esos datos en el módulo 2 de la interfaz gráfica de usuario para obtener el resultado que arroja el agente

proceso organoléptico, cabe mencionar que en la última columna se puede apreciar la Clase de café robusto a la que pertenece el grano del primer, segundo, cuarto y quinto proveedor.

Tabla 4.4 Proceso de catación de café robusto (Hernández González, 2017).

| Catación de café robusto | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|-------|----------|--------|------|-------|------------|------------------------|
| Caso | Fermento | Agrio | Hediondo | Tierra | Moho | Añejo | Clase café | Clase café |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 7.2 | Bola robusto |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 2 | 7.3 | Natural robusto |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7.3 | Natural robusto |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 7.2 | Bola robusto |

Con conocimiento de la clase de café que ingreso a la empresa, se procede a realizar el análisis físico del grano con el fin de conocer el proceso productivo a seguir.

En la Tabla 4.5 se muestran los procesos seleccionados para cada caso en específico, los cuales se obtuvieron al ingresar los valores resultantes del proceso de valoración física en el módulo 3 de la interfaz gráfica de usuario del sistema de apoyo a la decisión propuesto, con el fin de obtener la combinación de procesos productivos recomendados por el agente selección de proceso.

Tabla 4.5 Determinación de proceso productivo (Hernández González, 2017).

| Selección de proceso | | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------|----------------|-------------------|-----------|------------------------------|
| Caso | Tipo | Defectos Leves | Defectos Graves | Granza | Humedad | Aspecto verde | Peso (kg) | Proceso |
| 1 | Bola robusto | Muchos | Muchos | Normal | Permitido | Bueno | 27643.7 | Electrónicas |
| 2 | Natural robusto | Normal | Muchos | Normal | No aplica | Bueno | 15640 | Mecánica/Electrónicas |
| 3 | Oro lavado | Muchos | Muchos | Normal | Permitido | Falto | 7975.94 | Electrónicas |
| 4 | Natural robusto | Muchos | Muchos | Normal | No aplica | Ligeramente falto | 32916.13 | Granza/Electrónicas |
| 5 | Bola robusto | Muchos | Muchos | Normal | Pasado de seco | Muy falto | 26834.75 | Mecánica/Electrónicas |

Finalmente es necesario evaluar mediante indicadores de desempeño el impacto que tiene el sistema de apoyo a la decisión con enfoque de agentes en la cadena de suministro de la empresa.

4.2.1 Indicadores clave de desempeño

El indicador clave de desempeño tipo de proceso es considerado de alto impacto en los demás indicadores basados en el modelo SCOR debido a la influencia que tiene en ellos, es decir, de acuerdo al a la decisión que brinda el agente selección de proceso para realizar actividades productivas al grano de café, el indicador tiempo de ciclo, rendimiento de máquinas, cantidad de café bueno, ordenes completadas y costo de producción, fluctuaran positiva o negativamente repercutiendo en las operaciones cotidianas de la empresa.

Los indicadores de desempeño utilizados y basados en el modelo SCOR son los siguientes:

- Tiempo de ciclo: el tiempo asociado con los procesos de fabricación.
- Capacidad de utilización: es una medida de cuán intensamente se está utilizando un recurso para producir un bien o servicio. En el caso específico, se mide la utilización de maquinaria.
- Cantidad correcta de café bueno: es la cantidad de productos necesarios para el cliente, en el caso específico se trata de kilos de café
- Cumplimiento perfecto de pedidos: es el porcentaje de órdenes que cumple con el rendimiento de entrega. Los componentes incluyen todos los artículos y cantidades a tiempo utilizando la definición de tiempo del cliente y la documentación.
- Costo de los bienes vendidos: el costo asociado con la compra de materias primas y la producción de productos terminados. Este costo incluye costos directos (mano de obra, materiales) e indirectos (gastos generales).

4.2.1.1 Indicador clave de desempeño tiempo ciclo, capacidad de utilización y cantidad correcta de café bueno

Para realizar la evaluación del comportamiento de los indicadores se utilizaron los cinco casos ejemplificados, por lo tanto el resultado se muestra en la Tabla 4.6, donde se puede apreciar en las comparativas que en el caso 1, el tiempo de ciclo obtenido se reduce significativamente, se

aumenta la utilización de maquinaria a su totalidad, se realiza un sólo proceso en vez de realizar dos, al realizar un proceso más elaborado, la discriminación de café es más rigurosa, por tal motivo se obtiene cerca de 100 kilos menos de café, aunque el costo de producción de bienes se reduce en un 80%.

Para el segundo caso se nota un aumento en el tiempo de ciclo propuesto considerable debido a que el agente selección de proceso determina un proceso de tipo mecánicas/electrónicas para asegurar obtener la calidad de café que el cliente necesita sin sobrepasar el porcentaje de mancha solicitado, por el contrario, la empresa realizo un proceso de tipo electrónicas, obteniendo menor tiempo de ciclo y menor coste, pero al ser un proceso riguroso, el grano se puede llegar a sobre procesar adquiriendo mayor calidad de la solicitada aunque se venda a un precio inferior; la utilización de maquinaria propuesta es mejor y la cantidad correcta de café bueno a una calidad especifica es superior en poco más del 5%.

Para el tercer caso se aprecia un tiempo de ciclo propuesto inferior en cerca del 54%, una utilización de maquinaria superior, de acuerdo con las características del grano a procesar se determina un sólo proceso riguroso en vez de una combinación, lo cual se puede ver reflejado en un aumento del 13% en la cantidad correcta de café bueno obtenido para venta y una reducción del costo de producción superior al 60%.

En el cuarto caso se determina una disminución de tiempo de ciclo propuesto cerca del 45%, aunque la utilización de maquinaria disminuye poco más del 10% se considera justificable con el tiempo de ciclo, para el caso de la selección de proceso se aprecia que en la empresa utiliza mecánicas/electrónicas y se propone granza/electrónicas, lo anterior se ve reflejado en el aumento del 7% de la cantidad correcta de café bueno obtenido, utilizando la decisión del proceso propuesto aunque el coste de bienes aumente poco más del 1%.

