

Diseño, Implementación y Uso de un Framework para el Desarrollo de Sistemas de Inferencia Borrosos Flexibles

Dante Barbero¹. Irene Martini¹. Carlos Discoli¹.

Investigador CONICET.

¹ Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC),
Facultad de Arquitectura y Urbanismo,
Universidad Nacional de La Plata.

Calle 47 N°162. CP 1900. La Plata, Argentina.

dantebarbero@yahoo.com.ar, irene_martini@yahoo.com.ar, discoli@rocketmail.com

Resumen. Este trabajo presenta el desarrollo de un framework, construido a partir de técnicas de la programación orientada a objetos, que permite crear sistemas de inferencia borrosos (SIB) de tipo Mamdani flexibles ya que el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB, que es quizás la herramienta más usada a tal efecto, presenta una serie de limitaciones tales como no poder usar diferentes instancias de un mismo operador borroso en un SIB, no permitir elegir diferentes métodos de implicación para reglas distintas ni tampoco permite elegir el método de agregación y defuzzificación para cada variable lingüística de salida, en caso de ser necesario. Se presenta, además de la arquitectura, detalles de la implementación y un ejemplo de su uso.

Keywords: diseño – implementación - framework - sistema – inferencia – borroso - flexible.

1 Introducción

Este trabajo presenta el desarrollo de un framework, construido a partir de técnicas de programación orientada a objetos, que permite crear sistemas de inferencia borrosos flexibles (SIB) de tipo Mamdani. El mismo permite cubrir las limitaciones presentes en programas comerciales tales como el Fuzzy Logic Toolbox del software MATLAB¹. Este último permite diseñar sistemas de inferencia borrosos (SIB) de manera fácil y rápida. También posee un conjunto de interfaces gráficas que ayudan al usuario en las distintas etapas de la construcción de un sistema de inferencia borroso [1] pero presenta, no obstante, una serie de limitaciones tales como: a) No es posible usar distintas instancias (por ej. : min y prod son 2 posibles instancias del operador and) de un mismo operador lógico en un SIB, b) No es posible seleccionar un método de implicación para una regla distinto al elegido para las reglas restantes, c) No es posible que cada variable lingüística de salida tenga un método de

¹ MATLAB ® es un producto de The MathWorks, <http://www.mathworks.com>

agregación diferente al de otras variables de salida de un mismo SIB y d) No es posible usar diferentes métodos de defuzzificación para las distintas variables lingüísticas de salida.

A partir de las limitaciones antes citadas, se presentará un framework que supera tales inconvenientes y cuyo desarrollo ha formado parte de una tesis doctoral [2] en la que se analizaron diferentes metodologías para la evaluación de la calidad de vida a partir de modelos basados en índices e indicadores.

En función de los objetivos propuestos se presentará a continuación una introducción a los conceptos básicos sobre los sistemas de inferencia borrosos, la metodología de desarrollo utilizada para la construcción del framework, un ejemplo de su uso y los resultados obtenidos.

2 Conceptos básicos sobre los sistemas de inferencia borrosos

Los sistemas de inferencia borrosos transforman un conjunto de valores de entrada en un conjunto de valores de salida por medio de reglas. El proceso que realiza esta tarea se denomina proceso de inferencia y consta de 5 etapas [1], [3]:

1. Fuzzificar las entradas: Los valores de entrada son usados para evaluar con que grado satisfacen a c/u de sus valores lingüísticos (conjuntos borrosos) asociados en cada regla usando para ello las funciones de pertenencia. La entrada es siempre un valor en el universo de discurso de la variable, en tanto que la salida es un número entre 0 y 1 que indica el grado de pertenencia a un determinado valor lingüístico.

2. Aplicar el operador borroso: Si el antecedente tiene más de un operando entonces se aplican los operadores borrosos necesarios para obtener un único número que representa el grado con que se satisfizo el antecedente de la regla. Esta etapa recibe como entrada un conjunto de 2 o más grados de pertenencia a conjuntos y retorna un único número.

3. Aplicar el método de implicación: Antes de aplicar el método de implicación se debe determinar el peso de la regla. El proceso de implicación recibe como entrada un número (el grado con que se satisfizo el antecedente) y la salida es un conjunto borroso truncado.

