

Práctica  
Sistemas Difusos

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DIFUSO PARA LA INTERPRETACIÓN DE GASOMETRÍAS ARTERIALES

Fernández Costas, Xoán  
Piorno Lagos, Vicente  
Rodríguez González, Paula

**Máster en Bioinformática para Ciencias de la Salud**  
**Facultad de Informática, UDC**  
Curso 2023/2024

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>2</b>
a) Conjuntos difusos .....	2
b) Gasometría arterial .....	4
c) Equilibrio ácido-base .....	4
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Metodología .....</b>	<b>7</b>
a) Fuzzy Logic ToolBox MATLAB .....	7
b) Arquitectura del sistema .....	7
c) Clasificación .....	10
I. Variables de entrada: .....	10
II. Variables de salida: .....	10
<b>4. Implementación .....</b>	<b>11</b>
<b>5. Reglas del sistema .....</b>	<b>14</b>
<b>6. Resultados .....</b>	<b>15</b>
a) Ejemplos .....	15
b) Casos clínicos .....	18
<b>7. Discusión .....</b>	<b>19</b>
a) Ejemplos .....	19
b) Casos clínicos .....	19
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>20</b>
<b>9. Bibliografía .....</b>	<b>21</b>

## **Resumen**

En este informe se detalla un procedimiento para asignar la patología y su correspondiente nivel de gravedad mediante la prueba de gasometría arterial en sangre, la cual analiza el contenido de gas y el pH en la muestra. Se emplea la lógica difusa y se hace uso del software Fuzzy Logic ToolBox para Matlab, encargado de procesar conjuntos difusos, con el propósito de asignar el tipo de patología al paciente en función de los niveles de pH, la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  y la presión parcial de  $\text{CO}_2$ .

Inicialmente, se proporciona una breve explicación sobre conjuntos difusos, la gasometría arterial y el equilibrio ácido base, detallando los cuatro tipos de trastornos asociados: acidosis o alcalosis, respiratoria o metabólica. Posteriormente, se describe el funcionamiento del sistema difuso utilizado, así como todos los elementos necesarios para su comprensión (inputs, outputs, reglas), junto con la presentación de los resultados que se obtendrían en base a los niveles de los cuatro valores mencionados anteriormente con sus respectivas compensaciones. Finalmente, se realiza una comparativa con casos clínicos reales para verificar la operatividad del modelo y se obtienen las conclusiones del mismo.

## 1. Introducción

En el ámbito de la medicina, la evaluación precisa de las gasometrías arteriales desafía a los profesionales de la salud a abordar la complejidad de la información clínica, marcada por la incertidumbre y la variabilidad de los datos. La interpretación de los resultados de estos análisis es crucial para la toma de decisiones clínicas efectivas, ya que proporciona las ideas fundamentales sobre el equilibrio ácido-base y la función respiratoria del paciente.

Las alteraciones ácido-base suelen ser consecuencia de una patología preexistente, donde el médico evalúa la respuesta fisiológica compensadora para cada trastorno. Conocer el grado de compensación metabólica o respiratoria permite diagnósticos más precisos, ya que estimarlo y calcularlo incorrectamente puede llevar a diagnósticos erróneos y tratamientos inadecuados. Estos cambios en el pH se producen fundamentalmente por los cambios metabólicos en las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  y por cambios respiratorios en las concentraciones de la  $\text{PaCO}_2$  (Sánchez Díaz et al. 2018).

En este contexto, surge la necesidad de explorar enfoques innovadores que mejoren la capacidad de diagnóstico y pronóstico. Un área emergente y prometedora es la aplicación de sistemas difusos, que permiten manejar la ambigüedad y la imprecisión presentes en los datos médicos. Estos sistemas difusos, basados en la lógica difusa, ofrecen un marco flexible y adaptativo para modelar la toma de decisiones en situaciones clínicas complejas.

Este trabajo tiene como objetivo principal evaluar la efectividad y la aplicabilidad de un sistema difuso en el análisis de las gasometrías arteriales. Se abordarán los conceptos fundamentales de conjuntos difusos y lógica difusa, explorando cómo estas herramientas pueden ser implementadas para mejorar la interpretación de los resultados de las gasometrías arteriales y contribuir significativamente a la mejora de la toma de decisiones clínicas. Se considerarán variables clave como el pH, la  $\text{PaCO}_2$  y el  $[\text{HCO}_3^-]$ , con el propósito de desarrollar un modelo que no solo optimice la precisión diagnóstica, sino que también permita una adaptabilidad a la complejidad inherente de la información clínica.

### a) Conjuntos difusos

De manera intuitiva se tiene el concepto de conjunto como una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un objeto cualquiera, en un universo dado, si acaso este pertenece o no al conjunto. Sin embargo, esta definición no se ajusta a los denominados conjuntos difusos. En ellos a cada elemento del universo se le asocia un grado de pertenencia, que es un número entre 0 y 1, a ese conjunto, expresándose como:  $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$  (Kassir, 2015). Un grado de pertenencia más cercano a 1 indica una mayor pertenencia del elemento al conjunto. Un conjunto difuso, por tanto, es una correspondencia (o función) que a cada elemento del universo le asocia su grado de pertenencia.

Los conjuntos difusos se fundamentan en la aplicación de la lógica difusa, también conocida como "*fuzzy logic*". El concepto de lógica difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. Zadeh (Zadeh, 1988). Esta es, esencialmente, una lógica multivaluada que extiende a la lógica clásica. La lógica clásica, la cual consiste en reglas para generar inferencias creíbles, está basada en una lógica dicotómica, aceptando solo dos

valores, "verdadero" o "falso". Sin embargo, la realidad es que el mundo presenta información incierta e imprecisa por lo que, además de la lógica dicotómica, surge la lógica multivaluada, la cual incluye a la lógica difusa incompleta (Morales, 2002). Esta admite varios valores de verdad, describiendo cómo los humanos toman decisiones en situaciones de información imprecisa. Las lógicas difusas representan una metodología que ofrece una manera sencilla y refinada de derivar conclusiones a partir de información de entrada que es vaga, ambigua, imprecisa, ruidosa o incompleta.

