

Medición del desempeño para cadenas de abastecimiento en ambientes de imprecisión usando lógica difusa¹

Performance Measurement of Supply Chains in Inaccurate Environments Using Fuzzy Logic²

Medição do desempenho para cadeias de abastecimento em ambientes de imprecisão usando lógica difusa³

Código SICI: 0123-2126(201206)16:1<95:MDCAAI>2.3.TX;2-4

Wilson Adarme-Jaimes⁴

Martín Darío Arango-Serna⁵

Juan Miguel Cogollo-Flórez⁶

¹ Fecha de recepción: 22 de febrero de 2011. Fecha de aceptación: 23 de junio de 2011. Este artículo se deriva de un proyecto de investigación denominado *Propuesta metodológica para la coordinación de agentes en la industria naval colombiana*, desarrollado en la Universidad Nacional de Colombia por los grupos de investigación Sociedad Economía y Productividad (SEPRO) y Logística Industrial y Organizacional (GICO). El proyecto fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia y Cotecmar.

² Submitted on February 22, 2011. Accepted on June 23, 2011. This article is the result of the research project *Methological proposal for the coordination of agents in the Colombian naval industry*. Developed by the research groups Sociedad Economía y Productividad (SEPRO) and Logística Industrial y Organizacional (GICO), Universidad Nacional de Colombia. This project was funded by Universidad Nacional de Colombia and Cotecmar.

³ Data de recepção: 22 de fevereiro de 2011. Data de aceitação: 23 de junho de 2011. Este artigo deriva de um projeto de pesquisa denominado *Proposta metodológica para a coordenação de agentes na indústria naval colombiana*, desenvolvido na Universidade Nacional da Colômbia pelos grupos de pesquisa Sociedade Economia e Produtividade (SEPRO) e Logística Industrial e Organizacional (GICO). O projeto foi financiado pela Universidade Nacional da Colômbia e Cotecmar.

⁴ Ingeniero industrial, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Profesor asistente, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Colombia. Correo electrónico: wadarme@unal.edu.co.

⁵ Ingeniero industrial, Universidad Autónoma Latinoamericana, Medellín, Colombia. Magíster en Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Doctor en Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Correo electrónico: mdarango@unal.edu.co.

⁶ Ingeniero de alimentos, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. Estudiante de la Maestría en Ingeniería Administrativa, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia. Investigador del Grupo Logística Industrial y Organizacional (GICO), Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Correo electrónico: jmcogollof@unal.edu.co.

Resumen

En el presente artículo se muestra la aplicación de la lógica difusa en la medición del desempeño de la cadena de abastecimiento en un astillero colombiano. Se diseñó un modelo que integró los principios del *Balanced Scorecard* con la teoría de conjuntos difusos para el tratamiento de la imprecisión asociada a la gestión de la cadena de abastecimiento en estudio. La aplicación del modelo permitió obtener resultados numéricos concretos del desempeño global de la cadena y de cada perspectiva considerada (clientes, finanzas, procesos y aprendizaje y crecimiento), incorporando la imprecisión y vaguedad en dichos cálculos.

Palabras clave

Medición del trabajo, lógica difusa, gestión de recursos humanos, rendimiento tecnológico, indicadores de gestión.

Abstract

This article demonstrates the application of fuzzy logic in measuring the performance of the supply chain at a shipyard in Colombia. We designed a model that incorporated the Balanced Scorecard principles and the theory of fuzzy sets for the treatment of uncertainty associated to the management of the supply chain under study. The application of the model allowed obtaining specific numerical results regarding the overall performance of the chain and of each considered perspective (customers, finance, and learning and growth processes) by incorporating the imprecision and vagueness of said calculations.

Key words

Work measurement, fuzzy logic personnel management, performance technology, management indicators.

Resumo

No presente artigo mostra-se a aplicação da lógica difusa na medição do desempenho da cadeia de abastecimento em um estaleiro colombiano. Desenhou-se um modelo que integrou os princípios do *Balanced Scorecard* com a teoria de conjuntos difusos para o tratamento da imprecisão associada à gestão da cadeia de abastecimento em estudo. A aplicação do modelo permitiu obter resultados numéricos concretos do desempenho global da cadeia e de cada perspectiva considerada (clientes, finanças, processos e aprendizagem e crescimento), incorporando a imprecisão e vagueza em tais cálculos.

Palavras chave

Medição do trabalho, lógica difusa, gestão de recursos humanos, rendimento tecnológico, indicadores de gestão.

Introducción

Los ambientes de imprecisión en que operan las cadenas de abastecimiento (CA) se dan por exceso o falta de información para la toma de decisiones, lo que ocasiona dificultad en la definición, la medición y el seguimiento de objetivos y metas que permitan establecer índices de cumplimiento asociados a la medición del desempeño de las CA. Como respuesta a estos retos de la gestión empresarial han surgido teorías, enfoques y metodologías (flexibilidad, resiliencia, entre otras) que utilizan herramientas como la lógica difusa para obtener soluciones confiables que se adapten con facilidad a los cambios de los parámetros de la imprecisión (Arango et ál., 2008).

Adicional al tratamiento de los ambientes imprecisos, otro reto emergente es lograr que la medición del desempeño organizacional trascienda el enfoque financiero tradicional y se lleve a cabo de manera integral con medios adecuados a las nuevas generaciones de aplicaciones en la gestión de CA. Esta necesidad de disponer de herramientas de medición del desempeño en diferentes ámbitos de toma de decisiones y con un enfoque balanceado llevó a Kaplan y Norton (1992) a proponer el *Balanced Score Card* (BSC) como alternativa para evaluar el desempeño de una organización desde cuatro perspectivas: clientes, finanzas, procesos internos y aprendizaje y crecimiento.

