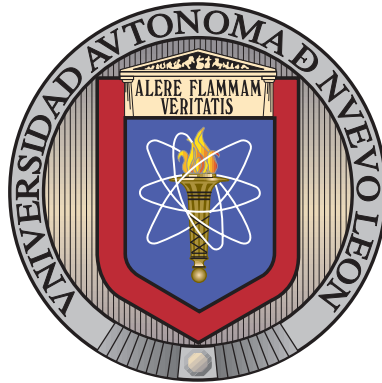


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES EN  
EL PROCESO DE NPI DE UNA EMPRESA DE LA  
INDUSTRIA HVAC MEDIANTE UN MODELO DE  
LÓGICA DIFUSA

POR

SAÚL ROBERTO MORALES VELÁZQUEZ

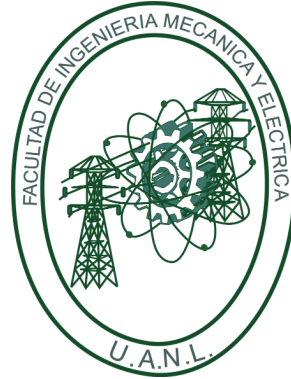
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

FEBRERO 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES EN  
EL PROCESO DE NPI DE UNA EMPRESA DE LA  
INDUSTRIA HVAC MEDIANTE UN MODELO DE  
LÓGICA DIFUSA

POR

SAÚL ROBERTO MORALES VELÁZQUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

FEBRERO 2026

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Evaluación y selección de proveedores en el proceso NPI de una empresa HVAC mediante un modelo de lógica difusa”, realizada por el estudiante Saúl Roberto Morales Velázquez, con número de matrícula 1856691, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

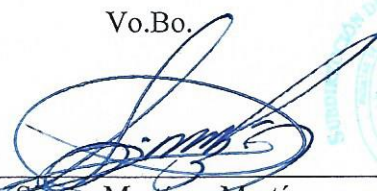
Dr. Tomás Eloy Salais Fierro  
Director

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez  
Revisor

Dr. Giovanni Lizárraga Lizárraga  
Revisor

MA Leonardo Peña Reyna  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simon Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 642595

Acta Núm. 4631

Ciudad Universitaria, a 3 de febrero del 2026.

*Al mia matro, al mia patro, kaj al miaj geavoj,  
kiuj ĉiam estas la kompasoj de mia vivo.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XVI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XVIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	2
1.2. Objetivo . . . . .	4
1.2.1. Objetivo general . . . . .	4
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.3. Hipótesis . . . . .	5
1.4. Justificación . . . . .	5
1.5. Metodología . . . . .	6
1.6. Estructura de la tesis . . . . .	6
<b>2. Antecedentes</b>	<b>8</b>
2.1. La cadena de suministro en las organizaciones . . . . .	8
2.2. La evaluación y selección de proveedores . . . . .	11

---

2.2.1. Criterios de evaluación y selección de proveedores . . . . .	12
2.2.2. Métodos de decisión multicriterio . . . . .	15
2.3. Conclusión . . . . .	19
<b>3. Descripción del método</b>	<b>20</b>
3.1. Definición del problema . . . . .	21
3.2. Diseño de la investigación . . . . .	24
3.3. Revisión sistemática de literatura . . . . .	26
3.3.1. Criterios de elegibilidad . . . . .	27
3.3.2. Fuentes de información . . . . .	28
3.3.3. Estrategia de búsqueda . . . . .	29
3.3.4. Proceso de selección de literatura . . . . .	31
3.3.5. Extracción de datos y síntesis . . . . .	31
3.4. Selección de las variables . . . . .	31
3.5. Desarrollo del modelo de lógica difusa . . . . .	33
3.5.1. Difusificación . . . . .	34
3.5.2. Proceso de inferencia difusa . . . . .	36
3.5.3. Desdifusificación . . . . .	38
3.5.4. Implementación del modelo . . . . .	39
3.6. Validación del modelo de lógica difusa mediante simulación . . . . .	39
3.7. Obtención de resultados y análisis . . . . .	39

---

3.7.1. Generación de reportes . . . . .	40
3.7.2. Análisis de datos y obtención de resultados . . . . .	41
3.8. Conclusión del capítulo . . . . .	42
<b>4. Aplicación del método</b>	<b>43</b>
4.1. Revisión sistemática de literatura . . . . .	43
4.2. Selección de variables . . . . .	48
4.3. Modelo de lógica difusa para la evaluación y selección de proveedores	50
4.3.1. Generación del conjunto de datos inicial mediante simulación .	51
4.3.2. Escenario 1: Prioridad en tiempos de implementación . . . . .	54
4.3.3. Escenario 2: Prioridad en reducción de costos . . . . .	61
4.4. Conclusión del capítulo . . . . .	66
<b>5. Obtención de resultados y análisis</b>	<b>67</b>
5.1. Obtención de resultados . . . . .	67
5.1.1. Resultados del Escenario 1 . . . . .	69
5.1.2. Resultados del Escenario 2 . . . . .	71
5.2. Comparación con otros métodos de selección . . . . .	73
5.2.1. Implementación con otros proveedores . . . . .	73
5.2.2. Adjudicación aleatoria uniforme . . . . .	74
5.3. Análisis de resultados . . . . .	75
5.3.1. Análisis del Escenario 1 . . . . .	76

---

5.3.2. Análisis del Escenario 2 . . . . .	77
5.3.3. Comparación con otros métodos de adjudicación . . . . .	78
5.4. Conclusión del capítulo . . . . .	79
<b>6. Conclusiones</b>	<b>80</b>
6.1. Hallazgos . . . . .	81
6.1.1. Métodos multicriterio . . . . .	81
6.1.2. Criterios de selección de proveedores . . . . .	82
6.1.3. Evaluación de proveedores mediante lógica difusa . . . . .	83
6.2. Aportaciones . . . . .	83
6.3. Limitaciones . . . . .	84
6.3.1. Datos simulados . . . . .	84
6.3.2. Criterios limitados . . . . .	84
6.3.3. Registros históricos limitados . . . . .	85
6.3.4. Periodo de calentamiento . . . . .	86
6.4. Trabajo futuro . . . . .	90
6.4.1. Aplicación en un entorno real . . . . .	90
6.4.2. Enfoque estratégico . . . . .	91
6.4.3. Uso de criterios alternativos . . . . .	91
<b>A. Simulación</b>	<b>92</b>
A.1. Entorno de ejecución . . . . .	93

---

A.2. Proceso de simulación . . . . .	93
A.3. Estructura del código . . . . .	95
A.3.1. Clases . . . . .	95
A.3.2. Variables secretas . . . . .	115
A.3.3. Implementación . . . . .	115
A.4. Consulta del código . . . . .	119
A.5. Licencia y citación . . . . .	119
<b>B. Revisión sistemática de literatura: Criterios</b>	<b>121</b>
<b>C. Encuesta aplicada a los tomadores de decisión</b>	<b>128</b>
<b>D. Resultados de la encuesta a tomadores de decisiones</b>	<b>133</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Procesos macro de la cadena de suministro . . . . .	11
3.1. Proceso metodológico . . . . .	21
3.2. Ubicación del problema en un departamento de <i>Sourcing</i> . . . . .	22
3.3. Diseño cuantitativo . . . . .	25
3.4. Propuesta de funciones difusas . . . . .	37
4.1. Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por idioma de publicación . . . . .	44
4.2. Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por año de publicación . . . . .	45
4.3. Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por país de estudio . . . . .	45
4.4. Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por industria de estudio . . . . .	47
4.5. Funciones difusas del escenario 1 . . . . .	59
4.6. Funciones difusas del escenario 2 . . . . .	64

---

5.1. Membresías de los proveedores para la variable de salida (puntaje) . . .	73
6.1. Serie de tiempo de adjudicación de los ECNs a los proveedores del Escenario 1 . . . . .	85
6.2. Serie de tiempo de adjudicación de 1,000 ECNs . . . . .	87
6.3. Histograma de liberación de ECNs . . . . .	90
A.1. Diagrama de flujo del proceso de NPI . . . . .	94
A.2. Códigos QR de consulta . . . . .	119
D.1. Resultados de la encuesta para los criterios económicos . . . . .	133
D.2. Resultados de la encuesta para los criterios logísticos . . . . .	134
D.3. Resultados de la encuesta para los criterios de producto . . . . .	135
D.4. Resultados de la encuesta para los criterios de servicio . . . . .	136
D.5. Resultados de la encuesta para los atributos del proveedor . . . . .	137

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Criterios para proveedores de Dickson (1966) . . . . .	13
2.2. Criterios recientes de evaluación de proveedores . . . . .	14
2.3. Ejemplo de terceros interesados en el proceso de toma de decisiones .	17
2.4. Métodos de decisión multicriterio para evaluar proveedores . . . . .	19
3.1. Diferencia entre <i>sourcing</i> estándar y NPI . . . . .	23
3.2. Tipología de la investigación . . . . .	26
3.3. Criterios de literatura . . . . .	28
3.4. Palabras clave empleadas en la búsqueda de literatura . . . . .	30
3.5. Diseño del instrumentos cuantitativo secundario . . . . .	33
3.6. Etiquetas lingüísticas propuestas para las variables de entrada . . . .	35
3.7. Etiquetas lingüísticas propuestas para la variable «Urgencia» . . . . .	35
3.8. Rangos de funciones difusas (variables de salida de los escenarios 1 y 2)	36
3.9. Columnas relevantes del reporte de evaluación difusa . . . . .	41
3.10. Columnas relevantes del reporte de implementación . . . . .	41

---

4.1. Relación idioma-país de publicación de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura . . . . .	46
4.2. Áreas temáticas de criterios de proveedores . . . . .	48
4.3. Criterios seleccionados para el modelo de lógica difusa . . . . .	49
4.4. Fechas importantes del proyecto . . . . .	52
4.5. Perfil de proveedores a analizar . . . . .	53
4.6. ECNs a implementar . . . . .	54
4.7. Parametrización de las variables del escenario 1 . . . . .	55
4.8. Parámetros estadísticos del escenario 1 . . . . .	56
4.9. Rangos de funciones difusas del Escenario 1 . . . . .	57
4.10. Reglas difusas del escenario 1 para proveedores existentes . . . . .	60
4.11. Reglas difusas del escenario 1 para proveedores nuevos . . . . .	61
4.12. Parametrización de las variables del escenario 2 . . . . .	61
4.13. Parámetros estadísticos del escenario 2 . . . . .	62
4.14. Rangos de funciones difusas del Escenario 2 . . . . .	63
4.15. Reglas difusas del escenario 2 para proveedores existentes . . . . .	65
4.16. Reglas difusas del escenario 2 para proveedores nuevos . . . . .	66
5.1. Variabilidad en los niveles de las membresías del escenario 2 . . . . .	69
5.2. Resultados del escenario 1.1 . . . . .	70
5.3. Resultados del escenario 1.2 . . . . .	70

---

5.4. Resultados del escenario 2 . . . . .	71
5.5. Resultados de implementación con otros proveedores . . . . .	74
5.6. Resultados por asignación aleatoria uniforme . . . . .	75
6.1. Resultados de la simulación de prueba de calentamiento . . . . .	89
A.1. Equipos de cómputo utilizados en la simulación . . . . .	93
A.2. Parámetros de números de parte . . . . .	102
A.3. Parámetros de tiempo de actividades internas . . . . .	102
A.4. Estructura del conjunto de datos de la clase <code>ItemMaster</code> . . . . .	106
A.5. Parámetros de tiempo de actividades de los proveedores . . . . .	114
A.6. Parámetros de la clase <code>Supplier</code> . . . . .	114
A.7. Diferencias clave del modelo de simulación y lógica difusa entre el Escenario 1 y el Escenario 2 . . . . .	118
B.1. Criterios identificados en la revisión sistemática de literatura en rela- ción con su autor . . . . .	121

# ÍNDICE DE BLOQUES DE CÓDIGO

---

A.1. Formato de variables secretas del modelo de simulación . . . . .	115
A.2. Ejemplo de importación de datos históricos . . . . .	117

# AGRADECIMIENTOS

---

Este trabajo de tesis marca la conclusión de mis estudios de maestría. Este hito importante para mi desarrollo personal y profesional lo he logrado no solo con mi esfuerzo sino también con el apoyo de las siguientes personas a las que deseo dar un agradecimiento.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia. A mis abuelos Roberto Velázquez y Adela Pérez por todo el apoyo económico que he recibido para mis estudios desde los primeros años de escuela hasta la realización de esta maestría; a mis padres Michelle y Andrés, y a mi abuelita Adela, por su apoyo moral durante mis estudios. Y un agradecimiento especial a la memoria de mi amado gato Guillermo, que a pesar de ya no estar conmigo lo llevo en mi corazón; él fue de gran ayuda para la realización de esta tesis y de mis estudios de maestría debido a su soporte emocional.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a los doctores Jania Astrid Saucedo Martínez, Tomás Eloy Salais Fierro y Carlos Esteban Chávez Pech de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por el apoyo directo en el desarrollo de mi tesis, el artículo de investigación y mi presentación del coloquio, con la revisión de mis avances y su valiosa retroalimentación. También se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) del Gobierno de México por los recursos otorgados bajo la Beca Nacional de Posgrados.

Finalmente, me gustaría agradecer al Dr. David Horacio García Waldman de la Facultad de Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales (FCPyRI) por permitir-

---

me realizar estancias de investigación en su cuerpo académico durante mis estudios de licenciatura, lo que me permitió obtener competencias valiosas que facilitaron el desarrollo de la presente tesis. Asimismo, me gustaría agradecer a todos los docentes que han formado parte de mi educación en las distintas etapas de mi vida, ya que han contribuido a mi formación con los conocimientos necesarios que me permitieron llegar hasta donde me encuentro el día de hoy.

# RESUMEN

---

Saúl Roberto Morales Velázquez.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: **EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES EN EL PROCESO DE NPI DE UNA EMPRESA DE LA INDUSTRIA HVAC MEDIANTE UN MODELO DE LÓGICA DIFUSA.**

Número de páginas: 145.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** La presente tesis tiene el objetivo de proponer una herramienta de evaluación y selección de proveedores confiable y objetiva con el propósito de contribuir a la toma de decisiones y a la mejora del desempeño de la cadena de suministro de una empresa del sector HVAC (Aire Acondicionado y Calefacción) para proyectos de Introducción de Nuevos Productos (NPI), particularmente en el cumplimiento del métrico (KPI) de implementación a tiempo del proyecto (OTD); de esta forma se busca resolver el problema de decisión multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) propio del proceso de *Sourcing*.

El estudio hizo uso de los siguientes tres instrumentos metodológicos con el fin de establecer un modelo de lógica difusa capaz de evaluar y seleccionar proveedores:

1. En primer lugar, se realizó una revisión sistemática de literatura con el propósito de identificar las variables en la literatura reciente;
2. En segundo lugar, se realizó una encuesta a expertos con el fin de seleccionar las variables relevantes a integrar en el modelo de selección de proveedores;
3. Finalmente, se desarrolló un modelo mediante lógica difusa y se implementó

---

con el apoyo de una simulación del proceso de Sourcing NPI.

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** La aportación principal del presente trabajo de investigación es un modelo de lógica difusa que puede emplearse en la evaluación y selección de proveedores, no solo en el contexto de la empresa de estudio, sino en cualquier otra industria mediante la modificación de las reglas difusas y los parámetros de los criterios. El modelo de simulación utilizado en esta investigación también constituye una aportación relevante que puede utilizarse para reproducir los resultados del estudio o que puede implementarse en trabajos de otros investigadores. Ambos modelos son de código abierto y pueden consultarse en el repositorio de GitHub escaneando el código QR de la Figura A.2a (Apéndice A). Como aportación secundaria, la revisión sistemática de literatura identificó y consolidó los criterios relevantes para la evaluación y selección de proveedores en documentos académicos de publicación reciente que pueden ser utilizados para guiar futuras investigaciones.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Tomás Eloy Salais Fierro

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

Dentro de toda organización existen distintos departamentos con funciones variadas y específicas según su área de especialización. Si bien cada departamento suele tener objetivos propios, es innegable que todos deben de trabajar de forma íntegra para alcanzar objetivos comunes, como lograr una producción adecuada, niveles de inventario acordes a las políticas, metas de ventas, entre otros. Esta labor conjunta tiene como fin máximo mantener la estabilidad y la rentabilidad de la empresa. Para que una empresa sea rentable es necesario que genere valor mediante su participación en la cadena de suministro (Handfield *et al.*, 2009).

Tomando como ejemplo una empresa de producción, dentro de la cadena de suministro, esta suele jugar un rol dual donde la organización actúa como cliente de otras organizaciones que le proveen de materia prima, pero al mismo tiempo es proveedora de sus bienes terminados.

La evaluación y selección de proveedores es sin duda uno de los procesos más importantes para una organización, ya que puede afectar significativamente su participación en ambos lados de la cadena de suministro; realizada de forma adecuada permite reducir los riesgos, asegurarse una proveeduría confiable que cumpla con los tiempos de entrega y que se alinee con las políticas de la empresa, e incluso puede determinar el éxito de una compañía a largo plazo (Yildiz Çankaya, 2020).

En la literatura, una de las cuestiones más debatidas es si la cadena de suministro de una empresa debe componerse por muchos o pocos proveedores. Handfield *et al.* (2009) proponen que toda organización debe de seleccionar aquellos proveedores con los que se pueda hacer negocios a largo plazo. Mientras que Dos Santos Vieira *et al.* (2018) mencionan que, en la actualidad, tener pocos proveedores confiables es reflejo de tener una cadena de suministros bien administrada.

Sin embargo, en ocasiones se presentan distintos escenarios que hacen necesario buscar un nuevo proveedor. Por ejemplo, durante el proceso de desarrollo o introducción de nuevos productos (NPI, por sus siglas en inglés) es esencial encontrar al proveedor adecuado para nuevos números de parte. Desde un punto de vista estratégico, también puede ser necesario descartar a un proveedor ya existente y reemplazarlo por otro, ya sea por buscar una mejora en los precios o en la calidad de la materia prima. Incluso en los casos de compras indirectas, con un volumen menor, es importante seleccionar al mejor proveedor de un bien o servicio para un requerimiento específico. La decisión de proveedores no es fácil debido a que se encuentra influenciada por múltiples criterios (Pató y Kiss, 2019).

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el panorama actual, la evaluación y selección de proveedores se ha convertido en un proceso complejo debido al macroentorno. La globalización y el desarrollo tecnológico han favorecido un aumento en la oferta de proveedores; el portafolio de muchas empresa ya no solo incluye proveedores locales, sino también internacionales, y muchos de ellos compiten entre sí por destacarse en el mercado.

Adicionalmente, el proceso de evaluación de proveedores es considerado un problema de decisión multicriterio, es decir, un problema donde existen por lo menos dos o más alternativas de acción que incluso en ocasiones pueden llegar a ser contrarías entre sí. En este tipo de problemas todos los objetivos deben evaluarse de

forma íntegra (De Almeida, 2013).

Dickson (1966), considerado un clásico en la literatura sobre compras, realizó una revisión de literatura y una encuesta a expertos (273 compradores) en Estados Unidos de América y Canadá identificando 23 criterios relevantes al momento de evaluar proveedores. Sin embargo, en la literatura reciente se han identificado 78 criterios, de los cuales 41 son relevantes para el proceso de NPI.

En la literatura se abordan distintos métodos de evaluación y selección de proveedores. Mediante una revisión de literatura, De Boer *et al.* (2001) proponen la siguiente clasificación:

- a. Modelos de ponderación linear, en el que se incluye el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), el Proceso Analítico de Red (ANP, por sus siglas en inglés), y la Teoría de Conjuntos Difusos (FST, por sus siglas en inglés);
- b. Modelos de Pertenencia de Costo Total (TCO, por sus siglas en inglés);
- c. Modelos de programación matemática;
- d. Modelos estadísticos; y
- e. Modelos basados en inteligencia artificial.

Adicionalmente a los anteriores mencionados, Aguezzoul y Ladet (2006) proponen los modelos de categorización.

El modelo propuesto por la presente tesis para la solución de este problema de decisión es la lógica difusa, la cual pertenece a la categoría de modelos de ponderación linear en base a la clasificación de De Boer *et al.* (2001). La lógica difusa permite la resolución computacional de problemas multicriterio mediante el uso de espectros de pertenencia o membresías, tal y como lo hace la percepción y la cognición humana (Singh *et al.*, 2013).

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una herramienta de evaluación y selección de proveedores confiable y objetiva con el propósito de contribuir a la toma de decisiones y a la mejora del desempeño de la cadena de suministro de una empresa del sector HVAC (Aire Acondicionado y Calefacción, a partir de sus siglas en inglés) para proyectos de NPI, particularmente en el cumplimiento del métrico (conocido también como *Key Performance Indicator*, o KPI por sus siglas en inglés) de implementación a tiempo del proyecto (u OTD, del inglés *On-Time Delivery*).

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión sistemática de literatura con el objetivo de identificar las variables de evaluación de proveedores en la literatura reciente.
- Realizar una encuesta a expertos que permita seleccionar las variables relevantes en el contexto de estudio.
- Diseñar un modelo basado en lógica difusa que permita evaluar y seleccionar proveedores de manera confiable y objetiva para proyectos de NPI.
- Aplicar el modelo propuesto para facilitar la toma de decisiones en la selección de proveedores, clasificándolos de acuerdo con su grado de cumplimiento de los criterios establecidos.

### 1.3 HIPÓTESIS

La implementación de un modelo de lógica difusa en el proceso de evaluación y selección de proveedores contribuirá a facilitar la toma de decisiones y podrá impactar positivamente en la mejora del desempeño de la cadena de suministro para proyectos de NPI medible a través del métrico de OTD en las actividades del proyecto, mediante una clasificación objetiva de los proveedores de acuerdo con criterios establecidos.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN

El *sourcing* es considerado como un área crítica dentro de la cadena de suministro de una organización debido a que se encarga de la búsqueda, evaluación y selección de proveedores. Estas actividades son consideradas principalmente dentro del horizonte de planeación estratégico debido a su complejidad e impacto en el negocio.

Una evaluación de proveedores realizada de forma adecuada resulta importante para reducir riesgos y asegurar el éxito y la continuidad de la compañía a largo plazo. En este contexto, Yildiz Çankaya (2020) enfatiza el poder que tienen los proveedores al ser capaces de influir indirectamente en las cantidades, calidad y tiempos de producción, así como en el precio de venta de los bienes producidos.

Sin embargo, en áreas como NPI, la evaluación y selección de proveedores debe realizarse en el horizonte operativo, buscando encontrar al mejor candidato posible para un proyecto en el menor tiempo posible con el propósito de evitar retrasos en el calendario del proyecto.

Es por ello que resulta importante el desarrollo de una herramienta que permita abordar este problema multicriterio de una forma objetiva, tomando en cuenta todas

los puntos de vista individuales que involucra el decidir si un proveedor es el más promisorio o no.

## 1.5 METODOLOGÍA

En base a la tipología de Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2018), el presente trabajo se clasifica como un estudio aplicado, no experimental, transversal y de alcance explicativo (Sección 3.2). Se siguió una metodología cuantitativa mediante el uso de los siguientes tres instrumentos:

- I. En primer lugar, se realizó una revisión sistemática de literatura con el propósito de identificar las variables en la literatura reciente;
- II. En segundo lugar, se realizó una encuesta a expertos con el fin de seleccionar las variables relevantes a integrar en el modelo de selección de proveedores;
- III. Finalmente, se desarrolló un modelo mediante lógica difusa y se implementó con el apoyo de una simulación del proceso de Sourcing NPI.

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se desarrolla la introducción, donde se expone el planteamiento del problema, la hipótesis, la justificación y la metodología empleada para la presente investigación.

En el segundo capítulo se lleva a cabo una revisión exhaustiva de los antecedentes, compuestos por la literatura o estado del arte que permitirán el desarrollo de la herramienta o modelo de lógica difusa.

En el tercer capítulo se presenta el diseño de la metodología y los instrumentos o herramientas que permitan llevar a cabo la solución del problema de decisión de proveedores.

En el cuarto capítulo se presentará el desarrollo de los procesos relacionados con los tres instrumentos metodológicos propuestos, así como los resultados de los instrumentos secundarios (revisión sistemática de literatura y encuesta expertos) que posteriormente se integraron en el modelo de lógica difusa propuesta.

En el quinto capítulo se presentan los resultados de la aplicación del modelo de lógica difusa a través de una simulación. Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones de los hallazgos y limitaciones del presente estudio, así como las sugerencias para futuras investigaciones.

Adicionalmente, el presente trabajo incluye los siguientes anexos: El primer anexo presenta la descripción técnica de la simulación desarrollada y utilizada para la aplicación y validación del modelo de lógica difusa. El segundo muestra la tabla de relación entre los criterios identificados en la literatura reciente y los autores que hacen mención a ellos. En el tercer anexo se presenta el formato del cuestionario de la encuesta a expertos. En el cuarto anexo se encuentran las gráficas de los resultados de la encuesta, mostrando la cantidad de votos que tuvo cada criterio.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

La evaluación y selección de proveedores es un proceso complejo dentro de la cadena de suministro que involucra el análisis de múltiples criterios. Este proceso ha sido objeto de distintas investigaciones a lo largo de las décadas, orientadas no solamente en la disciplina de la logística y la cadena de suministro, sino incluso en cómo afecta directamente a las industrias y actividades económicas, como la manufactura, la construcción, el gobierno, el turismo, entre otras.

En el presente capítulo se realizó un análisis de la literatura orientada a la resolución del problema de estudio, así como la revisión de algunos conceptos importantes para la comprensión del problema. Para la revisión de literatura y elaboración de los antecedentes se realizó una búsqueda de literatura en las principales bases de datos académicas, siguiendo la metodología PRISMA, como se explica en la Sección 3.3.

## 2.1 LA CADENA DE SUMINISTRO EN LAS ORGANIZACIONES

Definir qué es la cadena de suministro es una tarea compleja. Durante el proceso de búsqueda y revisión de literatura se ha encontrado que en la mayor parte

de los libros y artículos consultados los autores tratan a la logística y la cadena de suministro como dos temas separados, pero complementarios entre sí. Por una parte, podemos definir que la cadena de suministro es una red de organizaciones independientes, pero interconectadas directa o indirectamente, que actúan para generar valor hacia el consumidor final (Ballou, 2004). Y por otra parte, la logística se define como los procesos que permiten el flujo de bienes e información relacionada a través de la cadena de suministro, de forma ascendente o descendente (Ballou, 2004).

Chopra y Meindl (2016) proporcionan una definición holística. Para ellos, la cadena de suministro consiste en todas las partes involucradas en el cumplimiento del requerimiento de un cliente (proveedores, fabricantes, transportistas, almacenes, distribuidores y el cliente mismo); es dinámica, con flujos constantes de productos e información, y su objetivo es maximizar el valor total generado.

Por otra parte, Handfield *et al.* (2009) proporcionan una definición más específica en la que se establecen los componentes mínimos de una cadena de suministro: a) tres o más organizaciones; y, b) uno o más flujos de productos, servicios, información, entre otros. Estos flujos pueden ser descendentes, como en el caso de los productos terminados, o ascendentes, como la retroalimentación del consumidor o las devoluciones (logística inversa), y van desde el origen hasta el cliente o viceversa. Por cliente se entiende cualquier otro nodo de la cadena de suministro, no necesariamente el cliente final.

Es importante mencionar que la cadena de suministros no solo está presente entre organizaciones independientes, sino también entre las distintas áreas internas que las componen. La estructura orgánica dentro de una empresa es única para sus necesidades y objetivos. Partiendo desde el punto de vista de una organización como un ente, este organismo se compone de distintas unidades que realizan una función específica.

Desde el punto de vista del nivel macro, la organización puede estructurarse en base a los siguientes criterios (Schwer y Hitz, 2018): a) funciones; b) líneas de produc-

to; y c) ubicación geográfica. Cada una de esas unidades recaen directamente de la dirección general de la compañía, y de ellas se dividen cada uno de los departamentos que integran la organización (recursos humanos, compras, planeación, producción, mantenimiento, tecnologías de la información, mercadotecnia, entre otras).

A simple vista, puede parecer que algunos departamentos no están directamente relacionados con las funciones propias de la cadena de suministro. Sin embargo, las funciones auxiliares que estos departamentos proporcionan son igualmente importantes, ya que pueden contribuir en formar una cadena de suministros interna a través de los servicios que ofrecen a otros departamentos de la organización. Después de todo, la cadena de suministros es un proceso que debe analizarse desde una perspectiva holística.

El Foro de la Cadena de Suministro Global (también conocido como *Global Supply Chain Forum* en inglés) de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD, por sus siglas en inglés) propone los siguientes puntos clave de las funciones de la cadena de suministro, los cuales fueron recopilados por Lambert *et al.* (2005) en ocho categorías principales. El problema de estudio se sitúa en los numerales 3 y 7.

1. Administración de retornos.
2. Administración de la relación con el cliente.
3. Administración de la relación con el proveedor.
4. Administración del flujo de manufactura.
5. Administración del servicio al cliente.
6. Administración de la demanda.
7. Desarrollo de producto.
8. Surtimiento de órdenes.

Dentro del área de cadena de suministro de una organización existen distintos departamentos que se encargan de realizar estas funciones. Su estructura y denominación es diferente para cada empresa. Chopra y Meindl (2016) clasifican estas funciones en tres categorías principales, a las cuales denominan como «procesos macro». En la siguiente figura se ilustran los procesos macro y las actividades comunes relacionadas a ellos:

Administración de la relación con el <b>proveedor (SRM)</b>	Administración de la <b>cadena de suministro interna (ISCM)</b>	Administración de la relación con el <b>cliente (CRM)</b>
<i>Sourcing</i>	Planeación estratégica	Mercadotecnia
Compras	Planeación de la demanda	Estrategia de precios
	Abastecimiento	Ventas
	Logística	Atención al cliente
		Administración de órdenes

FIGURA 2.1: Clasificación de los procesos de la cadena de suministro en una perspectiva macro (Chopra y Meindl, 2016).

Como se puede observar en la Figura 2.1, en los extremos de la cadena de suministro se encuentran las funciones que tienen un contacto directo con proveedores (SRM) y clientes (CRM), fuera de la organización. Y en el centro se encuentran las funciones de la cadena de suministro que ocurren dentro de la organización (ISCM).

## 2.2 LA EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES

Dentro de la cadena de suministros de una organización, el problema abordado por la presente tesis se encuentra en el primer proceso macro de la Figura 2.1: Administración de la relación con el proveedor.

Este proceso macro a su vez está compuesto por las actividades de *sourcing* y compras. En algunas empresas estas actividades de abastecimiento son gestionadas

por el departamento de compras, mientras que en otras existe una separación clara entre las funciones de compras y *sourcing*.

La diferencia funcional entre ambas áreas de la cadena de suministros puede ser explicada de una forma breve en base a la información proporcionada por Trent y Monckzka (2003):

- **Compras:** Realiza transacciones de compras —adquisición de bienes y servicios— entre una entidad compradora y un proveedor.
- **Sourcing:** Tiene un mayor alcance y complejidad; el *sourcing* integra y coordina materiales, procesos, diseños y proveedores a través de otras áreas funcionales de la organización, como compras, ingeniería y operaciones.

### 2.2.1 CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES

La evaluación y selección de proveedores es un proceso complejo, debido a la multitud de criterios que un comprador o cualquier otro miembro del equipo de abastecimiento o *sourcing* de una organización deben considerar al hacer una decisión sobre el proveedor más apropiado para un producto o servicio específico.

La revisión de la literatura encontró que el artículo *An analysis of vendor selection systems and decisions* de Dickson (1966) es uno de los primeros en tratar este tema, y considerado como un clásico de la literatura debido a que cuenta con más de 1,200 citas desde 1966 hasta la actualidad (Dickson, 1966; Research Rabbit, 2024).

El estudio cuantitativo de Dickson para la clasificación de los criterios hizo uso de encuestas a 273 compradores en Estados Unidos y Canadá, afiliados a la Asociación Nacional de Agentes de Compras —hoy en día conocida como el Institute for Supply Management (Arnseth, 2015).

Dickson identificó 50 criterios iniciales mediante una revisión de literatura, de los cuales 23 fueron considerados como relevantes a partir de los resultados de una encuesta. A los participantes de su estudio se les pidió evaluar estos criterios mediante una escala Likert del 0 al 4, donde 0 correspondía a «no importante» y 4 a «extremadamente importante». La prelación se determinó en base al promedio que obtuvo cada criterio, siendo la mostrada en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1: Clasificación de los criterios de Dickson (1966)

#	Criterio	Clasificación
1	Calidad	Extremadamente importante
2	Entregas	Considerablemente importante
3	Historial de desempeño	
4	Política de garantías y reclamos	
5	Capacidad e instalaciones de manufactura	
6	Precio	
7	Capacidad técnicas	
8	Posicionamiento financiero	
9	Cumplimiento de procesos	
10	Sistema de comunicación	
11	Reputación y posición en la industria	
12	Deseo de hacer negocios	
13	Administración y organización	
14	Controles operativos	
15	Servicios de reparación	
16	Actitud	
17	Impresión (apariencia)	
18	Empaque	
19	Historial de relaciones laborales	
20	Ubicación geográfica	
21	Volumen de negocios previos	
22	Capacitación	
23	Acuerdos de reciprocidad	Ligeramente importante

Sin embargo, la cadena de suministro y sus procesos se encuentran en constante evolución, por lo que los criterios de Dickson (1966) no necesariamente deben considerarse vigentes en relación a la clasificación que propuso. La revisión de la literatura realizada en el presente estudio (Sección 3.3) encontró que los criterios de

la Tabla 2.2 son los diez más mencionados en publicaciones recientes entre 2020 y 2025. La lista completa de criterios con su correlación de autor puede consultarse en el Apéndice B.