De esta manera, y en contraposición con la lógica clásica, se puede afirmar que los conjuntos difusos se distinguen por tener una fase de transición. La definición de conjuntos difusos se apoya en una curva que representa los grados de pertenencia, denominada función de pertenencia, permitiendo establecer límites progresivos. Existen diversas funciones de pertenencia, entre las cuales destacan 5 funciones clásicas: triangular, trapezoidal,  $\frac{1}{2}$  trapezoidal (derecha o izquierda), gaussiana o sigmoide (Mathivet, 2018).

El adjetivo "difuso" aplicado a estas lógicas se debe a que los valores de verdad no-deterministas tienen una connotación de incertidumbre. Por ejemplo: si "un vehículo se mueve bastante rápido", se debe considerar qué tan rápido es el vehículo, aunque esto no implique necesariamente cuantificar la velocidad del vehículo con toda precisión. La medida de su velocidad constituye un elemento de incertidumbre o difusividad, y la lógica difusa busca cuantificar esta incertidumbre. El propósito fundamental de cualquier sistema que utilice la lógica difusa es describir los grados de los enunciados de salida en función de los de entrada (Eduardo et al., 2006).

Una variable lingüística se define como una variable difusa, donde el conjunto de valores posibles de dicha variable constituye el universo de discurso asociado. En el contexto de una variable lingüística, se introduce la noción de modificadores difusos, que son condiciones que alteran la configuración de los conjuntos difusos. Estos modificadores engloban adverbios tales como "mismo", "un poco", "realmente", "más o menos" y "ligeramente" (Kassir, 2015).

En el razonamiento difuso, se emplean proposiciones condicionales difusas conocidas como reglas difusas, que determinan las reglas de inferencia lógica difusa. Estas siguen la arquitectura de: SI  $x$  es  $A$  ENTONCES  $y$  es  $B$ . Donde el antecedente  $A$  es un conjunto difuso definido en  $X$  y el consecuente es un conjunto difuso  $B$  definido en  $Y$ . Además,  $x$  e  $y$  son las variables lingüísticas, mientras que  $A$  y  $B$  son valores lingüísticos determinados por los conjuntos difusos en los universos de discursos  $X$  e  $Y$ , respectivamente. Estas reglas difusas son unidades atómicas, pero pueden conectarse con otras reglas o proposiciones mediante conectores lógicos como "y", "o", "pero", etc. La interpretación humana de estos conectores lingüísticos da significado a las proposiciones difusas compuestas (Duarte, 1999; Kassir, 2015; Casadesús et al., 2018).

Tanto los conjuntos intuitivos de la lógica clásica, como los conjuntos difusos, pueden combinarse mediante las operaciones, llamadas booleanas, de complemento, unión e intersección: El complemento de un conjunto está formado por los elementos del universo que no están en él, la unión de dos conjuntos la forman los elementos que están en

uno o en otro conjunto y la intersección la conforman los elementos en ambos conjuntos. Estos operadores son fundamentales para combinar valores lingüísticos y establecer reglas (Duarte, 1999).

La lógica difusa se emplea en situaciones en las que la complejidad del proceso es considerablemente alta y no se dispone de modelos matemáticos precisos. Es especialmente útil para procesos altamente no lineales y cuando se manejan definiciones y conocimientos que no están estrictamente definidos, siendo imprecisos o subjetivos (Eduardo et al., 2006). En la teoría de conjuntos, la pertenencia de un elemento a un conjunto se establece de forma precisa; sin embargo, en un conjunto difuso, la frontera de pertenencia no está definida de manera precisa.

La lógica difusa ha cobrado una fama grande por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico incompleta (Morales, 2002).

### *b) Gasometría arterial*

La gasometría arterial (GA) es una prueba que permite analizar, de manera simultánea, el estado ventilatorio, el estado de oxigenación y el estado ácido-base. Se realiza en una muestra de sangre arterial; no obstante, en circunstancias especiales, también se puede realizar en sangre venosa periférica o sangre venosa mezclada. La GA proporciona mediciones directas de iones hidrógeno (pH), presión parcial de oxígeno ( $\text{PaO}_2$ ), presión parcial de dióxido de carbono ( $\text{PaCO}_2$ ) y saturación arterial de oxígeno ( $\text{SaO}_2$ ). La concentración de bicarbonato y el exceso de base efectivo no son medidos de manera directa, son valores calculados (Cortés-Telles et al., 2017). Este procedimiento se realiza con el propósito de evaluar el intercambio pulmonar de gases y estudiar las alteraciones en el equilibrio ácido-base (Artázcoz et al., 2008).

Este análisis es esencial en el diagnóstico y manejo de diversas condiciones médicas, como enfermedades pulmonares crónicas, insuficiencia cardíaca, traumatismos, y trastornos metabólicos. Proporciona una visión instantánea del estado respiratorio y ayuda a determinar la necesidad de intervenciones terapéuticas.

La gasometría arterial conlleva riesgos mínimos, pero se debe tener precaución en pacientes con trastornos hemorrágicos o infecciones locales. La interpretación de los resultados debe realizarse en el contexto clínico global, considerando la presentación del paciente y otros datos relevantes.

### *c) Equilibrio ácido-base*

Para poder mantener un equilibrio ácido-base, es crucial que estas variables se encuentren dentro de ciertos valores específicos, de lo contrario, podrían desencadenar diversas enfermedades. Las alteraciones del equilibrio ácido-base se pueden presentar en pacientes de forma primaria o secundaria a un proceso patológico como la diabetes *mellitus* o el fallo renal entre otros. El rango fisiológico oscila entre 7.35-7.45, mientras que un pH incompatible con la vida es aquel inferior a 6.6 o superior a 7.8 (Rodríguez-Roisin et al., 1998)

La concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) es uno de los parámetros más importantes del equilibrio ácido-base, expresando numéricamente el grado de acidez. Esta depende de las interacciones entre la presión arterial de dióxido de carbono ( $PaCO_2$ ), la concentración plasmática del ion bicarbonato ( $HCO_3^-$ ), la disociación constante del ácido carbónico y la solubilidad del dióxido de carbono como lo determina la ecuación de Henderson y Hasselbalch (Fórmula 1). El pH es definido como el logaritmo negativo (en base 10) de la concentración sanguínea de estos iones de  $H^+$  (Aristizábal-Salazar et al., 2015).

$$pH = pKa + \log\left(\frac{[HCO_3^-]}{[CO_2]}\right)$$

*Fórmula 1: Ecuación de Henderson-Hasselbalch para el sistema bicarbonato / ácido carbónico*

La  $PaCO_2$  se expresa en mmHg, torr o kPa. En un individuo sano, su valor oscila entre 35-45 mmHg (normocapnia) y se mantiene constante a lo largo del tiempo, a diferencia de algunas presiones arteriales como la  $PO_2$ . Así, en casos de hipoventilación el valor de  $PaCO_2$  aumentará, mientras que en hiperventilación descenderá (Rodríguez-Roisin et al., 1998; Sanchez-Díaz et al., 2017).