4. Agregación de las salidas: La entrada del proceso de agregación es la lista de conjuntos borrosos truncados retornados por el método de implicación para cada regla. La salida del proceso de agregación es un conjunto borroso para cada variable lingüística de salida.

5. Defuzzificación: La entrada para el proceso de defuzzificación es un conjunto borroso (el conjunto borroso agregado producido en el paso anterior) y la salida es un simple número.

Puede observarse un ejemplo del proceso de inferencia completo en la figura 1. El ejemplo, de carácter ilustrativo, estima la calidad de vida a partir de 2 variables (salud y dinero) usando un sistema de inferencia borroso. El mismo es una adaptación del expuesto a modo de ejemplo en la tesis doctoral de Ferraro [4]. La elección de este ejemplo tiene 2 motivos principales: a) Sirve para ilustrar de manera sencilla el proceso de inferencia borroso y b) Como tiene 2 variables de entradas (salud y dinero) y 1 de salida (calidad de vida), es posible mostrar gráficamente las salidas en función de las 2 entradas.

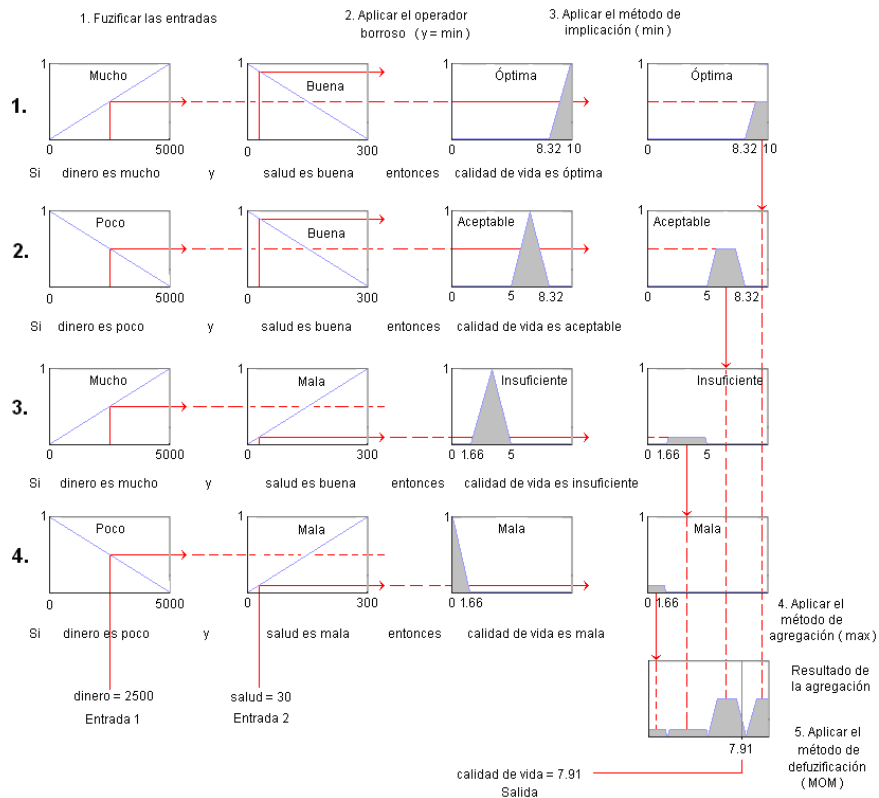


Figura 1. Proceso de inferencia de un sistema de inferencia borroso.

La figura 1 muestra el proceso de inferencia para un par de valores (2500, 30) correspondientes al par de variables dinero y salud respectivamente. No obstante, en la Figura 2 se puede observar los resultados obtenidos para cualquier combinación de valores de entrada mediante un gráfico 3D.

Se observa de los resultados obtenidos que el máximo nivel de calidad de vida se halla cuando la variable salud alcanza su mínimo valor (0 un/ml., el cual expresa una salud inmejorable) y dinero toma el valor máximo posible (5000 \$/mes). En éste caso, el valor de calidad de vida obtenido usando el método MOM es de 10, como era de

esperar. Por el mismo motivo se tiene que el sistema devuelve el valor 0 para la combinación (0, 300) usando el método MOM de defuzzificación.