TABLA 2.2: Criterios de evaluación y selección de proveedores encontrados en la literatura reciente

#	Criterio	Autores
1	Precio	Abdulla y Baryannis (2024); Ali <i>et al.</i> (2023); Álvarez Aranda <i>et al.</i> (2023); y otros 27 autores.
2	Calidad	Chattopadhyay <i>et al.</i> (2020); Chen (2020); Corsi <i>et al.</i> (2020); y otros 23 autores.
3	Tiempo de entrega	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); De Vasconcelos (2022); Dobos y Vörösmarty (2023); y otros 15 autores.
4	Puntualidad	Bošković <i>et al.</i> (2020); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Islam y Arakawa (2022); y otros 13 autores.
5	Reputación del proveedor	De Almeida <i>et al.</i> (2023); Jana <i>et al.</i> (2024b); Lyu <i>et al.</i> (2021); y otros 8 autores.
6	Flexibilidad	Leonesi y Terazzi (2020); Leong <i>et al.</i> (2022); Manik (2023); y otros 7 autores.
7	Nivel de servicio	Li <i>et al.</i> (2021); Moretti <i>et al.</i> (2022); Mortara y Tabone (2020); y otros 6 autores.
8	Costo total	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Li <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); y otros 5 autores.
9	Relación mutua	Da Silva <i>et al.</i> (2024); Gonçalves (2023); Pamucar <i>et al.</i> (2020); y otros 5 autores.
10	Capacidad de producción	Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023); Soffa y Lima (2022); y otros 4 autores.

Otro punto importante a mencionar es que la industria a la que pertenece una organización y la naturaleza de la propia mercancía, o del grupo de mercancías, influyen en los criterios a tomar en cuenta. Por ejemplo, en el caso de la industria HVAC, no son los mismos criterios que se deben considerar para un proveedor de tuberías de cobre que para un proveedor de etiquetas.

En base a la matriz de Kraljic (1983), los ensambles de tubería de cobre pueden llegar a tratarse de un producto estratégico, ya que poseen una alta complejidad

técnica para su diseño y fabricación; se requieren proveedores que puedan asegurar 1) una entrega constante y a tiempo; 2) una calidad del producto y exactitud en las medidas; y 3) una capacidad técnica y de producción adecuada al consumo anual; el precio de los ensambles de tubería de cobre puede verse afectado por las fluctuaciones de los metales, su falta de suministro detendría completamente la línea de producción, y un fallo en su manufactura o diseño puede llegar a costar miles de dólares en garantías y reparaciones. Por otra parte, las etiquetas pueden considerarse como un producto no crítico, debido a su costo, complejidad e impacto bajos en el proceso de manufactura de una unidad de aire acondicionado (Kraljic, 1983; Martínez Marín, 2018), es por ello que pueden considerarse el precio, la calidad y las entregas como ejemplos de criterios importantes para esta categoría de productos.

### 2.2.2 MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO

Como se mencionó en la Introducción, el presente trabajo aborda un problema de decisión multicriterio, ya que al evaluar y seleccionar a un proveedor existe la necesidad de tomar en cuenta más de un criterio.

Una decisión multicriterio puede ser considerada de igual forma una decisión multiobjetivo, ya que el tomador de decisiones es conducido por el deseo de lograr múltiples objetivos que en ocasiones conflictúan entre sí (De Almeida, 2013). Por ejemplo, uno de los objetivos de las empresas suele ser la reducción de costos, lo que se traduce en buscar proveedores con precios bajos, pero también otro de los objetivos es brindar productos de calidad al usuario final, lo que implica buscar proveedores con altos estándares de calidad. En ocasiones se escucha el término «relación calidad-precio»; pueden existir proveedores con altos precios y altos estándares de calidad, debido a la materia prima que utilizan, pero no siempre esta relación es directa, ya que también puede haber proveedores con bajos costos y altos estándares de calidad, que llegaron a este equilibrio mediante un proceso de manufactura eficiente.

De Almeida (2013) y Hushaysh (2019) reconocen que dentro de un proceso de toma de decisión multicriterio existen tres tipos de actores:

- 1) **Analista:** Conoce la metodología y las herramientas para la recolección, el procesamiento y el análisis de los datos que permitan desarrollar una recomendación para resolver el problema de decisión. Suele ser un consultor externo o interno.
- 2) **Cliente:** Es el tomador de decisiones, quien solicita la evaluación de un problema.
- 3) **Especialista:** Es el profesional que conoce los procesos del sistema estudiado, y las variables que influyen en el problema.

Sin embargo, ambos autores tienen un enfoque distinto sobre la aplicación de estos conceptos, debido al ámbito de sus investigaciones. De Almeida (2013) se enfoca en el proceso de toma de decisiones dentro de las organizaciones en general, donde el analista puede ser un externo a la compañía o un miembro de esta, y el cliente suele ser un gerente o un ejecutivo, o en su caso, un intermediario cercano a este, como un asistente.

Por otra parte, la tesis doctoral de Hushaysh (2019) propone un modelo de inteligencia de negocios para las PyMEs (Pequeñas y Medianas Empresas) de la industria minera, donde se puede interpretar que un ente, como una universidad o el tesista directamente, es el analista, y el cliente puede ser cualquier empresa que se beneficie del modelo.

En el caso del proceso de *sourcing* NPI para una empresa de la industria HVAC, el tomador de decisiones (cliente) en cuanto al proveedor a elegir no necesariamente suele ser un gerente, sino los ingenieros de *sourcing*.

Adicionalmente, De Almeida también reconoce la existencia de terceros interesados (*stakeholders*) que juegan un rol pasivo dentro del proceso de toma de decisión.

Estos actores pueden ser definidos como las partes interesadas que son afectadas por la decisión (De Almeida, 2013), pero que no tienen voz en el proceso, sin embargo, es pertinente tomar en cuenta las afectaciones que pudieran causarles. Por ejemplo, dentro del proceso de selección de proveedores para un proyecto de NPI, los terceros interesados pueden ser, mas no limitativamente, los departamentos de *import/export* y logística, que se ven afectados por la decisión de escoger a un proveedor local, nacional o internacional; y los departamentos de compras, que se ven afectados por la capacidad de producción del proveedor; entre otros (Tabla 2.3).

TABLA 2.3: Ejemplo de terceros interesados en el proceso de toma de decisiones en el proceso de *sourcing* para un proyecto de NPI en una empresa de la industria HVAC.

Terceros	Criterio	Afectación
Compras	Capacidad de producción del proveedor	Manejo de cortos de material y retrasos en el abastecimiento.
Finanzas y mercadotecnia	Precios de compra	Costeo del producto final.
<i>Import/Export</i>	Ubicación geográfica del proveedor (internacional)	Pago de impuestos de comercio exterior, cumplimiento de regulaciones y trámites aduaneros.
Ingeniería	Capacidad técnica del proveedores	Retrabajos y rediseños de los materiales en caso de no cumplir con las especificaciones.
Logística (externa)	Ubicación geográfica del proveedor (local, nacional o internacional)	Costos de transporte y selección del medio adecuado.
Logística (interna)	Ubicación geográfica del proveedor (local, nacional o internacional)	JIT o Kanban preferiblemente para proveedores locales; MRP o VMI preferiblemente para proveedores nacionales o internacionales.
	Empaque o embalaje del producto	Estrategia de manejo de materiales y almacenamiento.

JIT: *Just In Time*; MRP: *Material Request Planning*; VMI: *Vendor Managed Inventory*.

Algunos de los métodos de decisión multicriterio (MCDM) que De Almeida (2013) propone para la creación de un modelo son los siguientes:

- Método de agregación aditiva determinística
- Teoría de la utilidad multiatributo
- Métodos de sobreclasificación (ELECTRE, PROMETHEE, TACTIC)
- Método TOPSIS
- Programación matemática
- Métodos ordinales (lexicográfico, Borda, Condorcet)

Si bien De Almeida (2013) proporciona una variedad de métodos empleados para la creación de un modelo para la toma de decisiones multicriterio en general, la revisión de literatura ha encontrado que los métodos mostrados en la Tabla 2.4 son los más utilizados para el problema de evaluación y selección de proveedores.

TABLA 2.4: Métodos multicriterio aplicados en la evaluación y selección de proveedores encontrados en la literatura

#	Método	Autores
1	AHP	Abdulla y Baryannis (2024); Chen (2020); Corsi <i>et al.</i> (2020); Da Silva <i>et al.</i> (2024); Leonesi y Terazzi (2020); Manik (2023); Mortara y Tabone (2020); Soffa y Lima (2022); Utama <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
2	Fuzzy TOPSIS	Islam y Arakawa (2022); Li <i>et al.</i> (2021); Moretti <i>et al.</i> (2022); Nakiboglu y Bulgurcu (2020)
3	SMARTER	De Almeida <i>et al.</i> (2023); Moura <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
4	Fuzzy Logic	Gouveia (2022); Jana <i>et al.</i> (2024a); Lyu <i>et al.</i> (2021)
5	Best Worst	Jana <i>et al.</i> (2024a); Leong <i>et al.</i> (2022)
6	DEA	Dobos y Vörösmarty (2023); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023)
7	ELECTRE	Álvarez Aranda <i>et al.</i> (2023); Gonçalves (2023)
8	MABAC	Jana <i>et al.</i> (2024a); Pamucar <i>et al.</i> (2020)
9	TOPSIS	Chen (2020); Leong <i>et al.</i> (2022)
10	ANP	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021)

## 2.3 CONCLUSIÓN

En este capítulo se realizó la revisión de los antecedentes encontrados en la literatura sobre evaluación de proveedores. En base a la revisión de los antecedentes, se determinó que el problema de estudio se encuentra en uno de los extremos de la cadena de suministro, en la Administración de la Relación con el Proveedor (Figura 2.1).

Asimismo se identificó que la evaluación de proveedores es un problema multicriterio debido a que en él intervienen distintos criterios que pueden ser contradictorios entre sí, por lo que se requiere hacer uso de un MCDM para facilitar la toma de decisión, el cual se desarrollará en el siguiente capítulo de metodología.

## CAPÍTULO 3

# DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

---

La metodología de la presente investigación describe el enfoque y los procedimientos utilizados en el desarrollo de un modelo de evaluación y selección de proveedores.

En base a los métodos analizados en el capítulo anterior, se propone el uso de la lógica difusa con el fin de evaluar y seleccionar al mejor proveedor en base a las variables establecidas por el usuario, con el objetivo de establecer un proceso sistemático.

Durante el desarrollo del presente capítulo se describen las etapas del proceso metodológico empleado (Figura 3.1).

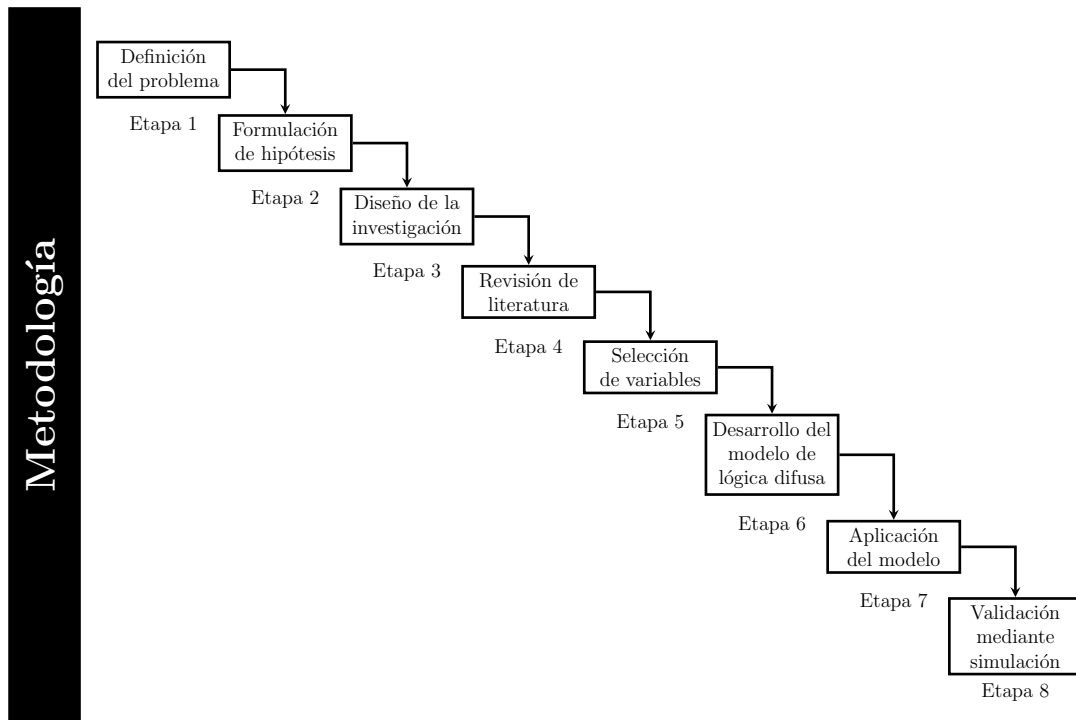


FIGURA 3.1: Flujo del proceso metodológico

### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La actividad de *sourcing* dentro del proceso de NPI requiere seleccionar a los proveedores para los nuevos números de parte que serán empleados en un proyecto de desarrollo de producto.

En el caso de una empresa de la industria HVAC, esto implica seleccionar los proveedores para componentes críticos, como las tuberías de cobre, los compresores, los laminados de acero, los arneses, o incluso componentes considerados menos críticos como tornillería o etiquetas, entre otros, cuya fabricación *in-house* no sea factible.

Una de las funciones propias de un departamento de *sourcing* no solo es la búsqueda de los proveedores para los nuevos números de parte, sino también el

desarrollarlos y mantener una relación estable a largo plazo. Sin embargo, para el caso específico de la empresa objeto de estudio, el departamento de *Sourcing* se encuentra dividido principalmente en dos áreas (Figura 3.2):

- ***Sourcing* Estratégico:** Desarrollo de proveedores; evaluación de proveedores; mantenimiento de la relación con proveedores a largo plazo; proyectos de ahorro mediante cambio de proveedores; entre otros.
- ***Sourcing* Operaciones:** Se encarga de la ejecución de la estrategia de proveedores y mantenimiento de los números de parte compra. Algunas de las funciones son: RFQ (Solicitud de Cotización, por sus siglas en inglés); solicitud y seguimiento de muestras para pruebas de calidad e ingeniería; soporte e intermediación entre los proveedores y los demás departamentos (clientes internos) involucrados en el proceso de aprobación e implementación de un número de parte; mantenimiento de parámetros de los números de parte en el *software* ERP (Planeación de Recursos Empresariales, por sus siglas en inglés); entre otros.

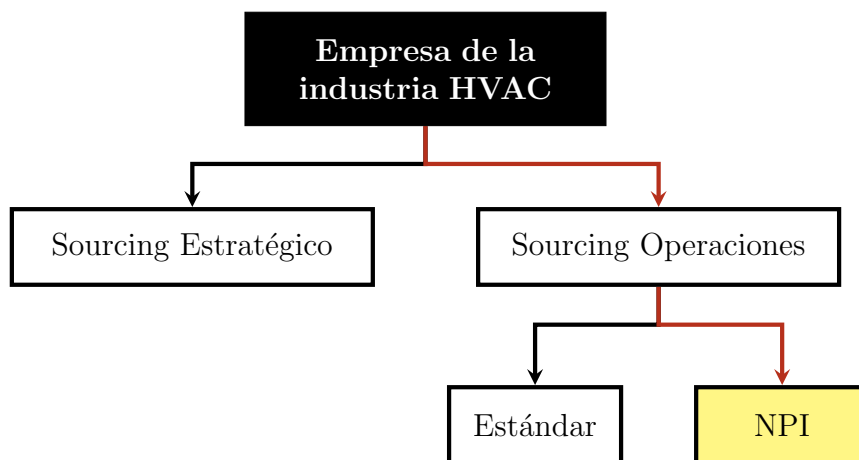


FIGURA 3.2: Estructura del departamento de *Sourcing* en la empresa de la industria HVAC y ubicación del problema de estudio

Adicionalmente, en la empresa objeto del estudio, el departamento de *Sourcing* Operaciones se subdivide según sus áreas de soporte en *estándar* y *NPI*; en esta última subdivisión es donde se enfoca la problemática (Tabla 3.1).

TABLA 3.1: Diferencias entre *sourcing* estándar y NPI con respecto al problema del estudio, dentro de la empresa de la industria HVAC

Estándar	NPI
<p>Se enfoca en el seguimiento y la implementación de cambios de ingeniería en los números de parte de compra ya existentes con el mismo proveedor. También ejecuta los cambios de proveedor previamente establecidos por <i>Sourcing</i> Estratégico o Ingeniería, con fines de ahorro o mejora en la calidad.</p>	<p><b>Selecciona el mejor proveedor</b> entre la lista de los ya existentes y aprobados por <i>Sourcing</i> Estratégico <b>para un nuevo número de parte.</b></p>

A continuación se enlistan las actividades que se desarrollan en el proceso de *sourcing NPI* de la empresa objeto de estudio. Estas actividades son las principales, mas no limitativas.

1. Selección de los proveedores adecuados para los nuevos números de parte.
2. Envío del RFQ.
3. Negociación de precios.
4. Solicitud de muestras de ingeniería y seguimiento a requerimientos de calidad o ingeniería.
5. Seguimiento para implementación del número de parte.

Si bien, un ingeniero de *sourcing* operaciones no evalúa activamente a los proveedores, un ingeniero de *sourcing* NPI debe ser capaz de seleccionar al mejor proveedor con el fin de evitar retrasos a corto plazo en la implementación del proyecto, y asegurar la estabilidad del suministro a largo plazo.

Por ello es fundamental que un ingeniero de *sourcing* NPI cuente con una herramienta que permita evaluar continuamente a los proveedores ya aprobados por *Sourcing* Estratégico y seleccionarlos de una forma rápida.

## 3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la presente tesis tiene el propósito de realizar una investigación aplicada, es decir, se encuentra orientada a la aplicación de un método con el fin de resolver un problema en cadena de suministro (Esteban Nieto, 2018), como lo es mejorar la evaluación y selección de proveedores.

El estudio tendrá un alcance explicativo, ya que busca identificar las variables o criterios que influyen en el proceso de evaluación y selección de proveedores. Así mismo, mediante la utilización de una simulación se modelará la interacción de estos criterios para facilitar la selección de un proveedor adecuado (Ramírez Hernández, 1996). Este alcance explicativo también es denominado por Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2018) como correlacional-causal.

La metodología empleada será la cuantitativa (Figura 3.3), debido a la naturaleza de los tres instrumentos metodológicos que se describen más adelante en esta misma sección: la etapa 4 utilizará una revisión sistemática de literatura en la que se identificarán las variables y se cuantificarán las menciones por autor. Posteriormente, la etapa 5 utilizará una encuesta a expertos en la que se cuantificarán los votos de cada variable. Por otra parte, en la etapa 7 se utilizará la lógica difusa en el proceso de evaluación y selección de proveedores; esta metodología se considera cuantitativa, ya que se basa en modelos matemáticos (Zadeh, 1965) con el fin de procesar los datos. Sin embargo, cabe mencionar que la lógica difusa también tiene la capacidad de incorporar elementos cualitativos, como variables lingüísticas («calidad alta», «entrega rápida», «precio bajo», etcétera) que posteriormente son transformadas en valores numéricos mediante conjuntos difusos y funciones de pertenencia (Zadeh,

1973).

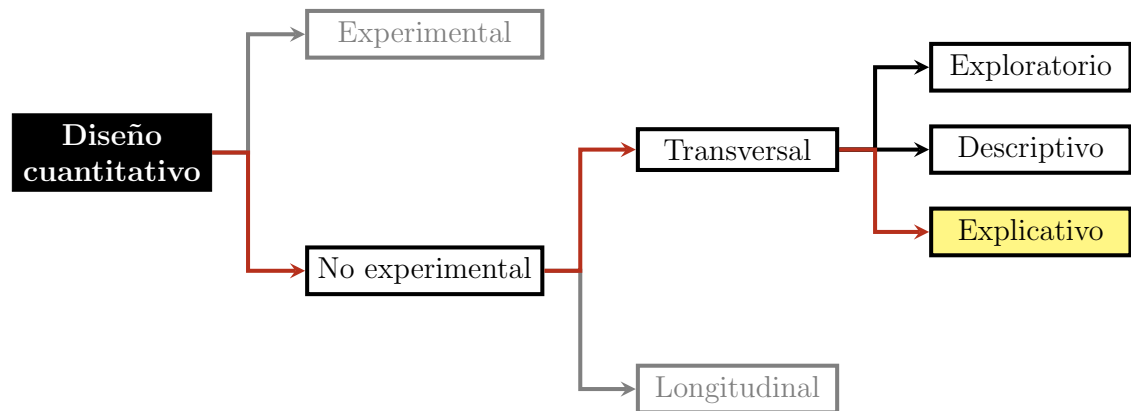


FIGURA 3.3: Diseño cuantitativo empleado para el presente trabajo de investigación (basado en Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2018))

La investigación seguirá una ruta no experimental, ya que no se crearán situaciones para observar interacciones, sino que se observarán las ya existentes, ni se modificarán de forma deliberada las variables independientes (Hernández Sampieri y Mendoza Torres, 2018); esto debido a que las variables independientes se encuentran establecidas por los proveedores (precios de venta, tiempos y planeación de la producción, sistemas de calidad, entre otros) o por criterios precedentes fuera de nuestro control (precios y tiempos de entrega de la materia prima, entre otros).

La ruta no experimental tiene dos clasificaciones en base a su temporalidad: transversal y longitudinal. La investigación será del primer tipo, ya que la recolección de los datos se hará en una única ocasión (Hernández Sampieri y Mendoza Torres, 2018).

En la siguiente Tabla 3.2 se resume la clasificación del presente trabajo:

TABLA 3.2: Tipología de la presente investigación en base a cada criterio

Criterio según	Tipo
Propósito u objeto	Aplicada
Metodología utilizada	Cuantitativa
Manipulación de variables	No experimental
Temporalidad	Transversal
Profundidad o alcance	Explicativa

La presente investigación contará con el uso de tres instrumentos cuantitativos, los cuales se describen a continuación:

- **Instrumento principal: Lógica difusa.** Este instrumento es una herramienta que permitirá evaluar y seleccionar a los proveedores. Es la herramienta en la que culminará la presente investigación.
- **Instrumentos secundarios: Revisión sistemática de literatura y encuesta.** La revisión sistemática de literatura permitirá identificar en la literatura reciente los criterios de evaluación y selección de proveedores. Posteriormente, por medio de una encuesta a los tomadores de decisiones se seleccionarán los criterios relevantes dentro del contexto de la empresa objeto del estudio, los cuales se integrarán en el modelo de lógica difusa.

### 3.3 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Para la construcción de la metodología de la presente investigación se realizará una revisión sistemática de literatura basada en la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analysis, por sus siglas en inglés) propuesta por Page *et al.* (2021), la cual es considerada como una guía para realizar una revisión sistemática completa y transparente.

Esta revisión sistemática tiene como objetivo extraer de la literatura académica información sobre los siguientes temas:

1. **Criterios de evaluación y selección de proveedores**, con el fin de conocer los criterios actuales y relevantes utilizados por distintas industrias en diferentes países.
2. **Métodos de evaluación y selección de proveedores**, para conocer cuáles son los distintos métodos de evaluación y selección de proveedores más utilizados en el último lustro.

### 3.3.1 CRITERIOS DE ELEGIBILIDAD

Los documentos incluidos en la presente revisión de literatura fueron preseleccionados empleando los criterios descritos en la Tabla 3.3.

Se decidió realizar una búsqueda de literatura en cuatro idiomas con el objetivo de minimizar el sesgo lingüístico, cultural y regional. Además, la decisión de seleccionar documentos publicados en los últimos cinco años permite acceder a un rango amplio de documentos sobre el tema con relevancia vigente. Finalmente, se decidió incluir también tesis de maestría y doctorado y memorias de congreso como literatura complementaria a los artículos de revistas científicas arbitradas, con el fin integrar formas alternativas de contenido académico de calidad. La inclusión de tesis se considera especialmente relevante en esta revisión sistemática, ya que al ir más allá de la teorización, suelen aplicar modelos en contextos reales permitiendo identificar criterios ya utilizados en diversas industrias. Finalmente, se decide excluir documentos que propongan criterios sustentables de selección de proveedores o centrados en temas ESG (*Environment, Social, Governance*) o RSE (Responsabilidad Social Empresarial), ya que estos tienen un enfoque estratégico —el caso de estudio se encuentra en el horizonte operativo-táctico— o sin relación con el proceso de desarrollo de producto.

TABLA 3.3: Criterios de elegibilidad de la literatura empleada en la revisión sistemática

<b>Criterio</b>	<b>Inclusión</b>	<b>Exclusión</b>
<b>Idioma</b>	Inglés, español, francés y portugués	Cualquier otro idioma
<b>Acceso</b>	Acceso a texto completo	Documentos sin acceso o contenido parcial
<b>Fechas</b>	2020-2025	Publicaciones fuera del rango definido
<b>Publicación</b>	Artículos de revistas arbitradas, tesis de maestría y doctorado, memorias de congreso con rigor académico	Resúmenes, blogs, noticias, artículos no arbitrados, publicaciones de empresas
<b>Temas</b>	Criterios de evaluación o selección de proveedores; métodos multicriterio aplicados a la evaluación de proveedores	Criterios de evaluación de proveedores con orientación RSE, ESG o sustentables; revisiones de literatura sin aplicación a un caso; modelos multicriterio no aplicados a la evaluación o selección de proveedores; cualquier documento que no proponga criterios

### 3.3.2 FUENTES DE INFORMACIÓN

La búsqueda de los documentos se realizó en múltiples bases de datos y herramientas de búsqueda especializadas en artículos de investigación, como Google Académico. Las siguientes fuentes fueron seleccionadas en base a su reconocimiento en la comunidad académica y accesibilidad:

#### Fuentes primarias

- **ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library y Taylor & Francis Online:** Bases de datos internacionales altamente reputadas que recopilan

revistas revisadas por pares para una vasta selección de temas, principalmente en inglés.

- **Érudite**: Base de datos francófona de libre acceso de revistas revisadas por pares, principalmente en ciencias sociales.
- **Redalyc y SciELO**: Bases de datos de revistas revisadas por pares de libre acceso de 16 países, principalmente latinoamericanos, con artículos en inglés, español y portugués.

### Fuentes secundarias

- **Google Académico**: Motor de búsqueda especializado que indexa distintas fuentes académicas, incluyendo aquellas que no se encuentran disponibles en bases de datos tradicionales.

Considerando que no todos documentos indexados en Google Académico siguen estrictos estándares de calidad, se revisaron las políticas editoriales de cada fuente alterna encontrada en este indexador con el fin de asegurar la inclusión de fuentes que cumplan con las buenas prácticas académicas.

### 3.3.3 ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA

Las bases de datos y herramientas de búsqueda seleccionadas permiten el uso de operadores booleanos mediante la búsqueda avanzada. La lógica utilizada fue «('\*' OR '\*' OR '\*' OR '\*') AND ('\*' OR '\*' OR '\*' OR '\*')». Se estableció esta lógica con ocho palabras clave para todas las bases de datos tomando como referencia las restricción de cantidad máxima de palabras clave de ScienceDirect, debido a que es la que menos cantidad de palabras permite.

En la Tabla 3.4 se muestran las peticiones utilizadas en cada idioma de búsqueda. Se hizo uso de la misma petición (por idioma) en todas las bases de datos con el

TABLA 3.4: Petición o palabras clave empleadas en la búsqueda de literatura para la revisión sistemática basada en PRISMA

Idioma	Petición
Inglés	(“criteria” OR “decision-making” OR “selection” OR “evaluation”) AND (“supplier” OR “purchasing” OR “procurement” OR “sourcing”)
Español	(“criterio” OR “decisión” OR “selección” OR “evaluación”) AND (“proveedor” OR “abastecimiento” OR “sourcing”)
Portugués	(“critério” OR “decisão” OR “seleção” OR “avaliação”) AND (“fornecedores” OR “aquisição” OR “fornecimento” OR “sourcing”)
Francés	(“critère” OR “décision” OR “sélection” OR “évaluation”) AND (“fournisseur” OR “sourcing”)

fin de seguir un proceso estructurado y replicable.

ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online y Google Académico fueron útiles en la recopilación de artículos en inglés, dando como resultado un promedio de 10,000 entradas. Sin embargo, al momento de buscar publicaciones en los otros tres idiomas propuestos no se obtuvieron resultados. Google Académico alcanzó más de 100,000 resultados en conjunto para todos los idiomas. Debido al gran volumen de resultados, para el presente estudio se consideraron solamente los primeros 100 resultados de cada base de datos para la evaluación inicial.

La evaluación inicial consistió en la selección manual basada en los títulos de las publicaciones y una lectura preliminar de sus resúmenes con el fin de determinar su idoneidad para un futuro análisis. Esta etapa dio como resultado 38 documentos en total, de los cuáles fueron 5 actas de congreso (13 %), 29 artículos (76 %), tres tesis de maestría (8 %) y una de doctorado (3 %). En cuanto a la distribución lingüística de la muestra, el 58 % de los documentos se encontraban en inglés, 34 % en portugués y 8 % en español; no se encontraron documentos académicos en francés que cumplieran con los criterios de la Tabla 3.3.

### 3.3.4 PROCESO DE SELECCIÓN DE LITERATURA

En esta segunda etapa del estudio se realizó un análisis a texto completo de los 38 documentos que se identificaron en el proceso de búsqueda, dando como resultado la inclusión de 34 documentos académicos y la exclusión de cuatro (tres artículos y una tesis de doctorado), los cuales no establecían criterios de evaluación y selección de proveedores.

### 3.3.5 EXTRACCIÓN DE DATOS Y SÍNTESIS

La extracción de los datos de cada documento se realizó a través de la lectura manual, para lo cual se identificaron los países y las industrias donde se aplicaron los respectivos estudios, así como los criterios y métodos multicriterio empleados en la evaluación y selección de proveedores.

En esta tercera etapa se identificaron inicialmente 116 criterios en 34 documentos académicos. Sin embargo, fue necesario fusionar los criterios redundantes, asimismo, se agruparon por afinidad temática con el fin de facilitar su análisis. La relación entre cada criterio y documentos se organizó en una matriz almacenada en una hoja de cálculo de Excel.

En el Capítulo 4 se presentará el detalle de los países, industrias, métodos y criterios encontrados en la literatura.

## 3.4 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES

La revisión sistemática de la literatura permitió identificar inicialmente 116 criterios de evaluación y selección de proveedores (variables independientes). Sin embargo, no todos los criterios deben considerarse relevantes para su utilización en

el modelo de lógica difusa, dentro de la empresa objeto del estudio, ya que muchos de estos criterios son similares y repetitivos, otros más tienen menor importancia dentro de la industria HVAC, e incluso dentro del proceso de NPI.

Con el fin de determinar los criterios relevantes dentro de una empresa de estudio, se aplicó una encuesta a los tomadores de decisión, como instrumento cuantitativo. En este sentido, la población objeto del estudio son todos los ingenieros de *sourcing* NPI actuales o anteriores que se hayan desempeñado en el puesto por más de noventa días y se encuentren en las divisiones comerciales y residencial de la empresa en cuestión. Se ha establecido un tiempo mínimo en el puesto, debido a que corresponde con la curva de aprendizaje establecida por la empresa, lo cual asegura que el encuestado tenga *expertís* en el tema.

Para la aplicación del instrumento cuantitativo se decidió realizar un muestreo no probabilístico, por voluntarios. Si bien, este tipo de muestreo tiene sus desventajas, como el no poder calcular el error estándar, determinar el nivel de confianza de la estimación de la muestra (Hernández Sampieri y Mendoza Torres, 2018) y el posible sesgo en la selección de los participantes, resulta el adecuado para aplicarse en el contexto del estudio. Esto se debe a que existen diversas restricciones, como suelen ser la disponibilidad limitada en la agenda de los individuos y la dispersión de la población entre las distintas plantas de la empresa.

Si bien no existe una fórmula exacta para el cálculo del tamaño de una muestra no probabilística, se toma en cuenta la sugerencia de Hernández Sampieri y Mendoza Torres (2018) sobre el tamaño para un estudio de caso, que es de 6 a 10 individuos, estableciendo un mínimo de 6 individuos para garantizar la recolección de datos significativos.

La Tabla 3.5 muestra el resumen de las características de la encuesta.

TABLA 3.5: Diseño del instrumento cuantitativo secundario

Criterio	Parámetros
Metodología	Cuantitativa
Instrumento	Encuesta
Población	Todos los ingenieros de <i>sourcing</i> NPI actuales o anteriores que se hayan desempeñado por más de 90 días en el cargo, en las divisiones comerciales o residencial de la empresa en cuestión.
Tamaño de la población	18 personas
Tipo de muestra	No probabilística, por voluntarios
Tamaño de la muestra	6 personas o más ( $6 \leq n \leq N$ )

La selección de las variables se realizará a través del recuento de la frecuencia de los votos de cada criterio en los resultados de la encuesta; se seleccionarán aquellos criterios que tengan la mayor cantidad de votos posibles.

### 3.5 DESARROLLO DEL MODELO DE LÓGICA DIFUSA

Como se describe en la Subsección 2.2.2, existe una variedad de métodos de decisión multicriterio que pueden ser aplicados en la evaluación y selección de proveedores. Sin embargo, se reconoce la versatilidad de la lógica difusa al trabajar en entornos de incertidumbre y subjetividad, como lo es el Sourcing NPI.

La presente investigación propone dos modelos de lógica difusa a utilizar en el contexto del aprovisionamiento para desarrollo de producto:

**Escenario 1.** Se propone un modelo aplicable en proyectos de NPI de medio o bajo impacto (técnico y/o económico) o donde el volumen de producción es relativamente bajo y se prioriza la velocidad de implementación.

**Escenario 2.** Se propone un modelo aplicable en proyectos de NPI alto impacto

donde el alto volumen de producción potencial tiene una implicación económica relevante, por lo que se busca priorizar la reducción de costos sin afectar los tiempos de implementación.

La aplicación del modelo de lógica difusa tiene como objetivo proporcionar al usuario una calificación de los proveedores en escala continua y con su etiqueta lingüística correspondiente, con el fin de facilitar el proceso de decisión sobre el proveedor al cual asignar el negocio.

El presente estudio se encuentra delimitado a los proveedores de ensambles de tubería de cobre, sin embargo, la aplicación del modelo puede ser utilizada para la mayoría de materiales de la empresa objetivo.