Tabla 4.6 Resultado de indicadores de desempeño (kpi) (Hernández González, 2017).

| Caso | Tipo de proceso | | Tiempo de ciclo (minutos) | | Capacidad de utilización | | Cantidad correcta de café bueno(kg) | | Costo de los bienes vendidos | |
|---------|------------------------|-----------------------|---------------------------|----------|--------------------------|----------|-------------------------------------|----------|------------------------------|--------------|
| | Real | Obtenido | Real | Obtenido | Real | Obtenido | Real | Obtenido | Real | Obtenido |
| 1 | Granza/mecánicas | Electrónicas | 5033.00 | 1986.94 | 72.0% | 100.0% | 27600 | 27467 | \$ 28,153.47 | \$ 5,320.45 |
| 2 | Electrónicas | Mecánica/Electrónicas | 1080.00 | 1905.18 | 79.0% | 87.3% | 13800 | 14546 | \$ 3,005.14 | \$ 7,354.10 |
| 3 | Mecánicas/electrónicas | Electrónicas | 1266.00 | 576.23 | 72.3% | 100.0% | 6900 | 7929 | \$ 3,958.81 | \$ 1,535.43 |
| 4 | Mecánicas/electrónicas | Granza/Electrónicas | 9445.00 | 5193.35 | 70.5% | 59.0% | 17423 | 18857 | \$ 39,325.57 | \$ 40,031.85 |
| 5 | Mecánicas/electrónicas | Mecánica/Electrónicas | 5022.00 | 3320.97 | 74.5% | 87.0% | 27600 | 24912 | \$ 24,162.91 | \$ 22,958.64 |
| Totales | | | 21846.00 | 12982.67 | | | 93323 | 93711 | \$98,605.90 | \$77,200.46 |

En el último caso se aprecia una reducción de tiempo de ciclo propuesto del 44%, un aumento de más del 10% en la utilización de maquinaria, se coincide la decisión del proceso a realizar, lo que resulta en una reducción del coste de bienes del 5% aunque la cantidad correcta de café bueno obtenido disminuye, considerándose justificable con el tiempo de proceso obtenido gracias a la gestión de información y sincronización del sistema propuesto.

4.2.1.2 Indicador clave de desempeño cumplimiento perfecto de pedidos

En el caso del indicador de desempeño “Cumplimiento perfecto de pedidos”, perteneciente al modelo SCOR, se utiliza el modelo complementario igualmente basado en agentes, donde el agente demanda se emplea para monitorear el comportamiento de las ordenes de los clientes y el agente camiones en conjunto con el agente distribución se encargan de obtener la mejor ruta de distribución; en la Figura 4.44 se presenta en el lado izquierdo la situación anterior y en el lado derecho la situación propuesta del comportamiento de las ordenes que se reciben de los clientes, las ordenes que se procesaron y llegaron hasta el cliente y las ordenes que no llegaron a satisfacerse en un periodo de una semana de producción de la empresa; se puede decir que la empresa mejora a un 90.90% de satisfacción de ordenes completadas.

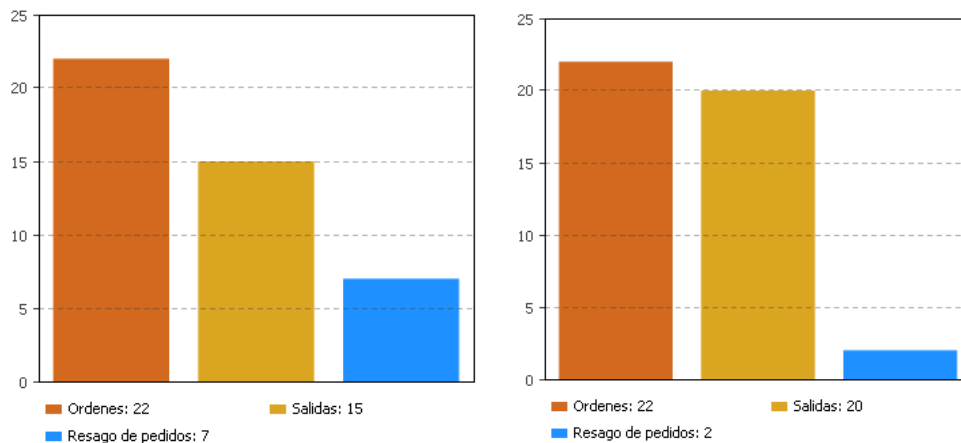


Figura 4.44 Indicador cumplimiento perfecto de pedidos (Hernández González, 2017).

En resumen, el sistema de apoyo a la decisión basado en agentes ayuda a mejorar el proceso de toma de decisiones, notándose una reducción económica de \$ 21,405.43 pesos que representa un 21.71%, se obtuvieron 388 kilos más de café bueno para vender y se redujo el tiempo de ciclo obtenido en un 40.57% que representa 8,863.33 minutos, los cuales sirven para atender otras ordenes de clientes.

4.2.3. Costo de producción

Para obtener los costes de producción de la empresa, se utiliza el software profesional @Risk® para realizar los cálculos pertinentes.

Los costos de producción se obtienen de la suma de mano de obra, gastos de beneficio y consumo eléctrico, En la Tabla 4.7 se presentan a detalle los rubros que involucra el cálculo de mano de obra, de donde se tomaron sólo los cargos, los cuales corresponden a un mes de actividad de la empresa y de acuerdo con la cantidad en kilos procesados, se obtuvieron los valores unitarios de cada rubro de la mano de obra.