Para mostrar la flexibilidad del framework desarrollado se aplicaron los siguientes cambios a las 2 primeras reglas del ejemplo anterior:

Se cambió la instancia del operador “y”, que era representado por la operación “min” en todas las reglas, por la operación “prod” en las reglas 1 y 2. También el método de implicación que era “min” para todas las reglas fue reemplazado por el método “prod” en las reglas 1 y 2. El resultado es el que se observa en la figura 3.

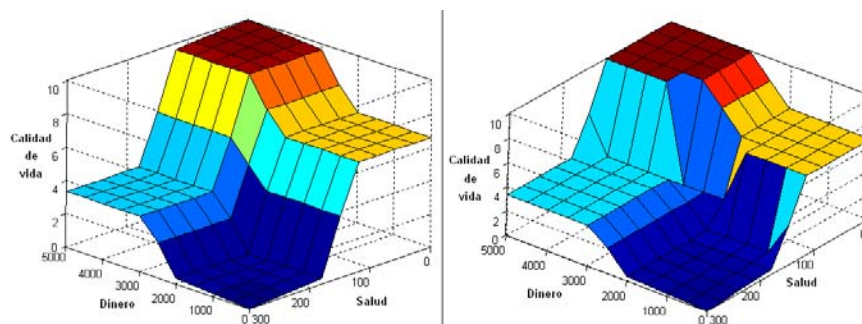


Figura 2 (izquierda). Superficie que representa la calidad de vida en función de las variables salud y dinero. **Figura 3 (derecha).** Superficie que representa la calidad de vida en función de las variables salud y dinero de los cambios realizados.

3 Metodología

El framework desarrollado tiene un alto grado de flexibilidad dado que permite el uso de distintos tipos de operadores lógicos, métodos de implicación, métodos de agregación y de defuzzificación en un mismo sistema de inferencia borroso. El mismo fue desarrollado haciendo uso de técnicas de la programación orientada a objetos.

Son conocidas las ventajas que esto supone, y en este caso particular la combinación de múltiples patrones de diseño con el objeto de formar un framework general proporciona una mayor reusabilidad, un mayor grado de abstracción y alcanza una muy buena genericidad. Se han empleado en múltiples ocasiones los patrones Strategy e Interpreter [5], [6] y se han aprovechado las ventajas de la herencia de objetos para aumentar la reusabilidad y, al mismo tiempo, distinguir entre objetos similares pero no idénticos.

Se muestra en la figura 4 el diagrama de clases completo del framework propuesto.