### 3.5.1 DIFUSIFICACIÓN

#### 3.5.1.1 VARIABLES

Las variables de entrada a incluir en el modelo se definirán en base a la encuesta a expertos descrita en la Subsección 3.4 del capítulo de Metodología. Los resultados pueden consultarse en el Capítulo 4.

La variable de salida arroja como valor *crisp* el puntaje del proveedor en una escala discreta del 1 al 10, sin embargo, a esta variable le corresponden etiquetas lingüísticas diferentes según el caso. Para el escenario 1 se propone interpretar la variable como una acción con dos etiquetas: «Implementar» (con ese proveedor) y «Esperar» (otra cotización). En caso del escenario 2 se proponen las etiquetas de la Tabla 3.6. Cabe mencionar que la elección de utilizar «Bajo, Regular y Alto» en lugar de «Malo, Regular y Bueno» tiene el fin de evitar crear un sesgo en los usuarios hacia los proveedores, ya que obtener un puntaje bajo no significa que el proveedor sea intrínsecamente malo, sino que, dado los valores *crisp* al momento de la medición,

el proveedor es el menos apto para el requerimiento; sucede lo mismo con un puntaje alto.

Las etiquetas lingüísticas de la Tabla 3.6 también se proponen para las variables de entrada, buscando tener una estandarización.

TABLA 3.6: Etiquetas lingüísticas propuestas para las variables de entrada

Etiqueta	Descripción
Bajo	Valores comprendidos entre el mínimo observado y la media menos una desviación estándar ( $\text{mín}(x) \leq x \leq \mu - \sigma$ ).
Regular	Valores comprendidos entre la media menos una desviación estándar y la media más una desviación estándar ( $\mu - \sigma \leq x \leq \mu + \sigma$ ).
Alto	Valores comprendidos entre la media más una desviación estándar y el máximo observado ( $\mu + \sigma \leq x \leq \text{máx}(x)$ ).

Los rangos propuestos en la Tabla 3.6 son aproximados y deben considerarse como una referencia inicial para encaminar el desarrollo del modelo de lógica difusa, ya que pueden estar sujetos a una adaptación de acuerdo a las características de las variables resultantes de la encuesta (Subsección 4.2).

Para el escenario 1 se propone añadir una variable que mida la urgencia o cercanía con respecto a la fecha de implementación (SOP, *start of production*), independientemente de las variables obtenidas a través de la encuesta (Subsección 4.2), con el fin de medir la urgencia de implementación. Para esta variable se proponen las etiquetas lingüísticas de la Tabla 3.7.

TABLA 3.7: Etiquetas lingüísticas propuestas para la variable «Urgencia»

Etiqueta	Descripción
Baja	90 días o más restantes para la fecha de SOP.
Moderada	Entre 30 a 90 días restantes para la fecha de SOP.
Alta	30 días o menos restantes para la fecha de SOP.

### 3.5.2 PROCESO DE INFERENCIA DIFUSA

#### 3.5.2.1 FUNCIONES DIFUSAS

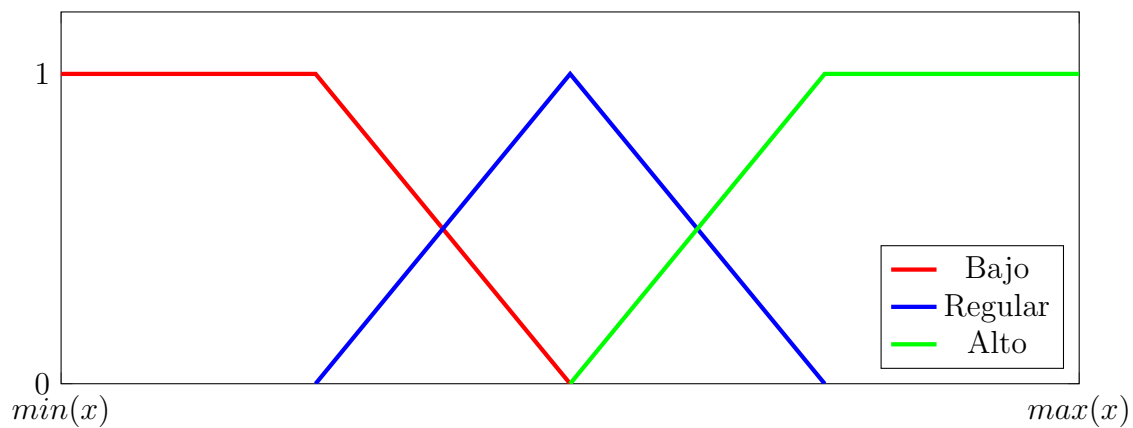
Para las variables de entrada se proponen utilizar funciones trapezoidales en los extremos con el objetivo de clasificar todos los valores *crisp* desde los extremos hasta el centro, y una función triangular desde el centro hacia una desviación estándar ( $\mu \pm \sigma$ ) con el fin de establecer como regular todo aquellos valores *crisp* cercanos a la media (Subfigura 3.4a).

Para la función de salida del escenario 2 también se propone utilizar funciones trapezoidales en los extremos y una función triangular en el centro (Subfigura 3.4c); la literatura comúnmente utiliza funciones triangulares en la función de salida, sin embargo, la elección de esta combinación de funciones permite disminuir la sensibilidad y proporcionar una distinción clara entre las categorías. En esta variable, la asignación de los rangos de las categorías se hizo de forma simétrica con respecto a la escala del 1 al 10 (Tabla 3.8).

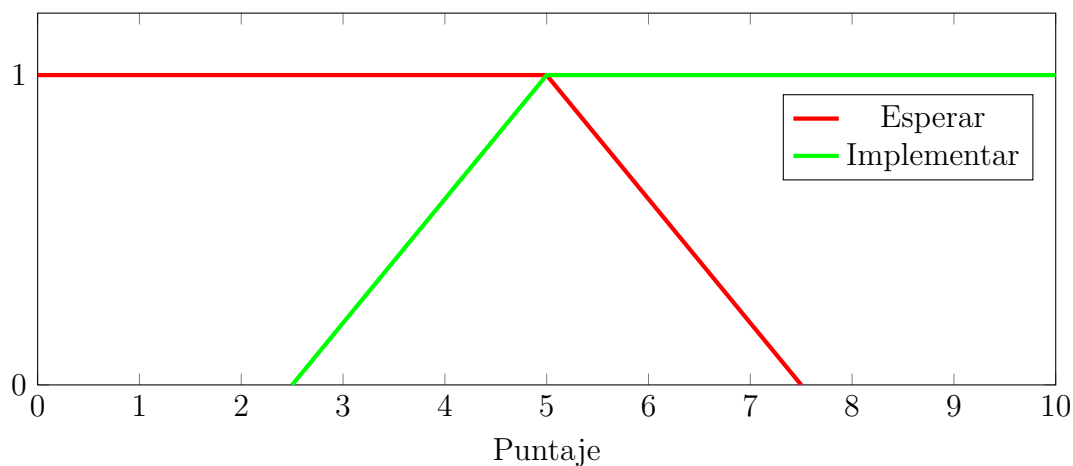
En el escenario 1 se propone utilizar solamente dos funciones trapezoidales (Subfigura 3.4b). El valor difuso de «Esperar» es completamente 1 entre los puntajes del 1 al 2.5 y para la función «Implementar» es completamente 1 entre el puntaje 7.5 al 10. Los grados de membresía entre ambas funciones ocurren entre los puntajes 2.5 y 7.5 (Tabla 3.8).

TABLA 3.8: Rangos de funciones difusas (variables de salida de los escenarios 1 y 2)

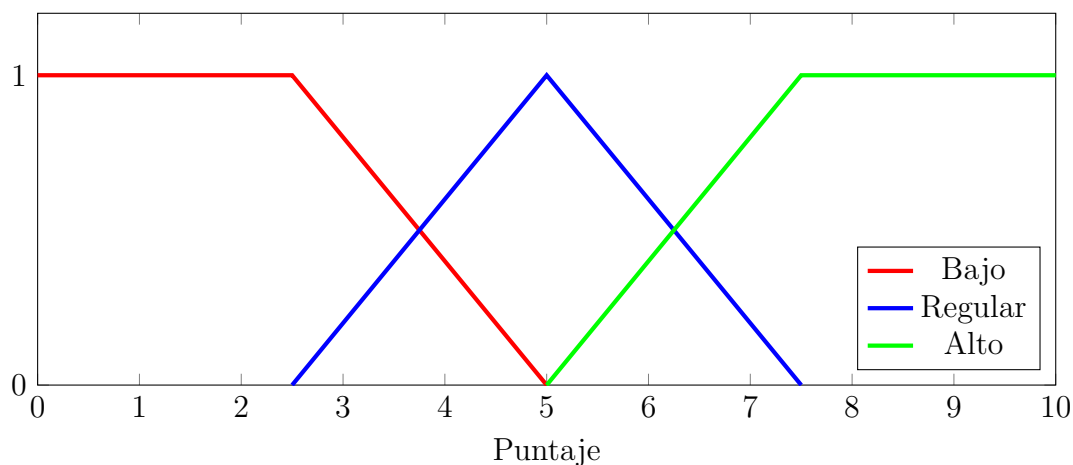
Variable	Gráfica	Etiqueta	Función	Parámetros
Acción (Escenario 1)	3.4b	Esperar	Trapezoidal	(0, 0, 5, 7.5)
		Implementar	Trapezoidal	(2.5, 5, 10, 10)
Proveedor (Escenario 2)	3.4c	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 2.5, 5)
		Regular	Triangular	(2.5, 5, 7.5)
		Alto	Trapezoidal	(5, 7.5, 10, 10)



(a) Funciones difusas trapezoidal-triangular-trapezoidal



(b) Funciones difusas trapezoidal-trapezoidal para la variable de salida (Escenario 1)



(c) Funciones trapezoidal-triangular-trapezoidal para la variable de salida (Escenario 2)

FIGURA 3.4: Propuesta de funciones difusas

### 3.5.2.2 REGLAS DIFUSAS

El modelo de lógica difusa de ambos escenarios se implementará siguiendo el sistema de inferencia difusa (*FIS*, por sus siglas en inglés) Mamdani, debido a que permite la creación de reglas difusas intuitivas parecidas al razonamiento humano en la toma de decisiones. El sistema Mamdani propone reglas con un patron «SI  $X$  es  $A$  O  $A'$  Y  $Y$  es  $B$  o  $B'$ , ENTONCES  $C$  es  $Z$ », donde  $C$  representa un conjunto difuso. Adicionalmente, este modelo permite utilizar operadores lógicos AND y OR.

La reglas difusas se determinarán, en primera instancia, asignando los valores de salida respectivos a todas las combinaciones posibles de las variables de entrada —la cantidad de reglas difusas posibles considerando todas las combinaciones puede ser calculada utilizando la fórmula de la Ecuación 3.1—, posteriormente se reducirán combinando aquellas que se solapen.

$$R_{max} = \prod_{i=1}^n m_i \quad (3.1)$$

Donde:

$R_{max}$  : Cantidad máxima de reglas  $R$ .

$n$  : Cantidad de variables  $i$ .

$m_i$  : Cantidad de funciones de membresía  $m$  de cada variable  $i$ .

### 3.5.3 DESDIFUSIFICACIÓN

Para la *desdifusificación* de los valores se ha optado por la técnica de masa de gravedad (centroide), debido a que es el más utilizado en la literatura (Bai y Wang, 2006) por proporcionar un equilibrio entre las membresías, ya que toma en cuenta todo el conjunto de salida y no solo los extremos o un intervalo determinado, aplicando un promedio ponderado a todas las salidas posibles.

### 3.5.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo de lógica difusa se desarrollará utilizando el módulo de Python `scikit-fuzzy` de Warner *et al.* (2024) siguiendo la documentación oficial (Scikit-Fuzzy Team, 2012).

La ejecución se realizará utilizando una libreta Jupyter en Microsoft Visual Studio Code debido a que facilita probar y depurar los errores por bloques de código sin tener que reiniciar la ejecución del *script* completo. Se utilizarán dos equipos de cómputo diferentes en función de las necesidades de movilidad para su desarrollo, los cuales se describen en la Tabla A.1.

## 3.6 VALIDACIÓN DEL MODELO DE LÓGICA DIFUSA MEDIANTE SIMULACIÓN

La validación del modelo de lógica difusa se realizará utilizando una simulación computacional del proceso de Sourcing NPI debido a que, por temas de confidencialidad de la información, la simulación permite generar datos en base a estadísticas reales además que permite probar la funcionalidad del modelo en un corto periodo de tiempo, mientras que la validación en un entorno real excede el tiempo disponible para el estudio (Robinson, 2004), debido a que la implementación de un proyecto de NPI suele tomar entre dos a tres años. Los detalles técnicos de la simulación pueden consultarse en el Apéndice A.

## 3.7 OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS

La implementación del modelo de lógica difusa y la simulación mediante Python permiten generar reportes en formato de hoja de cálculo de Microsoft Excel (xlsx)

utilizando las librerías `pandas` y `openpyxl`, los cuales contienen datos relevantes para la formulación de los resultados y las conclusiones. A continuación, en la Subsección 3.7.1 se detallarán los datos relevantes de cada reporte que serán analizados con base en la metodología de la Subsección 3.7.2.

### 3.7.1 GENERACIÓN DE REPORTE

- **Reporte de evaluación difusa:** Este reporte es generado a partir de la evaluación mediante el modelo de lógica difusa y contiene el puntaje del proveedor para cada ECN (*Engineering Change Notification* por sus siglas en inglés, o Notificación de Cambio de Ingeniería) cotizado, así como el desglose de la ponderación de las reglas difusas. Su análisis en conjunto con el reporte de implementación permitirá determinar la relación entre el puntaje representado como etiqueta lingüística («Esperar» o «Implementar») y el grado de cumplimiento en la implementación del proyecto. En la Tabla 3.9 se muestran los datos relevantes para el análisis y obtención de resultados.
- **Reporte de implementación:** Este reporte contiene la información de la simulación relativa a los ECNs y números de parte evaluados, las cotizaciones de los proveedores y el desempeño del proveedor asignado en razón de los tiempos de entrega de las muestras. El análisis de este reporte permitirá determinar el cumplimiento del proveedor y su impacto económico. En la Tabla 3.10 se muestran los datos relevantes para el análisis y obtención de resultados.

TABLA 3.9: Columnas o datos relevantes del reporte de evaluación difusa

Columna	Descripción
Iteración	Número de iteración de la simulación.
ECN	ECN evaluado.
ID del proveedor	Proveedor evaluado.
Regla 1... $n$	Peso resultante de la evaluación difusa en escala continua del 0 a 1 para cada regla.
Puntaje	Puntaje (valor <i>crisp</i> ) en escala continua del 0 al 10 del proveedor para el ECN evaluado.
Esperar	Peso resultante de la evaluación difusa en escala continua del 0 a 1 para cada la acción «Esperar».
Implementar	Peso resultante de la evaluación difusa en escala continua del 0 a 1 para cada la acción «Implementar».
Acción	Etiqueta lingüística de la variable de salida (Esperar o Implementar).

TABLA 3.10: Columnas o datos relevantes del reporte de implementación

Columna	Descripción
Iteración	Número de iteración de la simulación.
ECN	ECN evaluado.
ID del proveedor	Proveedor evaluado.
Gasto anual	Gasto anual de un número de parte calculado multiplicando el pronóstico de la demanda anual por el precio unitario.
SOP ready	Indica si el proveedor entregó el material a tiempo para el SOP (incluyendo las muestras de PPAP, MCS y piloto).

### 3.7.2 ANÁLISIS DE DATOS Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Se utilizará la librería `pandas` en una libreta Jupyter para el análisis de los datos de los reportes descritos en la sección anterior. Se obtendrán las estadísticas de la implementación de los nuevos números de parte (porcentajes de cumplimiento promedio y desviaciones estándar) para la formulación de los resultados.

### 3.8 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se describió detalladamente la metodología a utilizar para la implementación de un modelo de lógica difusa. El enfoque a utilizar en la investigación será el cuantitativo, mediante el uso de tres instrumentos, siendo el principal la lógica difusa que permita evaluar y seleccionar a los proveedores dentro del proceso de NPI, y una revisión sistemática de literatura y una encuesta como instrumentos secundarios, con el fin de identificar y seleccionar los criterios relevantes a integrar en el modelo de lógica difusa. También se hará uso de una simulación computacional con el fin de validar el modelo.

## CAPÍTULO 4

# APLICACIÓN DEL MÉTODO

---

En este capítulo se describe la implementación del modelo de lógica difusa desarrollado para la evaluación y selección de proveedores en proyectos NPI dentro del sector HVAC, así como los otros dos instrumentos cuantitativos auxiliares, que permitieron identificar y seleccionar las variables que se integraron en el modelo de lógica difusa. A continuación se detallan según su orden de ejecución.

### 4.1 REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

La revisión sistemática de literatura se llevó a cabo en tres etapas:

**Etapas 1:** Búsqueda de documentos y preselección.

**Etapas 2:** Selección de artículos relevantes.

**Etapas 3:** Extracción de datos y síntesis de criterios.

De los 38 documentos preseleccionados, 34 fueron incluidos después de un análisis exhaustivo basado en los criterios de elegibilidad de la Tabla 3.3. De los documentos donde se identificaron los criterios de evaluación y selección de proveedores, 5 fueron actas de congreso, 26 artículos y tres tesis de maestría; 20 en idioma inglés, 11 en portugués y tres en español (ver Figura 4.1).

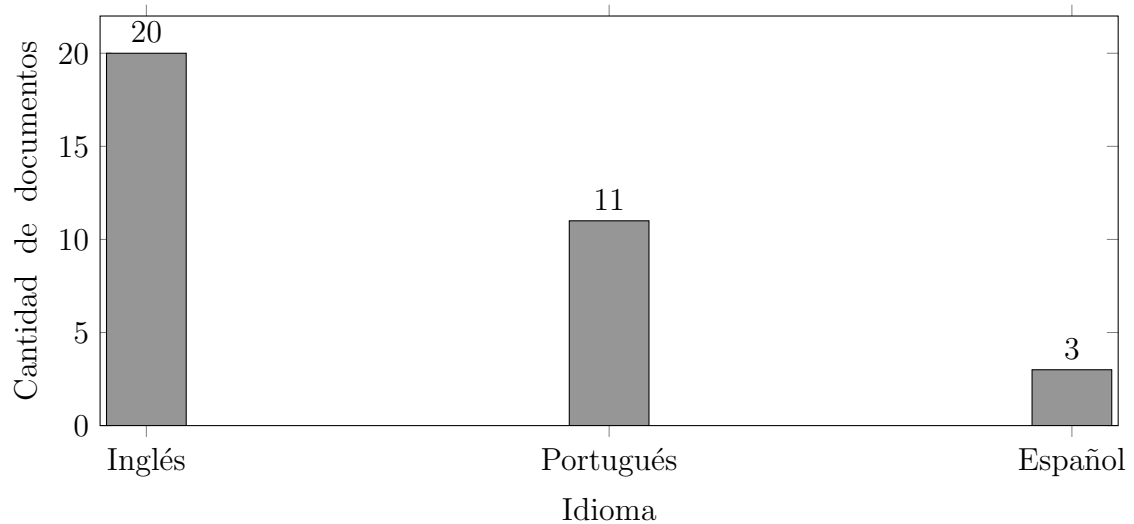


FIGURA 4.1: Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por idioma de publicación

En la Figura 4.2 se observa que la distribución por año es uniforme, habiendo una diferencia máxima de 2 años.

Brasil destaca como el país con mayor número de publicaciones en este tema (10 documentos), seguido por Bangladesh, China y España, con dos documentos cada uno. El resto de los países presenta solo una publicación cada uno (ver Figura 4.3). Cuatro documentos no fueron aplicados en un país específico.

Contrario a lo que se anticipaba en el Capítulo 3 durante la fase del diseño de la revisión sistemática de literatura, no se evidenció un sesgo lingüístico hacia el inglés en términos del país de aplicación de los estudios. Como se observa en la Tabla 4.1, la mayoría de los artículos publicados en inglés proceden de países donde el inglés no se considera una lengua oficial. Por lo tanto, en este sentido el inglés se desempeña como *lingua franca* para la comunicación científica internacional.

Por otra parte, la inclusión de documentos en español y portugués respondió a la intención metodológica de reducir los sesgos lingüísticos y regionales. No obstante, se identificó una sobrerrepresentación geográfica, debido a que el 29% de los docu-

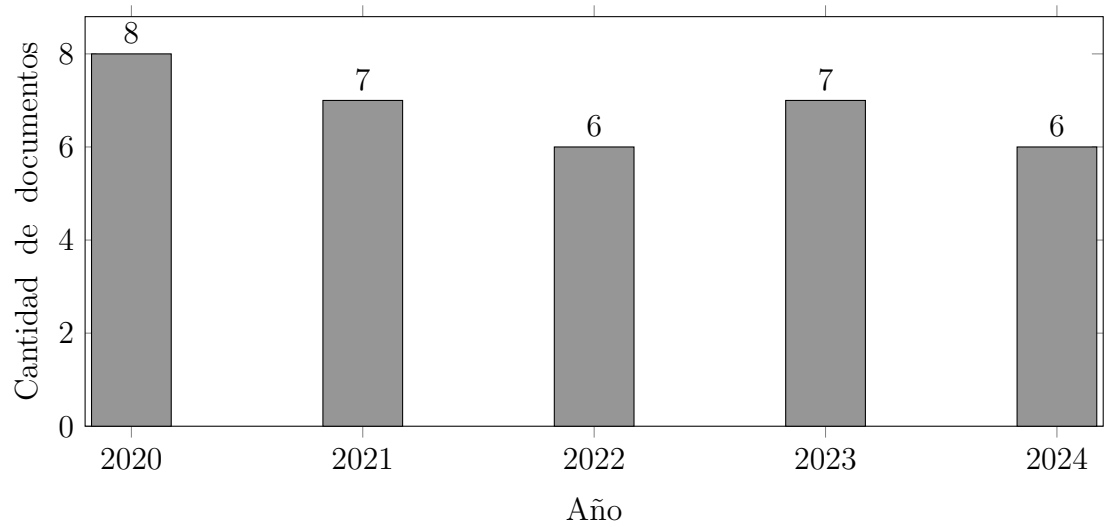


FIGURA 4.2: Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por año de publicación

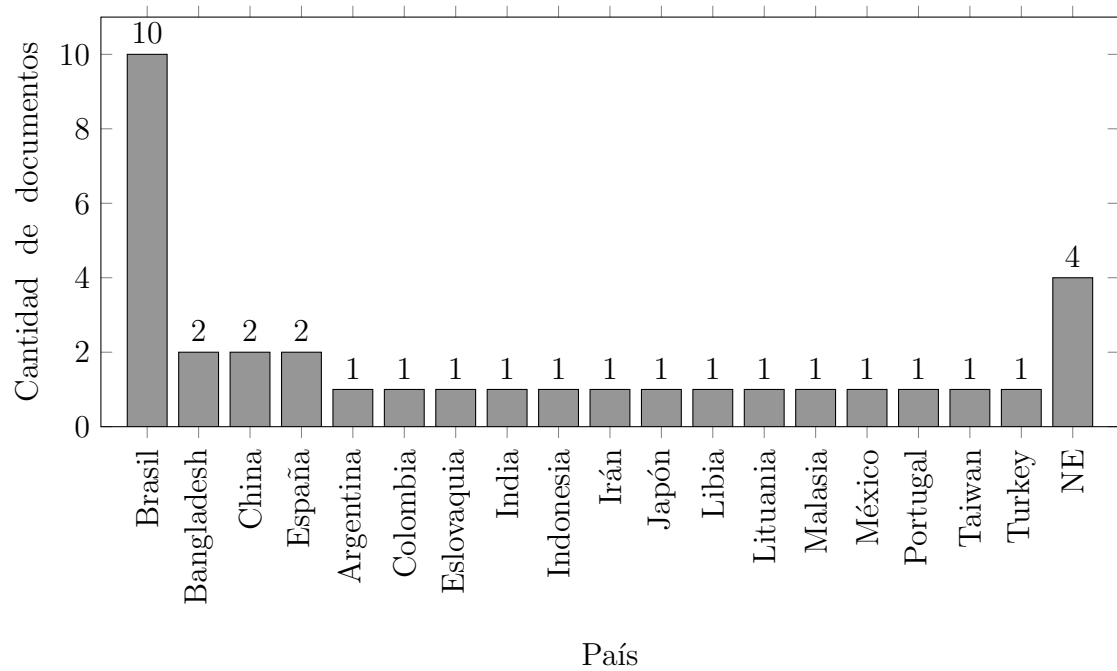


FIGURA 4.3: Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por país de estudio

TABLA 4.1: Relación idioma-país de publicación de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura

Idioma	Estatus oficial	Estatus no oficial
Inglés	India	Bangladesh China Eslovaquia España Indonesia Irán Japón Libia Lituania Malasia Taiwán Turquía
Portugués	Brasil Portugal	
Español	Argentina Colombia México	

mentos incluidos provienen de Brasil, lo cual puede ser valioso, ya que indica un alto interés por el tema en dicho país, por lo tanto es importante considerar que algunos de los criterios identificados pueden estar influenciados por el contexto industrial brasileño. Es por ello que la aplicación de la encuesta desarrollada en la Sección 4.2 permite reducir dicho sesgo al seleccionar aquellos aplicables al caso de estudio.

En cuanto a la distribución por sector industrial, el más representado es el textil (5), seguido por la construcción (4) y el alimenticio (3). Los sectores automotriz, farmacéutico, manufacturero en general y de servicios se encuentran representados por dos documentos cada uno, y el resto de industrias cuentan con una sola publicación (ver Figura 4.4). Por otro lado, tres estudios no estuvieron orientados en una industria específica, sino que los autores presentaron una propuesta general, con criterios básicos aplicables a cualquier escenario de evaluación de proveedores.

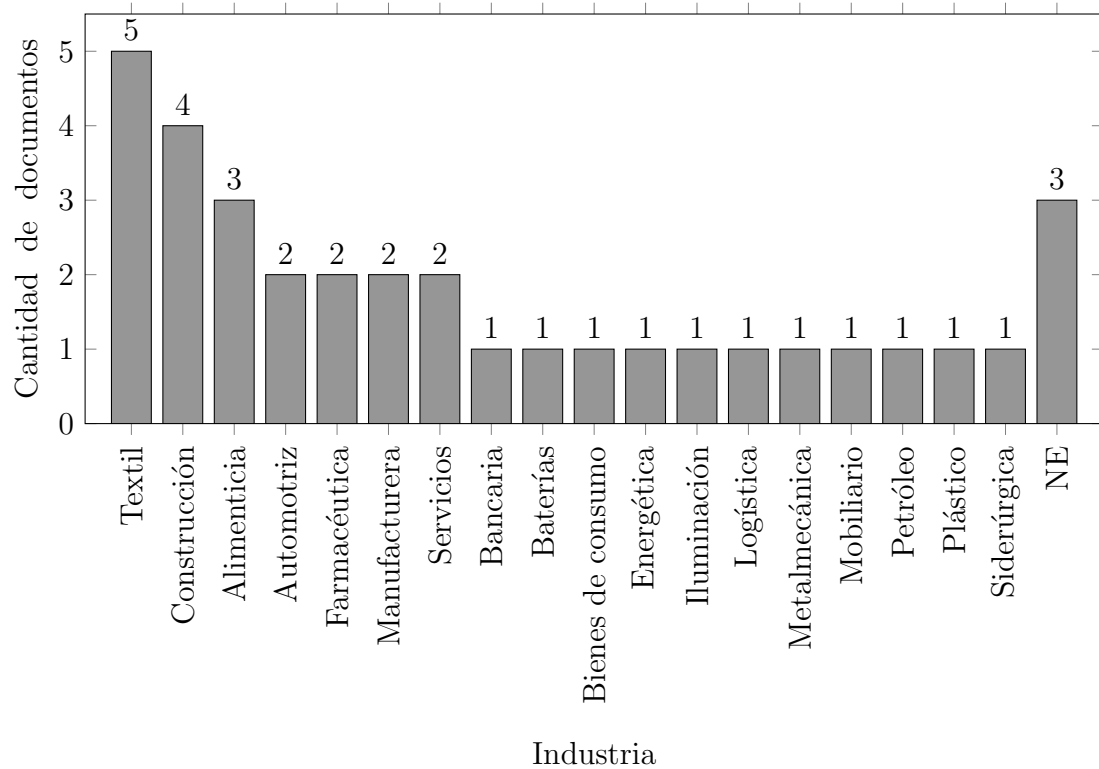


FIGURA 4.4: Distribución de los documentos incluidos en la revisión sistemática de literatura por industria de estudio

Un total de 116 criterios identificados en primera instancia se clasificaron en las áreas temáticas presentadas en la Tabla 4.2 y se sintetizaron, siguiendo la metodología descrita en la Sección 3.3.5. Como resultado, se depuraron 75 criterios, de los cuales 38 se fusionaron por redundancia respecto a otros y 37 no correspondían con actividades o decisiones propias del equipo de Sourcing NPI; 41 criterios se determinaron relevantes para el caso de estudio.

TABLA 4.2: Áreas temáticas y criterios de selección de proveedores

Área	Cantidad
Criterios económicos	5
Criterios logísticos	11
Criterios del producto	8
Criterios del servicio	7
Atributos del proveedor	10

En el Apéndice B se presenta la matriz completa con la relación criterio-autor, así como la asignación de cada criterio en su categoría correspondiente.

## 4.2 SELECCIÓN DE VARIABLES

Para el proceso de selección de variables se aplicó la encuesta descrita en la Sección 3.4 (ver Tabla 3.5) de la metodología. De la población de 18 individuos, se contó con una muestra de 8 personas voluntarias. Se hizo la invitación a la población del estudio vía mensaje grupal y la encuesta se hizo llegar a los participantes a través de la plataforma Microsoft Forms; el formulario contaba con cinco secciones (una por cada área) en las que el usuario podía seleccionar los criterios que consideraba relevantes en base a su experiencia y una sexta sección con una pregunta abierta opcional en la que se invitaba a proporcionar criterios adicionales no listados anteriormente. En el Apéndice C se encuentra el formulario utilizado en este estudio. Los resultados en formato de gráfica pueden consultarse en el Apéndice D.

Debido a que la complejidad de un sistema multicriterio aumenta en relación a la cantidad de variables, con el fin de evitar un exceso de criterios que dificulten su implementación se estableció un umbral de selección basado en el análisis de las frecuencias. Para ello, se identificaron los criterios que recibieron la máxima cantidad de votos (8), los cuales fueron considerados aquellos con el mayor nivel de consenso entre los tomadores de decisión. La Tabla 4.3 muestra los criterios que se integrarán

en el modelo de lógica difusa.

Se reconoce que no existe una única forma de seleccionar los criterios, especialmente cuando los otros criterios también consiguieron una cantidad considerable de votos (por ejemplo, diez criterios recibieron siete votos). Se decidió establecer un límite de corte con el fin de considerar la inclusión únicamente de los criterios percibidos como relevantes y facilitar la aplicación del modelo en un entorno operativo, como la implementación de proyectos NPI.

TABLA 4.3: Criterios seleccionados para incluir en el modelo de lógica difusa

Criterio	Descripción
Precio	Valor monetario del material
Puntualidad	Cumplimiento del tiempo de entrega prometido.
Tiempos de entrega	Tiempo transcurrido desde la colocación de la orden de compra hasta el surtimiento de las muestras

La última pregunta del cuestionario «¿Existe algún criterio adicional que usted considere importante y que no se haya mencionado anteriormente? ¿O algún comentario o criterio que sugiera replantear?» (Apéndice C) solamente obtuvo una respuesta válida en la que el participante sugería «considerar el *cashflow* o endeudamiento para proveedores nuevos y la existencia de contratos de inventario y sus términos para todos los proveedores (nuevos o existentes)»; estos criterios no se integraron en el modelo, sin embargo, se reconoce la importancia de la aportación y se sugiere considerarlos para un futuro estudio. Se recibieron dos respuestas adicionales que solamente agregaban como comentario que la encuesta consideró todas variables posibles.

### 4.3 MODELO DE LÓGICA DIFUSA PARA LA EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES

En la presente sección se describe la aplicación de dos modelos de lógica difusa aplicados a los escenarios descritos en la Sección 3.5.

La encuesta a los expertos (Sección 4.2) permitió identificar las variables que son necesarias para incluirse en ambos modelos:

- Precio
- Puntualidad
- Tiempo de entrega

Es importante distinguir que para el proceso de NPI no se consideran los tiempos de entrega (*lead time*) estándar para producción, los cuales corresponden en muchos casos con los que el proveedor proporciona en su cotización, ya que regularmente el tiempo de entrega de muestras suele ser mayor y con más dispersión. Sin embargo, en los modelos propuestos su uso se limitará cuando no existe un histórico de entregas por parte del proveedor.

La puntualidad se calcula con datos históricos del proveedor, en caso de haber datos disponibles, y se expresa como el porcentaje de cumplimiento del proveedor respecto al primer tiempo de entrega estimado pactado. Otra alternativa considerada fue la diferencia en días desde la fecha de entrega estimada hasta la fecha de entrega real, sin embargo, se optó por la primera opción.

Para la ejecución se utilizó Python en una libreta Jupyter y la validación se realizó mediante una simulación computacional. El código Python puede ser consultado en el siguiente repositorio de GitHub: <https://github.com/rubusarbaro/>

supplier-selection\_fuzzy-logic\_thesis (o escaneando el código QR de la Figura A.2a).

### 4.3.1 GENERACIÓN DEL CONJUNTO DE DATOS INICIAL MEDIANTE SIMULACIÓN

El presente estudio de caso plantea analizar la implementación de 10 ECNs de tubería de cobre (Tabla 4.6) para un nuevo proyecto de unidad de aire acondicionado, el cuál recibe el nombre clave de «Juneau».