Tabla 4.7 Descripción de mano de obra.

| Descripción | Saldo inicial | Cargos | Abonos | Saldos | Unitarios | Costos de proceso |
|---------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-------------------|
| Mano de obra | -\$ 3,118.00 | \$ 65,573.00 | \$ 65,573.00 | -\$ 3,118.00 | \$ 0.69 | \$ 693.87 |

| | | | | | | |
|----------------------|---------------|--------------|--|---------------|---------|-----------|
| Sueldos y salarios | \$ 47,005.00 | \$ 49,154.00 | | \$ 96,159.00 | \$ 0.52 | \$ 520.13 |
| Horas extras | \$ 38,445.00 | \$ 1,071.00 | | \$ 9,516.00 | \$ 0.01 | \$ 11.33 |
| Domingo doble | \$ 10,523.00 | | | \$ 10,523.00 | | |
| Prima dominical | \$ 98.00 | | | \$ 98.00 | | |
| Horas extras triples | \$ 42,897.00 | \$ 784.00 | | \$ 43,681.00 | \$ 0.01 | \$ 8.30 |
| Prima de asistencia | \$ 40,054.00 | \$ 4,766.00 | | \$ 44,820.00 | \$ 0.05 | \$ 50.43 |
| Prima de puntualidad | \$ 41,712.00 | \$ 4,932.00 | | \$ 46,644.00 | \$ 0.05 | \$ 52.19 |
| Día festivo | \$ 8,667.00 | | | \$ 8,667.00 | | |
| Percepciones | \$ 229,401.00 | \$ 60,707.00 | | \$ 290,108.00 | \$ 0.64 | \$ 642.38 |

| | | | | | | |
|------------------------|-----------|-------------|--|-------------|---------|----------|
| Prima vacacional | \$ 896.00 | \$ 2,116.00 | | \$ 3,012.00 | \$ 0.02 | \$ 22.39 |
| Prestaciones laborales | \$ 896.00 | \$ 2,116.00 | | \$ 3,012.00 | \$ 0.02 | \$ 22.39 |

| | | | | | | |
|-------------------|--------------|-------------|--|--------------|---------|----------|
| Vales de despensa | \$ 23,600.00 | \$ 2,750.00 | | \$ 26,350.00 | \$ 0.03 | \$ 29.10 |
| Previsión social | \$ 23,600.00 | \$ 2,750.00 | | \$ 26,350.00 | \$ 0.03 | \$ 29.10 |

| | | | | | | |
|-------------------------------|----------------|--|--------------|----------------|--|--|
| Traspaso a costo de beneficio | -\$ 257,015.00 | | \$ 65,573.00 | -\$ 322,588.00 | | |
|-------------------------------|----------------|--|--------------|----------------|--|--|

En la Tabla 4.8 se presentan a detalle los rubros que involucra el cálculo de gastos de beneficio, de donde se tomaron sólo los cargos, los cuales corresponden a un mes de actividad de la empresa y de acuerdo con la cantidad en kilos procesados, se obtuvieron los valores unitarios de cada rubro de los gastos de beneficio.

Tabla 4.8 Descripción de gastos generales de beneficio.

| Descripción | Saldo inicial | Cargos | Abonos | Saldos | Unitarios | Costos de proceso |
|-------------------------------------|------------------|---------------|---------------|------------------|-----------|-------------------|
| Gastos de beneficio | -\$ 2,057,875.00 | \$ 132,771.69 | \$ 288,656.39 | -\$ 2,213,759.70 | \$ 1.15 | \$ 1,147.59 |
| Sueldos y salarios | \$ 270,564.00 | \$ 22,596.00 | | \$ 293,160.00 | \$0.24 | \$ 239.10 |
| Horas extras | \$ 7,248.00 | | | \$ 7,248.00 | | |
| Domingo doble | \$ 15,284.00 | | | \$ 15,284.00 | | |
| Prima de asistencia | \$ 26,269.00 | \$ 2,259.00 | | \$ 28,528.00 | \$ 0.02 | \$ 23.90 |
| Prima de puntualidad | \$ 25,671.00 | \$ 2,259.00 | | \$ 27,930.00 | \$ 0.02 | \$ 23.90 |
| Día festivo | \$ 4,956.00 | | | \$ 4,956.00 | | |
| Gratificaciones | \$ 921.00 | \$ 2,100.00 | | \$ 3,021.00 | \$ 0.02 | \$ 22.22 |
| Vacaciones | \$ 291.00 | \$ 669.00 | | \$ 960.00 | \$ 0.01 | \$ 7.08 |
| Prima vacacional | \$ 1,059.00 | \$ 167.00 | | \$ 1,226.00 | \$ 0.00 | \$ 1.77 |
| Percepciones | \$ 352,263.00 | \$ 30,050.00 | | \$ 382,313.00 | \$ 0.32 | \$ 317.98 |
| Vales de despensa | \$ 7,600.00 | \$ 600.00 | | \$ 8,200.00 | \$ 0.01 | \$ 6.35 |
| Previsión social | \$ 7,600.00 | \$ 600.00 | | \$ 8,200.00 | \$ 0.01 | \$ 6.35 |
| 2% impto. A nómina | \$ 18,138.44 | \$ 1,836.00 | | \$ 19,974.44 | \$ 0.02 | \$ 19.43 |
| 2% S.A.R. | \$ 14,774.50 | \$ 1,423.83 | | \$ 16,198.33 | \$ 0.02 | \$ 15.07 |
| 5% infonavit | \$ 36,936.35 | \$ 3,559.64 | | \$ 40,495.99 | \$ 0.04 | \$ 37.67 |
| IMSS cuotas patronales | \$ 121,525.36 | \$ 11,532.89 | | \$ 133,058.25 | \$ 0.12 | \$ 122.04 |
| Contribuciones laborales | \$ 191,374.65 | \$ 18,352.36 | | \$ 209,727.01 | \$ 0.19 | \$ 194.20 |
| Herramientas | \$ 9,179.59 | \$ 386.55 | | \$ 9,566.14 | \$ 0.00 | \$ 4.09 |
| Ropa y uniformes | \$ 20,303.06 | \$ 22,230.31 | | \$ 42,533.37 | \$ 0.24 | \$ 235.23 |
| Equipo de protección | \$ 9,186.04 | \$ 210.22 | | \$ 9,396.26 | \$ 0.00 | \$ 2.22 |
| Útiles de trabajo | \$ 38,668.69 | \$ 22,827.08 | | \$ 61,495.77 | \$ 0.24 | \$ 241.55 |
| Energía eléctrica (o combustibles) | \$ 250,293.61 | \$ 24,320.24 | | \$ 274,613.85 | | |
| Mantenimiento a maquinaria y equipo | \$ 69,627.67 | \$ 3,301.45 | | \$ 72,929.12 | \$ 0.03 | \$ 34.93 |

| | | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|--------------|--|-----------------|---------|-----------|
| Mantenimiento a instalaciones | \$ 152,285.27 | \$ 7,151.87 | | \$ 159,437.14 | \$ 0.08 | \$ 75.68 |
| Mantenimiento a equipo de transporte | | \$ 331.90 | | \$ 331.90 | \$ 0.00 | \$ 3.51 |
| Fletes y acarreos | \$ 629,867.44 | \$ 4,653.96 | | \$ 634,521.40 | \$ 0.05 | \$ 49.25 |
| Arrendamiento | \$ 490,000.00 | | | \$ 490,000.00 | | |
| Servicios | \$ 1,592,073.99 | \$ 39,759.42 | | \$ 1,631,833.41 | \$ 0.16 | \$ 163.37 |

| | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|--------------|--|---------------|---------|-----------|
| Depreciación edificio | \$ 101,019.80 | \$ 10,101.98 | | \$ 111,121.78 | \$ 0.11 | \$ 106.89 |
| Depreciación maquinaria y equipo | \$ 80,873.68 | \$ 8,090.37 | | \$ 88,964.05 | \$ 0.09 | \$ 85.61 |
| Amortización seguros anticipados | \$ 481,349.11 | \$ 2,923.24 | | \$ 484,272.35 | \$ 0.03 | \$ 30.93 |
| Depreciación y amortizaciones | \$ 663,242.59 | \$ 21,115.59 | | \$ 684,358.18 | \$ 0.22 | \$ 223.44 |

| | | | | | | |
|----------------------------|-----------------|----------|--|-----------------|---------|---------|
| Hilo y costalera para café | \$ 34,795.00 | | | \$ 34,795.00 | | |
| Materiales | \$ 8,238.11 | \$ 67.24 | | \$ 8,305.35 | \$ 0.00 | \$ 0.71 |
| Maquila de café | \$ 964,603.62 | | | \$ 964,603.62 | | |
| Varios | \$ 1,007,636.73 | \$ 67.24 | | \$ 1,007,703.97 | \$ 0.00 | \$ 0.71 |

| | | | | | | |
|-------------------------------|------------------|--|---------------|------------------|--|--|
| Traspaso a costo de beneficio | -\$ 5,910,734.65 | | \$ 288,656.39 | -\$ 6,199,391.04 | | |
|-------------------------------|------------------|--|---------------|------------------|--|--|

Posteriormente, del total de café producido de donde se obtuvieron los cargos económicos, se clasifica de acuerdo con el tipo general de proceso para obtener el porcentaje de costos, como se puede ver en la Tabla 4.9 la cantidad procesada del mes fue de 94,503.91 kg, de los cuales el 58.30% corresponde a procesos que involucran granza, el resto corresponde a procesos de repaso como mecánicas.

Tabla 4.9 Porcentaje general de proceso.

| Resumen de café procesar | QQ | Kg | Porcentaje |
|--------------------------|----------|-----------|------------|
| Total | 1,897.91 | 94,503.91 | 100.00% |
| Total de granza completa | | 55,092.95 | 58.30% |
| Total procesos repaso | | 39,410.96 | 41.70% |

Se calcula posteriormente, teniendo en cuenta la frecuencia de cada proceso existente, el porcentaje que corresponde a cada tipo de proceso con el fin de obtener la proporción de utilización de producción de los procesos generales correspondientes a granza, mecánicas y electrónicas.

Una vez conociendo el porcentaje de influencia de los tres procesos principales de la empresa, se puede calcular, de acuerdo con cualquier cantidad de café a procesar y los precios unitarios de mano de obra y gastos de beneficio, los conceptos de producción mostrados en la Tabla 4.10, cabe mencionar que los valores se obtienen multiplicando el costo unitario por la cantidad de café a procesar.

Tabla 4.10 Conceptos para el cálculo de costos (Hernández González, 2017).

| Concepto | Total por concepto | Granza | Mec | Elec |
|---------------------------|--------------------|--------------|-------------|-------------|
| Kg a procesar | 27,644.00 | | | |
| Costo mano de obra | \$ 19,181.22 | \$ 9,148.97 | \$ 2,079.78 | \$ 1,919.79 |
| Costo gastos de beneficio | \$ 31,723.89 | \$ 15,131.52 | \$ 3,439.75 | \$ 3,175.16 |
| Total general | \$ 50,905.11 | \$ 24,280.49 | \$ 5,519.53 | \$ 5,094.95 |

En la Tabla 4.11 se presenta el desglose de conceptos necesarios para el cálculo de costos de acuerdo con los porcentajes de influencia calculados, en donde los recuadros en amarillo indican que el usuario debe ingresar manualmente el dato solicitado, pudiendo ser tiempo en minutos, cantidad en kilos de café a procesar y tipo de proceso.

Tabla 4.11 Calculo de costos de producción (Hernández González, 2017).

| Resumen | Detalle |
|-----------------------------------|-------------|
| Tiempo simulación total (minutos) | 1,986.640 |
| Tiempo simulación total (horas) | 33.111 |
| Desglose tiempo de procesos | 33.111 |
| Desglose tiempo de secado | 0.000 |
| Café a procesar (kg) | 27,644 |
| Tipo de proceso | 4 |
| Costo de producción | \$ 5,094.89 |
| Costo de energía eléctrica | \$ 225.52 |
| Costo total | \$ 5,320.42 |

En la Tabla 4.12 se presenta el tipo de proceso que puede ingresar el usuario para realizar el cálculo de costos de producción.