Aunque en su origen el concepto de BSC constituía una herramienta de medición, este evolucionó hacia un medio de implementación estratégica integral. Hoy día, el BSC posibilita la administración del desempeño que alinea y enfoca los esfuerzos y recursos de la organización, utilizando indicadores de gestión para conducir las estrategias y crear valor a largo plazo, considerando, simultáneamente, las relaciones entre ellos. La aplicación del BSC a la gestión de CA es estructuralmente similar al modelo tradicional utilizado para una empresa, con la diferencia que los indicadores desarrollados deben estar orientados a evaluar integralmente el desempeño de la cadena y no solo el intraorganizacional.

En el presente artículo se desarrolla y aplica un esquema que integra los fundamentos del BSC con la teoría de conjuntos difusos para la medición del

desempeño de una CA en la industria naval centrada en un astillero. Inicialmente se hace una revisión teórica-conceptual acerca de la aplicación de la lógica difusa en sistemas de medición del desempeño, luego se formula la estructura del BSC difuso, *core* del trabajo de investigación; posteriormente se describe la aplicación del modelo en un astillero, y se presentan los resultados que validan la pertinencia de la lógica difusa como alternativa en la implementación de iniciativas de gestión integral de CA.

1. Antecedentes. Lógica difusa y medición del desempeño

La lógica difusa es multivariada y permite, de forma práctica, abordar problemas como se presentan en el mundo real. Se origina en la teoría de conjuntos difusos propuesta por Zadeh (1975), que representa una generalización de la teoría clásica de conjuntos y se aplica a conceptos que pueden tomar un valor cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que fluctúan entre la verdad absoluta y la falsedad total. El fundamento de los conjuntos difusos es el hecho de que los elementos de construcción del razonamiento humano no son números, sino etiquetas lingüísticas; así, la lógica difusa emula estas características y usa datos aproximados para hallar soluciones precisas.

La fuerza de la teoría de conjuntos difusos radica en su capacidad de proporcionar un marco alterno al modelamiento de la imprecisión; permite analizar los conceptos de posibilidad y vaguedad separados de la incertidumbre aleatoria o probabilística según Klir y Yuan (1995). Un conjunto difuso está definido por una función que oscila entre 0 (falso) y 1 (verdadero), la cual asigna el grado de pertenencia a cada elemento en un conjunto. La forma de la función de pertenencia puede ser lineal (triangular o trapezoidal) o no lineal (gausiana, generalizada de Bell, sigmoidal, gamma, entre otras), dependiendo de la naturaleza del sistema estudiado (Kaufmann y Gil, 1993). El grado de pertenencia representa el grado en el cual el juicio de un experto pone un elemento en el conjunto. Un elemento puede pertenecer a más de un conjunto con diferentes grados de pertenencia y permitir una transición gradual entre conjuntos adyacentes.

La aplicación de la lógica difusa en el área de medición del desempeño ha tenido variados desarrollos en los últimos años por parte de diversos investigadores, especialmente en la región Asia-Pacífico. Los trabajos más relevantes empezaron a publicarse de forma profusa a partir del 2000, empezando por Lau et ál. (2002), que propusieron una metodología para analizar y monitorear el desempeño de los proveedores en una CA, basados en los criterios de calidad de producto y tiempo de entrega. Ohdar y Kumar (2004) desarrollaron una

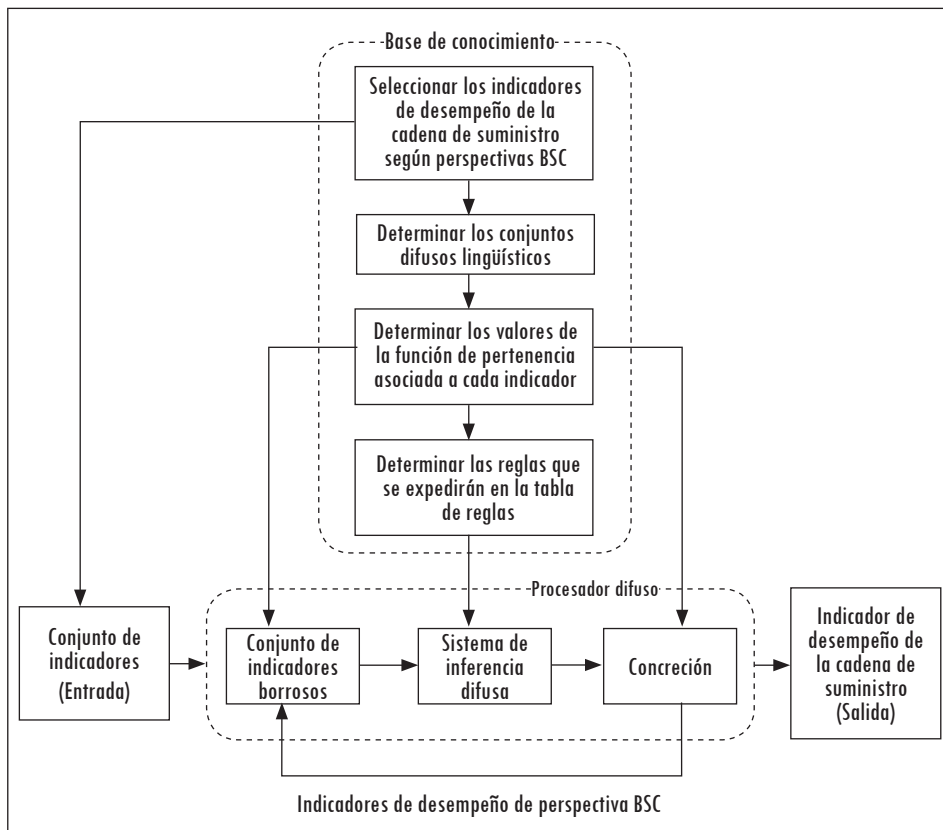
metodología difusa basada en algoritmos genéticos para evaluar el desempeño de proveedores. Ling et ál. (2006) presentaron un indicador para evaluar la agilidad en CA utilizando lógica difusa centrada en la aplicación de la aproximación lingüística y la aritmética difusa para sintetizar números difusos, con el fin de obtener el índice de agilidad de las operaciones de manufactura. Silva et ál. (2007) utilizaron la agregación ponderada difusa para formular problemas de optimización de sistemas logísticos, la cual puede extenderse a diferentes tipos de metodologías de optimización como algoritmos genéticos o colonia de hormigas. Kanda y Deshmukh (2007) aplicaron un enfoque de lógica difusa combinado con *Analytic Hierarchy Process* (AHP) en la evaluación del grado de coordinación entre los integrantes de una cadena de suministro. Arango et ál. (2010) describen una aplicación de indicadores con lógica difusa en el sector panificador colombiano.