Las fechas importantes (*milestones*) del proyecto se muestran en la Tabla 4.4. *Design freeze* corresponde a la fecha en la que se restringe la modificación del diseño del producto a cambios esenciales; la muestra de ECNs evaluados para la obtención de estadísticas refleja que los ECNs son liberados en promedio 60 días después de la fecha de *design freeze*, con una desviación estándar de 90 días, pudiendo haber casos donde los ECNs se liberan antes de tiempo o hasta un año después. Las siglas MCS no tienen un significado estandarizado en la literatura, sin embargo, esta fecha corresponde a la construcción de las primeras muestras; durante esta etapa no se considera necesario contar con la aprobación de PPAP (Proceso de Aprobación de Piezas de Producción, por sus siglas en inglés) de las materias primas, ya que en esta corrida se verifica el correcto ensamble y funcionamiento de las unidades de aire acondicionado, y en base a los hallazgos se realizan los cambios pertinentes que posteriormente son liberados en un nuevo ECN. El piloto corresponde a la fase en la que se fabrican las primeras muestras con el diseño definitivo, simulando tanto el proceso de manufactura como logístico de una producción regular; es importante mencionar que para un piloto todos componentes comprados deben contar con PPAP aprobado y con contratos cargados en SAP con el fin de que el proveedor pueda visualizar la demanda y que compras pueda hacer los *disparos* o pedidos. Finalmente, la fecha de SOP es la fecha de implementación del producto; se contempla que todos los

procesos de *sourcing* deben encontrarse finalizados como mínimo seis semanas antes —a este periodo de seis semanas se le conoce como *supplier readiness* (preparación del proveedor)—, como verificar que el proveedor se encuentre listo para embarcar y con inventario suficiente para cubrir la demanda.

TABLA 4.4: Fechas importantes (*milestones*) del proyecto Juneau

Proyecto	<i>Design freeze</i>	MCS	Piloto	SOP
Juneau	2024-04-09	2024-06-17	2024-08-01	2024-11-25

**Nota:** Las fechas se muestran en formato ISO (YYYY-MM-DD).

Primeramente se generó un conjunto de datos inicial mediante simulación (Apéndice A) de 300 ECNs en dos proyectos cotizados e implementados con 81 proveedores de distintos perfiles —uno por cada combinación de las variables de la Tabla 4.3 con las etiquetas lingüísticas Bajo, Medio y Alto (Ecuación 4.1)—, ya que utilizar directamente las estadísticas de los proveedores reales podría generar sesgo en las funciones difusas. La cantidad de 300 ECNs iniciales asignados a cada proveedor de forma aleatoria con una distribución uniforme permite que todos los proveedores cuenten con datos de entrega de al menos tres ECNs cada uno, sin embargo, todos ellos cotizaron los 300 ECNs.

La encapsulación de los 300 ECNs en tres proyectos (Alaska, Anchorage y Kodiak) diferentes a Juneau tiene la finalidad de permitir repartir la generación de datos en tres hilos simultáneos mediante el módulo `threading` de Python, así como facilitar la posterior simulación del nuevo proyecto. Los detalles técnicos pueden consultarse en el Apéndice A.

$$R_{max} = \prod_{i=1}^n m_i = \prod_{i=1}^4 3 = 3^4 = 81 \quad (4.1)$$

Donde:

$R_{max}$  : Cantidad máxima de reglas  $R$ .

$n$  : Cantidad de variables  $i$ .

$m_i$  : Cantidad de funciones de membresía  $m$  de cada variable  $i$ .

De los 81 proveedores de tubería de cobre generados mediante simulación, se seleccionaron tres que comparten un perfil similar a los reales (existentes), a los cuales se les cambió el nombre de la simulación (Proveedor 36, Proveedor 47 y Proveedor 73) por otro nombre genérico que permita distinguirlos. También se creó un cuarto proveedor (nuevo) con un perfil ideal (precios bajos, alta puntualidad en las entregas, tiempo de cotización corto y fabricación o entrega de muestras rápidas). Los proveedores restantes son desactivados dentro de la simulación. La Tabla 4.5 muestra los perfiles asignados a cada proveedor que se usará en la validación del modelo de lógica difusa.

TABLA 4.5: Perfil de proveedores a analizar en base a los modelos de lógica difusa (escenario 1 y 2)

Tipo	ID	Nombre	Perfiles			
			Precio	Puntualidad	Tiempo de cotización	Tiempo de entrega
Existente	33	Tuberías ABC, S.A. de C.V.	Regular	Alta	Bajo	Regular
Existente	47	Tuberías DEF, S. de R.L.	Bajo	Regular	Alto	Regular
Existente	73	Tuberías GHI, S.A.S	Bajo	Baja	Alto	Alto
Nuevo	82	Tuberías Súper, S.A.P.I.	Bajo	Alta	Bajo	Bajo

Posteriormente se generaron 10 nuevos ECNs exclusivos para el nuevo proyecto que serán evaluados e implementados en los escenarios 1 (Sección 4.3.2) y 2 (Sección 4.3.3) los cuales se muestran en la Tabla 4.6.

TABLA 4.6: ECNs de Juneau a implementar mediante mediante simulación utilizando los modelos de lógica difusa para analizar los proveedores.

#	ECN	Fecha de liberación	Cantidad de números de parte
1	ECN0000301	2024-07-10	2
2	ECN0000302	2024-07-17	4
3	ECN0000303	2024-07-20	3
4	ECN0000304	2024-02-07	3
5	ECN0000305	2024-03-05	4
6	ECN0000306	2024-09-11	3
7	ECN0000307	2024-04-18	7
8	ECN0000308	2024-05-10	5
9	ECN0000309	2024-04-04	4
10	ECN0000310	2024-08-21	3
<b>Total</b>			<b>38</b>

**Nota:** Las fechas se muestran en formato ISO (YYYY-MM-DD).

### 4.3.2 ESCENARIO 1: PRIORIDAD EN TIEMPOS DE IMPLEMENTACIÓN

#### 4.3.2.1 VARIABLES

La Tabla 4.7 muestra la parametrización de los criterios que se incluirán en el modelo de lógica difusa del escenario 1.

El criterio «Precio» obtenido en la revisión de literatura (Tabla B.1) y seleccionado en la encuesta a expertos se define como el valor monetario del material (Tabla 4.3). Para la aplicación del modelo del escenario 1 se ha decidido adaptar esta variable como «gasto total anual». El gasto total anual por proveedor se expresa como la suma del precio unitario de todos los números de parte que ha cotizado el proveedor hasta la fecha (histórico) por la demanda anual estimada del número de parte (Ecuación 4.2). A esta variable también se le conoce en la jerga de abastecimiento como *spend*.

$$C_s^{\text{anual}} = \sum_{i=1}^n p_{is} D_i \quad (4.2)$$

Donde:

$C_s^{\text{anual}}$  : Gasto total anual del proveedor  $s$ .

$n$  : Cantidad  $n$  de número de partes  $i$  cotizadas.

$p_{is}$  : Precio unitario del número de parte  $i$  del proveedor  $s$ .

$D_i$  : Demanda anual estimada del número de parte  $i$ .

En este escenario se ha incluido el criterio «Urgencia» anteriormente descrito en el capítulo de Metodología (Sección 3.5.1.1), el cual en función de la cantidad de días restantes para la fecha límite evalúa el nivel de urgencia de implementación del ECN.

TABLA 4.7: Parametrización de variables a utilizar en el modelo de lógica difusa del escenario 1

Tipo	Variable	UM	Tipo	Rango	Etiquetas lingüísticas
Entrada	Gasto total anual	Dólares	Continuo	0 a max	Bajo, regular, alto
Entrada	Puntualidad	%	Continuo	0 a 1	Baja, regular, alta
Entrada	Tiempo de entrega	Días	Discreto	0 a max	Bajo, regular, alto
Entrada	Urgencia	Días	Discreto	0 a max	Baja, moderada, alta
Salida	Acción	Puntos	Discreto	0 a 10	Esperar, implementar

#### 4.3.2.2 FUNCIONES DIFUSAS

Mediante una simulación por computadora (Apéndice A) se generó un conjunto de datos inicial que permitió obtener los parámetros estadísticos necesarios para la definición de las funciones difusas, los cuales se muestran en la Tabla 4.8.

Las funciones difusas para las variables de entrada toman una forma trapezoidal-triangular-trapezoidal (Figura 3.4a) como se describe en el capítulo de Metodología

TABLA 4.8: Parámetros estadísticos del escenario 1

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo*
Gasto total anual**	13 987 054.26	1 953 765.64	11 334 329.71	19 848 351.20
Tiempo de entrega	35	16	8	100

\* Para el valor máximo se ha establecido lo que resulte mayor entre la media más tres veces la desviación estándar ( $\mu + 3\sigma$ ) o el valor más alto del conjunto de datos.

\*\* Los valores para la variable «Gasto total anual» corresponden al conjunto de datos inicial.

(Sección 3.5.2.1) utilizando la media y desviación estándar como puntos de partida para los rangos. Para el valor máximo de las variables «Gasto total anual» y «Tiempo de entrega» no se tomó en cuenta el valor máximo obtenido del conjunto de datos, sino que se estableció utilizar el producto de la media más tres veces la desviación estándar ( $\mu + 3\sigma$ ), con el fin de tratar datos donde el valor generado se sale de la función de membresía.

No se obtuvieron datos estadísticos para las variables «Puntualidad» y «Urgencia», sin embargo, las funciones difusas fueron construidas de la siguiente manera: la puntualidad al tratarse de un porcentaje, las funciones se distribuyeron de forma simétrica entre partes entre 0 y 1; no existe un criterio establecido de cuándo un ECN recién liberado se debe considerar urgente, sin embargo, se logró establecer un rango en base a la revisión con expertos.

En la Tabla 4.9 se muestran los rangos de las funciones difusas de cada variable. La Gráfica 4.5a muestra que para la variable «Gasto total anual» el parámetro  $b$  de la función correspondiente a la etiqueta «Bajo» y no parte de 0 como en el resto de las variables; este comportamiento se ha programado de manera intencional, debido a que las reglas difusas (Sección 4.3.2.3) premian los costos bajos, sin embargo, los costos extremadamente bajos no siempre suelen ser beneficiosos, ya que en ocasiones se encuentran relacionados con una mala calidad de los materiales o un proceso ineficiente del proveedor, por lo que se busca reducir la pertenencia a medida que

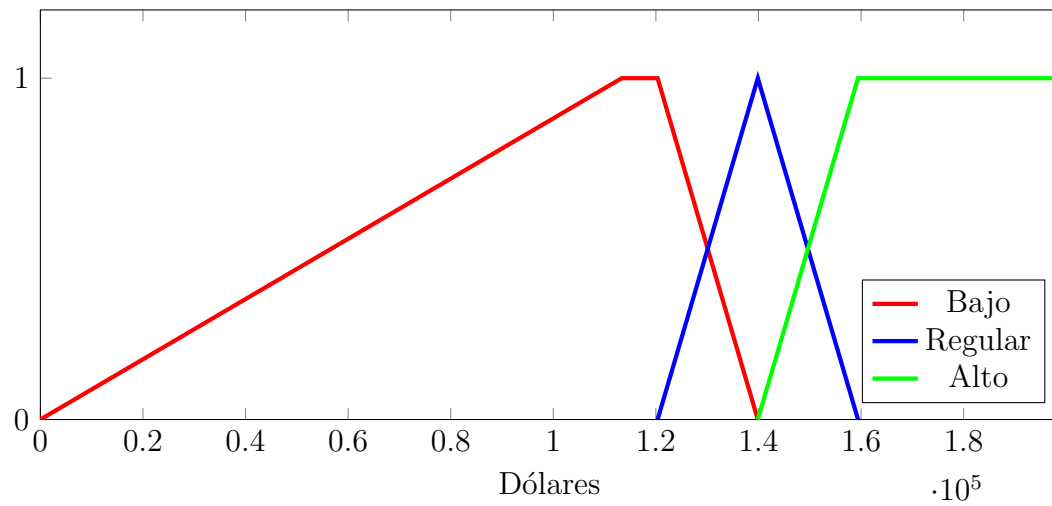
el valor se acerca a 0. Es por ello que se ha fijado el valor del parámetro  $b$  y del mínimo deseable igual al producto de la media menos dos veces la desviación estándar ( $\mu - 2\sigma$ ).

TABLA 4.9: Rangos de funciones difusas del Escenario 1

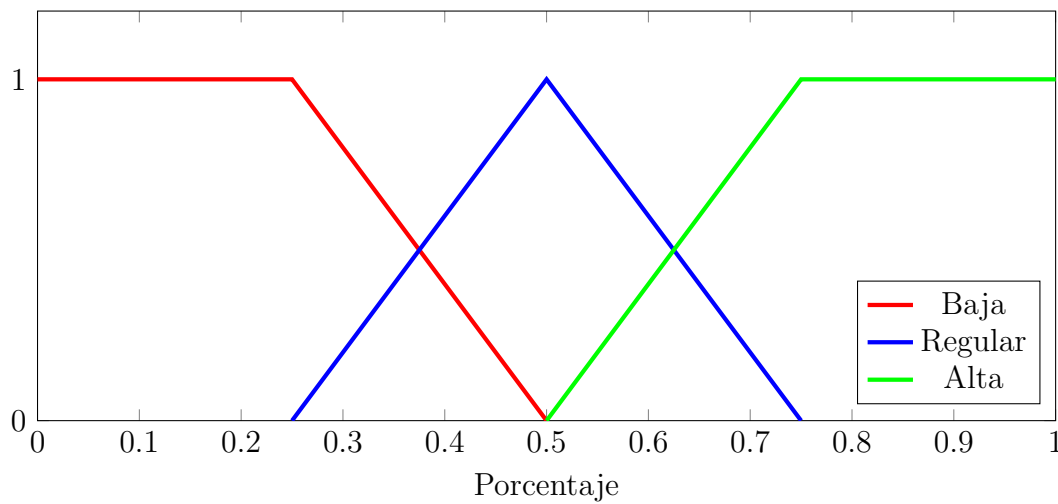
Variable	Gráfica	Etiqueta	Función	Parámetros
Gasto total anual*	4.5a	Bajo	Trapezoidal	(0, 11 334 329.71, 12 033 288.62, 13 987 054.26)
		Regular	Triangular	(12 033 288.62, 13 987 054.26, 15 940 819.91)
		Alto	Trapezoidal	(13 987 054.26, 15 940 819.91, 19 848 352, 19 848 352)
Puntualidad	4.5b	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 0.25, 0.5)
		Regular	Triangular	(0.25, 0.5, 0.75)
		Alto	Trapezoidal	(0.5, 0.75, 1, 1)
Tiempo de entrega	4.5c	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 18.7, 35.0)
		Regular	Triangular	(18.7, 35.0, 51.4)
		Alto	Trapezoidal	(35.0, 51.4, 100, 100)
Urgencia	4.5d	Baja	Trapezoidal	(0, 0, 30, 60)
		Moderada	Triangular	(30, 60, 90)
		Alta	Trapezoidal	(60, 90, 720, 720)

\* Los valores para los parámetros de la variable «Gasto total anual» corresponden al conjunto de datos inicial.

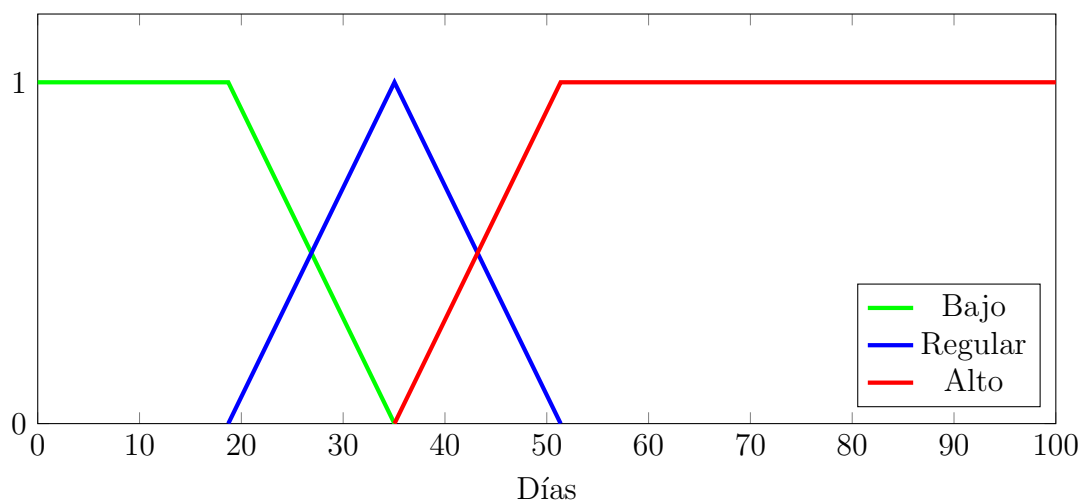
Los rangos (Tabla 3.8) y la gráfica (Gráfica 3.4b) de las funciones difusas de la variable de salida «Acción» se pueden consultar en la Sección 3.5.2.1 del capítulo de metodología.



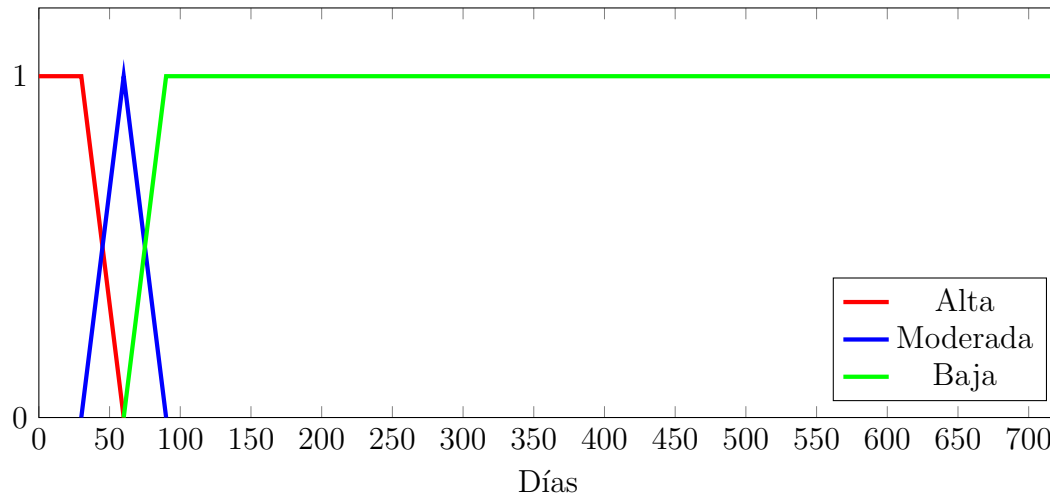
(a) Gasto total anual (x100)



(b) Puntualidad



(c) Tiempo de entrega



(d) Urgencia

FIGURA 4.5: Funciones difusas del escenario 1

#### 4.3.2.3 REGLAS DIFUSAS

Para el presente modelo se han definido dos conjuntos de reglas: el primero para proveedores nuevos, es decir, aquellos que nunca han entregado material, aún y cuando ya hayan cotizado con anterioridad; y el segundo para proveedores existentes que ya han entregado material a la planta.

Para los proveedores nuevos se establecieron seis reglas (Tabla 4.11) mientras que para los proveedores existentes se consideraron 18 (Tabla 4.10). La principal diferencia entre ambos conjuntos reside en que para los proveedores nuevos no se evalúa la variable de puntualidad debido a que no tienen un historial de entregas del cual obtener el valor.

Las reglas se determinaron en primera instancia definiendo los valores lingüísticos de la variable de salida «Acción» («Esperar» e «Implementar») con las etiquetas lingüísticas de las respectivas variables de entrada (27 para proveedores nuevos y 81 para proveedores existentes) y posteriormente se redujeron fusionando los criterios que se solapan. En las tablas 4.11 y 4.10 se muestra una regla por fila; las columnas

representan las variables, y entre cada columna se usa un operador «Y»; las celdas en blanco pueden tomar cualquier valor para la variable que representan y aquellas con dos valores usan operador «O».

TABLA 4.10: Reglas difusas a implementar en el modelo de selección de evaluación y selección de proveedores existentes en el escenario 1

#	Variables				Resultado
	Costo total	Puntualidad	Tiempo de entrega	Urgencia	Acción
1		Baja	Bajo	Alta	Esperar
2	Alto	Regular	Bajo	Alta	Esperar
3		Baja o Regular	Medio o Alto	Alta	Esperar
4		Alta	Regular	Alta	Implementar
5	Bajo o Regular	Regular	Bajo	Alta	Implementar
6		Alta	Bajo	Alta	Implementar
7		Baja	Bajo o Regular	Moderada	Esperar
8	Bajo o Regular	Regular o Alto	Bajo o Regular	Moderada	Implementar
9	Alto	Regular o Alta	Bajo o Regular	Moderada	Esperar
10			Alto	Moderada	Esperar
11	Bajo		Bajo	Baja	Implementar
12	Regular	Alta	Bajo	Baja	Implementar
13	Regular o Alto	Alta o Regular	Alto	Baja	Esperar
14	Alto	Alta	Bajo	Baja	Esperar
15	Regular	Baja	Regular o Alto	Baja	Esperar
16	Alto		Regular o Alto	Baja	Esperar
17	Bajo	Baja	Regular o Alto	Baja	Implementar
18	Bajo o Regular	Regular o Alta	Regular o Alto	Baja	Implementar

**Nota:** Los espacios en blanco pueden tomar cualquier valor entre Bajo, Regular o Alto.

A continuación se muestran dos ejemplos de cómo se interpretan las reglas, tomando como referencia la Tabla 4.11:

- **Regla 4:** SI *Costo total* es *Alto* Y *Urgencia* es *Media*, **ENTONCES** *Acción* es *Esperar*.
- **Regla 5:** SI *Costo total* es *Bajo* Y *Tiempo de entrega* es *Bajo* O *Regular* Y *Urgencia* es *Baja*, **ENTONCES** *Acción* es *Implementar*.

TABLA 4.11: Reglas difusas a implementar en el modelo de selección de evaluación y selección de proveedores nuevos en el escenario 1

#	Variables			Resultado
	Costo total	Tiempo de entrega	Urgencia	Acción
1		Alto		Esperar
2	Alto	Bajo o Regular	Alta	Esperar
3	Bajo o Regular	Bajo o Regular	Moderada o Alta	Implementar
4	Alto		Media	Esperar
5	Bajo	Bajo o Regular	Baja	Implementar
6	Medio o Alto	Medio o Alto	Baja	Esperar

**Nota:** Los espacios en blanco pueden tomar cualquier valor entre Bajo, Regular/Medio o Alto.

### 4.3.3 ESCENARIO 2: PRIORIDAD EN REDUCCIÓN DE COSTOS

#### 4.3.3.1 VARIABLES

La Tabla 4.12 muestra la parametrización de los criterios que se incluirán en el modelo de lógica difusa del escenario 2.

TABLA 4.12: Parametrización de variables a utilizar en el modelo de lógica difusa del escenario 2

Tipo	Variable	UM	Tipo	Rango	Etiquetas lingüísticas
Entrada	Gasto total anual	Dólares	Continuo	0 a max	Bajo, regular, alto
Entrada	Puntualidad	%	Continuo	0 a 1	Baja, regular, alta
Entrada	Tiempo de entrega	Días	Discreto	0 a max	Bajo, regular, alto
Salida	Proveedor	Puntos	Discreto	0 a 10	Bajo, regular, alto

Para la aplicación del modelo del escenario 2 se ha decidido adaptar la variable «precio» como «gasto total anual». La diferencia respecto al Escenario 1 (Sección

4.3.2) es que el Escenario 2 no considera el histórico de todos los números cotizados por los proveedores a evaluar, sino que considera únicamente el valor de las cotizaciones para el nuevo proyecto.

#### 4.3.3.2 FUNCIONES DIFUSAS

TABLA 4.13: Parámetros estadísticos del escenario 2

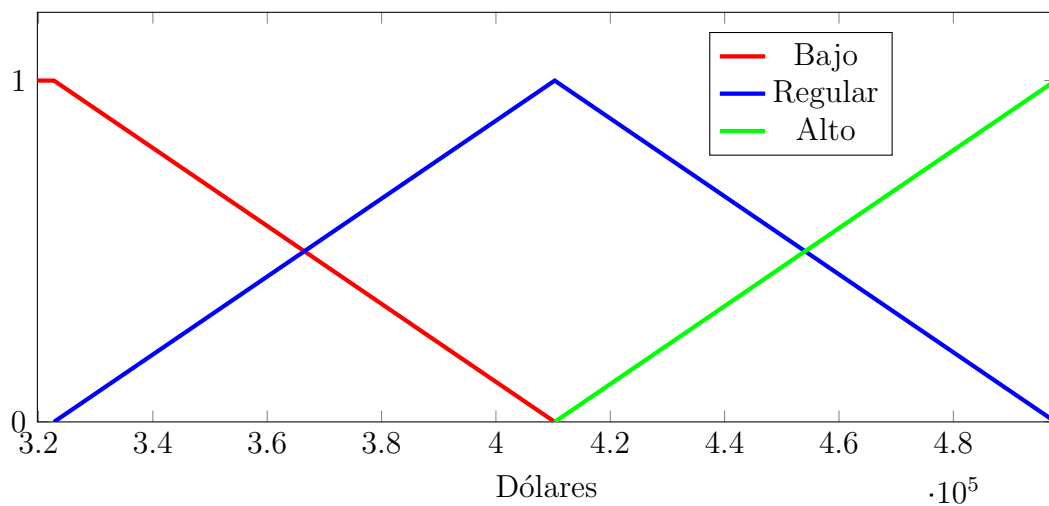
Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Gasto total anual	410 283.61	87 581.32	319 796.71	494 636.88
Tiempo de entrega	35	16	8	100

Las funciones difusas para las variables de entrada toman una forma trapezoidal-triangular-trapezoidal (Figura 3.4a) como se describe en el capítulo de Metodología (Sección 3.5.2.1) utilizando la media y la desviación estándar como puntos de partida para los rangos de las funciones difusas. Sin embargo, en el caso de la variables «Gasto total anual» se puede observar en la Gráfica 4.6a que los valores mínimos y máximos se encuentran cerca de la media más/menos una desviación estándar ( $\mu \pm \sigma$ ).

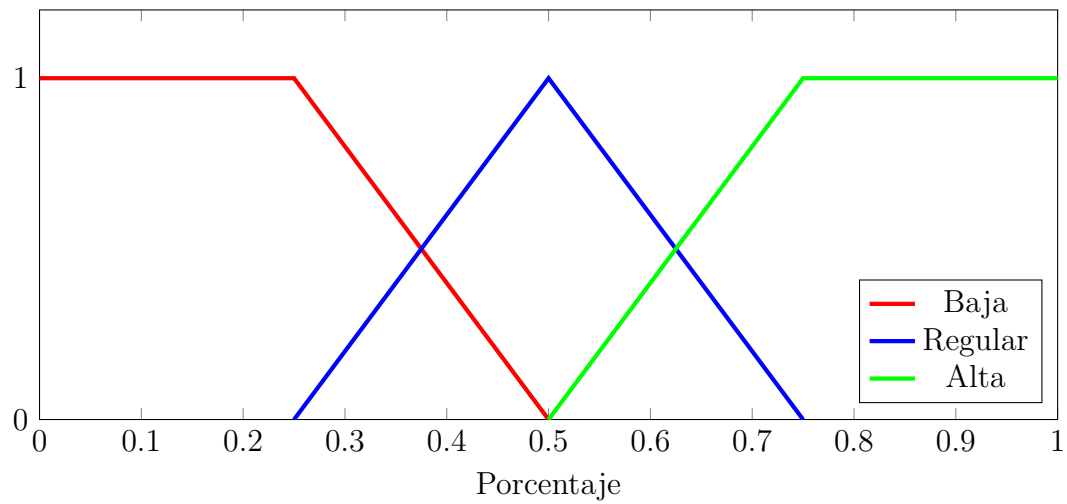
En la Tabla 4.14 se muestran los rangos de las funciones difusas de cada variable. Se puede observar que a pesar de que el valor máximo en el conjunto de datos para la variable de «Gasto total anual» fue de 494,636.88 USD, (Tabla 4.13), en la función difusa «Alto» se ha establecido el valor para los parámetros  $c$  y  $d$  el valor de la media más una desviación estándar ( $\mu + \sigma = 497,864.93$ ).

TABLA 4.14: Rangos de funciones difusas del Escenario 2

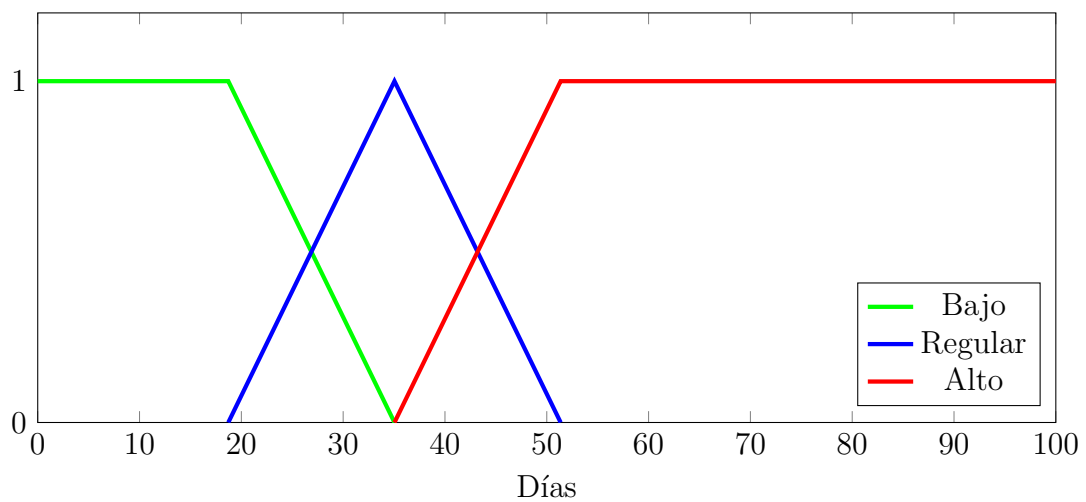
Variable	Gráfica	Etiqueta	Función	Parámetros
Gasto total anual	4.6a	Bajo	Trapezoidal	(319 796, 319 796, 322 702.29, 410 283.61)
		Regular	Triangular	(322 702.29, 410 283.61, 497 864.93)
		Alto	Trapezoidal	(410 283.61, 497 864.93, 497 865, 497 865)
Puntualidad	4.6b	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 0.25, 0.5)
		Regular	Triangular	(0.25, 0.5, 0.75)
		Alto	Trapezoidal	(0.5, 0.75, 1, 1)
Tiempo de entrega	4.5c	Bajo	Trapezoidal	(0, 0, 18.7, 35.0)
		Regular	Triangular	(18.7, 35.0, 51.4)
		Alto	Trapezoidal	(35.0, 51.4, 100, 100)



(a) Gasto total anual



(b) Puntualidad



(c) Tiempo de entrega

FIGURA 4.6: Funciones difusas del escenario 2

#### 4.3.3.3 REGLAS DIFUSAS

Para el presente modelo se han definido dos conjuntos de reglas: el primero para proveedores nuevos, es decir, aquellos que nunca han entregado material, aún y cuando ya hayan cotizado con anterioridad; y el segundo para proveedores existentes que ya han entregado material a la planta.

Para los proveedores nuevos se establecieron cuatro reglas (Tabla 4.16) mientras que para los proveedores existentes se consideraron 11 (Tabla 4.15). La principal diferencia entre ambos conjuntos reside en que para los proveedores nuevos no se evalúa la variable de puntualidad debido a que no tienen un historial de entregas del cual obtener el valor.

Las reglas se determinaron en primera instancia definiendo los valores lingüísticos de la variable de salida «Proveedor» («Bajo», «Regular» y «Alto») con las etiquetas lingüísticas de las respectivas variables de entrada (nueve para proveedores nuevos y 27 para proveedores existentes) y posteriormente se redujeron fusionando los criterios que se solapan. En las tablas 4.16 y 4.15 se muestra una regla por fila; las columnas representan las variables, y entre cada columna se usa un operador «Y»; las celdas en blanco pueden tomar cualquier valor para la variable que representan y aquellas con dos valores usan operador «O». En la Sección 4.3.2.3 se muestra un ejemplo de cómo se interpretarían las reglas propuestas.

TABLA 4.15: Reglas difusas a implementar en el modelo de selección de evaluación y selección de proveedores existentes en el escenario 2

#	Variables			Resultado
	Costo total	Puntualidad	Tiempo de entrega	Proveedor
1	Bajo o Regular	Baja	Bajo	Regular
2	Bajo o Regular	Regular o alta	Bajo	Alto
3	Alto	Bajo	Bajo	Bajo
4	Alto	Regular o Alta	Bajo	Regular
5	Bajo	Baja	Regular	Regular
6	Bajo o Regular	Regular	Regular o Alto	Regular
7	Bajo o Regular	Alta	Regular o Alta	Alto
8	Regular o Alto	Baja	Regular	Bajo
9	Alto	Alta	Regular o Alto	Bajo
10	Alto	Alta	Regular o Alto	Regular
11		Baja	Alto	Bajo

**Nota:** Los espacios en blanco pueden tomar cualquier valor entre Bajo, Regular o Alto en la variable de costo total.

TABLA 4.16: Reglas difusas a implementar en el modelo de selección de evaluación y selección de proveedores nuevos en el escenario 2

#	Variables		Resultado
	Costo total	Tiempo de entrega	Proveedor
1	Bajo o Regular	Bajo	Alto
2	Bajo o Regular	Regular	Regular
3	Bajo o Regular	Alto	Bajo
4	Alto		Bajo

**Nota:** Los espacios en blanco pueden tomar cualquier valor entre Bajo, Regular o Alto en la variable de costo total.

## 4.4 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se describieron los procedimientos necesarios para la implementación de un modelo de lógica difusa que permita evaluar y apoyar en la selección de proveedores dentro del proceso de NPI de una empresa de la industria HVAC. Dentro de las actividades desarrolladas se encontró la revisión de la literatura científica en la materia que permitió identificar los criterios de evaluación; posteriormente, mediante una encuesta a expertos se determinaron las variables o criterios a incluir en los dos modelos propuestas; como tercer paso se determinaron las funciones y reglas difusas de los modelos, las cuales se implementaron mediante Python con apoyo de una simulación computacional del proceso de Sourcing NPI.