Tabla 4.12 Tipo de proceso (Hernández González, 2017).

| Tipo de proceso | Descripción de proceso |
|-----------------|--|
| 1 | Granza sin secadora |
| 2 | Granza con secadora |
| 3 | Mecánicas |
| 4 | Electrónicas |
| 5 | Mecánicas electrónicas |
| 6 | Granza mecánicas electrónicas con secadora |
| 7 | Granza mecánicas electrónicas sin secadora |
| 8 | Granza mecánica con secadora |
| 9 | Granza mecánica sin secadora |
| 10 | Granza electrónicas |

El costo de energía eléctrica se realiza multiplicando el tiempo de uso de una máquina o equipo por el número de kilowatts que utiliza de acuerdo con el número de caballos de fuerza que emplea, con el fin de obtener el consumo en kilowatts- hora, sumarlo y finalmente multiplicar el resultado por el coste unitario de energía eléctrica, como se ve en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13 Cálculo de costo para energía eléctrica

| Elemento | Proceso | Tiempo | HP | Watts | kW | Kw-h |
|----------|---------|--------|----|-------|-------|------|
| E1 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E2 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E3 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E4 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E5 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E6 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E7 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E8 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E9 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E10 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |

| | | | | | | |
|---------|---------------|------------|-----|-------|------------|------------|
| E11 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E12 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E13 | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| E14 | | 33.1106667 | 1 | 746 | 0.746 | 24.7005573 |
| E15 | | 33.1106667 | 1 | 746 | 0.746 | 24.7005573 |
| E16 | | 33.1106667 | 1 | 746 | 0.746 | 24.7005573 |
| M1 | Prelimpia | 0 | 2 | 1492 | 1.492 | 0 |
| M2 | Morteadora | 0 | 30 | 22380 | 22.38 | 0 |
| M3 | Catadora | 0 | 5 | 3730 | 3.73 | 0 |
| M4 | Catadora | 0 | 5 | 3730 | 3.73 | 0 |
| M5 | Clasificadora | 0 | | 2238 | 2.238 | 0 |
| M6 | Oliver | 0 | 7.5 | 5595 | 5.595 | 0 |
| M7 | Oliver | 0 | 7.5 | 5595 | 5.595 | 0 |
| M8 | Oliver | 0 | 7.5 | 5595 | 5.595 | 0 |
| M9 | Electrónica | 33.1106667 | | 300 | 0.3 | 9.9332 |
| M10 | Electrónica | 33.1106667 | | 300 | 0.3 | 9.9332 |
| M11 | Electrónica | 33.1106667 | | 300 | 0.3 | 9.9332 |
| Doliver | | 0 | 1 | 746 | 0.746 | 0 |
| Dbueno | | 33.1106667 | 1 | 746 | 0.746 | 24.7005573 |
| Dmancha | | 33.1106667 | 1 | 746 | 0.746 | 24.7005573 |
| | | | | | Total kW-h | 153.302387 |
| | | | | | \$/kW-h | \$ 1.47 |
| | | | | | Cargo | \$ 225.52 |

4.3 Conclusiones

Se cumplieron los objetivos iniciales, ya que el sistema de apoyo a la decisión tiene como función primordial ser un soporte para la toma de decisiones del experto, resolviendo decisiones primordiales dentro de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V.

Con el modelo de agentes propuesto, se puede tomar decisiones de forma rápida y certera, sin la necesidad de que la persona sea experta en el ramo, además de auxiliar al catador presentando información para evaluar y seleccionar entre varias alternativas, y evitar que exista cierta tendencia positiva o negativa para ciertos proveedores, mejorando así la calidad y eficiencia en el proceso, por lo que las decisiones se vuelven descentralizadas.

En resumen, el sistema de apoyo a la decisión basado en agentes ayuda a mejorar el proceso de toma de decisiones, notándose una reducción económica de \$ 21,405.43 pesos que representa un 21.71%, se obtuvieron 388 kilos más de café bueno para vender y se redujo el tiempo de ciclo en un 40.57% que representa 8,863.33 minutos, los cuales sirven para atender otras ordenes de clientes. En cuanto al modelo complementario, se resume que la gestión de agentes ayuda a aumentar el porcentaje de ordenes completadas y gestiona las rutas de los camiones que llevan el café hasta el cliente, ascendiendo a una satisfacción del 90.90% en pedidos de cliente.

Por otro lado el análisis de superficies de respuesta ayuda a determinar cuáles son las variables que más afectan en los procesos para monitorear más a detalle dichas variables y con ello tener un panorama superior de los procesos de toma de decisiones, en resumen la variable que más afecta el rendimiento de café son la Nutrición del suelo, Control de plagas y Poda; las variables que más afectan el proceso de cata del café pergamino son el Fermento, Acidez, Sabor, Aroma y Cuerpo; las variables que más afectan el proceso de cata del café robusto son Hediondo, Agrio, Fermento y Moho; en otro aspecto, las variables que más impactan el proceso de análisis físico del café pergamino para obtener el proceso productivo son la cantidad de Defectos leves y Defectos graves, Granza y Humedad; las variables que más impactan al proceso de análisis físico del café bola robusto para obtener el proceso productivo son la cantidad de Defectos leves y Defectos graves y Humedad; finalmente, las variables que más impactan al proceso de análisis físico del café oro natural robusto para obtener el proceso productivo son la cantidad de Defectos leves y Defectos graves.

Con la información presentada anteriormente, se puede efectuar una planificación para la producción, ya que al determinar la cantidad de café que ingresa a la empresa, se determina su clasificación y tipo de proceso a seguir, se puede conocer las máquinas que se emplearan, el lugar de almacenaje, tiempo y costo de producción, así mismo esto ayuda a mejorar la trazabilidad del producto.