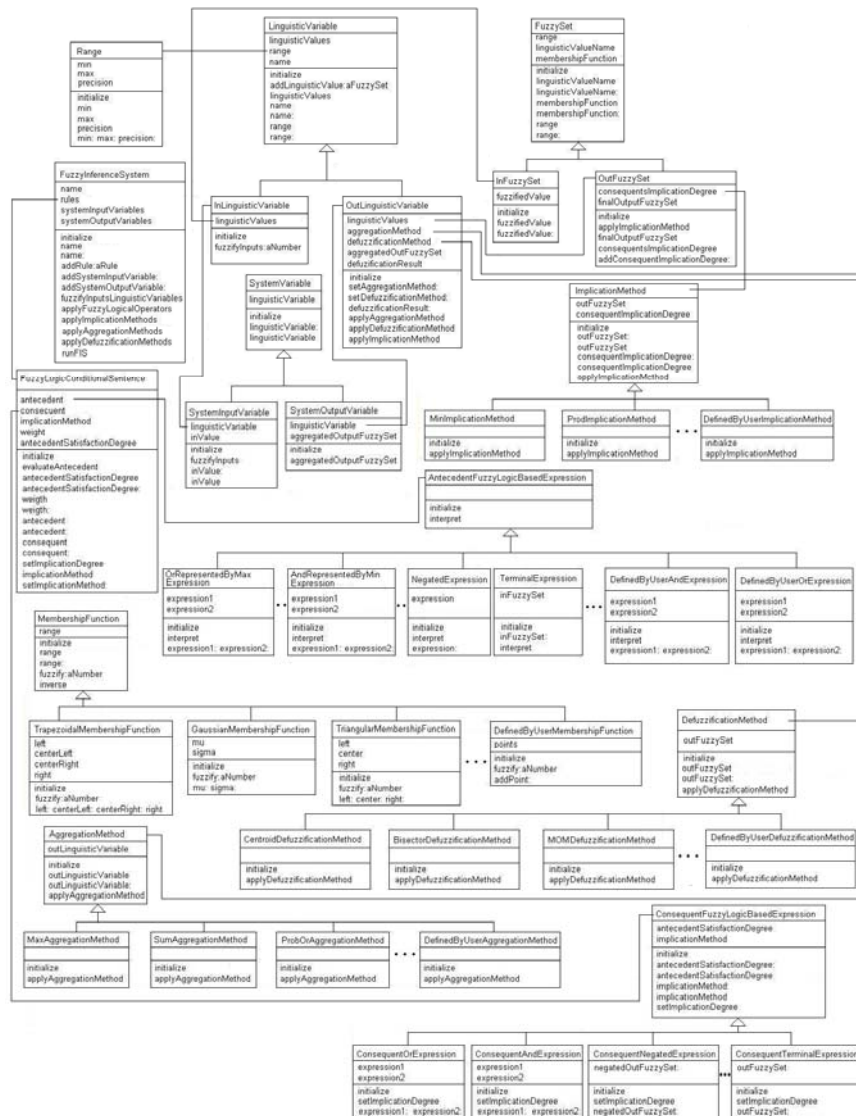


Figura 4. Diagrama de clases del framework para construir sistemas de inferencia borrosos flexibles.

4 Ejemplo de uso del framework para el desarrollo de sistemas de inferencia borrosos flexibles

A continuación veremos un ejemplo de aplicación del framework. Se trata de analizar la calidad del Servicio Educación (más específicamente los establecimientos

de educación primaria básica-EPB-) en la región del Gran La Plata, Argentina, a partir del análisis de las cualidades relacionadas a las variables edilicias, energéticas y productivas las cuales se detallan a continuación [7] :

a- *Características edilicias*: Se refiere a las características dimensionales de los establecimientos. Las superficies aparecen subdivididas en función de las actividades predominantes dentro de cada establecimiento (aulas, sectores administrativos, servicios auxiliares y de apoyo, etc.). Incluye la cantidad de pisos del edificio, la superficie destinada a aulas en relación a la superficie cubierta mínima del establecimiento y la superficie del terreno; altura promedio y el volumen.

A partir de un análisis particularizado se puede establecer un área estándar en función de las superficies actuales. Para el caso del área pedagógica (aulas) de EPB, se considera una capacidad aconsejable de 1.25m² de aula por alumno, considerando a su vez la superficie cubierta mínima total del establecimiento de 4.40 m²/alumno. O sea que la relación m²/alumno de aula en relación a la superficie cubierta mínima total debe ser del orden de 0.28 (superficie aula / superficie cubierta mínima total). Esto permite mantener el universo en una franja de superficies estándares a los efectos de identificar todos aquellos establecimientos por encima y por debajo de dicha relación. De esta manera, se construyen perfiles de extremos (máximos y mínimos) y estrategias de mejoramiento.

En este caso se consideró una relación media, aquella que no sea ni inferior ni superior a un 10% de la relación mínima (0,28). La Figura 5 muestra las funciones de pertenencia asociadas a los valores lingüísticos de la cualidad *características edilicias* con respecto a la relación m²/alumno.

b- *Datos energéticos ambientales*: Se refiere a vectores energéticos de consumo que intervienen en el funcionamiento del establecimiento en un periodo determinado y a las emisiones, discriminación y cuantificación de contaminantes aéreos en función de la fuente utilizada y la complejidad del establecimiento.