Finalmente, se concluye el capítulo con dos propuestas o modelos que permitan evaluar proveedores en dos escenarios: un escenario que priorice la rapidez de implementación y otro donde se priorice el ahorro sin descuidar el tiempo de implementación.

En el siguiente capítulo se analizarán los datos obtenidos y se elaborarán las conclusiones correspondientes a los resultados.

## CAPÍTULO 5

# OBTENCIÓN DE RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

Este capítulo se divide en tres secciones principales. En la Sección 5.1 se presentarán los resultados obtenidos de la simulación en la que se evaluaron los cuatro proveedores (Tuberías ABC, Tuberías DEF, Tuberías GHI y Tuberías Súper) con base en el modelo de lógica difusa y se implementaron los ECNs con el proveedor mejor calificado según los objetivos de cada escenario. Posteriormente, en la Sección 5.2 se presentarán los resultados de la implementación de los ECN con otros métodos de adjudicación con el fin de establecer una comparación con el modelo de lógica difusa propuesto. Finalmente, en la Sección 5.3 se analizarán los resultados y se interpretarán con el fin de elaborar las conclusiones que se presentarán en el Capítulo 6.

### 5.1 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Como se mencionó en capítulos anteriores (secciones 3.5 y 4.3), el presente estudio propone un modelo de lógica difusa que puede adaptarse a los siguientes dos escenarios de evaluación y selección de proveedores, según las necesidades de la planta o la organización. El escenario 1 propone una configuración de reglas difusas que

priorizan la velocidad de implementación en relación a las variables «puntualidad», «tiempo de cotización» y «tiempo de entrega». El escenario 2 presenta un conjunto de reglas que priorizan un gasto anual bajo sin descuidar las variables de tiempo mencionadas anteriormente; este escenario de evaluación es ideal para proyectos en plantas con un alto volumen de producción donde una diferencia de centavos en los costos puede tener un impacto económico significativo.

La simulación de los escenarios 1 y 2 se iteró 100 veces con el fin de obtener datos estadísticamente significativos. Las tablas 5.2, 5.3 y 5.4 muestran los resultados estadísticos relevantes (media y desviación estándar) de las 100 iteraciones de cada escenario. También se muestra la moda de la etiqueta lingüística para cada proveedor y cada escenario.

La Gráfica 5.1 muestra las membresías activas para la variable de salida que representa el puntaje de la evaluación para cada proveedor en el Escenario 2. Se ha optado por presentar únicamente la gráfica de las membresías activas en lugar del agregado de las membresías, ya que ambas presentan la misma área activa (sombreado), pero la primera opción facilita distinguir las membresías identificadas por colores. En el caso del Escenario 1 no es posible obtener una gráfica que represente la evaluación global de cada proveedor mediante un gráfico de activación de membresías, ya que en los sistemas de lógica difusa las salidas provienen de la combinación no lineal de reglas difusas, por lo tanto las membresías no pueden promediarse (Nishanth *et al.*, 2024).

A continuación se resume el proceso de simulación del Escenario 1 con el fin de ilustrar esta restricción:

1. Se envía el RFQ al proveedor a partir de la fecha de liberación del ECN;
2. Cada evaluación se realiza una vez recibida la cotización tomando como referencia los resultados de las cotizaciones e implementaciones anteriores dentro de la misma iteración;

3. La simulación escoje si implementa los números de parte con el proveedor evaluado en base al resultado o si espera a recibir la propuesta de otro proveedor.

Las membresías se ven afectadas tras cada implementación con base en el rendimiento del proveedor y en total se ejecuta un máximo posible de 1,000 evaluaciones por proveedor (una por ECN por iteración) en el escenario 1. Esto no es una limitante para la generación de las gráficas del escenario 2 debido a que la evaluación de los proveedores ocurre antes de la implementación cuando ya se recibieron las propuestas de todos los proveedores, además que solo ocurren 100 evaluaciones por proveedor durante la ejecución de la simulación (una evaluación de los 10 ECNs en su conjunto por iteración) en el escenario 2, lo que disminuye la variabilidad en los niveles de las membresías como se muestra en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1: Variabilidad en los niveles de las membresías durante la simulación del escenario 2 representada mediante la desviación estándar de las reglas difusas

Regla	Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Tuberías Súper
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	N/A	N/A
6	0.0	0.0	N/A	N/A
7	0.002668	0.0	N/A	N/A
8	0.0	0.0	N/A	N/A
9	0.0	0.0	N/A	N/A
10	0.0	0.0	N/A	N/A
11	0.0	0.0	N/A	N/A

**N/A:** No aplica.

### 5.1.1 RESULTADOS DEL ESCENARIO 1

La Tabla 5.2 presenta los resultados de la implementación para el escenario 1.1 con los proveedores existentes (Tuberías ABC, Tuberías DEF y Tuberías GHI). La

Tabla 5.3 muestra los resultados incorporando al nuevo proveedor (Tuberías Súper) en el escenario 1.2. En ambas tablas se reportan los promedios ( $\mu$ ), desviaciones estándar ( $\sigma$ ) y la moda de la etiqueta lingüística ( $M$ ).

TABLA 5.2: Resultados de la implementación del escenario 1.1

Métricos		Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Totales
ECNs	$\mu$	4.3	3.2	2.5	<b>10</b>
	$\sigma$	1.88	1.83	1.20	<b>1.8</b>
Números de parte	$\mu$	16.6	11.8	9.6	<b>38</b>
	$\sigma$	7.43	6.93	5.28	<b>0.00</b>
Gasto cotizado	$\mu$	428,824.91	361,165.87	363,375.51	<b>384,455.43</b>
	$\sigma$	38,616.80	32,258.16	28,913.98	<b>45,864.43</b>
Gasto asignado	$\mu$	197,655.71	92,689.53	103,029.43	<b>393,374.67</b>
	$\sigma$	121,802.88	72,568.27	82,860.95	<b>40,844.58</b>
Calificación	$\mu$	5.94	6.11	5.67	<b>5.92</b>
	$\sigma$	0.76	1.24	1.24	<b>1.07</b>
	$M$	Implementar	Implementar	Implementar	<b>Implementar</b>
Cumplimiento	$\mu$	62.74 %	54.29 %	51.25 %	<b>55.50 %</b>
	$\sigma$	25.77 %	34.29 %	29.70 %	<b>8.80 %</b>

$\mu$  : Media.  $\sigma$  : Desviación estándar.  $M$  : Moda.

TABLA 5.3: Resultados de la implementación del escenario 1.2

Métricos		Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Tuberías Súper	Totales
ECNs	$\mu$	4.3	2.9	2.7	0.1	<b>10</b>
	$\sigma$	1.92	1.89	1.56	0.24	<b>0.00</b>
Números de parte	$\mu$	16.4	11.0	10.4	0.2	<b>38</b>
	$\sigma$	7.41	7.30	6.38	0.76	<b>0.00</b>
Gasto cotizado	$\mu$	425,168.47	361,149.06	361,148.91	357,297.53	<b>376,190.99</b>
	$\sigma$	35,431.11	29,831.10	30,639.32	29,988.37	<b>42,337.04</b>
Gasto asignado	$\mu$	96,894.51	99,593.49	194,928.74	144.35	<b>391,561.09</b>
	$\sigma$	85,251.54	90,997.83	116,974.97	588.26	<b>37,417.11</b>
Calificación	$\mu$	5.84	5.62	5.30	4.20	<b>5.27</b>
	$\sigma$	0.68	0.97	0.91	0.72	<b>1.04</b>
	$M$	Implementar	Implementar	Implementar	Esperar	<b>Implementar</b>
Cumplimiento	$\mu$	61.37 %	50.80 %	65.65 %	0.00 %	<b>57.60 %</b>
	$\sigma$	34.91 %	30.56 %	23.73 %	0.00 %	<b>9.96 %</b>

$\mu$  : Media.  $\sigma$  : Desviación estándar.  $M$  : Moda.

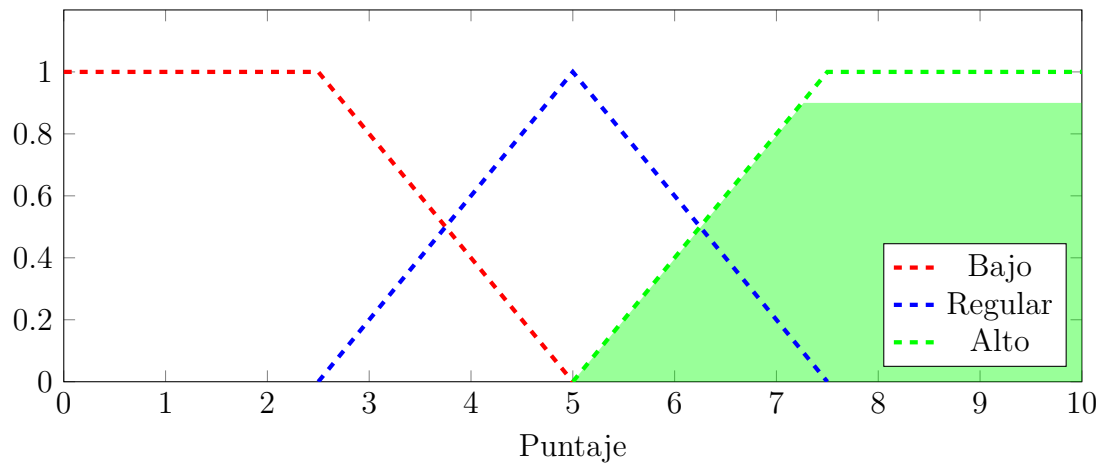
## 5.1.2 RESULTADOS DEL ESCENARIO 2

La Tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos al aplicar el Escenario 2. En este caso, el modelo evaluó a los proveedores bajo un enfoque orientado a minimizar el gasto anual. Se reportan los promedios, desviaciones estándar y la moda de la calificación. En la Subsección 3.5.2.1 se describen las etiquetas lingüísticas de la variable de salida «Calificación».

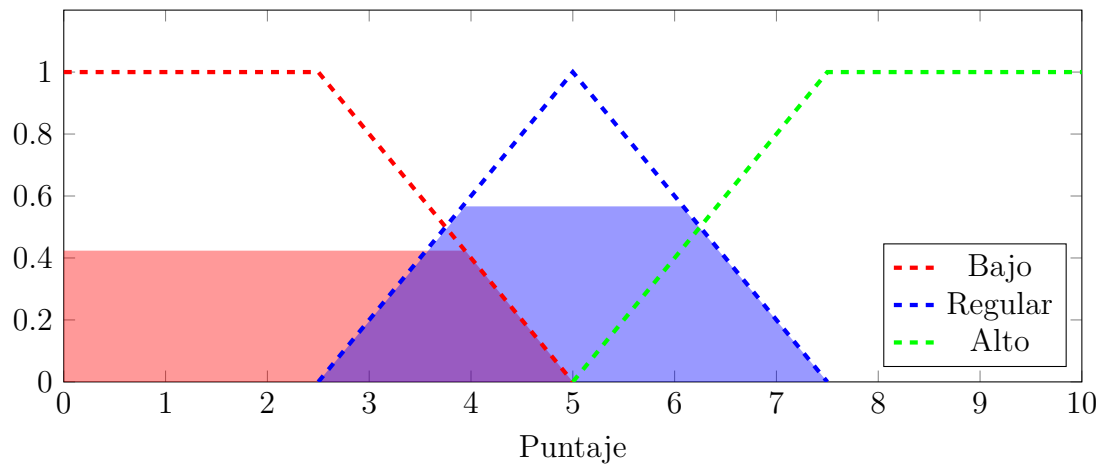
TABLA 5.4: Resultados de la implementación del escenario 2

Métricos		Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Tuberías Súper	Totales
ECNs	$\mu$	10	0	0	0	<b>10</b>
	$\sigma$	0	0	0	0	<b>0</b>
Números de parte	$\mu$	38	38	38	38	<b>38</b>
	$\sigma$	0	0	0	0	<b>0</b>
Gasto cotizado	$\mu$	427,411.07	360,527.04	362,652.30	356,339.65	<b>383,530.13</b>
	$\sigma$	40,162.29	29,373.33	30,612.95	29,340.04	<b>45,790.67</b>
Gasto asignado	$\mu$	427,411.07	0.00	0.00	0.00	<b>427,411.07</b>
	$\sigma$	40,162.29	0.00	0.00	0.00	<b>40,162.29</b>
Calificación	$\mu$	8.01	3.66	6.36	5.00	<b>5.76</b>
	$\sigma$	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
	$M$	Alto	Regular	Regular	Bajo	<b>Regular</b>
Cumplimiento	$\mu$	65.08 %	N/A	N/A	N/A	<b>65.08 %</b>
	$\sigma$	7.54 %	N/A	N/A	N/A	<b>7.54 %</b>

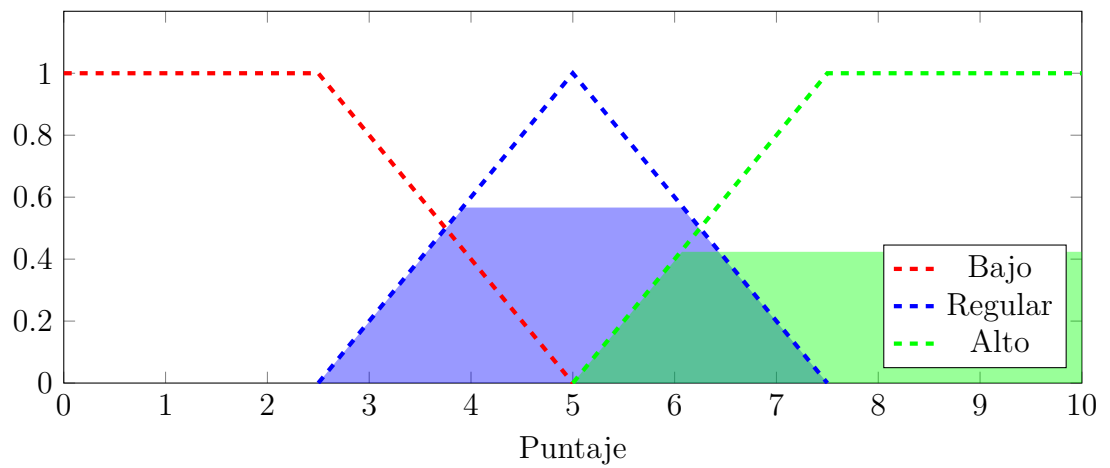
$\mu$  : Media.  $\sigma$  : Desviación estándar.  $M$  : Moda. N/A: No aplica.



(a) Tuberías ABC



(b) Tuberías DEF



(c) Tuberías GHI

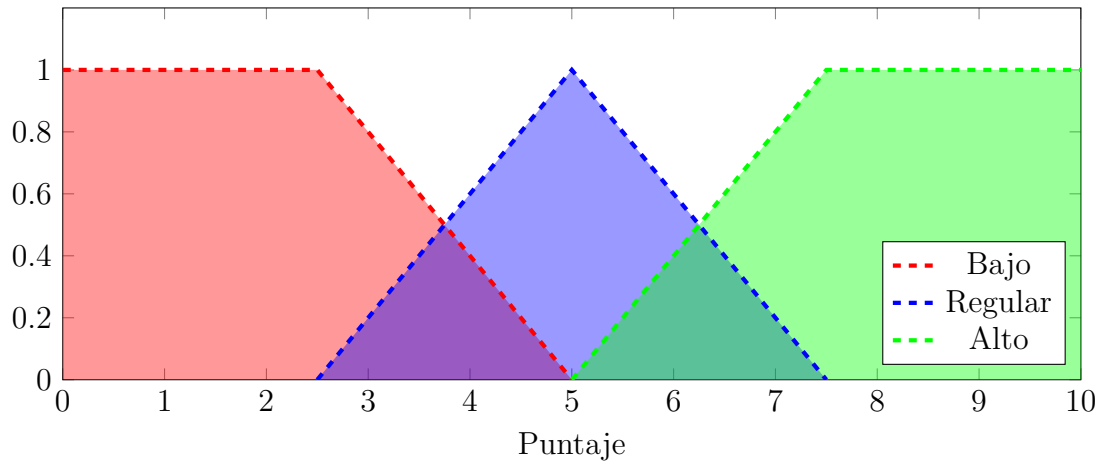
(d) **Tuberías Súper**

FIGURA 5.1: Membresías de los proveedores para la variable de salida (puntaje)

## 5.2 COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS DE SELECCIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la implementación de los 10 ECNs presentados en la Tabla 4.6 con otros métodos de adjudicación simulados con el objetivo de establecer una comparación con el modelo de lógica difusa propuesto.

### 5.2.1 IMPLEMENTACIÓN CON OTROS PROVEEDORES

La Tabla 5.5 muestra los resultados de la implementación siguiendo el procedimiento del Escenario 2. Los resultados de gasto anual y calificación son los mismos de la Tabla 5.4, sin embargo, en esta se incluyen los resultados del porcentaje de cumplimiento (OTD).

TABLA 5.5: Comparativa de resultados de la implementación con cada proveedor

Métricos		Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Tuberías Súper
ECNs	$\mu$	10	10	10	10
	$\sigma$	0	0	0	0
Números de parte	$\mu$	38	38	38	38
	$\sigma$	0	0	0	0
Gasto	$\mu$	427,411.07	361,747.68	355,911.82	361,991.06
	$\sigma$	40162.29	31453.32	31206.20	30885.59
Calificación	$\mu$	8.01	3.66	6.36	5.00
	$\sigma$	0	0	0	0
	$M$	Alto	Regular	Regular	Bajo
Cumplimiento	$\mu$	65.08 %	57.63 %	55.74 %	66.47 %
	$\sigma$	7.54 %	10.55 %	10.20 %	9.24 %

$\mu$  : Media.  $\sigma$  : Desviación estándar.  $M$  : Moda.

### 5.2.2 ADJUDICACIÓN ALEATORIA UNIFORME

La implementación mediante adjudicación aleatoria uniforme tiene el objetivo de obtener un punto de referencia del porcentaje de cumplimiento si se asignaran los ECNs de forma aleatoria sin seguir ninguna regla o política y sin el uso del modelo de lógica difusa. La Tabla 5.6 muestra los resultados promedios y desviaciones estándar para cada proveedor.

TABLA 5.6: Resultados de la implementación por adjudicación aleatoria uniforme

Métricos		Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Tuberías Súper	Totales
ECNs	$\mu$	2.35	2.71	2.19	2.75	<b>2.5</b>
	$\sigma$	1.23	1.48	1.24	1.31	<b>1.33</b>
Números de parte	$\mu$	8.6	10.6	8.0	10.7	<b>38</b>
	$\sigma$	4.73	6.33	4.82	5.18	<b>0</b>
Gasto	$\mu$	85,722.63	105,925.32	75,346.43	105,071.67	<b>372,066.05</b>
	$\sigma$	75,083.69	85,251.33	66,952.78	68,431.97	<b>36,008.37</b>
Calificación	$\mu$	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	$\sigma$	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	$M$	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cumplimiento	$\mu$	47.85 %	48.63 %	42.58 %	57.24 %	<b>49.08 %</b>
	$\sigma$	33.34 %	34.23 %	35.52 %	34.56 %	<b>34.69 %</b>

$\mu$  : Media.  $\sigma$  : Desviación estándar.  $M$  : Moda. N/A: No aplica.

La fila de calificación se muestra como «N/A» en los cuatro proveedores debido a que en este análisis no se realizaron evaluaciones mediante el modelo de lógica difusa, solamente se compararon los resultados de implementación.

### 5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las subsecciones siguientes se interpretan los resultados expuestos en las secciones anteriores. Se comparan las métricas clave (número de ECNs asignados, porcentaje de cumplimiento, gasto anual y calificación) entre escenarios y métodos de adjudicación y se discuten las implicaciones para el proceso de selección de proveedores en proyectos NPI.

Dado el elevado número de observaciones en cada simulación (entre 11,400 y 15,200 registros), el análisis se basa en comparaciones de medias y desviaciones estándar sin recurrir a pruebas de varianza como el ANOVA (Análisis de Varianza, por sus siglas en inglés).

### 5.3.1 ANÁLISIS DEL ESCENARIO 1

El Escenario 1, orientado a la rapidez de implementación, presenta dos configuraciones. En el subescenario 1.1, Tuberías ABC recibe en promedio 4.3 ECNs, mientras que Tuberías DEF y Tuberías GHI reciben 3.2 y 2.5 ECNs, respectivamente. Las tasas de cumplimiento muestran que Tuberías ABC obtiene 62.74 %, Tuberías DEF 54.29 % y Tuberías GHI 51.25 %, situando el promedio general en 55.50 %; la calificación resultante para los tres proveedores es similar (5.94, 6.11 y 5.67) y la etiqueta lingüística recomendada es «Implementar» en todos los casos. Aunque Tuberías DEF obtiene la calificación promedio más alta, la diferencia con Tuberías ABC es mínima ( $\Delta = 0.17$ , equivale a 2.78 %) y su variabilidad es mayor; por ello, el modelo selecciona en la práctica con mayor frecuencia a Tuberías ABC, que ofrece un desempeño más estable en puntualidad y tiempos, a pesar de su mayor costo (Tabla 4.5).

Los resultados también muestran que Tuberías ABC acumula tanto el mayor gasto asignado (197,655.71 USD) como cotizado (428,824.91 USD) en comparación a los 92,689.53 USD y 361,165.87 USD de Tuberías DEF, y los 103,029.43 USD y 363,375.51 USD de Tuberías GHI.

En el subescenario 1.2 se incorpora Tuberías Súper como proveedor nuevo. La asignación promedio se redistribuye: Tuberías ABC recibe 4.3 ECNs, Tuberías DEF 2.9, Tuberías GHI 2.7 y Tuberías Súper apenas 0.1 ECNs. La tasa de cumplimiento de Tuberías GHI aumenta a 65.65 %, superando a Tuberías ABC (61.37 %) y a Tuberías DEF (50.80 %). Esta diferencia en el cumplimiento entre los subescenarios 1.1 y 1.2 se debe a la naturaleza estocástica de la simulación para el Escenario 1; Tuberías Súper, al haber implementado un número insignificante de ECNs, registra 0 % de cumplimiento. Pese a poseer un perfil deseable (precios bajos y alta puntualidad), la calificación media de Tuberías Súper es 4.20 y la moda de la etiqueta lingüística obtenida es “Esperar”. Esta situación se debe a la ausencia de datos históricos sobre su desempeño: el modelo penaliza a los proveedores sin antecedentes, de modo que

la calificación depende exclusivamente de reglas difusas que no consideran la puntualidad. En contraste, Tuberías GHI se beneficia de su incremento en cumplimiento a pesar del mayor gasto unitario, lo que evidencia la sensibilidad del modelo a la puntualidad cuando existen registros previos.

En cuanto al gasto, Tuberías ABC posee el mayor gasto cotizado (425,168.47 USD), sin embargo, Tuberías GHI acumula el mayor gasto asignado (194,928.74) a pesar que posee un perfil de precios bajos y una cantidad de números de parte menor en relación a Tuberías ABC. Esto puede deberse a que se implementaron números de parte de mayor complejidad con este proveedor, siendo que la simulación está programada para asignar de forma aleatoria tres niveles de complejidad que afectan el precio del número de parte. Tuberías Súper posee el menor gasto cotizado (357,297.53 USD) y el menor gasto asignado (29,988.37 USD) debido a la baja cantidad de ECNs adjudicados a este proveedor.

### 5.3.2 ANÁLISIS DEL ESCENARIO 2

El Escenario 2, enfocado en minimizar el gasto anual, arroja resultados deterministas: la lógica difusa asigna los 10 ECNs a Tuberías ABC, dejando sin adjudicación a los demás proveedores. La tasa de cumplimiento asociada a esta estrategia es de 65.08% con una desviación estándar de 7.54%, y el gasto anual asciende a 427,411.07 USD. La calificación de Tuberías ABC (8.01) corresponde a la etiqueta “Alto”, mientras que las de Tuberías DEF (3.66), Tuberías GHI (6.36) y Tuberías Súper (5.00) se ubican en las categorías “Regular” o “Bajo”, lo que justifica que no se les asignen ECNs. Es importante señalar que, aunque Tuberías DEF y Tuberías Súper ofrecen costos anuales menores (alrededor de 361,000 USD), su calificación se ve afectada por la variable de puntualidad o por la falta de antecedentes; la estrategia adoptada maximiza la confiabilidad pero sacrifica el ahorro potencial.

Sobre la variabilidad en los niveles de membresía de la evaluación difusa, la

Tabla 5.1 muestra que la desviación estándar en los niveles de activación de las reglas difusas es 0, lo que indica que se han obtenido los mismos resultados en las 100 iteraciones de la simulación, con excepción de la regla 7 del proveedor Tuberías ABC que muestra una ligera variación ( $\sigma = 0.002668$ ). También se han observado variaciones insignificantes ( $\sigma = < 1 \times 10^{-16}$ ) en los niveles de las reglas 5 y 6 de Tuberías DEF y en las reglas 1 y 2 de Tuberías GHI atribuibles a redondeos, sin embargo, por la naturaleza de números de doble precisión de Python se han considerado estas desviaciones estándar iguales a cero. Adicionalmente se muestra «N/A» en las reglas del 5 al 11 de los proveedores Tuberías GHI y Tuberías Súper debido a que el modelo evaluó a ambos proveedores como nuevos en base a la reglas difusas presentadas en la Sección 4.3.3.3 (Tabla 4.15). Si bien Tuberías GHI es un proveedor existente, los datos previos al proyecto Juneau solo contienen cotizaciones mas no habían estadísticas de implementación previas, por lo tanto se aplicaron las reglas difusas que no hacían uso de la variable puntualidad.

### 5.3.3 COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS DE ADJUDICACIÓN

Para contextualizar el desempeño del modelo propuesto, se simularon dos métodos adicionales. En la adjudicación de la Sección 5.2.1 (implementación con otros proveedores) se asignan los 10 ECNs a un único proveedor utilizando el mismo procedimiento del Escenario 2. Como resultado, Tuberías Súper alcanzaría la mayor tasa de cumplimiento (66.47%) con un gasto anual mucho menor (361,991.06 USD), superando incluso a Tuberías ABC. Sin embargo, su calificación de 5.00 lo coloca en la categoría “Bajo”, por lo que el modelo lo descarta. Este resultado muestra la limitación de la lógica difusa cuando un proveedor carece de registros previos suficientes: se necesita un periodo de calentamiento (*warm-up*) para acumular suficientes observaciones, como se explica más adelante en la Sección 6.3. Por otro lado, Tuberías DEF y Tuberías GHI logran cumplimientos de 57.63% y 55.74%, respectivamente, con gastos anuales intermedios.

En la adjudicación aleatoria uniforme (Sección 5.2.2), donde los ECNs se asignan sin reglas ni evaluaciones difusas, el cumplimiento global promedio desciende a 49.08 %, es decir, 15.99 % menos que el alcanzado en el Escenario 2 y 8.51 % menos que en el escenario 1.2. Aunque el gasto total promedio (372,066.05 USD) es ligeramente inferior, la desviación estándar en el gasto individual por proveedor es mayor. Esta comparación evidencia que el modelo propuesto mejora significativamente el desempeño en términos de cumplimiento y proporciona una asignación más equilibrada en costos frente a una asignación aleatoria.

## 5.4 CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentaron los resultados de las simulaciones aplicadas al modelo de lógica difusa propuesto y se ha discutido su desempeño frente a otros métodos de adjudicación. El análisis ha evidenciado las ventajas de la lógica difusa en términos de cumplimiento y consistencia.

En el siguiente capítulo se presentarán las conclusiones de la investigación, así como las recomendaciones para mejorar la herramienta y orientar futuras investigaciones.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES

---

Esta investigación tuvo el objetivo de proponer una herramienta de evaluación y selección de proveedores confiable y objetiva con el propósito de contribuir a la toma de decisiones y a la mejora de la cadena de suministro dentro del proceso de desarrollo de producto, particularmente mediante la mejora en el métrico de entregas a tiempo y cumplimiento de los tiempos para la implementación de los proyectos de NPI. Para lograr este propósito, la metodología del estudio se dividió en tres etapas. La primera fue una revisión sistemática de literatura siguiendo la metodología PRISMA. En la segunda etapa se realizó una encuesta a los tomadores de decisión dentro de la empresa objeto de estudio con el fin de identificar los criterios relevantes a integrar en el modelo de lógica difusa. Finalmente, la tercer etapa comprendió el desarrollo y la aplicación del modelo de lógica difusa mediante una simulación computacional del proceso de *sourcing* NPI.

En este capítulo se presentarán los hallazgos, las aportaciones y limitaciones encontradas durante el desarrollo de la investigación. Así mismo, también se presentarán recomendaciones a considerar en futuras investigaciones.

## 6.1 HALLAZGOS

A continuación se comparten las conclusiones de los hallazgos encontrados en la presente investigación.

### 6.1.1 MÉTODOS MULTICRITERIO

La evaluación y selección de proveedores es un problema complejo debido a su naturaleza multicriterio en la que los criterios representan objetivos a cumplir (precio  $\rightarrow$  reducción de costos; calidad  $\rightarrow$  reducción de hallazgos; cumplimiento  $\rightarrow$  evitar paros de línea, entre otros ejemplos) que muchas veces pueden ser contradictorios (De Almeida, 2013).

La revisión de literatura ha permitido identificar los siguientes cinco principales métodos multicriterio utilizados en la evaluación y selección de proveedores (Tabla 2.4), de los cuales destacan los siguientes:

1. AHP
2. Fuzzy TOPSIS
3. SMARTER
4. Lógica difusa
5. Best-Worst

Sin embargo, el estudio optó por utilizar la lógica difusa, clasificada en cuarto lugar, debido a su capacidad de trabajar con incertidumbre y emular la cognición humana en el proceso de análisis de las variables difusas (Zadeh, 1965; Singh *et al.*, 2013). Este método se utilizó mediante el desarrollo de un modelo en Python (A)

### 6.1.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PROVEEDORES

La revisión sistemática de la literatura reciente permitió identificar 41 criterios de evaluación y selección de proveedores, de los cuales se destacan los siguientes cinco por ser los que cuentan con la mayor cantidad de menciones en los documentos consultados (Tabla 2.2). En el Apéndice B se pueden consultar todos los criterios identificados agrupados por categorías.

1. Precio
2. Calidad
3. Tiempo de entrega
4. Puntualidad
5. Reputación del proveedor

Mediante una encuesta a expertos se identificaron los criterios considerados relevantes por los tomadores de decisión en el departamento de *Sourcing* NPI de la empresa objeto de estudio, los cuales se integraron en el modelo de lógica difusa propuesto. La lista de los criterios incluidos son los siguientes:

- Precio
- Tiempos de entrega
- Cumplimiento

En el Apéndice D se pueden consultar los resultados de la encuesta.

### 6.1.3 EVALUACIÓN DE PROVEEDORES MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

Los resultados presentados en el Capítulo 5 han mostrado que el modelo de evaluación de lógica difusa permite obtener entre un 55 % a un 65 % de cumplimiento (OTD) en la implementación del proyecto. Este porcentaje es bajo para los estándares del proyecto que considera como un buen rendimiento por encima del 90 %, sin embargo, el resultado obtenido es superior a los métricos observados en la empresa de estudio (en promedio del 30 %). Es importante mencionar que el modelo de lógica difusa está sujeto a las limitaciones que se mencionan en la Sección 6.3.

## 6.2 APORTACIONES

La aportación principal del presente trabajo de investigación es un modelo de lógica difusa que puede emplearse en la evaluación y selección de proveedores, no solo en el contexto de la empresa de estudio, sino en cualquier otra industria mediante la modificación de las reglas difusas y los parámetros de los criterios. El modelo de simulación utilizado en esta investigación también constituye una aportación relevante que puede utilizarse para reproducir los resultados del estudio o que puede implementarse en trabajos de otros investigadores o tesistas. Ambos modelos son de código abierto y pueden consultarse en el repositorio de GitHub escaneando el código QR de la Figura A.2a (Apéndice A).

Como aportación secundaria, la revisión sistemática de literatura identificó y consolidó los criterios relevantes para la evaluación y selección de proveedores en documentos académicos de publicación reciente que pueden ser utilizados para guiar futuras investigaciones.

## 6.3 LIMITACIONES

A continuación se presentarán las limitaciones que se encontraron en el desarrollo del presente estudio con el fin de que futuros investigadores puedan tomarlas en consideración para el desarrollo de sus trabajos.

### 6.3.1 DATOS SIMULADOS

Los resultados de la presente investigación provienen de una simulación basada en parámetros estadísticos del entorno real para una planta específica de la empresa objeto del estudio. Se optó utilizar datos simulados debido a la confidencialidad de la información de la empresa y a la restricción del tiempo en cuanto a la obtención de resultados en el entorno real descrita en la Sección 3.6.

La desviación estándar nula de la Tabla 5.1 muestra que la simulación se comportó de forma determinística para el Escenario 2. Las tablas 5.2 y 5.3 muestran un comportamiento estocástico para el Escenario 1.

En el entorno real la variabilidad en ambos casos puede aumentar debido a factores externos no modelados en la simulación, por ejemplo, restricciones de capacidad, imprevistos logísticos, retrasos en los procesos de otros departamentos de la empresa, entre otros.

### 6.3.2 CRITERIOS LIMITADOS

El modelo de evaluación se construyó con tres criterios básicos cuantitativos (gasto total, tiempo de entrega y puntualidad) más el criterio de urgencia en el caso de Escenario 1. Se omiten otros criterios cualitativos o cuantitativos que podrían afectar la configuración de las reglas difusas o la clasificación de los proveedores.

### 6.3.3 REGISTROS HISTÓRICOS LIMITADOS

El modelo requiere de datos históricos del desempeño del proveedor, principalmente precios, tiempos de entrega y puntualidad, para realizar una evaluación precisa. Esta limitante es propia de sistemas que trabajan con parámetros estadísticos (Robinson, 2004).