La concentración fisiológica del bicarbonato se sitúa entre 22-26 mmol/L o mEq/L. Este componente desempeña un papel crucial en la neutralización de ácidos provenientes del metabolismo celular y la dieta. El sistema bicarbonato, conocido como el buffer plasmático más relevante, actúa como un sistema abierto, permitiendo la eliminación de ácidos por el pulmón en forma de  $CO_2$  y la regeneración renal del  $HCO_3^-$  (Sanchez-Díaz et al., 2017; Olivera et al., 2018).

Para mantener el equilibrio ácido-base en el fluido extracelular, la compensación de los cambios es realizada por:

- 1) El sistema respiratorio elimina o retiene  $CO_2$  a través de cambios en la ventilación alveolar (hiperventilando o hipoventilando respectivamente en respuesta a cambios censados por quimiorreceptores), generando cambios en la  $PaCO_2$ , gas que debido al bajo peso molecular y alta solubilidad pasa fácilmente entre las diferentes membranas y compartimientos biológicos, alterando de este modo la  $[H^+]$ .
- 2) El sistema renal aumenta o disminuye la secreción de  $H^+$  y reabsorbe cerca del 80% del  $HCO_3^-$  filtrado, pero además produce nuevo bicarbonato.

Las alteraciones en estas variables van a desencadenar una serie de efectos patológicos que se pueden categorizar según los valores del pH en acidosis o alcalosis. Sin embargo, es necesario estudiar el origen primario del desbalance (respiratorio o metabólico) y, posteriormente, verificar si el otro componente intenta compensar o compensa totalmente el pH (Aristizábal-Salazar et al., 2015). Es por ello que las situaciones que nos vamos a encontrar y, las cuales debemos definir para poder evaluarlo en nuestro modelo difuso son:

**Acidosis Respiratoria:** Esta condición implica hipoventilación con incremento de la  $PaCO_2$ , lo que conlleva a un descenso del pH. La compensación tiene lugar con incremento en la concentración de  $HCO_3^-$ , los cuales actúan como amortiguadores para contrarrestar el exceso de iones de hidrógeno. La acidosis respiratoria no es una enfermedad

específica, sino un desequilibrio entre la producción de  $\text{CO}_2$  y su eliminación, que depende del correcto funcionamiento de la “bomba ventilatoria”, integrada por la caja torácica (Sánchez-Díaz et al., 2017).

- a. Acidosis Respiratoria Compensada: En el caso de la acidosis respiratoria crónica, los riñones retienen bicarbonato como un intento de compensación renal ante el exceso de ácidos de origen respiratorio. Este proceso, de naturaleza más lenta, suele asociarse con un pH normal (Barros et al., 2010).
- b. Acidosis Respiratoria No Compensada: En situaciones de acidosis respiratoria aguda, se produce una disminución rápida del pH mientras los niveles de bicarbonatos permanecen dentro de la normalidad (Barros et al., 2010).

**Alcalosis Respiratoria:** Alteración en el equilibrio ácido-base que ocurre por incremento de la ventilación alveolar, lo que conlleva a una eliminación en exceso de la  $\text{PaCO}_2$ , disminución en la concentración  $\text{HCO}_3^-$  y, por tanto, un aumento del nivel de pH (mayor de 7.45). Es el trastorno ácido-base más frecuente. Para compensar este desequilibrio, se produce la secreción de  $\text{HCO}_3^-$  y la reabsorción de  $\text{H}^+$  en los riñones (Sánchez-Díaz, 2017; Barros et al., 2010).

- a. Alcalosis Respiratoria Compensada: En el caso de la alcalosis respiratoria crónica, se asocia con valores de pH normal (o con una tendencia a la normalidad) y bajos niveles de  $\text{PaCO}_2$  y de bicarbonato.
- b. Alcalosis Respiratoria No Compensada: En situaciones de alcalosis respiratoria aguda, se observan valores elevados de pH y niveles de bicarbonato normales.

**Acidosis Metabólica:** La acidosis metabólica se manifiesta con un pH bajo y niveles disminuidos de  $\text{HCO}_3^-$ . Este descenso del pH puede ser debido al incremento en la producción endógena de ácidos, disminución de la excreción de ácidos, ganancia de ácidos exógenos o condicionada por pérdida de  $\text{HCO}_3^-$  y, con menor frecuencia, por defecto en la síntesis renal del mismo (Sánchez-Díaz et al., 2017).

- a. Acidosis Metabólica Compensada: La acidosis metabólica se compensa mediante un aumento en la ventilación alveolar ya que la acidemia provoca hiperventilación, reduciendo así la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en la sangre.
- b. Acidosis Metabólica No Compensada: En el caso de una falta de compensación o una compensación insuficiente, el paciente mantiene niveles bajos de pH y  $\text{HCO}_3^-$ , mientras mantiene niveles fisiológicos de  $\text{CO}_2$ .

**Alcalosis Metabólica:** Se distingue por incremento del  $\text{HCO}_3^-$  plasmático, elevación del pH e incremento de la  $\text{PaCO}_2$ . Por lo común ocurre por pérdidas de  $\text{H}^+$  en la zona gastrointestinal (vómitos o aspiración gástrica) o a través de la orina (diuréticos) (de Paula et al., 2012, Sánchez-Díaz et al., 2017).

- a. Alcalosis Metabólica Compensada: La compensación de la alcalosis metabólica ocurre mediante un aumento en la  $\text{PaCO}_2$ , a consecuencia de una disminución de la ventilación pulmonar.



- b. **Alcalosis Metabólica No Compensada:** La alcalosis metabólica no compensada se presenta cuando los valores de  $\text{PaCO}_2$  son normales, pero el pH es alto y el  $\text{HCO}_3^-$  está elevado.

Es esencial destacar la posibilidad de trastornos mixtos, donde coexisten dos o más trastornos ácido-base, como la presencia simultánea de acidosis respiratoria y alcalosis metabólica (Rodríguez-Villar et al., 2020). Sin embargo, estos casos no serán abordados en nuestro sistema.