Conclusión

Actualmente el mundo de los negocios resulta muy volátil principalmente para el proceso de toma de decisiones, es por ello que se requiere con ahínco tomar decisiones de una manera rápida y certera, puesto que muchas veces resulta desconcertante el proceso ante la imposibilidad de asimilar una gran cantidad de información para concluir en una decisión adecuada, como sucede en la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., orillándola a realizar inversiones de gran envergadura en modelos de negocio poco fructíferos que repercuten en la imagen y posicionamiento en los mercados nacionales e internacionales

A lo largo de toda la cadena de suministro de la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V., se llevan a cabo importantes decisiones, siendo 3 las decisiones cruciales para la eficiencia de la empresa. La primera consiste en determinar el rendimiento de café que ingresa a la empresa de acuerdo con diferentes actividades agrícolas, puesto que es incierto para un caficultor saber cuántos kilos puede cosechar, esta decisión depende de las variaciones climatológicas. La segunda decisión es el análisis organoléptico o cata del café que se da en el laboratorio de la empresa, en donde se evalúan las características sensoriales, principalmente los defectos en taza, esta decisión es importante ya que es una evaluación subjetiva y de ella dependerá determinar la calidad del aromático, lo que puede orillar al catador a mostrar cierta tendencia hacia algunos proveedores. Finalmente, la tercera decisión consiste en determinar que combinación de procesos productivos se necesitan para obtener una calidad deseada por el cliente, conforme al análisis de características físicas del grano. Cada una de las decisiones se lleva a cabo de manera centralizada, provocando demoras, gasto de recursos e incumplimiento de objetivos y pedidos, por no asimilar la información de manera adecuada por el afán de proporcionar una respuesta con rapidez.

En los últimos años, se ha visto un gran auge en los sistemas de apoyo a la decisión en combinación con técnicas de inteligencia artificial como las redes neuronales artificiales, agentes inteligentes, lógica difusa, entre otros, para abordar problemáticas de las diferentes

áreas de la ingeniería, siendo agentes inteligentes, una técnica óptima para abordar tópicos de la cadena de suministro debido a sus características intrínsecas. Por lo tanto, el utilizar técnicas de inteligencia artificial, podría resultar confiable para determinar estrategias de negocios con el fin de proporcionar un esquema completo que pueda ser utilizado como herramienta para facilitar y agilizar la toma de decisiones y enfrentar con mayor certidumbre las problemáticas.

La presente investigación pretende apoyar al sector agrícola por medio de un marco de referencia genérico de agentes para productos agrícolas que permita la identificación y proceso de conceptualización de modelos de agentes inteligentes, así mismo se aporta al área de conocimiento “Agricultura y Ciencias Biológicas” con el desarrollo de un sistema de apoyo a la decisión basado en técnicas de inteligencia artificial como agentes inteligentes y lógica difusa que permita descentralizar el proceso de toma de decisiones en la cadena de suministro, teniendo como caso de estudio el grano de café mediante la empresa Merino Telis Café S.A. de C.V.

Para el desarrollo y medición del impacto del sistema de apoyo a la decisión y el modelo de agentes propuesto para la cadena de suministro de la empresa en estudio, se desarrolla una plataforma de usuario a través del software profesional AnyLogic[®], combinando simulación de eventos discretos y agentes inteligentes, donde los agentes proveedor, proceso organoléptico y selección de proceso tienen cargados motores de inferencia basado en lógica difusa, por lo que se emplea el software profesional Matlab[®] para desarrollar los seis modelos difusos inmersos en este sistema de apoyo a la decisión. Posteriormente se realiza la integración correspondiente para crear la comunicación necesaria entre AnyLogic[®] y Matlab[®].

La plataforma del sistema de apoyo a la decisión cuenta con una interfaz gráfica principal de usuario, la cual está seccionada en el módulo de prácticas agrícolas, módulo de catación y el módulo de selección de proceso, que corresponde a los agentes recurso proveedor, proceso organoléptico y selección de proceso respectivamente.

En el primer módulo de prácticas agrícolas o aprovisionamiento se pueden ingresar los valores de las variables inciertas inmersas en las prácticas agrícolas del agricultor y que se modelaron mediante lógica difusa, con el propósito de saber cuál es la cantidad de café que ingresará a la empresa de acuerdo con un comportamiento de cultivo específico.

El segundo módulo de la interfaz, el cual se encuentra segmentado en dos partes, la primera corresponde a la catación de café robusto, en donde el usuario ingresa los valores de la intensidad de defecto de taza resultantes del análisis en las variables inciertas correspondientes con el fin de obtener la clasificación de café (bola robusto, oro natural robusto, rechazar). La segunda parte corresponde al mismo proceso pero para obtener la clasificación de café pergamino (extra prima, prima lavado, altura, rechazar).

El tercer módulo corresponde al análisis físico del café o selección de proceso, el cual se encuentra un apartado para café bola robusto, uno para oro natural robusto y café pergamino, con el fin de obtener, en conjunto con el resultado del módulo catación, la combinación de procesos productivos que debe seguir el café para alcanzar una mayor calidad y pueda comercializarse con el menor uso de recursos.

En resumen, el sistema de apoyo a la decisión basado en agentes ayuda a mejorar el proceso de toma de decisiones, notándose una reducción económica de \$ 21,405.43 pesos que representa un 21.71%, se obtuvieron 388 kilos más de café bueno para vender, se redujo el tiempo de ciclo en un 40.57% que representa 8,863.33 minutos, los cuales sirven para atender otras ordenes de clientes, y se obtuvo una satisfacción del 90.90% en pedidos de cliente.

Como se puede ver, se cumplieron los objetivos iniciales propuestos en este trabajo de investigación, ya que el sistema de apoyo a la decisión con enfoque de agentes inteligentes tiene la función primordial de ser un soporte para la toma de decisiones del experto encargado de este proceso, permitiendo que no exista tendencia positiva o negativa para la catación y análisis físico del grano de ciertos proveedores por cuestiones personales, así mismo elimina la subjetividad que impera al no asimilar la información necesaria para brindar una decisión

certera respecto al proceso productivo que debe seguir el grano por el hecho de dar una respuesta rápida al trata de agilizar la planta laboral.