Un ejemplo de esto se observa en las tablas 5.3 y 5.4 de los resultados de los escenarios 1 y 2 en la que el proveedor Tuberías Súper (completamente nuevo y sin antecedentes) obtiene una calificación baja a pesar de tener un perfil deseable (Tabla 4.5). La Gráfica 6.1 muestra la cantidad de ECNs adjudicados a cada proveedor en el Escenario 1 por fecha de liberación de ECN. Se observa que en un transcurso de ocho meses se adjudicaron los 10 ECNs; en promedio, el modelo no asignó ningún ECN a Tuberías Súper durante este periodo, mientras que el resto de proveedores obtuvieron la asignación de su primer ECN en los primeros tres meses.

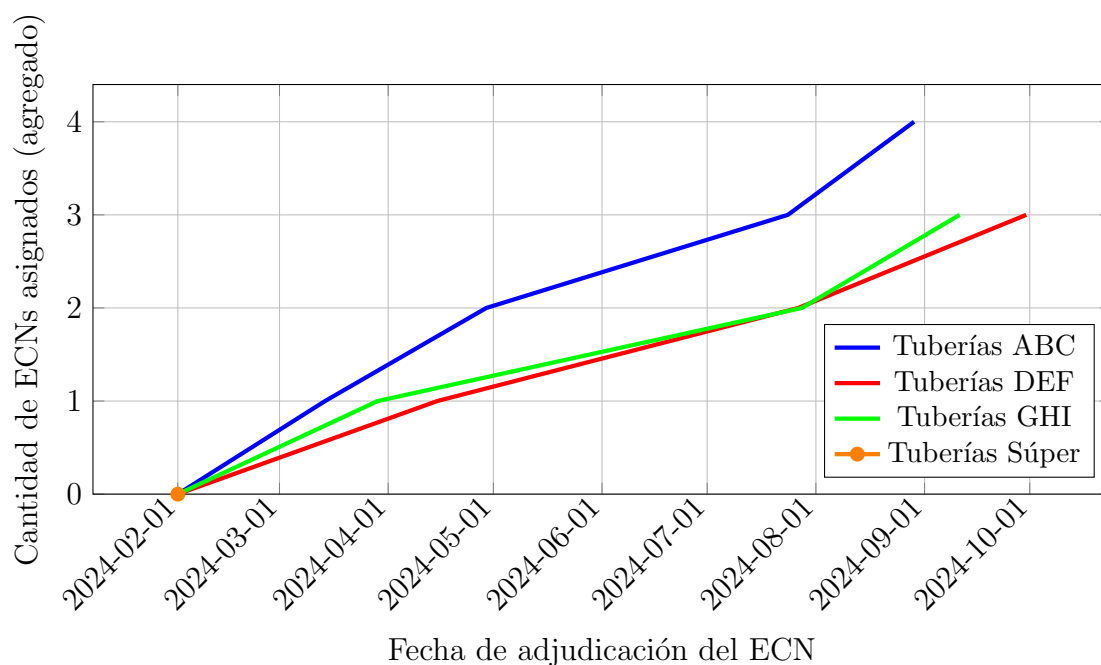
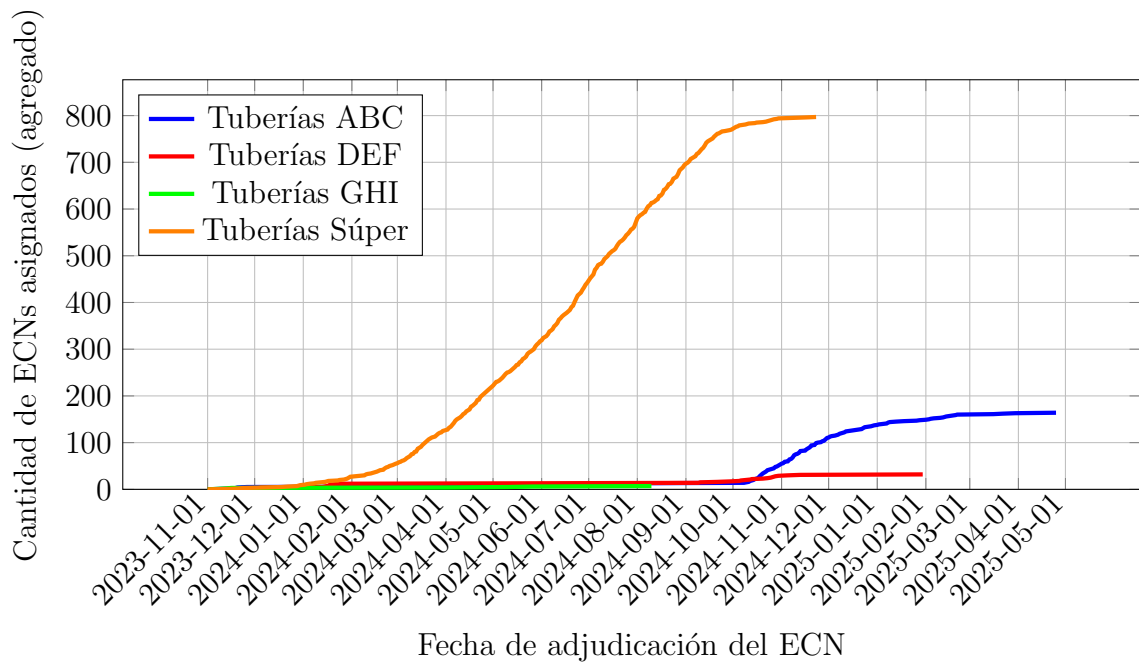


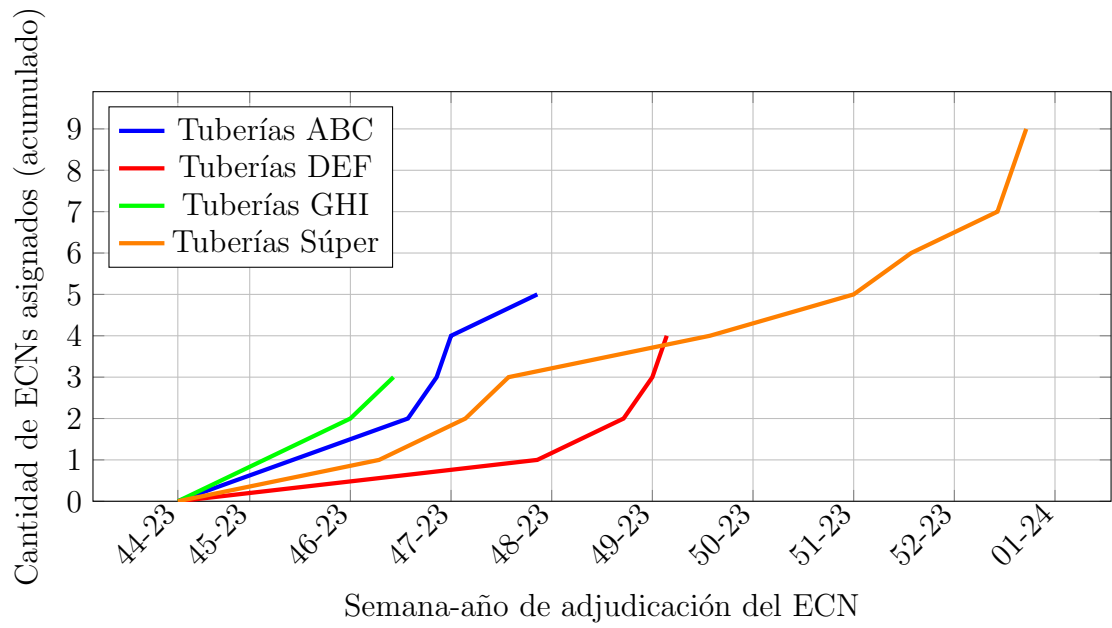
FIGURA 6.1: Serie de tiempo de adjudicación de los ECNs a los proveedores del Escenario 1

### 6.3.4 PERIODO DE CALENTAMIENTO

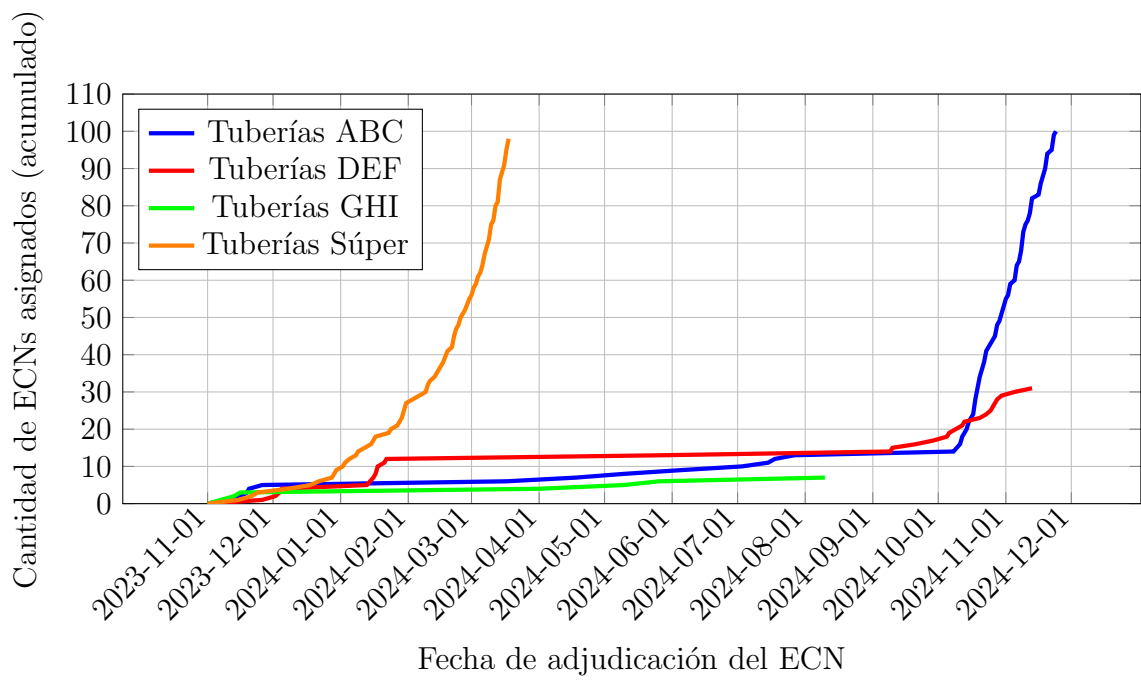
Se realizó una tercera simulación en la que se incrementó la cantidad de ECNs a implementar a 1,000. Es importante mencionar que esta cantidad de ECNs no se observa en el desarrollo de un solo proyecto en el entorno real, sin embargo, permite comparar el funcionamiento del modelo cuando se tiene una cantidad suficiente de antecedentes. La Gráfica 6.2 muestra los resultados de esta simulación.



(a) Serie de tiempo completa



(b) Adjudicación en los primeros dos meses del proyecto



(c) Tiempo de adjudicación de los primeros 100 ECNs de cada proveedor

FIGURA 6.2: Serie de tiempo de adjudicación de 1,000 ECNs

La Gráfica 6.2a muestra la serie de tiempo completa en la que se observa que la simulación está sujeta a un periodo de calentamiento (*warm-up*) en el que se generan los antecedentes estadísticos suficientes para que el modelo de lógica difusa pueda realizar una evaluación adecuada, el cual tomó 11 meses y comprendió la evaluación del rendimiento de los proveedores en 937 ECN (Gráfica 6.3). Se aprecia que al término del periodo de calentamiento la cantidad de ECNs asignados a Tuberías ABC aumenta y posteriormente se estabiliza, al igual que la cantidad de ECNs asignados a Tuberías Súper.

La Gráfica 6.2b muestra la serie de tiempo de la adjudicación de ECNs en los primeros dos meses desde el inicio de la liberación de los primeros ECNs. Se observa que la simulación, utilizando el modelo de lógica difusa para evaluar a los proveedores, asigna los primeros dos ECNs a Tuberías GHI y Tuberías ABC en la segunda semana (semana 45 de 2023) a partir del envío de las primeras solicitudes de cotización; Tuberías Súper obtiene el primer ECN adjudicado en la tercera semana (semana 46 de 2023) y Tuberías DEF a finales del primer mes (semana 47 de 2023). Durante este periodo de dos meses, Tuberías ABC obtiene un máximo de cinco ECNs a cuatro semanas de comenzar las licitaciones (semana 47 de 2023) mientras que a Tuberías Súper le tomó siete semanas en alcanzar la misma cantidad de ECNs (semana 51 de 2023); Tuberías DEF obtuvo un máximo de cuatro ECNs y Tuberías DEF tres. Sin embargo, es a partir de la semana 49 de 2023 cuando Tuberías Súper comienza a obtener la mayor parte de los 1,000 ECNs, como se muestra en la Gráfica 6.2a.

La Gráfica 6.2c muestra la serie del tiempo que le tomó a cada proveedor recibir la asignación de sus primeros 100 ECNs. Se observa que a Tuberías ABC le tomó 13 meses mientras que a Tuberías Súper le tomó cinco meses. Tuberías DEF y Tuberías GHI obtuvieron solamente 32 y siete ECNs respectivamente durante todo el periodo simulado.

TABLA 6.1: Resultados de la simulación de 1,000 ECNs para la prueba de calentamiento (*warm-up*) del modelo

Métricos		Tuberías ABC	Tuberías DEF	Tuberías GHI	Tuberías Súper	Totales
ECNs		164	32	7	797	1,000
Números de parte		540	110	26	2,848	3,524
Gasto cotizado	$\mu$	70,377,761.07	59,106,655.52	59,006,896.61	59,657,734.96	62,037,262.04
	$\sigma$	0.00	0.00	0.00	0.00	5,567,693.79
Gasto asignado		12,083,684.48	2,094,397.73	405,482.72	47,290,653.21	61,874,218.14
Cumplimiento		6.11 %	39.09 %	100.00 %	68.05 %	57.87 %

$\mu$  : Media.  $\sigma$  : Desviación estándar.  $M$  : Moda.

La Tabla 6.1 muestra los resultados de la simulación con 1,000 ECNs. Es importante recordar que esta última simulación no forma parte del experimento central del presente trabajo ya que tuvo el objetivo de probar el calentamiento del modelo, debido a que la cantidad y frecuencia de ECNs generados por la simulación no representan los patrones de un proyecto de NPI real. También es importante mencionar que esta última simulación se realizó con una sola iteración debido a la restricciones de tiempo de cómputo y memoria RAM, por lo que los resultados mostrados en la Tabla 6.1 no son estadísticamente significativos.

El aumento en la selección de Tuberías Súper puede ser explicado por el incremento en los antecedentes tanto de cotizaciones como de implementación. La Gráfica 6.3 muestra la distribución de la liberación de ECNs en la simulación original en comparación de esta última en la cual se observa que desde los primeros meses las cantidades de la simulación de prueba de calentamiento son superiores a las de la simulación original, lo que permite obtener en menor tiempo una mayor cantidad de datos respecto al rendimiento de los proveedores.

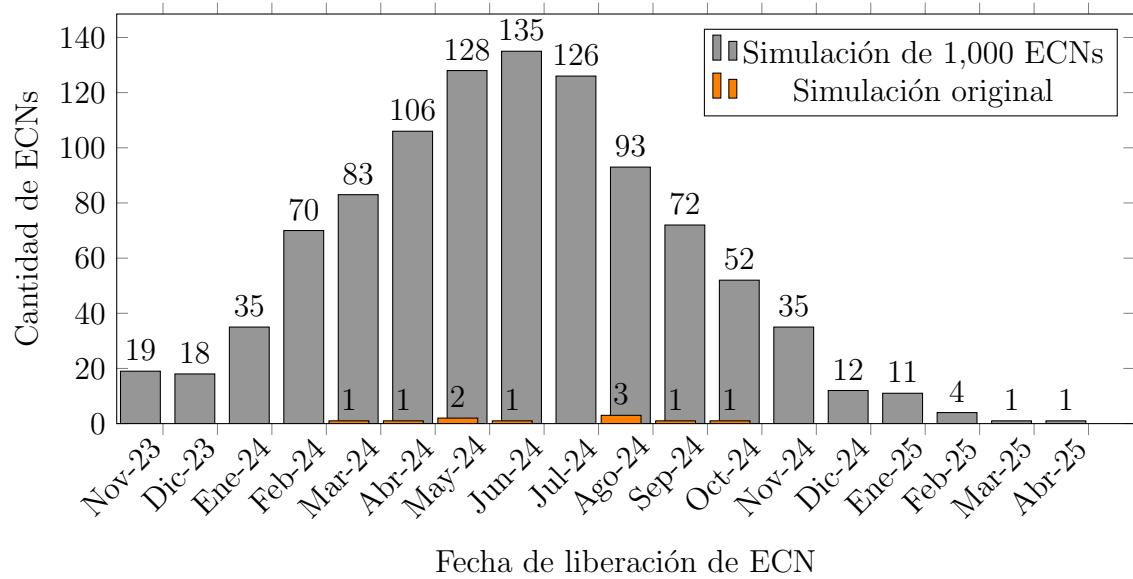


FIGURA 6.3: Histograma de liberación de ECNs

## 6.4 TRABAJO FUTURO

A continuación se presentan recomendaciones que pueden ser de utilidad para guiar futuras investigaciones en la evaluación y selección de proveedores.

### 6.4.1 APLICACIÓN EN UN ENTORNO REAL

Aplicar el modelo de lógica difusa propuesto en un entorno real, dentro de una empresa de la industria HVAC o en cualquier otro tipo de industria realizando las adecuaciones pertinentes en las reglas difusas.

### 6.4.2 ENFOQUE ESTRATÉGICO

El modelo propuesto pretende ser auxiliar en el proceso de toma de decisiones a un nivel operativo-táctico cuyo efecto y ejecución son inmediatas o a mediano plazo. Se recomienda evaluar cuales son los criterios que intervienen en el proceso de abastecimiento estratégico debido a la tendencia de la industria en centralizar esta actividad de la cadena de suministro en un *sourcing* global.

### 6.4.3 USO DE CRITERIOS ALTERNATIVOS

El presente trabajo hizo uso de criterios tradicionales de evaluación de proveedores (precio, calidad, entrega, entre otros). A pesar de no haberlo documentado en el estudio, la revisión de literatura realizada permitió descubrir una evolución hacia el uso de los criterios de RSE o ESG. Una recomendación para trabajos futuros es adaptar el modelo propuesto para utilizar criterios de sostenibilidad, sin embargo, es importante considerar que algunos de estos criterios son cualitativos y habría que desarrollar una forma de cuantificarlos o desarrollar un nuevo modelo que haga uso de las variables lingüísticas propuestas por Zadeh (1973).

## APÉNDICE A

# SIMULACIÓN

---

En este capítulo se presenta la documentación técnica del modelo de simulación y lógica difusa utilizado en el presente estudio. El módulo provee las clases necesarias para simular el proceso de *sourcing* NPI para tuberías de cobre en la industria HVAC, desde la etapa de *Design Freeze* (P2) hasta el inicio de la producción (P4) y realizar la evaluación de proveedores mediante lógica difusa.

El estudio optó por utilizar una simulación en lugar de la implementación en el entorno real debido a las siguientes restricciones:

1. Tiempo de implementación: La implementación de un proyecto de NPI suele tomar de dos a tres años desde su fase de desarrollo (Pre-P0) hasta su fase de implementación (P4). El uso de una simulación permite evaluar el modelo propuesto en un menor tiempo Robinson (2004).
2. Confidencialidad: Los datos requeridos para implementar y validar el modelo de lógica difusa en el entorno real pueden ser sujetos de confidencialidad, por lo que el uso de una simulación permite generar datos pseudoaleatorios similares utilizando los parámetros estadísticos del entorno real.

## A.1 ENTORNO DE EJECUCIÓN

La simulación se modeló utilizando el lenguaje de programación Python mediante el paradigma orientado a objetos (POO). La Tabla A.1 describe las características técnicas de los equipos de cómputo utilizados en el desarrollo y ejecución del modelo. Ambos equipos cuentan con especificaciones similares; la alternancia de su uso se encontró relacionado con las necesidades de movilidad sin que esto afectara los resultados de la simulación, ya que el código y los datos de entrada y salida se encontraban sincronizados mediante GitHub (Figura A.2a).

TABLA A.1: Equipos de cómputo utilizados en la implementación y validación mediante simulación

Descripción	Equipo 1	Equipo 2
<b>Tipo</b>	Laptop	Tablet
<b>Marca y modelo</b>	Apple Macbook Pro 2021	Dell Latitude 5290 2-in-1
<b>Sistema operativo</b>	macOS Sequoia 15.6.1	Fedora Linux 42 (Workstation Edition)
<b>Versión del núcleo</b>	24.6.0	6.16.5
<b>Especificaciones técnicas</b>	Procesador Apple M1 Pro (ARM) de 8 núcleos 3.2GHz y 16GB de memoria unificada (RAM)	Procesador Intel Core i7 de 8 núcleos 4.2 GHz (x86_64) y 16GB de memoria RAM
<b>Entorno Python</b>	Python 3.11.16 IPython 8.24.0	Python 3.13.5 IPython 9.3.0
<b>Uso</b>	Trabajo en casa	Trabajo fuera de casa

## A.2 PROCESO DE SIMULACIÓN

La Figura A.1 muestra el proceso simplificado de NPI en el entorno real desde el punto de vista del departamento de *Sourcing*.

El modelo de simulación permite generar los valores relacionados con este proceso que son evaluados directamente por el modelo de lógica difusa (tiempos de



cotización, tiempos de entrega y precios de los materiales) o que influyen en el cumplimiento del OTD (tiempos de liberación de ECNs, tiempos envío de RFQ, tiempos de aprobación de ISIR (*Initial Sample Inspection Report*, por sus siglas en inglés) y PPAP, tiempos de carga de contratos, entre otros).

## A.3 ESTRUCTURA DEL CÓDIGO

El código de la simulación cuenta con tres archivos importantes:

- `simulation.py` provee las clases y métodos necesarios para simular el proceso de NPI. Este módulo contiene las siguientes dependencias para su funcionamiento: `datetime`, `dotenv`, `os`, `statistics`, `random`, `numpy` y `pandas`.
- `fuzzy_supplier_evaluator.py` provee el modelo de lógica difusa que posteriormente se integra con la simulación. Este módulo contiene las siguientes dependencias para su funcionamiento: `logging`, `math`, `matplotlib`, `numpy`, `pandas`, `simulation` (módulo descrito en este capítulo) y `skfuzzy`.
- `implementation.ipynb` contiene el código de ejecución de la simulación y su integración el modelo de lógica difusa. Esta libreta Jupyter hace uso de las siguientes librerías: `datetime`, `fuzzy-supplier-evaluator` (módulo descrito en este capítulo), `pandas`, `simulation`, `statistics` y `threading`.

### A.3.1 CLASES

A continuación se describen los atributos y métodos de cada clase en el archivo `simulation.py` y `fuzzy-supplier-evaluator.py`. Se recomienda revisar directamente los comentarios `docstring` en el código de la simulación para más información (Figura A.2). Las clases son presentadas en orden alfabético.

### A.3.1.1 ECN

Esta clase representa un ECN como un conjunto de números de parte.

#### Atributos

- `instances` (`int`): Contador de los objetos creados con clase `ECN`. Este atributo es global.
- `project` (`Project`): Proyecto relacionado al ECN.
- `ecn_id` (`str`): ID del ECN. Se genera automáticamente concatenando el prefijo «ECN» y el contador `instances`.
- `ecn_date` (`date`): Fecha de liberación de ECN.
- `items` (`list`): Lista de los números de parte liberados en este ECN.
- `quotations` (`list`): Lista de las cotizaciones recibidas al momento de este ECN.
- `readiness` (`dict`): Diccionario del cumplimiento del ECN en las diferentes etapas del proyecto (MCS, piloto y SOP). El diccionario contiene las siguientes claves: *MCS ready*, *Pilot ready* y *SOP ready*; toman valores *booleanos*, `False` por defecto.
- `status` (`str`): Estatus del ECN en las distintas fases del proyecto. Puede tomar los siguientes valores: *Under review*, *Engineering release* y *Release for production*. El valor por defecto es *Under review* (en revisión).

#### Métodos

- `display_as_df()`: Retorna un `DataFrame` conteniendo la información de las siguientes columnas: proyecto, ECN, fecha de ECN, número de parte, complejidad y EAU.

- `reset()`: Reinicia el estatus del ECN a *Under review* y borra la lista de cotizaciones.

El objeto puede ser creado llamando la clase de la siguiente forma: `ECN(project, ecn_date, pn_list)`.

### A.3.1.2 ENVIRONMENT

La clase `Environment` es el componente central del modelo de simulación, ya que sus atributos y métodos permiten orquestar la simulación. Representa el entorno donde se realiza el proyecto de NPI y en el cual interactúan los demás objetos de la simulación.

#### Atributos

- `suppliers (list)`: Lista de todos los proveedores que se han creado dentro del entorno.
- `active_suppliers (list)`: Lista de los proveedores activos para cotización y adjudicación.
- `inactive_suppliers (list)`: Lista de los proveedores inactivos. Estos proveedores no se consideran para el envío del RFQ.
- `ecns (list)`: Lista de los ECNs creados dentro del entorno.
- `item_master (DataFrame)`: Conjunto de datos maestro. En este objeto se registra la información relacionada a los números de parte (`PartNumber`) y su interacción con los proveedores.
- `part_kinds (dict)`: El modelo puede generar siete tipos de tuberías diferentes. Este atributo contiene un diccionario con los siguientes valores: el promedio y la desviación estándar de cada tipo de tubería por ECN; la probabilidad de

que un número de parte tenga una complejidad determinada (*low*, *medium* o *high*); y una lista donde se almacenan los objetos de los números de parte de cada tipo.

- `environment_times` (dict): Este atributo proporciona un diccionario de las medias y desviaciones estándar de los tiempos de cada actividad relacionada con el proceso de NPI.
- `μ_eau_qty` (float): Demanda anual promedio en una planta de bajo volumen.
- `σ_eau_qty` (float): Desviación estándar de la demanda anual en una planta de bajo volumen.
- `min_eau_qty` (float): Demanda anual mínima en una planta de bajo volumen.

## Métodos

- `add_supplier(supplier: Supplier)`: Añade un proveedor previamente creado al entorno.
- `add_suppliers(suppliers: list[Supplier])`: Añade proveedores de una lista previamente creada al entorno.
- `activate_supplier(supplier: Supplier)`: Habilita un proveedor para cotización y adjudicación añadiéndolo a la lista de proveedores activos (`Environment.active_suppliers`) y eliminándolo de la lista de proveedores inactivos (`Environment.inactive_suppliers`).
- `create_supplier(name: str, delivery_profile, quotation_profile: str = "regular", price_profile: str = "regular", punctuality_profile: str = "regular", active: bool = True)`: Crea un proveedor dentro del entorno llamando la clase `Supplier`. El único argumento obligatorio es `name`. Los perfiles reciben por defecto el valor «*regular*» y el valor por defecto de `active` es `True`.

- `deactivate_supplier(supplier: Supplier)`: Deshabilita un proveedor para cotización y adjudicación añadiéndolo a la lista de proveedores inactivos (`Environment.inactive_suppliers`) y eliminándolo de la lista de proveedores activos (`Environment.active_suppliers`).
- `gen_ecns(project: Project, qty: int)`: Genera una cantidad determinada de ECNs para un proyecto específico. La cantidad de números de parte por ECN se genera de forma aleatoria con una distribución normal (Tabla A.2) y la complejidad se asigna de forma aleatoria mediante un peso. El método *retorna* una lista conteniendo los ECNs generados.
- `get_ecn(search_reference: str)`: Este método permite buscar un ECN en la lista de ECNs del entorno y *retorna* el objeto en caso de encontrarlo.
- `get_supplier(search_mode: str, reference: str)`: Este método permite buscar un proveedor en la lista de proveedores del entorno mediante su nombre o su ID y *retorna* el objeto en caso de encontrarlo. El argumento `search_mode` acepta únicamente los siguientes valores: `<name>` y `<id>`.
- `import_ecns_from_df(project: Project, df: DataFrame)`: Este método permite crear objetos de tipo `ECN` y `PartNumber` a partir de un conjunto de datos de `pandas` que contenga las siguientes columnas: `<Project>`, `<ECN>`, `<ECN release>`, `<Part number>`, `<Complexity>` y `<EAU>`. Este enfoque facilita la reproductividad de la simulación al cargar los mismo parámetros de simulaciones anteriores.
- `import_training_df(training_df: DataFrame)`: Este método permite importar un conjunto de datos de `pandas` que contenga datos históricos del rendimiento de los proveedores a evaluar, pudiendo ser del entorno real o de una simulación anterior con el fin de facilitar la reproductividad. El conjunto de datos debe contener las columnas de la clase `ItemMaster` (Tabla A.4).
- `quote_ecn_all_suppliers(ecn: ECN)`: Este método interactúa con los atri-

butos de los objetos ECN; permite cotizar un ECN específico con todos los proveedores activos dentro del entorno haciendo uso del método `Supplier.quote`.

- `quote_all_ecn_project_all_suppliers(project: Project)`: Este método permite cotizar todos los ECNs de un proyecto específico con todos los proveedores activos dentro del entorno llamando al método anteriormente descrito (`quote_ecn_all_suppliers`).
- `quote_ecn_some_suppliers(ecn: ECN, quoting_suppliers: list[Supplier])`: Este método permite cotizar un ECN específico con los proveedores definidos dentro de una lista; interactúa con los atributos del objeto ECN y con el método `Supplier.quote`.
- `implement_ecn(ecn: ECN, awarded_supplier: Supplier, overwrite_bool = False)`: Este método implementa el ECN con el proveedor seleccionado. El argumento `overwrite_bool` permite sobrescribir resultados de implementaciones previas en el atributo `Environment.item_master` cuando el valor es `True`; esto es útil cuando se simularán dos o más iteraciones. El valor por defecto es `False`, lo que evita que se sobrescriban los datos e imprime un mensaje de advertencia al usuario en caso de que un ECN ya se encuentre implementado.
- `quote_all_ecns()`: Cotiza todos los ECNs de todos los proyectos con todos los proveedores. Este método es utilizado durante la generación del conjunto de datos inicial o de entrenamiento del modelo.
- `gen_initial_item_master_df()`: Implementa todos los ECNs del entorno asignando los proveedores de forma aleatoria con una distribución uniforme. Este método es utilizado para la generación del conjunto de datos inicial o de entrenamiento del modelo y *retorna* un conjunto de datos que sobrescribe el atributo `Environment.item_master`.
- `gen_initial_item_master_df_project(project: Project)`: Implementa todos los ECNs de un proyecto específico asignando los proveedores de forma

aleatoria con una distribución uniforme. Este método es utilizado para la generación del conjunto de datos inicial o de entrenamiento del modelo y *retorna* un conjunto de datos que sobrescribe el atributo `Environment.item_master`.

- `get_μσ_punctuality()`: Calcula los parámetros estadísticos (media y desviación estándar globales del tiempo de entrega de muestras de los números de parte adjudicados. El método *retorna* una tupla donde el primer valor es la media y el segundo es la desviación estándar.

`implement_ecn` es el método central de la clase, ya que internamente concentra la lógica principal de la fase de implementación de la simulación, interactúa con diversos objetos y permite generar los resultados a partir de operaciones que hacen uso de los parámetros estadísticos y números pseudoaleatorios.

A continuación se presentan los parámetros estadísticos necesarios para el funcionamiento de la clase.

La Tabla A.2 presenta siete tipos de tubería diferentes; cada tipo de tubería contiene un código alfabético utilizado al momento de generar la nomenclatura del número de parte en la simulación. También se muestra el promedio y la desviación de la cantidad números de parte de cada tipo por ECN; este parámetros son utilizados para generar los números de parte utilizando una distribución normal. La asignación de la complejidad se realiza de forma aleatoria utilizando pesos; es importante observar que la suma de los pesos de cada tipo de tubería es igual a 1.

TABLA A.2: Parámetros estadísticos de los tipos de tubería por ECN

Código	Nombre	Cantidades		Pesos		
		$\mu$	$\sigma$	$w_{low}$	$w_{medium}$	$w_{high}$
A	Tubo de descarga	0.33	0.77	1.00	0.00	0.00
B	Tubo de líquido	0.50	0.86	0.33	0.67	0.00
C	Equalizador	0.33	0.77	1.00	0.00	0.00
D	Tubo de succión	0.61	0.78	0.09	0.73	0.18
E	Distribuidor	0.67	1.94	0.00	0.00	1.00
F	Cabezal ( <i>Header</i> )	0.56	0.24	0.00	0.00	1.00
G	Ensamble de válvula	0.44	0.78	0.00	0.00	1.00

$\mu$  : promedio;  $\sigma$  : desviación estándar;  $w$  : peso para cada tipo de complejidad (*low*, *medium* y *high*)

En cuanto a la demanda anual (EAU), se identificó en el entorno real una media de 319.40 piezas, una desviación estándar de 364.97 y un valor mínimo de 23.

La Tabla A.3 muestra la media, la desviación estándar y los tiempos mínimos y máximos de cada actividad relacionada con el proceso de *Sourcing NPI*. En la simulación no se han modelado clases para representar los departamentos de la empresa, sin embargo, la tabla también muestra el área responsable con fines descriptivos.

TABLA A.3: Parámetros estadísticos de los tiempos de las actividades relacionadas con el proceso de *sourcing NPI* expresados en días.

Actividad	Departamento	$\mu$	$\sigma$	<i>min</i>	<i>max</i>
Liberación de ECN	Ingeniería	59.74	90.38	-110.00	436.00
Envío de RFQ	<i>Sourcing</i>	3.06	3.98	0.00	N/A
Creación de requisición	<i>Sourcing</i>	8.89	8.92	0.00	N/A
Envío de PO	*	7.53	3.31	0.00	N/A
Aprobación de ISIR	Ingeniería	26.80	33.71	0.00	N/A
Aprobación de PPAP	Calidad	2.64	5.30	0.00	N/A
Carga a contrato	<i>Sourcing</i>	2.22	3.23	0.00	N/A

$\mu$  : promedio;  $\sigma$  : desviación estándar; *min* : mínimo; *max* : máximo; N/A: no aplica; RFQ: *request for proposal* (cotización); PO: *purchase order* (orden de compra)

\*: Ingeniería, Compras Indirectas, Finanzas y *Sourcing*

La liberación de ECNs ocurre, usualmente, a partir de la fecha de *design freeze*

(Tabla 4.4), sin embargo, el valor mínimo para esta actividad es negativo, debido a que hay ocasiones en la que un ECN se libera antes de esta fecha en el caso de números de parte complejos. También se aporta un valor máximo de 436 días para el caso de liberación de ECNs *clean up* —ECNs con correcciones a números de parte existentes—. En las otras actividades se muestra el valor «no aplica» para la cantidad máxima de días, ya que no se modela un límite máximo para estas actividades.