2. BSC difuso para medición del desempeño en una cadena

En la formulación clásica del BSC, las variables se representan con números y obvian el hecho de que en la práctica están afectadas por la imprecisión y la vaguedad y necesitan incorporar, en muchos casos, variables cualitativas en la medición del desempeño, lo cual dificulta el modelamiento matemático para obtener un resultado concreto que facilite la toma de decisiones. Para resolver este inconveniente e incorporar la imprecisión y el razonamiento aproximado en aplicaciones reales de medición del desempeño de la CA estudiada, se integrará un modelo de lógica difusa al BSC clásico. El modelo que se propone tiene una base de conocimiento y un procesador difuso (figura 1). Metodológicamente, se establece que la selección de los indicadores requiere una fase previa de revisión bibliográfica o consulta con expertos sobre la aplicación del BSC en la medición del desempeño de CA y en los modelos de lógica difusa aplicados; sigue una fase de contextualización y referenciación con la industria para determinar los índices de aceptación que sirvan de insumo para construir los conjuntos difusos y la función de pertenencia asociados a cada indicador y, posteriormente, construir la base de regla difusa necesaria para el procesador difuso.

Los indicadores seleccionados y los valores de sus funciones de pertenencia se combinan en cada perspectiva usando la base de regla difusa, que contiene el conjunto de reglas *si-entonces*, desarrolladas por la experiencia y el conocimiento de un equipo de medición del desempeño conformado por personal con experiencia en el tema. El sistema de inferencia difusa combina el desempeño de los indicadores y se obtiene como salida de cada regla una salida difusa individual. Esta salida permite obtener un indicador de desempeño concreto (determinístico).

Figura 1. Modelo de lógica difusa integrado con BSC para medición de desempeño de CA



Fuente: presentación propia de los autores.

3. Aplicación del BSC difuso en la medición del desempeño

En los procesos de implementación de sistemas de medición del desempeño de CA es importante reconocer el funcionamiento detallado del sector, actores de la cadena, uso de modelos de integración, particularidades de los productos y servicios, entre otros aspectos que influyen y determinan el desarrollo global de la CA. Un astillero constructor es básicamente una planta de ensamble de unidades estructurales de acero, con actividades menores de fabricación para el corte, el doblado y el formado de láminas y tuberías, de acuerdo con las especificaciones de diseño de la embarcación.

La incorporación de técnicas avanzadas de planificación de la producción ha permitido construir embarcaciones a partir de módulos con instalaciones y sistemas integrados, los cuales se unen para formarlas. Por su parte, un astillero

reparador lleva a cabo una gran variedad de actividades (desmantelamiento, conversión, reparaciones en dique y en muelle) y prestación de servicios a la industria naval (mantenimiento y reparación de motores individuales, metrología y calibraciones, pruebas de ensayos no destructivos, entre otros), lo que requiere una alta flexibilidad y adaptabilidad a las necesidades del cliente.

Un proyecto de construcción o reparación naval, marítima o fluvial, se subdivide en varios subproyectos desarrollados, generalmente, por empresas contratistas, los cuales tienen como producto la entrega de una parte del buque en condiciones funcionales. Un punto crítico es la etapa de diseño, por lo que cada pedido (embarcación que se va a construir o a reparar en el astillero) tiene una fase de diseño particular (Gosling y Naim, 2009), determinada en gran medida por el cliente; de igual manera, se desarrollan varios proyectos simultáneos con diferentes especificaciones técnicas y tiempos de ejecución y en diferentes etapas del proceso de fabricación (Abdul y Nabi, 2003).

Otro punto crítico está localizado en la fabricación y compra de materias primas e insumos (Olhager, 2003), especialmente, en los proyectos de reparación, los cuales, por lo general, tienen corta duración (de siete a quince días promedio) y hay una alta exigencia de cumplimiento de plazos de entrega por parte del cliente, debido al costo de tener una embarcación fuera de servicio, en cuanto a costos fijos (salarios de la tripulación, fletamento de la embarcación), costo de días en el astillero, pérdida de facturación de servicios, entre otros. Igualmente, es común hacer ajustes a los requerimientos de materiales e insumos, ya que estos no se conocen al inicio de manera precisa y varían a medida que avanzan las actividades de reparación.

En general, los astilleros se consideran el punto de convergencia de la CA en este sector (Beamon y Chen, 2001), lo cual puede llegar a proporcionar la capacidad de asumir una posición dominante, determinando operaciones, funcionamiento y convirtiéndose, así, en un tipo de pivote en la CA (Capó-Vicedo et ál., 2007; Lehtinen y Ahola, 2010). La aplicación del modelo BSC difuso incluye selección de indicadores, determinación de conjuntos difusos y funciones de pertenencia de los indicadores, método de inferencia difusa, construcción de sistemas de reglas y concreción. El desarrollo analítico y los cálculos computacionales resultantes del modelo fueron realizados usando el *Fuzzy Toolbox* del *software* Matlab®.