En el marco del análisis establecido en un modelo de calidad de vida urbana [9] y a partir de la información disponible, se tomaron los datos de estudios realizados en un trabajo anterior [8] en los cuales se estimó un consumo de 317,14 kWh/alumno/año. Considerando los valores promedios y el desvío estándar, podemos determinar los establecimientos cuyos consumos están en el intervalo [promedio-desvío, promedio+desvío] y los que están fuera del mismo. Los establecimientos con consumos insuficientes refieren a importantes deficiencias en la climatización y fundamentalmente en la iluminación ya que los mismos registran en los planos de trabajo niveles por debajo del 2% exigido por norma². En cuanto a los casos con consumos excesivos corresponden a establecimientos con altos niveles de climatización y sin una regulación eficiente en sus sistemas de iluminación (no aprovechamiento de la luz natural). La Figura 6 muestra las funciones de pertenencia

² Criterios y Normativa Básica de Arquitectura Escolar.

asociadas a los valores lingüísticos de la cualidad *Datos energético- ambientales* con respecto a la relación kWh/alumno.

c- *Datos de Producción*: Se refiere a todos aquellos datos ligados a la producción de cada establecimiento de la red de educación. Involucra los requerimientos pedagógicos, buscando alcanzar la mayor racionalización y optimización de los recursos disponibles. También comprende la planta funcional del establecimiento y personal contratado. La organización del edificio escolar debe responder al proyecto institucional, a los requerimientos pedagógicos y a las pautas socio-culturales de los usuarios, adaptándose a las diversas características regionales, cumpliendo con las superficies mínimas y las exigencias cualitativas tecnológicas.

Según los criterios y normativa básica de arquitectura escolar, se considera para las aulas del EPB una capacidad máxima de 36 alumnos por sección, siendo la capacidad aconsejable de 30 alumnos. Por lo tanto, una situación óptima sería la relación docente-alumno 1/30, la máxima admisible 1/36 y la menor admisible 1/13 (superando el máximo admisible –36 alumnos- el mínimo surge a partir de división de 36 alumnos/2). La Figura 7 muestra las funciones de pertenencia asociada a los valores lingüísticos de la cualidad *Datos de producción* con respecto a la relación docente/alumno para el caso educación.

El sistema de inferencia borroso, por lo tanto, estará compuesto por 3 variables lingüísticas de entrada (Características edilicias, Datos energético-ambientales y Datos de producción) y una de salida (Eficiencia). La figura 8 muestra las funciones de pertenencia de los valores lingüísticos (mala, insuficiente, aceptable y óptima) asociados a la variable lingüística “Eficiencia”.

Las funciones de pertenencia asociadas a los valores lingüísticos “Bajo”, “Medio” y “Alto” asociados a la variable lingüística “Características edilicias” se muestran en la figura 5. La primera y la última han sido definidas como de tipo trapezoidal con parámetros [0, 0, 0.25, 0.31] y [0.25, 0.31, 0.4, 0.4] respectivamente, en tanto que la correspondiente al valor lingüístico “Medio” es de tipo triangular con parámetros [0.25, 0.28, 0.31].

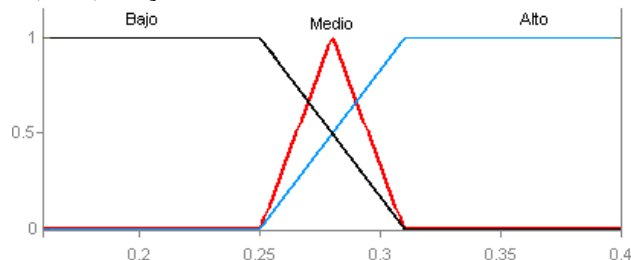


Figura 5. Funciones de pertenencia de los valores lingüísticos “Bajo”, “Medio” y “Alto” asociados a la variable lingüística “Características edilicias”.

Las funciones de pertenencia asociadas a los valores lingüísticos “Insuficiente”, “Promedio” y “Alto” asociados a la variable lingüística “Datos energético-

ambientales” se muestran en la figura 6. La primera y la última han sido definidas como de tipo trapezoidal con parámetros $[0, 0, 50, 600]$ y $[46.42, 587.68, 700, 700]$ respectivamente, en tanto que la correspondiente al valor lingüístico “Medio” es de tipo triangular con parámetros $[46.42, 317.14, 587.86]$.