Para la actividad de envío de órdenes de compra se considera el tiempo promedio desde la creación de la requisición, su aprobación y envío. Es importante mencionar que en la aprobación de las órdenes de compra intervienen distintos departamentos; el orden de aprobación es el siguiente: 1) Ingeniería, 2) Compras indirectas, y 3) Finanzas; posteriormente la orden de compra (PO, por sus siglas en inglés) es enviada por *Sourcing*.

En base a los estándares de trabajo y las buenas prácticas, las actividades de la Tabla A.3 ocurren de forma lineal. Sin embargo, es importante considerar que estas actividades se pueden realizar en un orden diferente o incluso simultáneamente en caso de urgencia, especialmente en plantas de alto volumen o en proyectos de alto impacto. La simulación fue modelada considerando el flujo estándar de trabajo.

El objeto puede ser creado llamando la clase de la siguiente forma, sin argumentos adicionales: `Environment()`.

### A.3.1.3 FUZZYMODEL

Esta clase es provista por el módulo `fuzzy_supplier_evaluator`. El modelo de lógica difusa se ha desarrollado con un enfoque de POO para facilitar la reutilización y parametrización según se requiera durante el desarrollo de la simulación gracias al encapsulado, que es una característica propia de este paradigma.

#### Atributos

- `df` (`DataFrame`): Conjunto de datos de `pandas` del entorno real o del objeto `Environment` que contiene los datos históricos y la información de los números de parte a evaluar. El conjunto de datos debe coincidir con el formato de la clase `ItemMaster`.
- `new_supplier` (`bool`): Indica si el proveedor a evaluar es nuevo (`True`) o existente (`False`).
- `evaluating_supplier_id` (`str`): ID del proveedor a evaluar. Este valor debe coincidir con el atributo `Supplier.id`.
- `evaluation_priority` (`str`): Define el objetivo de la evaluación: la opción «time» prioriza el tiempo de implementación mientras que la opción «spend» prioriza la reducción de costos.
- `stats` (`dict`): Diccionario que contiene los resultados de la evaluación del proveedor mediante lógica difusa. La información proporcionada en el diccionario es la siguiente: ID del proveedor, estatus del proveedor (nuevo o existente), calificación *crisp*, niveles de activación de las funciones difusas, etiqueta lingüística del proveedor y niveles de activación de las reglas difusas

### Atributos privados

Esta clase cuenta con atributos privados que contienen los valores necesarios para configurar los rangos de las funciones difusas con base en los parámetros mostrados en las tablas 3.8, 4.8, 4.9, 4.13 y 4.14 utilizando `numpy` y `skfuzzy`. Se recomienda consultar el código para más información (Figura A.2a).

### Métodos

- `get_stats()`: *Retorna* el diccionario del atributo `stats`.
- `plot_model()`: Genera e imprime las gráficas de las funciones difusas del modelo. El ejemplo de las gráficas generadas se puede observar en las figuras 3.4, 4.5 y 4.6.

- `_evaluate_supplier_time_priority(quotation_ecn: ECN)`: Método privado que contiene el modelo del Escenario 1 (Sección 4.3.2).
- `_evaluate_supplier_spend_priority(project: Project, gen_chart: bool = False)`: Método privado que contiene el modelo del Escenario 2 (Sección 4.3.3). El argumento `gen_chart` activa la función de generación e impresión de las gráficas de los resultados de evaluación difusa, como las mostradas en la Figura 5.1. El valor proporcionado debe ser *booleano* (`True` o `False`).

Los objetos pueden ser generados llamando la clase de la siguiente manera: `FuzzyModel(df_item_master: DataFrame, ref_supplier: Supplier, quotation_ecn: ECN, evaluation_ecn: ECN, evaluation_priority: str, massive_simulation: bool = False, new_supplier: bool = False)`. No se requiere proporcionar el argumento `quotation_ecn` si la prioridad de evaluación (`evaluation_priority`) es *«spend»*, sin embargo, sí es obligatorio cuando la prioridad es *«time»*. El argumento `massive_simulation` debe tener el valor `True` en caso de utilizar el modelo en una simulación con una cantidad significativa de iteraciones.

#### A.3.1.4 ITEMMASTER

Esta clase proporciona un conjunto de datos (*data frame*) de `pandas` con un formato de columnas estandarizado. Los objetos de esta clase permiten almacenar los resultados de la implementación.

##### Atributos

- `df (DataFrame)`: Conjunto de datos de `pandas` en el que se almacena la información relacionada con los números de parte cotizados e implementados.

Esta clase no contiene métodos adicionales. Los objetos pueden ser generados llamando la clase sin proporcionar argumentos: `ItemMaster()`

La Tabla A.4 muestra las columnas contenidas en el conjunto de datos resultante. Los tipos de datos descritos corresponden a los tipos de dato de Python.

TABLA A.4: Estructura del conjunto de datos de la clase `ItemMaster`

Columna	Tipo de dato	Descripción
<b>Datos de la simulación</b>		
Iteration	int	Número de iteración de la simulación a la que pertenece la información de la fila.
<b>Datos de identificación del ECN</b>		
Project	str	Nombre del proyecto evaluado.
ECN	str	ID del ECN evaluado
ECN release	date	Fecha de liberación del ECN evaluado.
<b>Datos del número de parte</b>		
Part number	str	ID del número de parte
Complexity	str	Complejidad del número de parte ( <i>low</i> , <i>medium</i> o <i>high</i> )
EAU	int	Demanda anual estimada
<b>Datos del proveedor</b>		
Delivery profile	str	Perfil del tiempo de entrega del proveedor ( <i>low</i> , <i>regular</i> o <i>high</i> )
Quotation profile	str	Perfil del tiempo de cotización del proveedor ( <i>low</i> , <i>regular</i> o <i>high</i> )
Price profile	str	Perfil del rango de precios del proveedor ( <i>low</i> , <i>regular</i> o <i>high</i> )
Punctuality profile	str	Perfil de puntualidad del proveedor ( <i>low</i> , <i>regular</i> o <i>high</i> )
Supplier ID	str	ID del proveedor en el ERP (SAP)

(Continúa en la siguiente página)

Columna	Tipo de dato	Descripción
<b>Datos de la simulación</b>		
Supplier name	str	Nombre del proveedor
Price	float	Precio cotizado del número de parte
Lead time	int	Tiempo de entrega estándar del proveedor en la cotización
<b>Fechas</b>		
RFQ date	date	Fecha de envío del RFQ
Quotation date	date	Fecha de recepción de la cotización
REQ date	date	Fecha de creación de la requisición de compra
PO date	date	Fecha de envío de la orden de compra
ETA	date	Fecha estimada de entrega de las muestras
Delivery date	date	Fecha de recepción de muestras
ISIR documents	date	Fecha de recepción de documentos PPAP en el portal de calidad
ISIR approval	date	Fecha de aprobación del ISIR por Ingeniería
PPAP approval	date	Fecha de aprobación de PPAP por Calidad
Contract date	date	Fecha de carga del número de parte al contrato de SAP por <i>Sourcing</i>
<b>Entradas al modelo de lógica difusa</b>		
Quotation time	int	Tiempo de cotización de los números de parte en días, desde el envío del RFQ hasta la recepción de la cotización

*(Continúa en la siguiente página)*

Columna	Tipo de dato	Descripción
<b>Datos de la simulación</b>		
OTD	bool	Indicador de recepción de muestras a tiempo
Delivery time	int	Tiempo de recepción de las muestras en días, desde el envío de la orden de compra hasta la recepción
<b>Otra información</b>		
FY Spend	float	Gasto estimado anual. Se obtiene multiplicando el precio por la demanda estimada anual.
Awarded	bool	Indicador de adjudicación de número de parte al proveedor. <b>False</b> por defecto para cotización
<b><i>Readiness</i></b>		
MCS ready	bool	Indicador de llegada de muestras a tiempo para MCS
Pilot ready	bool	Indicador de llegada de muestras a tiempo para el piloto
SOP ready	bool	Indicador de preparación del proveedor para inicio de producción (6 semanas antes de la fecha de SOP)

### A.3.1.5 PARTNUMBER

Esta clase representa un número de parte o material. La clase contenida en el modelo está concebida para representar tuberías de cobre, sin embargo, se puede adaptar para cualquier tipo de material.

#### Atributos

- `pn` (`str`): ID del material. Debe ser único, no pueden existir dos `PartNumber` con el mismo ID.
- `complexity` (`str`): Complejidad de la tubería de cobre. Puede tomar los siguientes valores: *low*, *medium* y *high*.
- `eau` (`int`): Uso estimado anual. Representa la demanda que se pretende consumir durante el año.

Esta clase no cuenta con métodos adicionales, sin embargo, los atributos anteriores deben ser proporcionados al momento de crear el objeto: `PartNumber(pn, complexity, eau)`.

#### A.3.1.6 PROJECT

Esta clase representa un proyecto de NPI.

##### Atributos

- `name` (`str`): Nombre del proyecto NPI.
- `df_date` (`date`): Fecha del *design freeze* o congelación de cambios; corresponde a la etapa P2.
- `mcs_date` (`date`): Fecha del MCS. Se requiere que las muestras lleguen antes de esta fecha. No se requiere contar con aprobación de PPAP.
- `pilot_date` (`date`): Fecha de la corrida piloto. El material requiere contar con aprobación de PPAP y contrato de SAP antes de esta fecha. Adicionalmente, el proceso de abastecimiento se realiza a través de Compras, no de *Sourcing*.
- `sop_date` (`date`): Fecha de inicio de producción o implementación del proyecto.

Esta clase no cuenta con métodos adicionales, sin embargo, los atributos anteriores deben ser proporcionados al momento de crear el objeto: `Project(name, df_date, mcs_date, pilot_date, sop_date)`.

### A.3.1.7 QUOTATION

Esta clase representa la cotización de un proveedor.

#### Atributos

- `ecn` (ECN): ECN relacionado a esta cotización.
- `supplier` (Supplier): Proveedor que realizó la cotización.
- `date` (date): Fecha de cotización.
- `awarded` (bool): Indica si la cotización fue adjudicada mediante un valor *booleano*. `False` por defecto.
- `df` (DataFrame): Conjunto de datos de `pandas` conteniendo la información de la cotización.

Esta clase no cuenta con métodos adicionales, sin embargo, algunos de los atributos anteriores deben ser proporcionados al momento de crear el objeto: `Quotation(ecn, supplier, date)`.

El conjunto de datos de esta clase utiliza algunas de las columnas de la clase `ItemMaster` (Tabla A.4), ya que esta información posteriormente se integra al objeto que contenga la bitácora o registro de la implementación.

### A.3.1.8 SUPPLIER

Esta clase representa un proveedor.

## Atributos

- **instances** (*int*): Contador de los objetos creados con clase **Supplier**. Este atributo es global.
- **id** (*str*): ID del proveedor en el ERP. La simulación lo genera automáticamente con base en el valor de **instances**, sin embargo, se puede sobrescribir (**Supplier.id = valor str**).
- **name** (*str*): Nombre del proveedor.
- **quotations** (*list*): Lista de cotizaciones creadas por el proveedor.
- **awarded\_ecns** (*list*): Lista de ECNs adjudicados al proveedor.
- **standard\_lead\_time** (*int*): Tiempo de entrega estimado que el proveedor proporciona en sus cotizaciones. Al momento de simular la entrega de materiales, el modelo utiliza el histórico de entregas, salvo que sea un proveedor nuevo se utiliza el valor de este parámetro.
- **delivery\_profile** (*str*): Perfil del tiempo de entrega del proveedor: *low*, *regular* y *high*.
- **quotation\_profile** (*str*): Perfil del tiempo de cotización del proveedor: *low*, *regular* y *high*.
- **price\_profile** (*str*): Perfil de precios del proveedor: *low*, *regular* y *high*.
- **punctuality\_profile** (*str*): Perfil de puntualidad del proveedor: *low*, *regular* y *high*. Determina la probabilidad de que el proveedor sea puntual (Tabla A.6)
- **$\mu$ \_delivery\_time** (*float*): Tiempo promedio de entrega del proveedor a partir de la recepción de la orden de compra. Se calcula multiplicando el promedio del entorno real (34.62 días) por un factor determinado por el perfil de entregas (Tabla A.6).

- `$\sigma_{\text{delivery\_time}}$`  (float): Desviación estándar del tiempo de entrega del proveedor a partir de la recepción de la orden de compra. Se calcula multiplicando la desviación estándar del entorno real (16.28 días) por un factor determinado por el perfil de entregas (Tabla A.6).
- `$\text{minimum\_delivery\_time}$`  (float): Tiempo mínimo de entrega del proveedor a partir de la recepción de la orden de compra. Se calcula multiplicando el mínimo del entorno real (12 días) por un factor determinado por el perfil de entregas (Tabla A.6).
- `$\text{eta\_difference}$`  (dict): Parámetro que determina la variación entre la fecha de entrega y la fecha estimada de entrega. El atributo es un diccionario que contiene la diferencia promedio ( $\mu$ ) y la desviación estándar con base en la asignación aleatoria del proveedor de la etiqueta «puntual» o «inpuntual».
- `$\mu_{\text{isir\_documents\_upload}}$`  (float): Tiempo promedio que toma al proveedor cargar los documentos de PPAP al portal a partir de la fecha de entrega de las muestras.
- `$\sigma_{\text{isir\_documents\_upload}}$`  (float): Desviación estándar del tiempo promedio que toma al proveedor cargar los documentos de PPAP al portal a partir de la fecha de entrega de las muestras.
- `$\mu_{\text{quotation\_time}}$`  (float): Tiempo promedio que toma al proveedor cotizar los números de parte a partir de la recepción del RFQ. Se calcula multiplicando el promedio del entorno real (27.72 días) por un factor determinado por el perfil de cotización (Tabla A.6).
- `$\sigma_{\text{quotation\_time}}$`  (float): Desviación estándar del tiempo promedio que toma al proveedor cotizar los números de parte a partir de la recepción del RFQ. Se calcula multiplicando la desviación estándar del entorno real (21.60 días) por un factor determinado por el perfil de cotización (Tabla A.6).

- `minimum_quotation_time` (float): Tiempo mínimo de cotización del proveedor a partir de la recepción del RFQ. Se calcula multiplicando el mínimo del entorno real (9 días) por un factor determinado por el perfil de cotización (Tabla A.6).
- `price_complexity_map` (dict): Este atributo contiene un diccionario con los precios promedios y las desviaciones estándar para las distintas complejidades de los números de parte (*low*, *medium* y *high*). Los valores de cada clave se calcula multiplicando la media y desviación estándar para cada complejidad por el factor correspondiente al perfil de precios del proveedor (Tabla A.6).

## Métodos

- `quote(ecn: ECN, rfq_date: date, lead_time: int = 0)`: Este método permite que el objeto de tipo proveedor cotice un ECN. Para ello es necesario proporcionar los argumentos `ecn`, `rfq_date` y `lead_time`. El argumento `lead_time` es opcional, ya que en caso de omitirlo, el valor por defecto es 0. La cotización resultante *retorna* en el formato de un `DataFrame` de `pandas`, el cual se integra automáticamente al objeto de clase `ItemMaster` (Tabla A.4).

Internamente, el método `quote` genera, de forma aleatoria con una distribución normal, los valores de la fecha de cotización (fecha de RFQ + tiempo de cotización) y el precio de los números de parte en base a la complejidad.

La Tabla A.5 muestra la media, la desviación estándar y la cantidad mínima de los días que toma realizar las actividades relacionadas con el proveedor; estos datos se obtuvieron con base en los registros del entorno real. No se consideró modelar una cantidad máxima de días para estas actividades, por lo que se muestran con el valor «no aplica».

TABLA A.5: Parámetros estadísticos de los tiempos globales de las actividades de los proveedores relacionadas con el proceso de *sourcing* NPI expresados en días.

Actividad	$\mu$	$\sigma$	<i>min</i>	<i>max</i>
Cotización	27.72	21.60	9	N/A
Entrega de muestras	34.62	16.28	12	N/A
Carga de documentos PPAP	0.35	0.94	0	N/A

$\mu$  : promedio;  $\sigma$  : desviación estándar; *min* : mínimo; *max* : máximo; N/A: no aplica

El objeto puede ser creado de la siguiente manera: `Supplier(name, delivery_profile, quotation_profile, price_profile, punctuality_profile, standard_lt)`. El argumento `name` es el único obligatorio; el modelo asigna por defecto el valor «*regular*» para los argumentos del perfil y 0 para el tiempo de entrega, sin embargo, es recomendable generar el objeto con los argumentos correctos. La Tabla A.6 describe los parámetros (estadísticos o factores) utilizados para configurar los perfiles del proveedor. Los factores se determinaron de forma empírica, mientras que la probabilidad de puntualidad se determinó con base en las observaciones del entorno real.

TABLA A.6: Parámetros de la clase `Supplier`

Parámetro	Perfil	$\mu$	$\sigma$	<i>P</i>
Factor de perfil de entrega	<i>Low</i>	0.80	0.80	N/A
	<i>Regular</i>	1.00	1.00	N/A
	<i>High</i>	1.00	1.30	N/A
Factor de perfil de cotización	<i>Low</i>	0.80	0.80	N/A
	<i>Regular</i>	1.00	1.00	N/A
	<i>High</i>	1.30	1.10	N/A
Factor de perfil de precios	<i>Low</i>	0.85	0.85	N/A
	<i>Regular</i>	1.00	1.00	N/A
	<i>High</i>	1.20	1.10	N/A
Probabilidad de puntualidad	<i>Low</i>	N/A	N/A	0.19
	<i>Regular</i>	N/A	N/A	0.47
	<i>High</i>	N/A	N/A	0.64

$\mu$  : promedio;  $\sigma$  : desviación estándar; *P* : probabilidad; N/A: no aplica

### A.3.2 VARIABLES SECRETAS

Por cuestiones de confidencialidad de la información, las variables relacionadas a los precios de los productos no se integraron directamente en el código de la simulación, sino que se almacenaron localmente en un archivo `.env` y posteriormente se accedió mediante la librería `dotenv`. El bloque de Código A.1 puede ser utilizado para configurar el entorno sustituyendo 0.00 por el valor real. Este enfoque permite separar la lógica del modelo de los parámetros sensibles, facilitando la reproducibilidad de la simulación sin comprometer la confidencialidad de la información.

```
1  ## Prices per complexity
2  AVG_PRICE_LOW_COMPLEXITY=0.00
3  STDEV_PRICE_LOW_COMPLEXITY=0.00
4  AVG_PRICE_MEDIUM_COMPLEXITY=0.00
5  STDEV_PRICE_MEDIUM_COMPLEXITY=0.00
6  AVG_PRICE_HIGH_COMPLEXITY=0.00
7  STDEV_PRICE_HIGH_COMPLEXITY=0.00
8
9  MINIMUM_PRICE=0.00
```

Código A.1: Formato de variables secretas del modelo de simulación

### A.3.3 IMPLEMENTACIÓN

La implementación de la simulación y su integración con el modelo de lógica difusa se realizó en una libreta Jupyter (`implementation.ipynb`). Esta herramienta facilita la depuración del código durante el desarrollo al permitir ejecutar bloques concretos sin ejecutar nuevamente la simulación, manteniendo en memoria valores pseudoaleatorios o que requieren tiempo para su generación, además de permitir

identificar fácilmente segmentos de código defectuosos. Asimismo, la libreta Jupyter permite introducir comentarios en formato Markdown, lo que enriquece la documentación del código.

La libreta se divide en tres secciones o etapas. La primera etapa (Sección A.3.3.1) corresponde a la generación de datos de entrenamiento o datos históricos de rendimiento. La segunda etapa (Sección A.3.3.2) contiene la implementación del modelo de lógica difusa propuesto integrado con la simulación para los escenarios 1 y 2 (Sección 3.5). Finalmente, la tercera etapa (Sección A.3.3.3) contiene el código utilizado para el análisis de los resultados con `numpy` y `pandas`.

#### A.3.3.1 GENERACIÓN DE DATOS DE ENTRENAMIENTO

Como se mencionó anteriormente en la Sección 6.3.3, la simulación, como cualquier modelo que funcione mediante estadística, requiere de datos históricos o precedentes para funcionar de forma adecuada. Por cuestiones de confidencialidad de los datos, el estudio optó por generar los datos históricos a través de la simulación tomando como referencia las estadísticas del entorno real.

En esta etapa de la implementación se generaron los datos simulados de 81 proveedores de tubería de cobre para 300 ECNs de tres proyectos de NPI, como se describe en la Sección 4.3.1.

En la simulación o en el modelo de lógica difusa es posible integrar datos de un entorno real o de simulaciones anteriores como se explica en el bloque de Código A.2. Es importante que los datos históricos a importar se encuentren en un archivo de Excel (`xlsx`) con el formato de la clase `ItemMaster`.

```
1 # Paso 1: Importar las librerías a utilizar
2 import fuzzy_supplier_evaluator as fse
3 import pandas as pd
4 import simulation
5
6 # Paso 2: Inicializar el entorno de la simulación
7 env = simulation.Environment()
8
9 # Paso 3: Importar los datos históricos
10 # Es importante sustituir "df.xlsx" por la ubicación del archivo de
    Excel con los datos.
11 imported_df = pd.read_excel("df.xlsx")
12 env.import_training_df(imported_df)
13 env.item_master["Supplier ID"] = env.item_master["Supplier
    ID"].apply(str)
14 for columna in ["ECN release", "RFQ date", "Quotation date", "REQ
    date", "PO date", "ETA", "Delivery date", "ISIR documents", "ISIR
    approval", "PPAP approval", "Contract date"]:
15     env.item_master[columna] =
        pd.to_datetime(env.item_master[columna]).dt.date
```

Código A.2: Ejemplo de importación de datos históricos

Es importante observar en el bloque de Código A.2 que después de importar los datos es necesario cambiar el formato de la columna `Supplier ID` y de aquellas que contengan fechas para que coincida con el formato con el que trabajan los métodos de las clases.

### A.3.3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE LÓGICA DIFUSA

Esta etapa contiene el código de la implementación de los modelos. Se encuentra dividido en dos subsecciones independientes. La primera sección corresponde al modelo de simulación y evaluación de proveedores para el Escenario 1 que prioriza el tiempo de implementación; en este escenario, la solicitud de cotización y la evaluación de los proveedores ocurre de forma dinámica, conforme se liberan los ECN. La segunda sección corresponde al Escenario 2 que prioriza la reducción de costos; este escenario tiene el objetivo de adjudicar el total del negocio de una categoría con el proveedor con la mejor propuesta económica sin descuidar los demás criterios. La Tabla A.7 muestra las diferencias clave entre ambos modelos.

TABLA A.7: Diferencias clave del modelo de simulación y lógica difusa entre el Escenario 1 y el Escenario 2

Característica	Escenario 1	Escenario 2
Volumen de producción	Bajo ( $\approx 1,000$ u/año)	Alto ( $\approx 1,000,000$ u/año)
Impacto económico	Relativamente bajo	Alto
Prioridad	Tiempo de implementación	Reducción de costos
Características clave del modelo utilizado	Implementación/ <u>evaluación dinámica</u> conforme se liberan los ECNs y se reciben las cotizaciones.	<u>Evaluación transversal</u> ocurre después de recibir todas las cotizaciones.

La simulación exporta los resultados de la implementación y la evaluación de proveedores en una hoja de datos de Excel (**xlsx**).

### A.3.3.3 ANÁLISIS DE DATOS

Esta etapa contiene el código de la obtención de los resultados presentados en la Sección 5 mediante **pandas**.

## A.4 CONSULTA DEL CÓDIGO

El código fuente de la simulación y el modelo de lógica difusa puede ser consultado en el repositorio de GitHub `rubusarbaro/supplier-selection_fuzzy-logic_thesis` escaneando el código QR de la Figura A.2a.

Adicionalmente, este repositorio se encuentra indexado en DeepWiki, que es una herramienta que genera documentación detallada y permite resolver cualquier duda del repositorio mediante inteligencia artificial. Se puede acceder a la página de DeepWiki escaneando el código QR de la Figura A.2b.



(a) Código QR del repositorio de GitHub `rubusarbaro/supplier-selection_fuzzy-logic_thesis`



(b) Código QR de la página de DeepWiki para el repositorio de GitHub `rubusarbaro/supplier-selection_fuzzy-logic_thesis`

FIGURA A.2: Códigos QR de consulta

## A.5 LICENCIA Y CITACIÓN

El código de la simulación en Python se encuentra publicado en el repositorio de GitHub de la Figura A.2a bajo licencia MIT. En caso de hacer uso de este código, por favor utilice la siguiente cita sugerida:

Morales Velázquez, S.R. (2025). Supplier selection fuzzy logic thesis [Computer soft-

---

ware]. GitHub. [https://github.com/rubusarbaro/supplier-selection\\_fuzzy-logic\\_thesis](https://github.com/rubusarbaro/supplier-selection_fuzzy-logic_thesis)

**Importante:** Esta sugerencia de citación aplica únicamente para el código de la simulación. Para la citación de la tesis, por favor, utilice el estándar de la norma de estilo que usted utiliza en su trabajo de investigación.

## APÉNDICE B

# REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA: CRITERIOS

---

TABLA B.1: Criterios identificados en la revisión sistemática de literatura en relación con su autor

Criterio	Q	Autor
Criterios económicos		

*(Continúa en la siguiente página)*

*(Continuado desde la página anterior)*

<b>Criterio</b>	<b>Q</b>	<b>Autor</b>
Precio	30	Abdulla y Baryannis (2024); Ali <i>et al.</i> (2023); Álvarez Aranda <i>et al.</i> (2023); Chattopadhyay <i>et al.</i> (2020); Chen (2020); Corsi <i>et al.</i> (2020); Da Silva <i>et al.</i> (2024); De Almeida <i>et al.</i> (2023); De Vasconcelos (2022); Dobos y Vörösmarty (2023); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Gonçalves (2023); Gouveia (2022); Islam y Arakawa (2022); Jana <i>et al.</i> (2024b,a); Leonesi y Terazzi (2020); Leong <i>et al.</i> (2022); Lyu <i>et al.</i> (2021); Manik (2023); Moretti <i>et al.</i> (2022); Mortara y Tabone (2020); Moura <i>et al.</i> (2021); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023); Soffa y Lima (2022); Ulutas <i>et al.</i> (2021); Utama <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Costo total	8	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Ali <i>et al.</i> (2023); Bošković <i>et al.</i> (2020); Corsi <i>et al.</i> (2020); De Almeida <i>et al.</i> (2023); De Vasconcelos (2022); Li <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024)
Descuentos	4	Ali <i>et al.</i> (2023); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Ulutas <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Cumplimiento en la facturación	1	Corsi <i>et al.</i> (2020)
Duración de la cotización	1	Abdulla y Baryannis (2024)
<b>Criterios logísticos</b>		

*(Continúa en la siguiente página)*

*(Continuado desde la página anterior)*

<b>Criterio</b>	<b>Q</b>	<b>Autor</b>
Tiempo de entrega	18	Abdulla y Baryannis (2024); Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Ali <i>et al.</i> (2023); Chen (2020); Corsi <i>et al.</i> (2020); De Vasconcelos (2022); Dobos y Vörösmarty (2023); Gouveia (2022); Islam y Arakawa (2022); Leong <i>et al.</i> (2022); Li <i>et al.</i> (2021); Manik (2023); Moretti <i>et al.</i> (2022); Mortara y Tabone (2020); Moura <i>et al.</i> (2021); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Soffa y Lima (2022); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Puntualidad	16	Ali <i>et al.</i> (2023); Bošković <i>et al.</i> (2020); Chattopadhyay <i>et al.</i> (2020); Chen (2020); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Islam y Arakawa (2022); Jana <i>et al.</i> (2024b); Leonesi y Terazzi (2020); Li <i>et al.</i> (2021); Lyu <i>et al.</i> (2021); Manik (2023); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023); Soffa y Lima (2022); Ulutas <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Capacidad de producción	7	Chattopadhyay <i>et al.</i> (2020); Gonçalves (2023); Li <i>et al.</i> (2021); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023); Soffa y Lima (2022); Valentim (2024)
Ubicación del proveedor	6	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Ali <i>et al.</i> (2023); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Mortara y Tabone (2020); Soffa y Lima (2022); Valentim (2024)

*(Continúa en la siguiente página)*

(Continuado desde la página anterior)

<b>Criterio</b>	<b>Q</b>	<b>Autor</b>
Transporte	4	Abdulla y Baryannis (2024); Da Silva <i>et al.</i> (2024); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Condiciones de entrega	3	Abdulla y Baryannis (2024); Utama <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Logística inversa	2	Ali <i>et al.</i> (2023); Li <i>et al.</i> (2021)
Capacidad de entrega	2	Chen (2020); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Entregas completas	2	De Vasconcelos (2022); Lyu <i>et al.</i> (2021)
Embalaje	1	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021)
Daños durante la entrega	1	Nakiboglu y Bulgurcu (2020)
<b>Criterios del producto</b>		
Calidad	26	Abdulla y Baryannis (2024); Ali <i>et al.</i> (2023); Álvarez Aranda <i>et al.</i> (2023); Chattopadhyay <i>et al.</i> (2020); Chen (2020); Corsi <i>et al.</i> (2020); Da Silva <i>et al.</i> (2024); De Almeida <i>et al.</i> (2023); De Vasconcelos (2022); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Gonçalves (2023); Islam y Arakawa (2022); Jana <i>et al.</i> (2024b,a); Leonesi y Terazzi (2020); Leong <i>et al.</i> (2022); Li <i>et al.</i> (2021); Lyu <i>et al.</i> (2021); Manik (2023); Moura <i>et al.</i> (2021); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023); Soffa y Lima (2022); Utama <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)

(Continúa en la siguiente página)

*(Continuado desde la página anterior)*

<b>Criterio</b>	<b>Q</b>	<b>Autor</b>
Especificaciones técnicas	6	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Álvarez Aranda <i>et al.</i> (2023); Gouveia (2022); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023); Valentim (2024)
Tasa de defectos	6	Ali <i>et al.</i> (2023); Li <i>et al.</i> (2021); Mortara y Tabone (2020); Nakiboglu y Bulgurcu (2020); Ulutas <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Cantidad	2	Abdulla y Baryannis (2024); De Vasconcelos (2022)
Innovación	2	Ali <i>et al.</i> (2023); Corsi <i>et al.</i> (2020)
Empaque	2	Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Documentación	1	Leonesi y Terazzi (2020)
Origen del producto	1	Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
<b>Criterios del servicio</b>		
Flexibilidad	10	Ali <i>et al.</i> (2023); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Leonesi y Terazzi (2020); Leong <i>et al.</i> (2022); Lyu <i>et al.</i> (2021); Manik (2023); Moretti <i>et al.</i> (2022); Mortara y Tabone (2020); Utama <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Nivel de servicio	9	Ali <i>et al.</i> (2023); Da Silva <i>et al.</i> (2024); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Leonesi y Terazzi (2020); Li <i>et al.</i> (2021); Lyu <i>et al.</i> (2021); Manik (2023); Moretti <i>et al.</i> (2022); Mortara y Tabone (2020)

*(Continúa en la siguiente página)*

*(Continuado desde la página anterior)*

<b>Criterio</b>	<b>Q</b>	<b>Autor</b>
Relación mutua	8	Da Silva <i>et al.</i> (2024); De Vasconcelos (2022); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Gonçalves (2023); Islam y Arakawa (2022); Lyu <i>et al.</i> (2021); Pamucar <i>et al.</i> (2020); Valentim (2024)
Tiempo de respuesta	6	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Álvarez Aranda <i>et al.</i> (2023); Corsi <i>et al.</i> (2020); Nazari Shir-kouhi <i>et al.</i> (2023); Pamucar <i>et al.</i> (2020); Valentim (2024)
Garantías	5	Mortara y Tabone (2020); Soffa y Lima (2022); Utama <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Capacidad de respuesta	4	Ali <i>et al.</i> (2023); Utama <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Servicio posventa	4	Ali <i>et al.</i> (2023); Gouveia (2022); Ulutas <i>et al.</i> (2021); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
<b>Atributos del proveedor</b>		
Reputación del proveedor	11	Ali <i>et al.</i> (2023); Bošković <i>et al.</i> (2020); De Almeida <i>et al.</i> (2023); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Islam y Arakawa (2022); Jana <i>et al.</i> (2024a); Lyu <i>et al.</i> (2021); Moura <i>et al.</i> (2021); Pamucar <i>et al.</i> (2020); Ulutas <i>et al.</i> (2021); Valentim (2024)
Historial de rendimiento	6	Alcalá Casanova <i>et al.</i> (2021); Ali <i>et al.</i> (2023); De Vasconcelos (2022); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Gonçalves (2023); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)

*(Continúa en la siguiente página)*

*(Continuado desde la página anterior)*

<b>Criterio</b>	<b>Q</b>	<b>Autor</b>
Confiabilidad	3	Ali <i>et al.</i> (2023); Ghasempoor Anaraki <i>et al.</i> (2021); Jana <i>et al.</i> (2024b)
Certificaciones	3	De Vasconcelos (2022); Soffa y Lima (2022); Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)
Compartimiento de información	2	Ali <i>et al.</i> (2023); Gonçalves (2023)
Transparencia	2	Gonçalves (2023); Valentim (2024)
Respeto a las políticas	1	Ali <i>et al.</i> (2023)
Problemas éticos	1	Ali <i>et al.</i> (2023)
Adaptabilidad	1	Nazari Shirkouhi <i>et al.</i> (2023)
Cumplimiento normativo	1	Zúñiga Marín y Jiménez Lorza (2024)

## APÉNDICE C

# ENCUESTA APLICADA A LOS TOMADORES DE DECISIÓN

---

## Cuestionario sobre criterios de selección de proveedores en el proceso de sourcing

### INTRODUCCIÓN

Estimado participante:

Esta **encuesta** forma parte de un **estudio de tesis** de la **Maestría** en Logística y Cadena de Suministro de la **Universidad Autónoma de Nuevo León**, el cual se titula «Evaluación y selección de proveedores en el proceso de NPI de una empresa mediante un modelo de lógica difusa».