## **2. Objetivos**

La presente investigación tiene como objetivo el desarrollo e implementación de un modelo de sistema difuso mediante el uso del paquete Fuzzy Logic Toolbox de Matlab para interpretar los resultados de las gasometrías arteriales y así identificar trastornos ácido-base, tales como acidosis respiratoria o metabólica, y alcalosis respiratoria o metabólica. Estos diagnósticos se establecen en función de los valores medidos de gases, como el  $\text{CO}_2$ , el pH y los bicarbonatos. Para ello se realiza una explicación exhaustiva de variables a medir, así como de los conceptos médicos necesarios para comprender los resultados. Además, se aborda la estructuración básica de un modelo diseñado en Matlab utilizando un enfoque de tipo 1 de la lógica difusa.

## **3. Metodología**

Para desarrollar el sistema, se utilizó el programa Matlab, analizando los resultados mediante una herramienta de lógica difusa, específicamente un tipo de Mandani del Fuzzy Logic Toolbox, que permite comparar las entradas y definir las salidas siguiendo una serie de reglas.

### **a) Fuzzy Logic ToolBox MATLAB**

Fuzzy Logic Toolbox constituye un paquete de herramientas dentro del programa MATLAB que faculta a los usuarios para crear y gestionar sistemas basados en lógica difusa. Como se mencionó previamente, la lógica difusa es una metodología utilizada para representar y gestionar la incertidumbre y subjetividad en los sistemas de control. Entre las funciones destacadas de este paquete se encuentran:

- i. Creación y Edición de Reglas de Lógica Difusa
- ii. Creación y Edición de Conjuntos de Pertenencia Difusa
- iii. Síntesis de Sistemas de Control Difusos
- iv. Análisis y Visualización de Conjuntos Difusos
- v. Validación y Simulación de Sistemas de Control Difusos

### **b) Arquitectura del sistema**

El análisis exhaustivo de la arquitectura de un sistema de lógica difusa revela la complejidad intrínseca y la interrelación de sus componentes esenciales. Este estudio se enfocará en comprender la estructura y funcionalidad de elementos

fundamentales que conforman la esencia de un sistema de lógica difusa y, en particular, en la transformación de información nítida a difusa y viceversa. La arquitectura del sistema de lógica difusa implementado se estructura en tres elementos principales (las variables o datos de entrada, la base de conocimiento y el dispositivo de inferencia) los cuales se intercalan entre dos procesos (fusificación y defusificación) (Fig.1).

Las variables o datos de entrada son fundamentales para controlar el sistema. En nuestro sistema, comprenden el valor de pH en sangre, los bicarbonatos y la presión parcial de  $\text{CO}_2$ . Estas proporcionan valores de entrada que son precisos y exactos, es decir, valores nítidos. Aunque los valores nítidos son más manejables matemáticamente, su medición a veces es imprecisa o difícil de definir. Por esta razón, los sistemas de lógica difusa resultan convenientes para manejar la incertidumbre de manera más adecuada.

La base de conocimiento consiste en un conjunto de reglas que determinan el funcionamiento del sistema. Cada regla consta de una condición de entrada, conformada por una o más variables de entrada y sus conjuntos de pertenencia difusa respectivos. Asimismo, incluye una acción de salida que proporcionará un valor nítido para la variable de salida, representando un diagnóstico específico para el modelo difuso planteado. En nuestro caso, el formato de reglas utilizado fue del tipo SI\_ENTONCES. Por ejemplo: SI acidemia y normocapnia y hipocarbonatemia ENTONCES acidosis metabólica sin compensar.

El dispositivo de inferencia se encarga de determinar el valor de salida a partir de un valor de entrada, evaluando el conjunto de reglas. El paquete Fuzzy Logic de Matlab posibilita la implementación de dos motores distintos, Mamdani y Sugeno. En este caso, se emplea un dispositivo de inferencias de tipo Mamdani tipo 1 ya que se adecúa mejor para la interpretación humana.

La inferencia difusa de Mamdani fue introducida por primera vez como un método para crear un sistema de control mediante la síntesis de un conjunto de reglas de control lingüísticas obtenidas de operadores humanos experimentados. En un sistema Mamdani, la salida de cada regla es un conjunto difuso. Dado que estos sistemas tienen bases de reglas más intuitivas y fáciles de entender, son adecuados para aplicaciones de sistemas expertos donde las reglas se crean a partir del conocimiento de expertos humanos, como en el diagnóstico médico.

En todo sistema difuso es de vital importancia comprender cómo el sistema convierte los *inputs* nítidos en valores difusos para aplicar el conjunto de reglas, así como saber cómo estos valores se transforman nuevamente en valores de salida que puedan ser interpretados de manera efectiva por el sistema. Esto es a lo que se denomina Proceso de Inferencia.

El proceso de inferencia en un sistema Mamdani implica varios pasos, que se describen a continuación (MathWorks, 2023):

1. Fusificación (Fuzzification): En esta etapa, se toman las entradas del sistema y se evalúa en qué medida pertenecen a los conjuntos difusos definidos para esas entradas. En el software Fuzzy Logic Toolbox, la

entrada es siempre un valor numérico claro limitado al universo de discurso de la variable de entrada. La salida es un grado difuso de pertenencia al conjunto lingüístico calificador (siempre en el intervalo de 0 a 1). Cada entrada se asigna a múltiples conjuntos difusos mediante funciones de membresía, lo que significa que se obtiene un grado de pertenencia para cada conjunto difuso.

2. Evaluación del Antecedente (Fuzzy Operator): Una vez que las entradas han sido fusificadas, se evalúa el antecedente de cada regla en las reglas difusas del sistema. Cada regla tiene una condición o antecedente que se compone de proposiciones difusas relacionadas con las entradas. Se aplica un operador difuso (AND, OR u otro) para combinar las proposiciones difusas y determinar la verdad difusa de la regla.
3. Implicación: Después de evaluar el antecedente de cada regla, se procede a la etapa de implicación. La implicación establece la contribución de cada regla a la salida del sistema. Se toma en cuenta la verdad difusa de cada regla y se establece una relación entre el antecedente y el consecuente de la regla.
4. Agregación de Consecuentes: La agregación es el proceso mediante el cual los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla se combinan en un solo conjunto difuso. La agregación implica la participación de operadores difusos específicos, como el máximo o el mínimo, dependiendo de la lógica utilizada en el sistema.
5. Defusificación: La agregación de un conjunto difuso abarca un rango de valores de salida, por lo que debe defusificarse para obtener un solo valor de salida del conjunto. La salida difusa resultante de la agregación debe ser convertida en una salida nítida y comprensible. Este proceso se denomina defusificación. Existen varios métodos de defusificación, como el centroide, el de máxima verosimilitud, el de la media del máximo (MOM), el de la media ponderada, el del último máximo (LOM) y el del primer máximo (FOM), que transforman el conjunto difuso en un valor único que representa la salida del sistema.