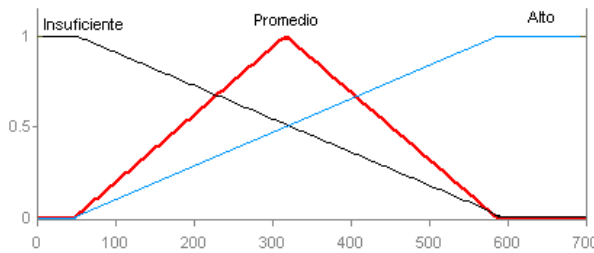


Figura 6. Funciones de pertenencia de los valores lingüísticos “Insuficiente”, “Promedio” y “Alto” asociados a la variable lingüística “Datos energético-ambientales”.

Las funciones de pertenencia asociadas a los valores lingüísticos “Bajo”, “Aconsejable” y “Alto” asociados a la variable lingüística “Datos de producción” se muestran en la figura 7. La primera y la última han sido definidas como de tipo trapezoidal con parámetros $[0, 0, 18, 36]$ y $[18, 36, 46, 46]$ respectivamente, en tanto que la correspondiente al valor lingüístico “Medio” es de tipo triangular con parámetros $[18, 30, 36]$.

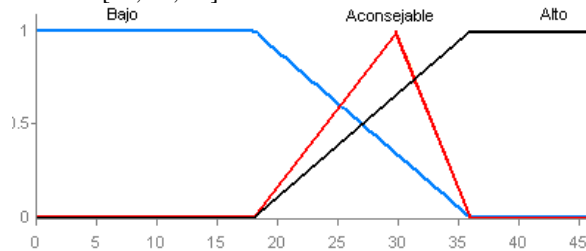


Figura 7. Funciones de pertenencia de los valores lingüísticos “Bajo”, “Aconsejable” y “Alto” asociados a la variable lingüística “Datos de producción”.

La variable lingüística “Eficiencia” tiene asociados 4 valores lingüísticos: “Mala”, “Insuficiente”, “Aceptable” y “Óptima”. Estos últimos se representan con funciones de pertenencia de tipo triangular con parámetros $[0, 0, 16.66]$, $[16.66, 33.33, 50]$, $[50, 66.66, 83.32]$ y $[83.32, 100, 100]$ respectivamente (Figura 8).

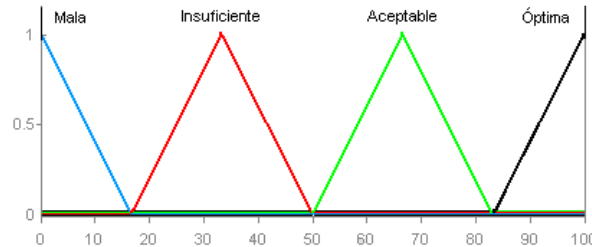


Figura 8. Funciones de pertenencia de los valores lingüísticos “Óptima”, “Aceptable”, “Insuficiente” y “Mala” asociados a la variable lingüística “Eficiencia”.

Se definieron 27 reglas, dado que cada una de las 3 variables lingüísticas de entrada posee 3 valores lingüísticos asociados. Todas las reglas tienen peso igual a 1. Se muestran a continuación, a modo de ejemplo, 2 de las 27 reglas establecidas.

Regla 1:

Si Características edilicias=Baja y Datos energético-ambientales=Insuficiente y Datos de producción=bajo entonces Eficiencia=Mala.

Regla 27:

Si Características edilicias=Medio y Datos energético-ambientales=Promedio y Datos de producción=Aconsejable entonces Eficiencia=Óptima.

El operador “y” fue el “min” y el método de implicación fue “min” para todas las reglas. Como método de agregación se usó el “max” y como método de defuzificación se utilizó el “MOM”.

A continuación se muestra la eficiencia obtenida en función de 2 variables de entrada (la restante se fijó en su valor ideal). El primer gráfico (Figura 9) relaciona los Datos energético-ambientales con las Características edilicias, tomando con valor fijo los Datos de Producción edilicia (1/30 docente/alumno). El gráfico siguiente (Figura 10) relaciona los Datos de Producción edilicia con los Datos energético-ambientales fijando el valor de las Características Edilicia (0.28 superficie aula/superficie cubierta mínima total). Por último se fija el valor de los Datos energético-ambientales (317.14 kWh/alumno/año) y se analizan las variables Datos de Producción edilicia y Características edilicias (Figura 11). Esto nos permite visualizar el comportamiento de las variables y sus interrelaciones.