3.1. Selección de indicadores

La medición del desempeño a través de los rasgos de las operaciones de la CA puede sustentarse en la selección y en la definición de indicadores utilizados

para evaluar la eficiencia, la eficacia y la efectividad de sus operaciones. En los astilleros, la etapa de selección de indicadores requiere atento cuidado dada la complejidad de la CA: gran número de actores que influyen en el desarrollo de sus operaciones (múltiples proveedores, sociedades clasificadoras, compañías aseguradoras, contratistas, entes gubernamentales, entre otros), fases exclusivas de diseño y tiempos de fabricación y entrega diferentes para cada producto. De igual modo, los indicadores de la cadena deben tener un enfoque integral y facilitar la implementación de iniciativas de mejora en conjunto. Los indicadores seleccionados para el modelo BSC difuso aquí propuesto para medir el desempeño de la CA del astillero en estudio se describen en la tabla 1.

3.2. Conjuntos difusos y funciones de pertenencia de los indicadores

Un número difuso (en este caso, un indicador de desempeño) es un subconjunto difuso del referencial de los reales, que tiene una función de pertenencia normal y convexa. Puede ser representado a través de los segmentos formados al asignar un valor de unos determinados índices a la función de pertenencia (triangular, trapezoidal, gaussiana, generalizada de Bell, sigmoideal, gamma, entre otras). Los números difusos triangular y trapezoidal (figura 2) se destacan por su facilidad de adaptación, dado que permiten formalizar de manera fidedigna gran cantidad de situaciones organizacionales (Kaufman y Gil, 1993).

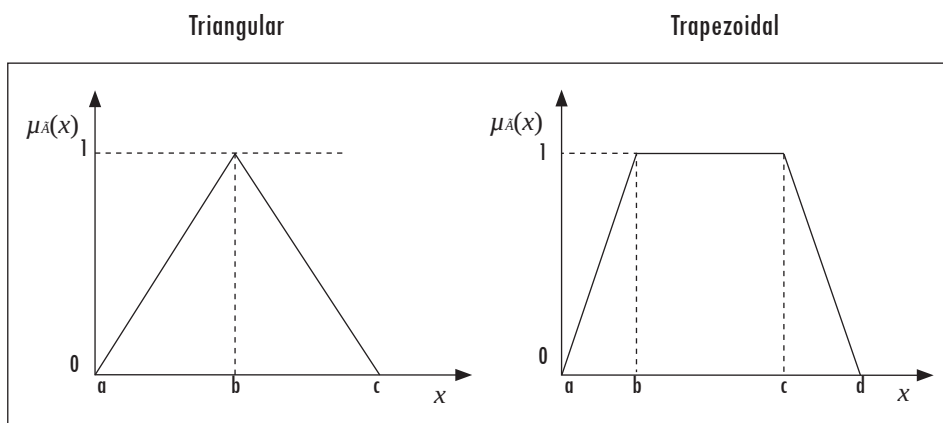
Tabla 1. Indicadores básicos y parámetros de los subconjuntos difusos asociados en las variables de entrada del desempeño de las perspectivas

Perspectiva BSC	Indicadores	Subconjuntos difusos											
		Bajo				Medio				Alto			
		a	b	c	d	a	b	c		a	b	c	d
Clientes	Ventas a nuevos clientes (%)	0	0	5	15	0	15	30		15	25	30	30
	Satisfacción de clientes (%)	0	0	10	50	0	50	100		50	90	100	100
	Cumplimiento presupuesto de ventas (%)	50	50	60	80	60	80	100		80	100	120	120
Financiera	Margen operacional (%)	0	0	5	15	5	15	25		15	25	30	30
	Rotación de activos fijos (núm. veces)	0	0	1	3	1	3	5		3	5	6	6
	EVA (cientos de millones de pesos)	0	0	1	2,5	1	2,5	4		2,5	4	5	5
Procesos internos	Costo de espacio de almacenamiento (\$ × 10.000/unidad)	10	10	14	20	14	20	26		20	26	30	30
	Tasa de rechazo de pedidos (%)	0	0	1	2,5	1	2,5	4		2,5	4	5	5
	Rotación de inventarios (núm. veces)	0	0	2	5	2	5	8		5	8	10	10
Aprendizaje y crecimiento	Eficiencia de activos físicos (TBC/m ² × m × t)	0	0	1	5	1	5	9		5	9	10	10
	Rotación de empleados (%)	0	0	1	2,5	1	2,5	4		2,5	4	5	5
	Inversión I + D + i/Ventas (%)	0	0	1	5	1	5	9		5	9	10	10
	Cumplimiento gestión corporativa (%)	0	0	10	50	10	50	90		50	90	100	100

$TBC/(m^2 \times m \times t)$: toneladas brutas compensadas/área de las posiciones de parada en $m^2 \times$ longitud del muelle de atraque en $m \times$ capacidad de levante en toneladas.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 2. Representación esquemática de números difusos



Fuente: presentación propia de los autores.

Su singularidad para modelar el comportamiento de indicadores de desempeño en ambientes de imprecisión radica en el hecho de que se hallan determinados por tres cantidades: una por debajo de la cual es inaceptable obtener resultados (a , para ambos números), otra en la que no será posible obtener valores superiores (c para triangular y d para trapezoidal) y, finalmente, aquella que representa el máximo nivel de presunción o satisfacción (b para triangular y el segmento b - c para trapezoidal).