Este sistema de apoyo a la decisión permite integrar y tratar de forma eficiente la información, no sólo para aumentar la velocidad de los procesos decisivos, sino también para transformar esa información en recursos críticos y estratégicos, creando así ventajas competitivas, objetivas y concretas que posicionen a la empresa en nuevos horizontes.

Referencias bibliográficas

- pAdarme Jaimes, W. (2011). *Desarrollo metodológico para la optimización de la cadena de suministro esbelta con m proveedores y n demandantes bajo condiciones de incertidumbre: caso aplicado a empresas navieras colombianas* [Universidad Nacional de Colombia]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/5514/>
- AnyLogic. (2016). *Use of Simulation*. <http://www.anylogic.com/use-of-simulation>
- Barr, A., Feigenbaum, E. A., & Cohen, P. R. (1981). *The Handbook of artificial intelligence*. HeurisTech Press.
- Cafés de México. (2011). *Historia del café*. <http://www.cafesdemexico.com/index.php/es/el-cafe/34-historia-del-cafe-.html>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, Planeación y Operación*.
- Chuang, S.-H., Liao, C., & Lin, S. (2013). Determinants of knowledge management with information technology support impact on firm performance. *Information Technology and Management*, 14(3), 217–230. <https://doi.org/10.1007/s10799-013-0153-1>
- Clemen, R. T. (Robert T. (1996). *Making hard decisions : an introduction to decision analysis*. Duxbury Press.
- Coss Bu, R. (2003). *Simulación: un enfoque práctico*. Noriega. <https://books.google.com.mx/books?id=iY6dI3E0FNUC&pg=PA12&lpg=PA12&dq=Simulación+es+una+técnica+numérica+para+realizar+experimentos+en+una+computadora+digital.++Estos++experimentos++involucran++ciertos++tipos++de++modelos++matemáticos+>

Guasch, A., Piera, M. A., Casanovas, J. (Casanovas G., & Figueras, J. (Figueras J. (2003). *Modelado y simulación aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Edicions UPC.

H. Chavez, J., & Torres Rabello, R. (2012). *Supply Chain Management*. 360.

Hernan Tolosa, G., & Alfredo Bordignon, F. R. (1999). *Revisión: tecnología de agentes de software*. 28(3), 302–309.

Hernández González, J. C. (2017). *Procesamiento de información y desarrollo para tesis*.

Hernández González, J. C., Pérez Salazar, M.-R., Aguilar Lasserre, A. A., & González Huerta, M. Á. (2016). *Análisis cualitativo sobre agentes inteligentes en la cadena de suministro*. https://www.google.com.mx/_/chrome/newtab?espv=2&ie=UTF-8

Higgins, A., Thorburn, P., Archer, A., & Jakku, E. (2007). Opportunities for value chain research in sugar industries. *Agricultural Systems*, 94(3), 611–621. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.02.011>

Hípola, P., & Vargas Quesada, B. (1999). *El profesional de la informacion*. http://www.elprofesionaldelainformacion.com/contenidos/1999/abril/agentes_inteligentes_definicion_y_tipologia_los_agentes_de_informacion.html

IICA. (2004). *Cadena Agroindustrial del Cafe*. https://books.google.com.mx/books?id=6v68Ey_yKQkC&pg=PA25&lpg=PA25&dq=El+proceso+de+selecci%252525C3%252525B3n+se+realiza+a+mano+o+con+maquinarias+para+eliminar+las+semillas+defectuosas+y+materia+extra%252525C3%252525B1a.+La+clasificaci%252525C3%252525B3n+est%252525C3%25

International Coffee Organization. (2009). *Procesamiento de campo*.

http://www.ico.org/ES/field_processingc.asp

Karetsos, S., Costopoulou, C., Lambrou, M., & Zorkadis, V. (2002). *The use of intelligent agents in the e-agribusiness environment*.

Ko, M., Tiwari, A., & Mehnen, J. (2010). A review of soft computing applications in supply chain management. *Applied Soft Computing*, 10(3), 661–674. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.09.004>

Kumari, S., Singh, A., Mishra, N., & Garza-Reyes, J. A. (2015). A multi-agent architecture for outsourcing SMEs manufacturing supply chain. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 36, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.12.009>

Labarthe, O., Espinasse, B., Ferrarini, A., & Montreuil, B. (2005). A Methodological Approach for Agent Based Simulation of Mass Customizing Supply Chains. *Journal of Decision Systems*, 14(4), 397–425. <https://doi.org/10.3166/jds.14.397-425>

Labarthe, O., Espinasse, B., Ferrarini, A., & Montreuil, B. (2007). Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(2), 113–136. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2006.09.014>

Ley Borrás, R. (2011). Decidiendo sobre qué decidir. *PYME Adminístrate*, 11–17. [http://www.casia-creaciones.mx/iframe/Pyme 2011/Agosto 208/Pyme208p11-17.pdf](http://www.casia-creaciones.mx/iframe/Pyme%202011/Agosto%20208/Pyme208p11-17.pdf)

Li, J., & Chan, F. T. S. (2013). An agent-based model of supply chains with dynamic structures. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), 5403–5413. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.10.054>

Lou, P., Zhou, Z. D., Chen, Y. P., Fuh, J. Y. H., & Zhang, Y. F. (2006). Negotiation-Based

Task Allocation in an Open Supply Chain Environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(6), 975–985.
<https://doi.org/10.1243/09544054JEM390>