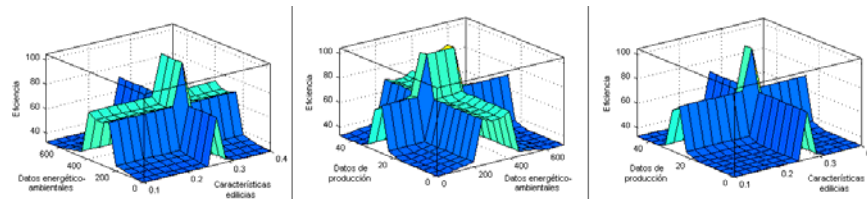


Figura 9 (izquierda). Superficie que representa la eficiencia en función de los Datos energético- ambientales y las Características edilicias, tomando con valor fijo los Datos de Producción edilicia (1/30 docente/alumno). **Figura 10 (centro).** Superficie que representa la eficiencia en función de los Datos de Producción edilicia y los Datos energético-ambientales, tomando con valor fijo el valor de las Características edilicias (0.28 superficie aula/superficie cubierta mínima total). **Figura 11 (derecha).** Superficie que representa la eficiencia en función de las variables Datos de Producción edilicia y Características edilicias manteniendo fijo el valor de los Datos energético-ambientales (317.14 kWh/alumno/año).

Se observa de los resultados obtenidos que el máximo nivel de eficiencia (óptima) se halla cuando las variables Características edilicias, Datos energético-ambientales y Datos de producción alcanzan los valores 0.28 (medio), 317.14 (promedio) y 30 (aconsejable) respectivamente (Figura 11). En éste caso, el valor de la eficiencia

obtenido usando el método MOM es de 10, como era de esperar. Por el mismo motivo se tiene que el sistema devuelve el valor 0 para la combinación (0, 0, 0) usando el método MOM de defuzificación.

5 Conclusiones

El framework propuesto para el desarrollo de SIB flexibles ha superado las limitaciones señaladas al comienzo permitiendo asociar distintos métodos a las distintas instancias de un mismo operador lógico, cada regla puede tener el método de implicación más adecuado y todas las variables lingüísticas de salida podrán contar con los métodos de agregación y defuzificación que mejor representen el fenómeno a modelizar. Estos aportes se traducen en un mayor grado de flexibilidad a la hora de construir un sistema de inferencia borroso.

Referencias

1. The MathWorks, Inc.: Fuzzy Logic Toolbox 2. User's guide, www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/fuzzy/fp754.html
2. Barbero, D. A. Modelo sistémico para el manejo con SIG de indicadores de calidad de vida. Tesis doctoral. Facultad de Informática, UNLP (2008)
3. Hiler, J. R., Martínez, V. J.: Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones. Editorial RA-MA, Madrid (1995)
4. Ferraro, D. O. La sustentabilidad en la Pampa Interior (Argentina): desarrollo y evaluación de indicadores de impacto ambiental del uso de pesticidas y labranzas usando lógica difusa. Tesis Doctoral. Facultad de Agronomía, UBA (2005)
5. Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J.: Design patterns: Elements of reusable object-oriented software. Addison-Wesley (1995)
6. Stelting, S., Maassen, O. Patrones de diseño aplicados a Java. Pearson-Prentice Hall, Madrid (2003)
7. Martini, I. Barbero, D. Discoli, C. Rosenfeld, E. Dicroce, L. Brea, B. Esparza, J. Determinación y análisis de las variables edilicias energéticas y productivas para la valoración del servicio educación en el marco de un modelo de calidad de vida urbana. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. pp. 01.65-01.72. Vol. 11 (2007)
8. San Juan, G. Discoli, C. Martini, I. Metodología de diagnóstico y optimización de consumos y gastos en servicios básicos urbanos. Aplicación en la red de establecimientos escolares. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 8, N°2 (2004)
9. Rosenfeld, E. San Juan, G. Discoli, C. Índice de calidad de vida urbana para una gestión territorial sustentable. Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Volumen 4. Nro. 1. pp. 1.35-1.38. (2000)