Los parámetros de los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida para los cálculos del desempeño por perspectiva y del índice global de la CA se establecen analizando la información histórica mediante la construcción de histogramas de frecuencias y su correspondiente segmentación en terciles o quintiles, según el número de conjuntos difusos establecidos por el equipo de medición del desempeño:

3.2.1. Subconjuntos difusos de las variables de entrada para el cálculo del desempeño de las perspectivas

En la tabla 1 se muestran los subconjuntos difusos de cada uno de los indicadores asociados (variables de entrada) al cálculo del desempeño de las perspectivas. La función de pertenencia del subconjunto difuso *bajo* es de tipo trapezoidal y está definida por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & a, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c < x < d \\ 0 & d < x < \alpha \end{cases} \quad (1)$$

La función de pertenencia del subconjunto difuso *medio* es de tipo triangular y está definida por:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & b < x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x < c \end{cases} \quad (2)$$

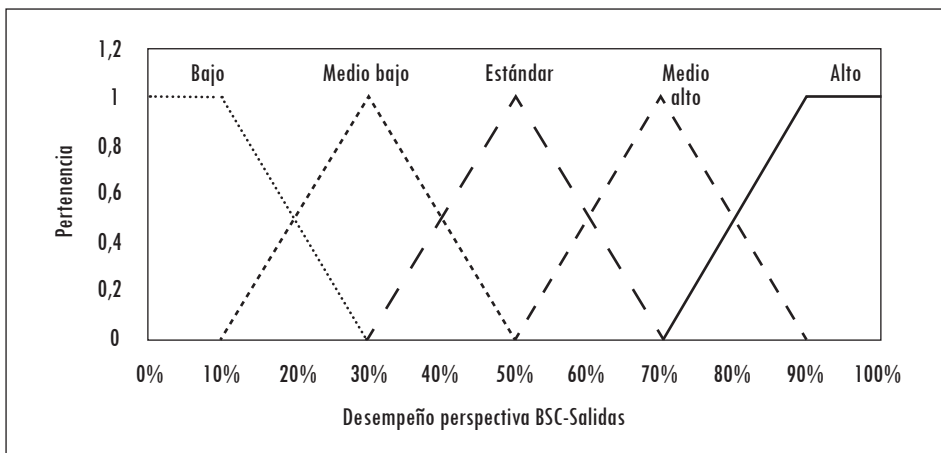
La función de pertenencia del subconjunto difuso *alto* es de tipo trapezoidal y está definida por:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1 & c, d \geq x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & d < x < a \end{cases} \quad (3)$$

3.2.2. Subconjuntos difusos de las variables de salida para el cálculo del desempeño de las perspectivas

De forma análoga a las variables de entrada, se definieron las funciones de pertenencia para los subconjuntos difusos (bajo, medio bajo, estándar, medio alto y alto) de las variables de salida (indicador de cada perspectiva), que se representan gráficamente en la figura 3.

Figura 3. Subconjuntos difusos de las variables de salida (indicador de desempeño de cada perspectiva)



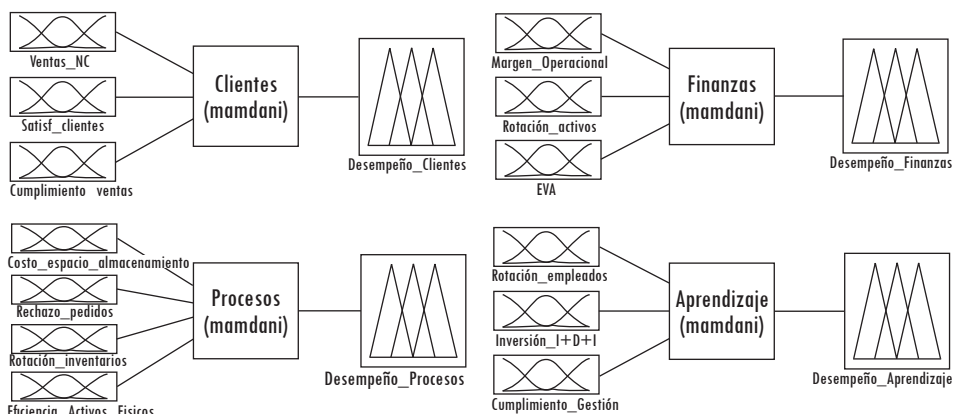
Fuente: presentación propia de los autores.

La definición de los subconjuntos difusos de las variables de entrada para el cálculo del indicador global del desempeño de la CA no se describe en esta sección, ya que las salidas de cada perspectiva corresponden a las entradas del sistema para el cálculo del desempeño de la cadena.

3.3. Método de inferencia difusa

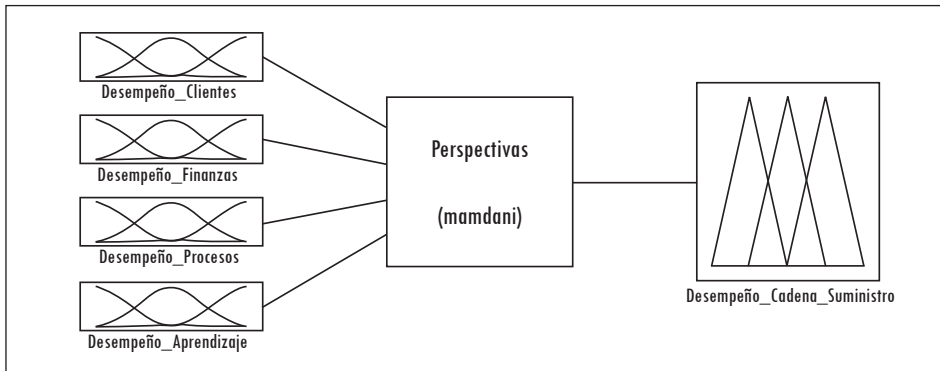
Un método de inferencia difusa permite derivar conclusiones (un valor difuso) desde un conjunto de reglas *si-entonces* y un conjunto de valores de entrada al sistema, mediante la aplicación de relaciones de composición. Los dos métodos de inferencia comúnmente utilizados son el Mandani, introducido por Mandani y Assilian (1975) y el TSK (Takagi-Sugeno-Kang), propuesto por Sugeno y Takagi (1985). La principal diferencia entre estos métodos radica en el tipo consecuente de las reglas difusas. Los sistemas tipo Mandani usan conjuntos difusos como consecuente de la regla y los TSK emplean funciones lineales de las variables de entrada con salidas de datos discretos. En esta investigación se utiliza el sistema de inferencia tipo Mandani (figuras 4 y 5) con salidas de valores continuos.

Figura 4. Sistemas de inferencia difusa para la medición del desempeño de las perspectivas clientes, finanzas, procesos y aprendizaje y crecimiento



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 5. Sistema de inferencia difusa para la medición del desempeño global de la cadena de suministro



Fuente: presentación propia de los autores.