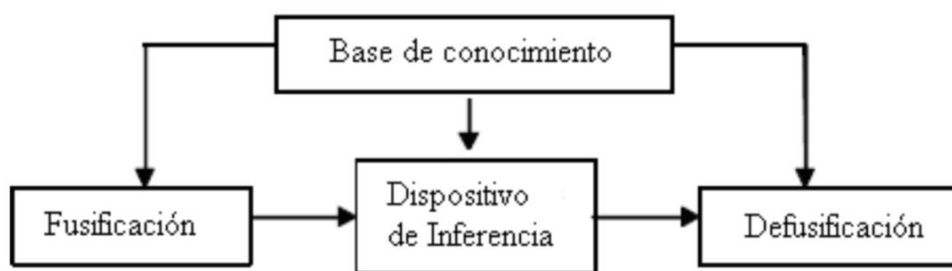


Figura 1: Estructura fundamental de un sistema difuso puro o Mamdani.

En resumen, en un sistema Mamdani, las entradas se fusifican, se evalúa el antecedente de cada regla, se aplica la implicación para calcular la contribución de cada regla, se agregan los consecuentes de todas las reglas, y finalmente, se realiza la defusificación para obtener la salida nítida del sistema.

En contraposición a los sistemas Mamdani, que utilizan conjuntos difusos en el consecuente de las reglas y requieren un paso de defusificación, los sistemas Sugeno emplean funciones matemáticas precisas en el consecuente y no necesitan defusificación, lo que se traduce en una mayor eficiencia computacional. La elección entre estos dos enfoques depende de la naturaleza del problema y de cómo se prefiera representar la salida del sistema. Los sistemas Sugeno a menudo se utilizan en situaciones donde se busca una salida más precisa y matemáticamente definida.

### c) Clasificación

La clasificación se realizó teniendo en cuenta los parámetros del pH, concentración parcial de  $\text{CO}_2$  y la concentración de bicarbonato en sangre arterial, usando como límites de referencia los indicados en la Tabla 1. La combinación de estos datos ha sido utilizada para crear las respectivas reglas y las salidas del modelo.

- I. **Variables de entrada:** Como variables de entrada encontramos el pH, la  $\text{PaCO}_2$  y la  $[\text{HCO}_3^-]$ . En la tabla 1 se encuentran los valores y rangos fisiológicos para cada una de las variables, que se utilizarán como referencia para crear el sistema y la implementación del mismo.

Acidemia	pH Fisiológico		Alcalemia
< 7.35	7.35	7.45	> 7.45
Hipocapnia	$\text{PaCO}_2$ Fisiológica		Hipercapnia
< 35 mmHg	35 mmHg	45 mmHg	> 45 mmHg
Hipobicarbonatemia	$\text{HCO}_3^-$ Fisiológico		Hiperbicarbonatemia
< 22 mEq/L	22 mEq/L	26 mEq/L	> 26 mEq/L

Tabla 1: Parámetros a analizar en el equilibrio ácido-base, que incluyen los valores fisiológicos y posibles trastornos. Adaptado de Sanchez-Díaz et al. (2017).

- II. **Variables de salida:** En base a las tres variables previamente señaladas, al implementar un sistema de inferencia permite procesar las variables de entrada, las variables resultantes se detallan en las Tablas 2, 3, 4 y 5. Es importante tener en consideración que los valores consignados en la Tabla 1 hacen referencia al valor de MATLAB que representa la situación específica.

#### 1. Situación metabólica:

Acidosis metabólica	Normalidad	Alcalosis metabólica
< 0.30	0.40 - 0.60	> 0.70

Tabla 2: Valores asumidos por el modelo en MATLAB para cada una de las variables de salida relacionadas con la situación metabólica.

#### 2. Situación respiratoria:

Acidosis metabólica	Normalidad	Alcalosis metabólica
< 0.30	0.40 - 0.60	> 0.70

Tabla 3: Valores asumidos por el modelo en MATLAB para cada una de las variables de salida relacionadas con la situación respiratoria.

#### 3. Grado de compensación metabólica

Sin compensación	Compensación Parcial	Compensación total
< 0.20	0.40 - 0.50	> 0.80

Tabla 4: Valores asumidos por el modelo en MATLAB para cada una de las variables de salida relacionadas con el grado de compensación metabólica.

#### 4. Grado de compensación respiratoria

Sin compensación	Compensación Parcial	Compensación total
< 0.20	0.40 - 0.50	> 0.80

Tabla 5: Valores asumidos por el modelo en MATLAB para cada una de las variables de salida relacionadas con el grado de compensación respiratoria.

## 4. Implementación

La implementación de las variables de entrada y salida constituye un paso fundamental para abordar problemas complejos caracterizados por la imprecisión y vaguedad. Las variables de entrada y salida se caracterizan mediante conjuntos difusos que siguen una forma trapezoidal, permitiendo una representación más detallada y específica de las condiciones y resultados.