El presente estudio tiene el **objetivo** de conocer cuáles son los **criterios reales** tomados en cuenta por los ingenieros de **Sourcing NPI** en el proceso de **selección de proveedores** para nuevos números de parte para su integración en un modelo matemático de lógica difusa.

Este estudio consta de dos partes:

1. Encuesta sobre los criterios empleados;

## 2. Encuesta sobre la relevancia de los criterios seleccionados.

Estos criterios fueron obtenidos mediante una revisión sistemática de literatura académica existente sobre evaluación y selección de proveedores bajo la metodología PRISMA.

**La encuesta toma menos de 5 minutos para ser contestada.**

Su **participación** es completamente **voluntaria** y anónima con **finés** exclusivamente **académicos**, para lo cual, **agradezco su participación de antemano.**

## Criterios de selección de proveedores

A continuación se muestran los criterios de evaluación y selección de proveedores recopilados mediante la revisión de literatura. Estos criterios fueron organizados en las siguientes categorías para facilitar su análisis.

**Por favor, seleccione solamente las opciones que usted realmente considera relevantes y usa al momento de seleccionar un proveedor.** Si usted no considera relevante ningún criterio de alguna categoría, por favor, seleccione «Ningún criterio de esta lista».

### 1. Criterios económicos

- Precio (*importe facturado por el material*)
- Duración de la oferta (*vigencia de la cotización*)
- Costo total (*valor del material + costos de transporte, aranceles, fixtures o herramientas, etcétera*)
- Cumplimiento en la facturación (*facturado a tiempo, cantidades correctas, precios correctos, datos correctos, etcétera*)
- Descuentos (*por implementación temprana, por volumen de compra, etcétera*)
- Ningún criterio de esta lista

## 2. Criterios logísticos

- Tiempos de entrega (*lead time*)
- Condiciones de entrega (*horarios, lugar, etcétera*)
- Embalaje (*emplaye, aditamentos de protección, carritos, contenedores, etcétera*)
- Ubicación del proveedor
- Puntualidad
- Logística inversa (*capacidad de retorno de material al proveedor*)
- Capacidad de producción (*Capacidad del proveedor de producir el volumen requerido*)
- Capacidad de entrega (*unidades de transporte suficientes y adecuadas al volumen*)
- Transporte (*modos y medios de transporte*)
- Entregas completas (*sin backorder*)
- Daños durante la entrega
- Ningún criterio de esta lista

## 3. Criterios del producto

- Calidad
- Cantidad (*MOQ o lot size adecuado al EAU*)
- Especificaciones técnicas (*cumplimiento de specs*)
- Innovación (*uso de nuevas tecnologías en la fabricación de materiales*)
- Tasa de defectos (*histórico de rechazos de calidad*)
- Empaque
- Documentación
- Origen del producto
- Ningún criterio de esta lista

## 4. Criterios del servicio

- Tiempo de respuesta
- Capacidad de respuesta
- Servicio posventa
- Flexibilidad (*capacidad del proveedor de responder ante requerimientos inesperados*)
- Nivel de servicio (*cumplimiento de entregas, comunicación, actitud hacia el cliente, servicio al cliente, profesionalismo, etcétera*)
- Relación mutua (*cooperación, confianza, compromiso, interdependencia, acciones conjuntas, etcétera*)
- Garantías (*disposición a reponer material no conforme; retrabajos*)
- Ningún criterio de esta lista

#### 5. Atributos del proveedor

- Confiabilidad (*percepción unilateral hacia el proveedor*)
- Reputación del proveedor (*pública; qué es lo que otros clientes opinan del proveedor*)
- Compartición de información (*facilidad y disponibilidad del proveedor para compartir información importante*)
- Respeto a las políticas (*alineación con las políticas, código de ética del proveedor o seguimiento de procesos*)
- Historial de rendimiento (*cómo se ha desempeñado el proveedor a lo largo del tiempo*)
- Problemas éticos
- Adaptabilidad (*Capacidad del proveedor de adaptarse a los cambios del entorno: legal, comercial, tecnología, tendencias de mercado, etcétera*)
- Transparencia (*Disposición del proveedor a compartir detalles críticos*)
- Certificaciones (*ISO, UL, entre otras, relevantes a sus procesos o a la fabricación del producto*)
- Cumplimiento normativo (*Leyes, NOMs, NMX, etcétera*)
- Ningún criterio de esta lista

6. **¿Existe algún criterio adicional que usted considere importante y que no se haya mencionado anteriormente? ¿O algún comentario o criterio que sugiera replantear?**

Por favor, siéntase con la libertad de proponer aquellos criterios que usted utiliza al momento de escoger a un proveedor y que no se mencionaron anteriormente. **(Opcional)**

## APÉNDICE D

# RESULTADOS DE LA ENCUESTA A TOMADORES DE DECISIONES

---

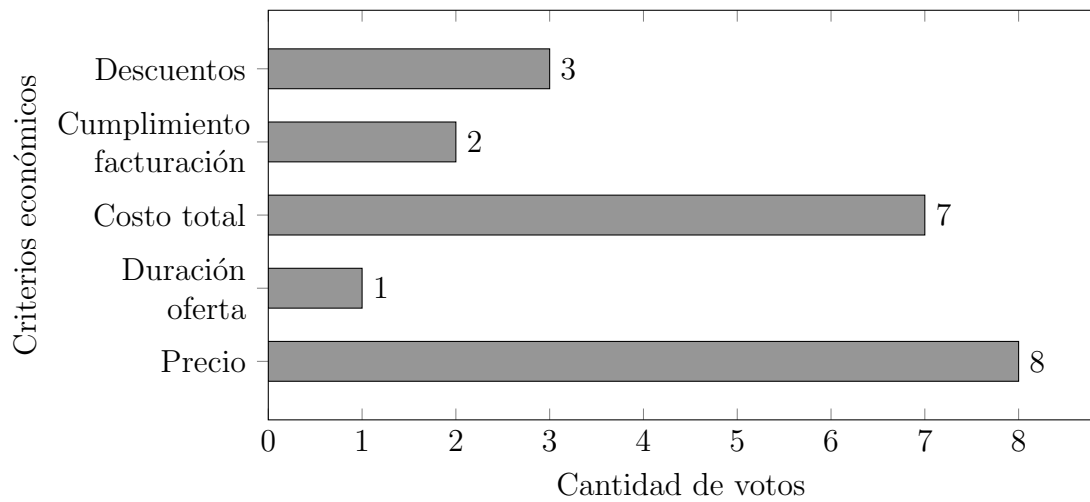


FIGURA D.1: Resultados de la encuesta para los criterios económicos

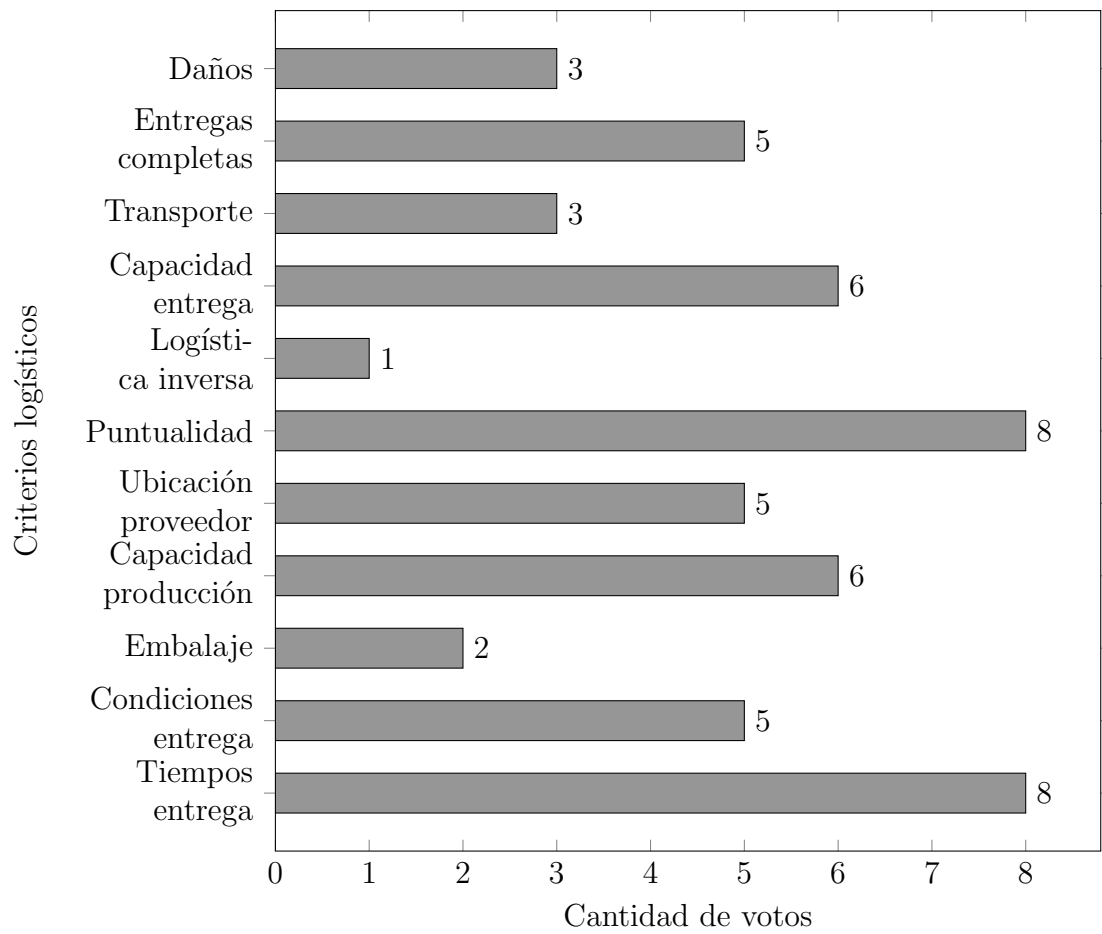


FIGURA D.2: Resultados de la encuesta para los criterios logísticos

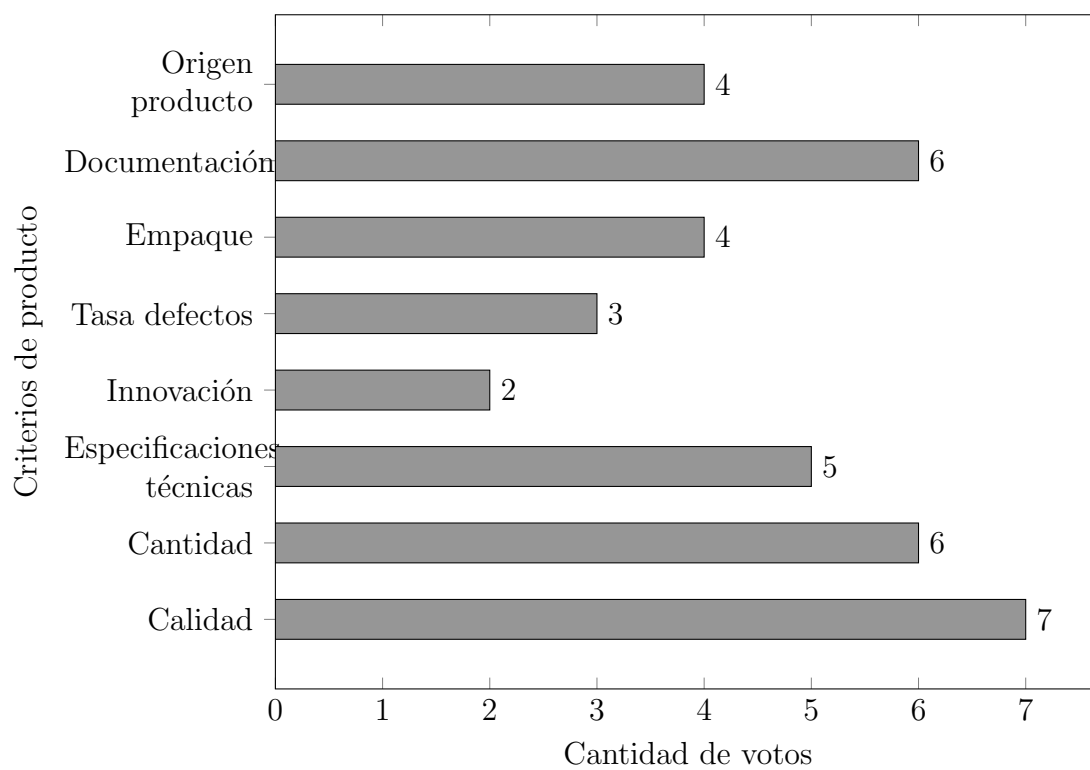


FIGURA D.3: Resultados de la encuesta para los criterios de producto

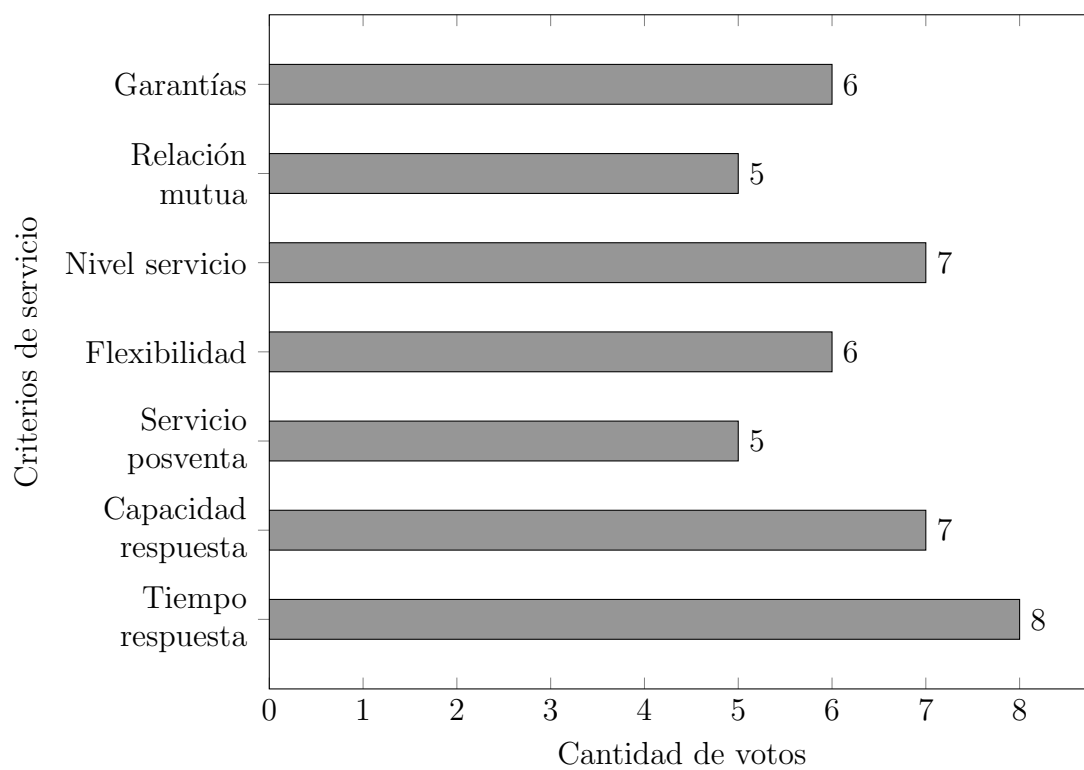


FIGURA D.4: Resultados de la encuesta para los criterios de servicio

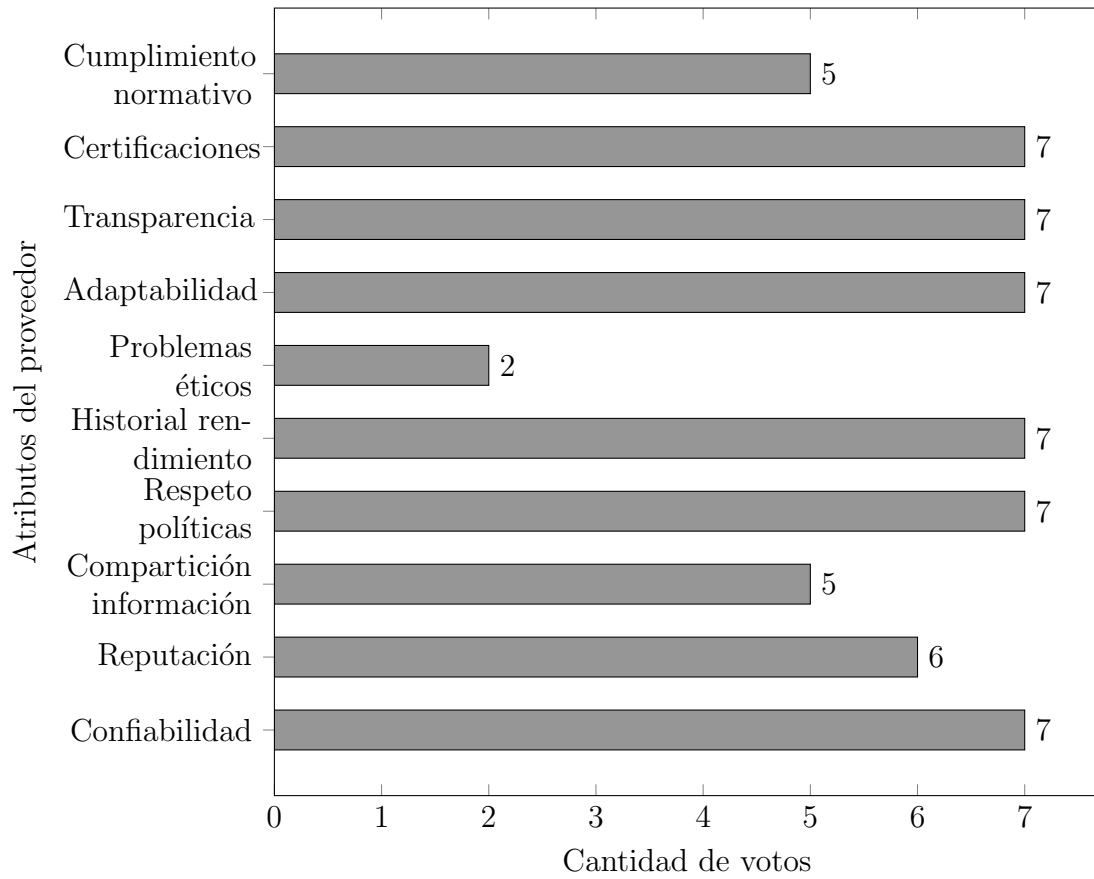


FIGURA D.5: Resultados de la encuesta para los atributos del proveedor

# BIBLIOGRAFÍA

---

- ABDULLA, A. y G. BARYANNIS (2024), «A hybrid multi-criteria decision-making and machine learning approach for explainable supplier selection», *Supply Chain Analytics*, **7**(100074), págs. 1–13.
- AGUEZZOUL, A. y P. LADET (2006), «Sélection et évaluation des fournisseurs : Critères et méthodes», *Revue Française de Gestion Industrielle*, **2**(25), págs. 5–28.
- ALCALÁ CASANOVA, C., J. CARRIÓN BAZ, D. BARKATZ y P. ARAGONÉS BELTRÁN (2021), «Selection of a supplier for the manufacture of a luminaire using anp decision support technique», en *25th International Congress on Project Management and Engineering*, págs. 903–913, URL <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2946>.
- ALI, M. R., M. A. NIPU y S. A. KHAN (2023), «A decision support system for classifying supplier selection criteria using machine learning and random forest approach», *Decision Analytics Journal*, **7**(100238), págs. 1–14.
- ARNSETH, L. (2015), «Cover story», *Inside Supply Management*, **26**(1), págs. 18–27.
- BAI, Y. y D. WANG (2006), *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*, capítulo Fundamentals of fuzzy logic control – Fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications, Springer, págs. 17–36.
- BALLOU, R. H. (2004), *Logística: Administración de la cadena de suministro*, quinta edición, Pearson Education.

- BOŠKOVIĆ, S., S. JOVČIĆ, V. SIMIĆ, L. ŠVADLENKA, M. DOBRODOLAC y N. BACANIN (2020), «A new criteria importance assessment (CIMAS) method in multi-criteria group decision-making: Criteria evaluation for supplier selection», *Facta Universitatis*, **1**(2023), págs. 1–16.
- CHATTOPADHYAY, R., S. CHAKRABORTY y C. SHANKAR (2020), «An integrated D-MARCOS method for supplier selection in an iron and steel industry», *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, **3**(2), págs. 49–69.
- CHEN, C.-H. (2020), «A novel multi-criteria decision-making model for building material supplier selection based on Entropy-AHP weighted TOPSIS», *entropy*, **22**(259), págs. 1–23.
- CHOPRA, S. y P. MEINDL (2016), *Supply chain management: Strategy, planning and operation*, sixth edición, Pearson Education.
- CORSI, A., D. H. BARBOSA y A. M. K. MORO (2020), «Aplicação da metodologia Analytic Hierarchy Process para seleção de fornecedores em uma indústria de confecção», *Navus*, **10**, págs. 1–20.
- DA SILVA, A. S., M. L. D. S. DOMINGUES, M. H. M. MOLINA y A. L. SANCHES (2024), «Análise comparativa na escolha de fornecedores corporativos utilizando o método de análise hierárquica (AHP)», *International Journal of Professional Business Review*, **9**(11), págs. 1–13.
- DE ALMEIDA, A. T. (2013), *Processo de decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério*, Editora Atlas.
- DE ALMEIDA, M. R., L. M. S. MACIEL, C. D. P. F. MOTA y J. A. DE ALMEIDA (2023), «Seleção de fornecedores para indústria têxtil: Uma abordagem multicritério», en *XLIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, págs. 1–13.

- DE BOER, L., E. LABRO y P. MORLACCHI (2001), «A review of methods supporting supplier selection», *European Journal of Purchasing & Supply Management*, **7**(2), págs. 75–89.
- DE VASCONSELOS, A. R. (2022), *A seleção de fornecedores no contexto da cadeia de suprimentos: Um estudo de caso de três montadoras de veículos automotores da região sudeste do Brasil*, Tesis de Maestría, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- DICKSON, G. W. (1966), «An analysis of vendor selection systems and decisions», *Journal of Purchasing*, **1**(2), págs. 5–17.
- DOBOS, I. y G. VÖRÖSMARTY (2023), «Input and output reconsidered in supplier selection DEA model», *Central European Journal of Operations Research*, **32**(2024), págs. 67–81.
- DOS SANTOS VIEIRA, K., A. P. HENRIQUES DU GUSMÃO y M. MENDOÇA SILVA (2018), «Problema de seleção de fornecedores - Uma abordagem multicritério usando VFT e FITradeoff», en *Anais do Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, págs. 1–12.
- ESTEBAN NIETO, N. T. (2018), «Tipos de investigación», <https://api.core.ac.uk/oai/oai:repositorio.unisdg.edu.pe:USDG/34>.
- GHASEMPOOR ANARAKI, M., D. S. VLADISLAV, M. KARBASIAN, N. OSINTSEV y V. NOZICK (2021), «Evaluation and selection of supplier in supply chain with fuzzy Analytical Network Process approach», *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, **2**(1), págs. 69–88.
- GONÇALVES, A. T. P. (2023), «Modelo de seleção de fornecedores em relacionamentos colaborativos na cadeia de suprimentos», *Revista de Administração e Contabilidade da Unisonos*, **20**(3), págs. 1981–2010.

- GOUVEIA, J. P. B. A. (2022), *Desenvolvimento de sistemas de avaliação de fornecedores baseado em fuzzy logic*, Tesis de Maestría, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- HANDFIELD, R., R. MONCKZKA, L. GIUNIPERO y J. PATTERSON (2009), *Sourcing and Supply Chain Management*, South-Western.
- HERNÁNDEZ SAMPIERI, R. y C. P. MENDOZA TORRES (2018), *Metodología de la investigación científica: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*, primera edición, McGraw Hill Education.
- HUSHAYSH, M. (2019), *Multi-criteria decision analysis for business intelligence: The case of a membership-based organization*, Tesis Doctoral, Université Polytechnique Hauts-de-France.
- ISLAM, M. M. y M. ARAKAWA (2022), «Integrated multi-criteria group decision-making model for supplier selection in an uncertain environment», *Cogent Engineering*, **9**(1), págs. 1–30.
- JANA, C., H. GARG, M. PAL, B. SARKAR y G. WEI (2024a), «MABAC framework for logarithmic bipolar fuzzy multiple attribute group decision-making for supplier selection», *Complex & Intelligent Systems*, **10**(2024), págs. 273–288.
- JANA, C., A. SIAB, M. S. ALI KHAN, M. PAL, L. MARTÍNEZ y M. A. JAN (2024b), «Decision-making for supplier selection problems based on qualiflex technique using likelihood method in LIVIFS environment», *Expert Systems With Applications*, **252**(124136), págs. 1–19.
- KRALJIC, P. (1983), «Purchasing must become supply management», *Harvard Business Review*, **61**, págs. 109–117.
- LAMBERT, D. M., S. J. GARCÍA DASTUGUE y K. L. CROXTON (2005), «An evaluation process-oriented supply chain management frameworks», *Journal of Business Logistics*, **26**(1), págs. 25–51.

- LEONESI, T. y L. F. TERAZZI (2020), «Identificação e hierarquização de critérios e subcritérios para seleção de fornecedores em uma concessionária de rodovias utilizando o método analytic hierarchy process (AHP)», *Interface Tecnológica*, **17**(2), págs. 693–705.
- LEONG, W. Y., K. Y. WONG y W. P. WONG (2022), «A new integrated multi-criteria decision-making model for resilient supplier selection», *Applied System Innovation*, **8**(5), págs. 1–18.
- LI, G., G. KOU, Y. LI y Y. PENG (2021), «A group decision making approach for supplier selection with multi-period fuzzy information and opinion interaction among decision makers», *Journal of the Operational Research Society*, **73**(4), págs. 855–868.
- LYU, F., Y. ZHANG, Z. FENG, R. DING y J. SU (2021), «Multiple attribute decision-making model for supplier selection in service-oriented manufacturing paradigm», *Mathematical Problems in Engineering*, **2021**(5561299), págs. 1–10.
- MANIK, M. H. (2023), «Addressing the supplier selection problem by using the Analytical Hierarchy Process», *Heliyon*, **9**(17997), págs. 1–12.
- MARTÍNEZ MARÍN, J. E. (2018), «Inteligencia de Proveedores», Universitat Oberta de Catalunya.
- MORETTI, V., B. S. RIBEIRO, M. I. C. ULLOA, C. HLUSZKO y J. C. COLMENERO (2022), «Metodologia para seleção de fornecedores em pequenos negócios: Uma abordagem multicritério», en *XII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, págs. 1–11, URL [https://aprepro.org.br/conbrepro/anais/arquivos/09212022\\_140952\\_632b465014ad5.pdf](https://aprepro.org.br/conbrepro/anais/arquivos/09212022_140952_632b465014ad5.pdf).
- MORTARA, V. A. y L. B. TABONE (2020), «Selección de proveedores bajo una estrategia de abastecimiento múltiple en una empresa metalmeccánica», *Ingeniería Industrial*, **2021**(40), págs. 1–22.

- MOURA, M. D. F. C., L. N. D. D. L. DE ALMEIDA y M. D. D. O. DUARTE (2021), «Modelo multicritério para seleção de fornecedores de cimento para um empresa de pré-moldados de Pernambuco», en *XLI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, págs. 1–13.
- NAKIBOGLU, G. y B. BULGURCU (2020), «Supplier selection in a Turkish textile company by using intuitionistic fuzzy decision-making», *The Journal of The Textile Institute*, **112**(2), págs. 322–332.
- NAZARI SHIRKOUHI, S., M. TAVAKOLI, K. GOVINDAN y S. MOUSAKHANI (2023), «A hybrid approach using Z-number dea model and artificial neural network for resilient supplier selection», *Expert Systems With Applications*, **222**(119746), págs. 1–16.
- NISHANTH, F. P., S. K. DASH y S. R. MAHAPATRO (2024), «Critical study of type-2 fuzzy logic control from theory to applications: A state-of-the-art comprehensive survey», *e-Prime: Advances in electrical engineering, electronics and energy*, **10**(100771), págs. 1–24.
- PAGE, M. J., J. E. MCKENZIE, P. M. BOSSUYT, I. BOUTRON, T. C. HOFFMANN, C. D. MULROW, L. SHAMSEER, J. M. TETZLAFF, E. A. AKL, S. E. BRENNAN, R. CHOU, J. GLANVILLE, J. M. GRIMSHAW, A. HRÓBJARTSSON, M. M. LALU, T. LI, E. W. LODER, E. MAYO-WILSON, S. McDONALD, L. A. MCGUINNESS, L. A. STEWART, J. THOMAS, A. C. TRICCO, V. A. WELCH, P. WHITING y D. MOHER (2021), «The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews», *Systematic Reviews*, **10**(1), págs. 1–11.
- PAMUCAR, D., M. YAZDANI, R. OBRADOVIC, A. KUMAR y M. TORRES JIMÉNEZ (2020), «A novel fuzzy hybrid neutrosophic decision-making approach for the resilient supplier selection problem», *International Journal of Intelligent Systems*, **35**(12), págs. 1934–1986.
- PATÓ, G. S. B. y F. KISS (2019), «The importance of supplier evaluation in short supply chains», *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Oeconomica*, **64**(2), págs. 1–11.

- RAMÍREZ HERNÁNDEZ, V. F. (1996), «Tipos de investigación y manejo de hipótesis», *CIENCIA ergo-sum*, **3**(1).
- RESEARCH RABBIT (2024), «Research Rabbit», <https://researchrabbitapp.com/>.
- ROBINSON, S. (2004), *Simulation: The practice of model development and use*, John Wiley & Sons.
- SCHWER, K. y C. HITZ (2018), «Designing organizational structure in the age of digitalization», *Journal of Eastern European and Central Asian Research*, **5**(1), págs. 1–11.
- SCIKIT-FUZZY TEAM (2012), «skfuzzy 0.4.2 docs», <https://scikit-fuzzy.github.io/scikit-fuzzy/>.
- SINGH, H., M. M. GUPTA, T. MEITZLER, Z.-G. HOU, K. K. GARG, A. M. G. SOLO y L. A. ZADEH (2013), «Real-life applications of Fuzzy Logic», *Advances in Fuzzy Systems*, **2013**(1), págs. 581 879–581 882.
- SOFFA, M. C. F. y R. H. P. LIMA (2022), «Aplicação do método AHP para identificação e seleção de fornecedores na indústria têxtil», en *XLII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, págs. 1–15.
- TRENT, R. J. y R. M. MONCKZKA (2003), «International purchasing and global sourcing - What are the differences?», *Journal of Supply Chain Management*, **39**(3), págs. 26–36.
- ULUTAS, A., D. STANUJKIC, D. KARABASEVIC, G. POPOVIC, E. K. ZAVADSKAS, F. SMARANDACHE y W. K. M. BRAUERS (2021), «Developing of a novel integrated MCDM MULTIMOOSRAL approach for supplier selection», *Informatica*, **32**(1), págs. 145–161.
- UTAMA, D. M., T. BAROTO, M. F. IBRAHIM y D. S. WIDODO (2021), «Evaluation of supplier performance in plastic manufacturing industry: A case study», *Journal of Physics: Conference Series*, **1845**(12016), págs. 1–8.

- VALENTIM, M. E. C. (2024), *Modelo multicritério de seleção de fornecedores para apoiar decisões de compras de uma fábrica de móveis*, Tesis de Maestría, Universidade Federal Rural do Semi-Árido.
- WARNER, J., J. SEXAUER, W. VAN DEN BROECK, B. P. KINOSHITA, J. BALINSKI, SCIKIT-FUZZY, C. CLAUSS, TWMEGGS, ALEXSAVIO, A. UNNIKRIISHNAN, M. MIRRETTI, G. CASTELÃO, F. ARRUDA PONTES, T. UELWER, PHME283, PD2F, LAURAZH, F. BATISTA, MOETAYUKO y T. GERMER (2024), «JDWarner/scikit-fuzzy: Scikit-Fuzzy 0.5.0 (v0.5.0)», <https://doi.org/10.5281/zenodo.13372212>.
- YILDIZ ÇANKAYA, S. (2020), «The effects of strategic sourcing on supply chain strategies», *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, **2**(13), págs. 129–148.
- ZADEH, L. A. (1965), «Fuzzy Sets», *Information and Control*, **1965**(8), págs. 338–353.
- ZADEH, L. A. (1973), «Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **3**(1), págs. 28–44.
- ZÚÑIGA MARÍN, J. S. y J. L. JIMÉNEZ LORZA (2024), «Propuesta de modelo de evaluación y selección de proveedores basado en técnicas multicriterio. Caso: Empresa del sector alimenticio», *Revista EIA*, **21**(41), págs. 1–31.
- ÁLVAREZ ARANDA, M., L. D. MARTÍNEZ URBINA, J. APARICIO URBANO y M. CRUZ ROMERO (2023), «Método de pronóstico y multicriterio para analizar la demanda y selección de proveedores en una PyME», *Ingeniería Investigación y Tecnología*, **24**(2), págs. 1–11.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Saúl Roberto Morales Velázquez

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROVEEDORES EN EL PROCESO DE  
NPI DE UNA EMPRESA DE LA INDUSTRIA HVAC MEDIANTE UN  
MODELO DE LÓGICA DIFUSA

Nacido el 20 de diciembre de 2000 en Matehuala, San Luis Potosí, México. Hijo de Michelle Alejandra Velázquez Pérez y Andrés Alejandro Morales Moreno.

Es licenciado en Relaciones Internacionales por la Facultad de Ciencias Políticas y Relaciones Internacionales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Se ha desempeñado como comprador de indirectos en el corporativo de Grupo Protexa y actualmente es ingeniero de *sourcing* NPI en Carrier México.