3.4. Reglas de inferencia difusa

La definición de reglas resulta básica para el diseño del modelo BSC difuso, en la medida en que incorpora el juicio de los expertos o el análisis de información histórica. Este modelo contiene cuatro sistemas de reglas para las perspectivas y un sistema de reglas para el indicador de desempeño global de la cadena de suministro. La construcción de los sistemas de reglas se hizo a través de la elaboración de una matriz completa de conclusiones que consideraba todas las posibles combinaciones de las entradas y asignaba una conclusión a cada una.

En la tabla 1 se evaluaron las perspectivas *clientes*, *finanzas* y *aprendizaje* y *crecimiento* en tres variables de entrada, las cuales tienen tres categorías difusas, donde existen $3^3 = 27$ posibles combinaciones o reglas difusas en cada uno de sus sistemas. Por otro lado, la perspectiva *procesos* es evaluada en cuatro variables de entrada, que tienen tres categorías difusas, donde existen $3^4 = 81$ reglas difusas en su sistema (tabla 2). El índice global de desempeño de la CA es evaluado en cuatro variables de entrada (clientes, finanzas, procesos y aprendizaje y crecimiento), las cuales tienen cinco categorías difusas (bajo, medio bajo, estándar, medio alto y alto), donde se construyen $5^4 = 625$ reglas en su matriz de definición de reglas difusas.

Con el propósito de ilustrar el proceso, se toma como ejemplo la matriz de definición de reglas difusas de la perspectiva *procesos* (tabla 2). Los valores en las celdas representan el consecuente que describe cada combinación y corresponde a las categorías o etiquetas lingüísticas de los subconjuntos difusos de la variable de salida, así: *B* corresponde a bajo, *MB* es medio bajo, *E* es estándar, *MA* es

medio alto y *A* es alto. Cualquier celda en la matriz puede ser expresada como una regla. Por ejemplo, la celda sombreada corresponde a la siguiente regla: SI la eficiencia de activos físicos es *medio* Y la rotación de inventarios es *alto* y el rechazo de pedidos es *bajo* Y el costo de espacio de almacenamiento es *bajo* ENTONCES el desempeño de la perspectiva procesos es *medio alto*.

3.5. Concreción

El resultado del proceso de inferencia es un conjunto con una distribución difusa como respuesta. Si la toma de decisiones necesita resultados numéricos concretos, se debe eliminar la *difusidad* para obtener un número discreto o *crisp*. En la literatura se describen varios métodos para eliminar la difusidad, como el del centro del área, la bisectriz del área, el más pequeño de los máximos o el más grande de los máximos (Jang et ál., 1997). El método adecuado depende de su grado de ajuste a las consideraciones y restricciones de la aplicación que se desea hacer.

El método del centro del área es uno de los más usados y se utilizó en este trabajo debido a su continuidad y no ambigüedad y a que el cálculo del área de superposición se hace solo una vez, a diferencia de otros métodos.

Tabla 2. Matriz de definición de reglas difusas de la perspectiva procesos

Eficiencia activos físicos												
Costo espacio almacenamiento	Bajo				Medio				Alto			
	Rechazo pedidos	Rot. inventarios			Rechazo pedidos	Rot. inventarios			Rechazo pedidos	Rot. inventarios		
		Bajo	Medio	Alto		Bajo	Medio	Alto		Bajo	Medio	Alto
		Bajo	E	E		Bajo	E	MA		Bajo	MA	A
		Medio	MB	E		Medio	E	E		Medio	MA	A
Bajo	Alto	MB	MB	E	Alto	MB	MB	E	Alto	MA	MA	
Medio	Rechazo pedidos	Rot. inventarios			Rechazo pedidos	Rot. inventarios			Rechazo pedidos	Rot. inventarios		
		Bajo	Medio	Alto		Bajo	Medio	Alto		Bajo	Medio	Alto
		Bajo	E	MA		Bajo	E	MA		Bajo	MA	A
		Medio	MB	E		Medio	E	E		Medio	MA	MA
	Alto	MB	MB	MB	Alto	MB	MB	Alto	MB	MB	E	
Alto	Rechazo pedidos	Rot. inventarios			Rechazo pedidos	Rot. inventarios			Rechazo pedidos	Rot. inventarios		
		Bajo	Medio	Alto		Bajo	Medio	Alto		Bajo	Medio	Alto
		Bajo	MB	MB		Bajo	MB	E		Bajo	MB	E
		Medio	MB	MB		Medio	MB	E		Medio	MB	E
	Alto	B	B	B	Alto	B	MB	Alto	B	MB	MB	

Fuente: presentación propia de los autores.

4. Resultados

La aplicación del modelo BSC difuso permite obtener los indicadores de desempeño numéricos (en cada perspectiva BSC y global de la CA), así como los gráficos de superficies difusas de respuesta.

4.1. Resultados numéricos

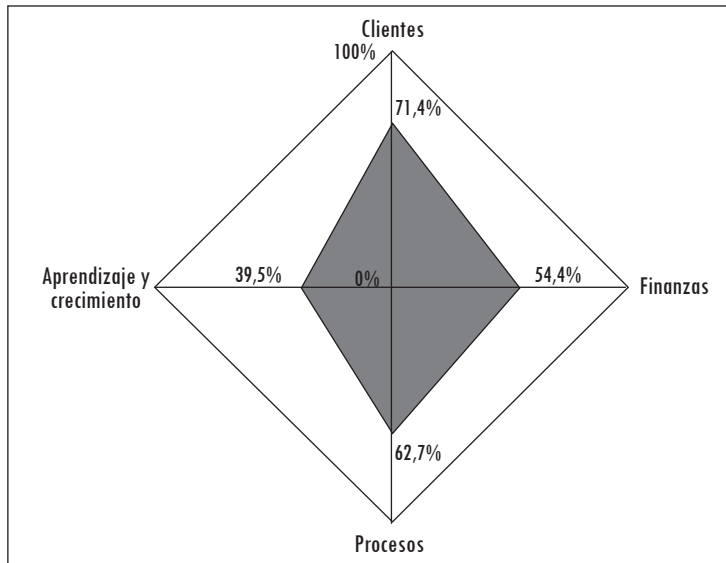
Los resultados numéricos concretos obtenidos con la aplicación del modelo BSC difuso se expresan a través del perfil de desempeño de la CA del astillero en estudio (figura 6), donde se muestra gráficamente el grado en el cual la CA logra los objetivos y metas de gestión en cada una de las perspectivas consideradas. Se puede deducir que las mayores oportunidades de mejora están en las perspectivas *finanzas* y *aprendizaje y crecimiento*.