Los *inputs* para los sistemas de entrada fueron:

- El pH se representó mediante una función trapezoidal con un rango de 7.00 y 7.80 (Figura 2a). Se definieron diferentes niveles:
  - Acidemia: [7.00 7.00 7.30 7.35]. Todos aquellos valores inferiores a 7.35 se encontrarían en el conjunto difuso de acidosis.
  - Normalidad: [7.30 7.35 7.45 7.50]. Los valores que caigan en el rango de 7.35 a 7.45 se situarían en la meseta de la función trapezoidal, reflejando los valores fisiológicos para el pH.
  - Alcalemia: [7.45 7.50 7.80 7.80]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 7.45 estarían dentro del conjunto difuso de alcalosis.
- La  $\text{PaCO}_2$  se categorizó con una función trapezoidal con un rango de 10 y 70 (Figura 2b). Los niveles en este caso fueron:
  - Hipocapnia: [10 10 30 35]. Todos aquellos valores inferiores a 35 mmHg se incluirían en el conjunto difuso de hipocapnia.
  - Normocapnia: [30 35 45 50]. Los valores que caigan en el rango de 35 a 45 mmHg se situarían en la meseta de la función trapezoidal, reflejando los valores fisiológicos para la  $\text{paCO}_2$ .
  - Hiperapnia: [45 50 70 70]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 45 mmHg estarían dentro del conjunto difuso de hiperapnia.
- La  $[\text{HCO}_3^-]$  se categorizó con una función trapezoidal con un rango de 5 y 45 (Figura 2c). Se definieron diferentes niveles:
  - Hipobicarbonatemia: [5.00 5.00 18.50 22.00]. Todos aquellos valores inferiores a 22 mEq/L se incluirían en el conjunto difuso de hipobicarbonatemia.
  - Normobicarbonatemia: [20.00 22.00 26.00 29.50]. Los valores que caigan en el rango de 22 a 26 mEq/L se situarían en la meseta de la función trapezoidal, reflejando los valores fisiológicos para la  $[\text{HCO}_3^-]$ .

- Hiperbicarbonatemia: [26.00 29.50 45.00 45.00]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 26 mEq/L estarían dentro del conjunto difuso de hiperbicarbonatemia.

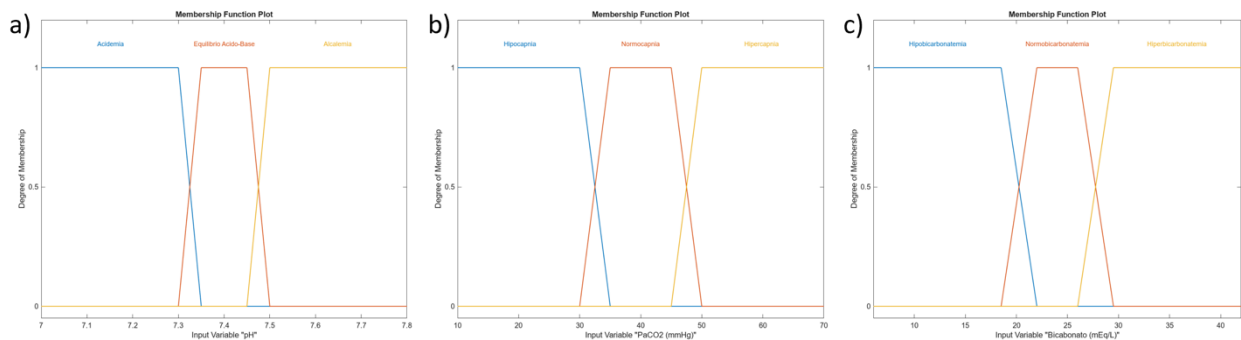


Figura 2: Representación gráfica de la función trapezoidal de los conjuntos difusos realizado en Matlab para los inputs establecidos para, a) el pH, b) la presión parcial de CO<sub>2</sub> en la sangre arterial y c) el bicarbonato.

Las funciones para los sistemas de salida fueron:

- La situación metabólica se representó mediante una función trapezoidal con un rango entre 0 y 1 (Figura 3a). Así, se obtuvo:
  - Acidosis metabólica: [0.00 0.00 0.30 0.40]. Todos aquellos valores inferiores a 0.30 se incluirían en el conjunto difuso de acidosis metabólica.
  - Normalidad: [0.30 0.40 0.60 0.70]. Todos aquellos valores que se encuentren comprendidos entre 0.40 y 0.60 estarían en la meseta de la función trapezoidal, y por tanto dentro del conjunto difuso de normalidad.
  - Alcalosis metabólica: [0.60 0.70 1.00 1.00]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 0.60 estarían dentro del conjunto difuso de alcalosis metabólica.
- La situación respiratoria se representó mediante una función trapezoidal con un rango entre 0 y 1 (Figura 3b). Así, se obtuvo:
  - Acidosis respiratoria: [0.00 0.00 0.30 0.40]. Todos aquellos valores inferiores a 0.40 se incluirían en el conjunto difuso de acidosis respiratoria.
  - Normalidad: [0.30 0.40 0.60 0.70]. Todos aquellos valores que se encuentren comprendidos entre 0.40 y 0.60 estarían en la meseta de la función trapezoidal, estarían dentro del conjunto difuso de normalidad.
  - Alcalosis respiratoria: [0.60 0.70 1.00 1.00]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 0.60 estarían dentro del conjunto difuso de alcalosis respiratoria.

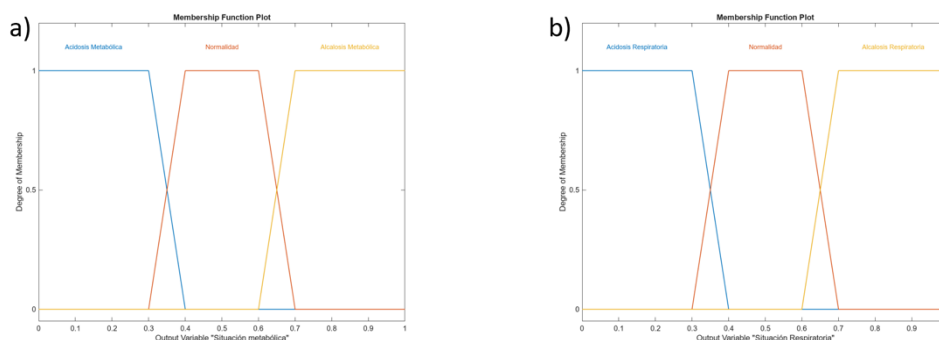


Figura 3: Representación gráfica de la función trapezoidal de los conjuntos difusos realizado en Matlab para los outputs establecidos para, a) la situación metabólica del paciente, y b) la situación respiratoria del paciente.