Mallo, C., & Rocafort, A. (2014). *Contabilidad de dirección para la toma de decisiones. Profit.*

https://books.google.com.mx/books?id=OhALBAAAQBAJ&pg=PT28&lpg=PT28&dq=contabilidad+de+direccion+para+la+toma+de+decisiones&source=bl&ots=_ofsDfJ6sa&sig=tDEzxfLY40i7q7wjxvXyfaDWtFQ&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwikipSAIP3RAhVB-WMKHar3DmcQ6AEIKjAD#v=onepage&q=contab

Manuj, I., & Sahin, F. (2011). A model of supply chain and supply chain decision-making complexity. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(5), 511–549. <https://doi.org/10.1108/09600031111138844>

Maria Garcia Perez, A., & Garcia Martinez, M. (2007). The agrifood cooperative netchain. A theoretical framework to study its configuration. *Food Economics - Acta Agriculturae Scandinavica, Section C*, 4(1), 31–39. <https://doi.org/10.1080/16507540701192535>

Mata, F., & Cobas Flores, E. (2008). *Cómo administrar la cadena de suministro | Expansión.*
http://expansion.mx/manufactura/actualidad/2008/03/26/como-administrar-la-cadena-de-suministro?internal_source=PLAYLIST

Grupo Merino, (2015). <http://www.grupomerino.com.mx/conocer.html>

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>

Ming, S., Fu, R., Zhu, C., & Xin, Z. (2007). Study on the agile supply chain management

based on agent. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 14, 115–118. [https://doi.org/10.1016/S1005-8885\(08\)60024-2](https://doi.org/10.1016/S1005-8885(08)60024-2)

Montoya T, J. R., & Ortiz V, D. A. (2013). Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000–2012. *Estudios Gerenciales*, 30, 343–354. <http://dx.doi.org/10.1016/j.estger.2014.05.006>

Oprea, M. (2014). ABVE-construct: an agent-based virtual enterprise model for civil engineering. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 15(3), 231–249. <https://doi.org/10.12694/scpe.v15i3.1018>

Oxford. (2017). *Oxford Living Dictionary*. <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/maquina>

Pino, R., Fernández, I., de la Fuente, D., Parreño, J., & Priore, P. (2010). Supply chain modelling using a multi-agent system. *Journal of Advances in Management Research*, 7(2), 149–162. <https://doi.org/10.1108/09727981011084968>

Rojas Cubero, G., & Alvarado Soto, M. (1994). *Cultivo y beneficiado del café*. Editorial Universidad Estatal a distancia. [https://books.google.com.mx/books?id=15qrSG-5114C&pg=PR10&lpg=PR10&dq=\(Cubero+Rojas+%26+Alvarado,+1994\).&source=bl&ots=Oe08u6U65N&sig=2J55cgCf8zqt18MkQCVOQt9JmpM&hl=es&sa=X&ved=0ahUK EwiOouiHz8_RAhUJKWMKHYRSAwgQ6AEIGzAA#v=onepage&q=\(Cubero Rojas %26](https://books.google.com.mx/books?id=15qrSG-5114C&pg=PR10&lpg=PR10&dq=(Cubero+Rojas+%26+Alvarado,+1994).&source=bl&ots=Oe08u6U65N&sig=2J55cgCf8zqt18MkQCVOQt9JmpM&hl=es&sa=X&ved=0ahUK EwiOouiHz8_RAhUJKWMKHYRSAwgQ6AEIGzAA#v=onepage&q=(Cubero Rojas %26)

Samvedi, A., & Jain, V. (2013). A grey approach for forecasting in a supply chain during intermittent disruptions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(3), 1044–1051. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.12.002>

Sánchez Ramírez, C. (2014). *Logística integral*.

<https://www.google.com.mx/search?q=Foundations+of+knowledge-based+systems&oq=Foundations+of+knowledge-based+systems&aqs=chrome..69i57.2347j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

Shih, S. C., Hsu, S. H. Y., Zhu, Z., & Balasubramanian, S. K. (2012). Knowledge sharing—A key role in the downstream supply chain. *Information & Management*, 49(2), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.im.2012.01.001>

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2000). *Designing and managing the supply chain : concepts, strategies, and case studies*. Irwin/McGraw-Hill.

Soroor, J., Tarokh, M. J., & Abedzadeh, M. (2012). Automated bid ranking for decentralized coordination of construction logistics. *Automation in Construction*, 24, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.11.013>

Suganthi, L., Iniyan, S., & Samuel, A. A. (2015). Applications of fuzzy logic in renewable energy systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 585–607. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.037>

Tian, J., & Tianfield, H. (2006). Multi-agent modeling and simulation for petroleum supply chain. *Computational Intelligence, Pt 2, Proceedings*, 4114, 496–501. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37275-2_60

Torsun, I. S. (1995). *Foundations of Intelligent Knowledge-Based*. Academic Press. <https://www.amazon.com/Foundations-Intelligent-Knowledge-Based-Systems-Information/dp/0126960607>

Waters, D. (2003). *Supply Chain Management: An Introduction to Logistics* (Second). PALGRAVE MACMILLAN. <https://www.amazon.com/Supply-Chain-Management-Introduction-Logistics/dp/0230200524>

-
- Wilson, B. R., Conley, J. F., Harris, T. M., & Lafone, F. (2012). New terrains of taste: Spatial analysis of price premiums for single origin coffees in Central America. *Applied Geography*, 35(1–2), 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.10.004>
- Wu, D. (2009). Supplier selection: A hybrid model using DEA, decision tree and neural network. *Expert Systems with Applications*, 36(5), 9105–9112. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.039>
- Ying, W., & Dayong, S. (2005). Multi-agent framework for third party logistics in E-commerce. *Expert Systems with Applications*, 29(2), 431–436. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.04.039>
- Zadeh, L. a. (1996). Fuzzy logic equals Computing with words. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions On*, 4(2), 103–111. <https://doi.org/10.1109/91.493904>
- Zhang, D. Z., Anosike, A. I., Lim, M. K., & Akanle, O. M. (2006). An agent-based approach for e-manufacturing and supply chain integration. *Computers & Industrial Engineering*, 51(2), 343–360. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.02.012>