Sobre la categorización lingüística del desempeño obtenido en cada una de las perspectivas, de acuerdo con los conjuntos difusos de salida establecidos (figura 3), los resultados son:

- *Perspectiva clientes*: el indicador de desempeño (71,4%) fue considerado *medio alto* (con un grado de pertenencia de 0,93) y *alto* (con un grado de pertenencia de 0,07).
- *Perspectiva finanzas*: el indicador de desempeño (54,4%) fue considerado *estándar* (con un grado de pertenencia de 0,78) y *medio alto* (con un grado de pertenencia de 0,22).
- *Perspectiva procesos*: el indicador de desempeño (62,7%) fue considerado *medio alto* (con un grado de pertenencia de 0,635) y *estándar* (con un grado de pertenencia de 0,365).
- *Perspectiva aprendizaje y crecimiento*: el indicador de desempeño (39,5%) fue considerado *medio bajo* (con un grado de pertenencia de 0,525) y *estándar* (con un grado de pertenencia de 0,475).

El indicador global de desempeño de la CA fue 59,6%. Este nivel de desempeño se considera *estándar* (con un grado de pertenencia de 0,52) y *medio alto* (con un grado de pertenencia de 0,48).

Figura 6. Perfil de desempeño de la cadena de suministro del astillero en estudio aplicando el modelo BSC difuso



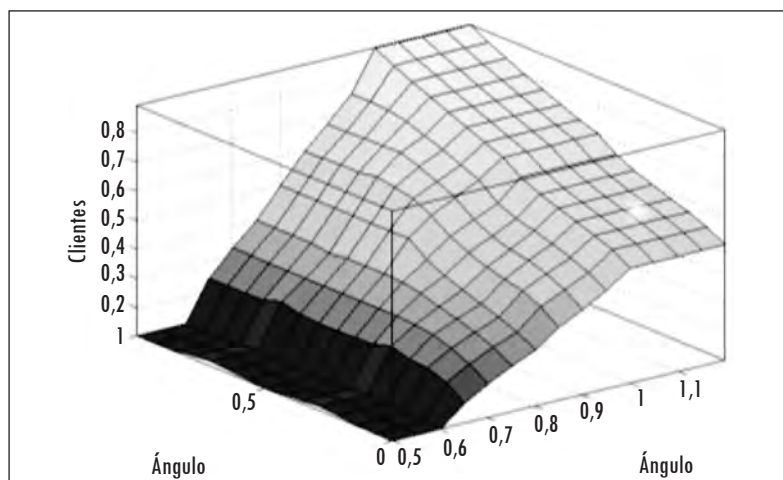
Fuente: presentación propia de los autores.

4.2. Superficies difusas

La aplicación del sistema de inferencia difusa tipo Mandani, propia del modelo desarrollado con base en los sistemas de reglas descritas en las secciones previas, permitió obtener en total veintiún gráficos de superficies difusas de respuesta que expresan la relación entre las variables de entrada y salida (tres gráficos para la perspectiva clientes; tres, para la perspectiva finanzas; seis, para la perspectiva procesos; tres, para la perspectiva aprendizaje y crecimiento, y seis para el indicador global de desempeño de la cadena).

Se muestran dos ejemplos de los gráficos obtenidos, con el fin de ilustrar la interpretación de los resultados de la aplicación del modelo propuesto. En la figura 7 se presenta la relación entre los indicadores *Satisfacción de clientes* y *cumplimiento de ventas* en la perspectiva *Clientes*; se nota que si el *cumplimiento de ventas* es inferior al 60%, para cualquier valor de satisfacción de *clientes*, la contribución junto al desempeño de la perspectiva es prácticamente nula. En niveles superiores al 60% en *cumplimiento de ventas*, el indicador de *satisfacción de clientes* tiene mayor impacto que el primero en los resultados de la perspectiva *Clientes*.

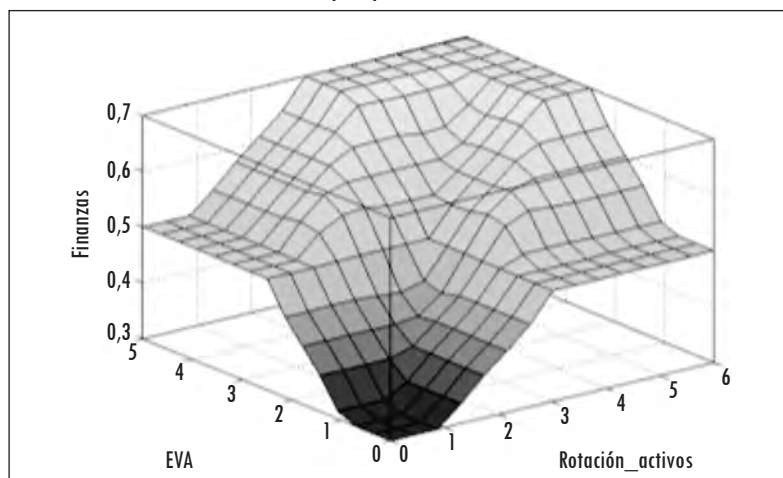
Figura 7. Superficie difusa de relación entre los indicadores satisfacción de clientes y cumplimiento de ventas en la perspectiva clientes



Fuente: presentación propia de los autores.