- La compensación metabólica se representó mediante una función trapezoidal con un rango entre 0 y 1 (Figura 4a). De esta manera, se obtuvo:
  - Sin compensación: [0.00 0.00 0.20 0.40]. Todos aquellos valores inferiores a 0.40 se incluirían en el conjunto difuso de sin compensación.
  - Compensación Parcial: [0.20 0.40 0.60 0.80]. Todos aquellos valores que se encuentren comprendidos entre 0.40 y 0.60 estarían en la meseta de la función trapezoidal, estarían dentro del conjunto difuso de compensación parcial.
  - Compensación Total: [0.60 0.80 1.00 1.00]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 0.60 estarían dentro del conjunto difuso de compensación total.
- La compensación respiratoria se representó mediante una función trapezoidal con un rango entre 0 y 1 (Figura 4b). Así, se obtuvo:
  - Sin compensación: [0.00 0.00 0.20 0.40]. Todos aquellos valores inferiores a 0.40 se incluirían en el conjunto difuso de sin compensación.
  - Compensación Parcial: [0.20 0.40 0.60 0.80]. Todos aquellos valores que se encuentren comprendidos entre 0.40 y 0.60 estarían en la meseta de la función trapezoidal, estarían dentro del conjunto difuso de compensación parcial.
  - Compensación Total: [0.60 0.80 1.00 1.00]. Todos aquellos valores que se encuentren por encima de 0.60 estarían dentro del conjunto difuso de compensación total.

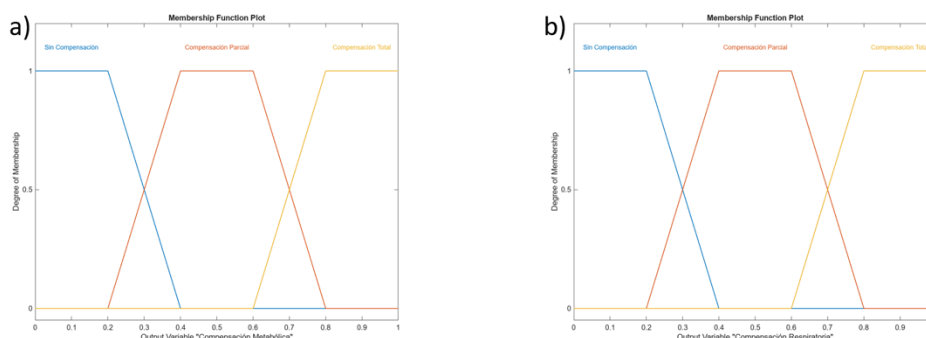


Figura 4: Representación gráfica de la función trapezoidal de los conjuntos difusos realizado en Matlab para los outputs establecidos para, a) la compensación metabólica, y b) la compensación respiratoria.

## 5. Reglas del sistema

Para determinar las diferentes reglas se utilizó como referencia el manual de atención médico-quirúrgica (de Swaringen, 2003). Tras tener en cuenta las posibles combinaciones de variables de entrada y salida, se establecieron un total de normas, reflejadas en las Figuras 5, 6 y 7.

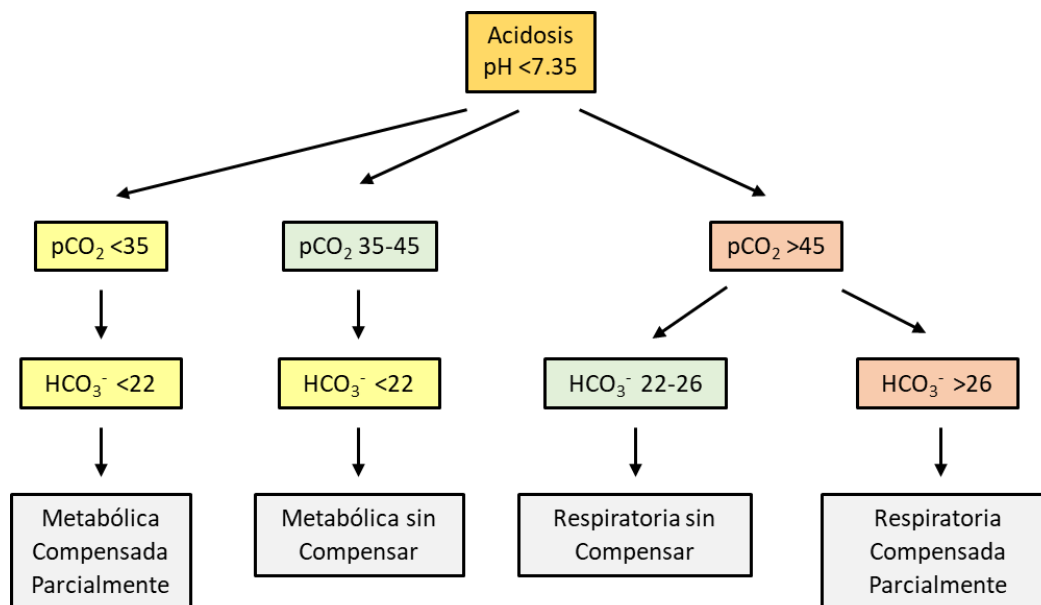


Figura 5: Diagrama representando las normas para las situaciones de acidosis. La  $pCO_2$  y el  $HCO_3^-$  se expresan en mmHG y mEq/L, respectivamente.

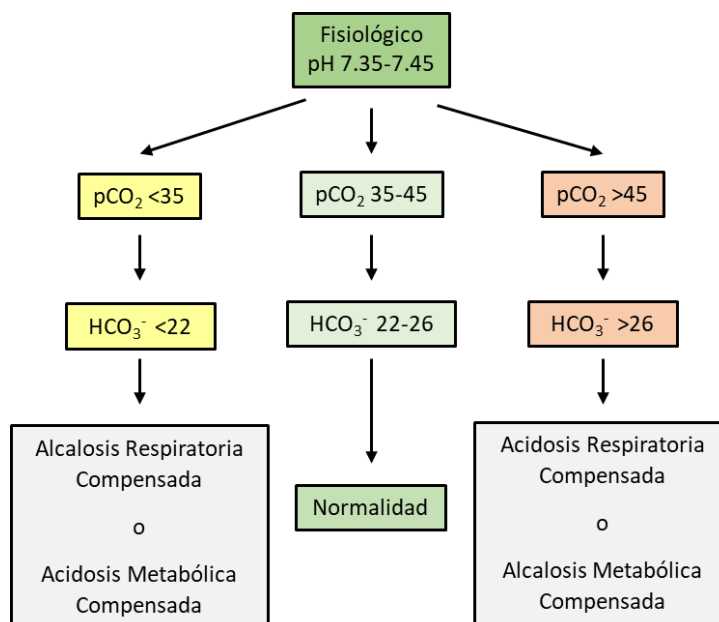


Figura 6: Diagrama representando las normas para las situaciones de donde el pH es el fisiológico. La  $pCO_2$  y el  $HCO_3^-$  se expresan en mmHG y mEq/L, respectivamente.