En la figura 8 se muestra la relación entre los indicadores EVA y la rotación de activos en finanzas. Ambos indicadores contribuyen de manera similar y sirven de refuerzo para mejorar los resultados de la perspectiva. Esto permite afirmar que se les debe gestionar en forma armonizada.

Figura 8. Superficie difusa de relación entre los indicadores EVA y rotación de activos en la perspectiva finanzas



Fuente: presentación propia de los autores.

5. Conclusiones

La lógica difusa asociada a otra técnica como el BSC provee un nuevo enfoque en el modelamiento de la imprecisión que caracteriza a la gestión de CA. Además, se considera que es un procedimiento práctico, fácil de aplicar y adaptar, comparado con los enfoques convencionales especialmente cuando se tiene un número elevado de datos de entrada.

La modelización de indicadores usando la lógica difusa no debe verse como una forma de contrastar resultados con la lógica clásica, ya que la primera es una extensión de la segunda y no debería existir contradicción entre los resultados. La diferencia radica en que la lógica difusa permite una ampliación de la información obtenida y un aumento de la capacidad para representar fenómenos vagos o inciertos.

El modelo BSC difuso desarrollado y aplicado permitió obtener un valor numérico concreto como índice global de desempeño de la CA en estudio, el cual sirve de insumo fundamental para la toma de decisiones y parte de un sistema de reglas difusas fácilmente interpretables y aprehendidas por parte del personal involucrado en el sistema de medición del desempeño. Adicionalmente, el uso de aplicativos como el Matlab hace posible obtener gráficos en 3D de las relaciones entre las variables de entrada y de salida en cada uno de los cinco sistemas de inferencia difusa formados que, más allá de ambientar los resultados, facilitan su comprensión, análisis y uso. El análisis del comportamiento de los gráficos permite emitir juicios sobre el impacto o relevancia de los indicadores de entrada en los resultados de las perspectivas y el enfoque de gestión de las perspectivas, resultado de las reglas difusas del método de inferencia.

Aunque el modelo BSC difuso desarrollado se revisó en un contexto específico, en este caso para medir el desempeño en la CA de un astillero, el hecho de poseer una estructura semántica general basada en metodologías universales, hace posible obtener o derivar un modelo general que cada cadena o empresa pueda ajustar a sus necesidades y características particulares.

Referencias

- ABDUL, A. y NABI, M. The need for a new product development framework for engineer-to-order products. *European Journal of Innovation Management*. 2003, vol. 6, núm. 3, pp. 182-196.
- ARANGO, M. D.; ZAPATA, J. y ADARME, W. Gestión de cadena de abastecimiento con indicadores bajo incertidumbre caso aplicado al sector panificador. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2010, vol. 20, núm. 1, pp. 97-116.

- ARANGO, M. D.; SERNA, C. A. y PÉREZ, G. Aplicaciones de la lógica difusa a las cadenas de suministro. *Revista Avances en Sistemas e Informática*. 2008, vol. 15, núm. 3, pp. 51-60.
- BEAMON, B. y CHEN, V. Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research*. 2001, vol. 39, núm. 14, pp. 3195-3218.
- CAPÓ-VICEDO, J.; TOMÁS-MIQUEL, J. y EXPÓSITO-LANGA, M. Gestión del conocimiento en la cadena de suministro: Análisis de la influencia del contexto organizativo. *Información Tecnológica*. 2007, vol. 18, núm. 1, pp. 127-135.
- GOSLING, J. y NAIM, M. Engineer-to-order supply chain management: a literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*. 2009, núm. 122, pp. 741-754.
- JANG, J.-S., SUN, C.-T. y MIZUTANI, E. *Neuro-Fuzzy and soft computing*. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
- KANDA, A. y DESHMUKH, S. G. Coordination in supply chains: an evaluation using fuzzy logic. *Production Planning & Control*. 2007, vol. 18, núm. 5, pp. 420-435.
- KAPLAN, R. S. y NORTON, D. P. The balanced scorecard measures that drive performance. *Harvard Business Review*. 1992, vol. 70, núm. 1, pp. 71-79.
- KAUFMANN, A. y GIL, J. *Introducción de la teoría de los subconjuntos borrosos a la gestión de las empresas*. 3 ed. Santiago de Compostela: Milladoiro, 1993.
- KLIR, G. y YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Application*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- LAU, H.; PANG, W. y WONG, C. Methodology for monitoring supply chain performance: a fuzzy logic approach. *Logistics Information Management*. 2002, vol. 15, núm. 4, pp. 271-280.
- LEHTINEN, J. y AHOLA, T. Is performance measurement suitable for an extended enterprise? *International Journal of Operations & Production Management*. 2010, vol. 30, núm. 2, pp. 181-204.
- LING, C.; CHIU, H. y TSENG, Y. Agility evaluation using fuzzy logic. *International Journal of Production Economics*. 2006, vol. 101, pp. 353-368.
- MAMDANI, E. H. y ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975, vol. 7, núm. 1, pp. 1-13.
- OHDAR, R. y KUMAR, P. Performance measurement and evaluation of suppliers in supply chain: an evolutionary fuzzy-based approach. *Journal of Manufacturing Technologi Management*. 2004, vol. 15, núm. 8, pp. 723-734.
- OLHAGER, J. Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics*. 2003, vol. 85, núm. 3, pp. 319-329.
- SILVA, C.; SOUSA, J. y RUNKLER, T. Optimization of logistic systems using fuzzy weighted aggregation. *Fuzzy Sets and Systems*. 2007, vol. 158, pp. 1947-1960.

- SUGENO, M. y TAKAGI, T. Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control. *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics*. 1985, vol. 15, pp. 116-132.
- ZADEH, L. *Fuzzy Sets and their applications to cognitive and decision processes*. London: Academic Press, 1975.