Cabe destacar que un pH fisiológico con niveles altos o bajos para la  $PaCO_2$  y el  $HCO_3^-$  se explica por una situación metabólica o respiratoria ya compensada (Figura 7). Esto genera casos ambiguos donde el problema puede ser respiratorio, variando el nivel de dióxido de carbono y siendo el bicarbonato el que se encarga de compensarlo, o metabólico cuando ocurre lo contrario. En estos casos el sistema no es capaz de distinguir cual es el verdadero



causante del trastorno ácido-base y cuál es el valor compensado. De este modo, se establecieron normas que expresen ambas posibilidades y se tendrá en cuenta que ambas salidas puedan ser válidas.

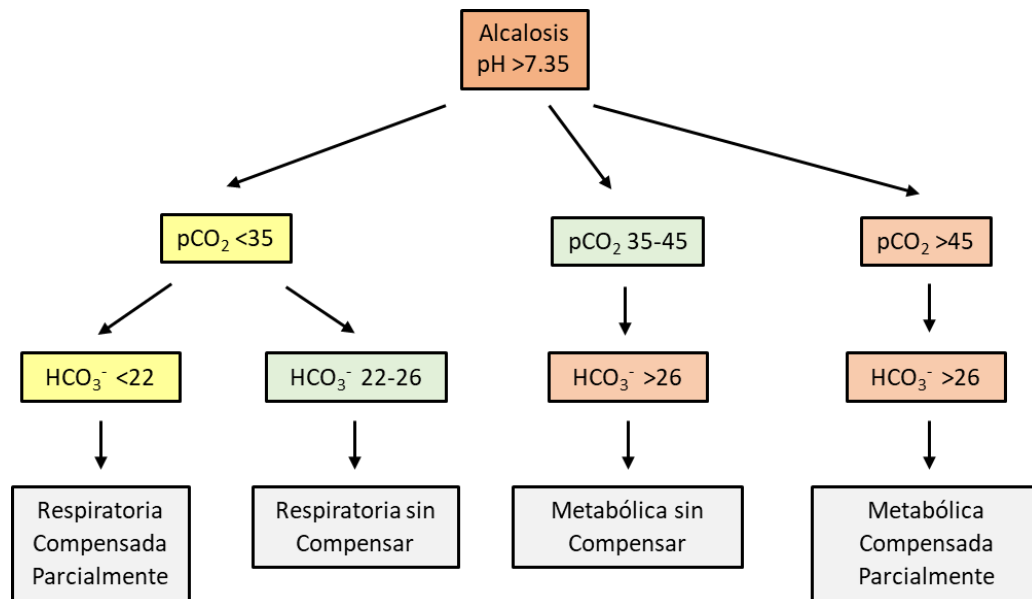


Figura 7: Diagrama representando las normas para las situaciones de donde el pH es normal. La  $pCO_2$  y el  $HCO_3^-$  se expresan en mmHG y mEq/L, respectivamente.

## 6. Resultados

### a) Ejemplos

Se llevaron a cabo diversas pruebas para evaluar la eficacia del modelo desarrollado en MATLAB. Se escogieron de forma aleatoria diversos números que se ajustaran a los rangos correspondientes a cada diagnóstico. Esto resultó en la obtención de 11 conjuntos de datos. Posteriormente, se analizaron estos datos mediante su ingreso en una calculadora de gasometrías en línea (<https://www.rccc.eu/calculadoras/GSA.html>) y comparándolos con los resultados del modelo creado en MATLAB. Se buscará identificar y explicar las discrepancias observadas entre ambos conjuntos de resultados. Las salidas, de izquierda a derecha, corresponden a la situación metabólica, situación respiratoria, compensación respiratoria y compensación metabólica. En la calculadora aguda equivale a que no existe compensación.

- $pH = 7,22 / CO_2 = 29 / HCO_3^- = 21$

Calculadora: acidosis metabólica compensada parcialmente.

MATLAB: acidosis metabólica compensada parcialmente.

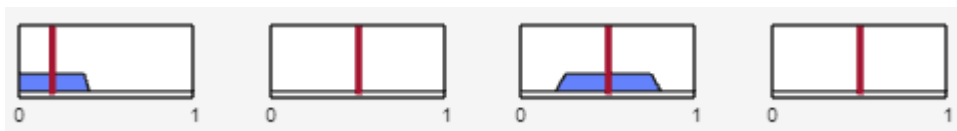


Figura 8: Representación del sistema difuso para el caso [7,22 29 21].

- $\text{pH} = 7,13 / \text{CO}_2 = 38 / \text{HCO}_3 = 13$

Calculadora: acidosis metabólica aguda.

MATLAB: acidosis metabólica sin compensar.



Figura 9: Representación del sistema difuso para el caso [7,13 38 13].

- $\text{pH} = 7,26 / \text{CO}_2 = 54 / \text{HCO}_3 = 24$

Calculadora: acidosis respiratoria aguda.

MATLAB: acidosis respiratoria sin compensar.



Figura 10: Representación del sistema difuso para el caso [7,26 54 24].

- $\text{pH} = 7,09 / \text{CO}_2 = 48 / \text{HCO}_3 = 33$

Calculadora: acidosis respiratoria compensada parcialmente.

MATLAB: acidosis respiratoria compensada parcialmente.

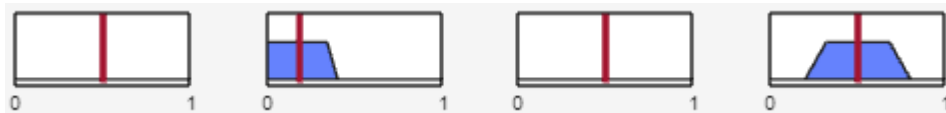


Figura 11: Representación del sistema difuso para el caso [7,09 48 33].

- $\text{pH} = 7,43 / \text{CO}_2 = 22 / \text{HCO}_3 = 11$

Calculadora: alcalosis respiratoria compensada.

MATLAB: acidosis metabólica o alcalosis respiratoria totalmente compensada.

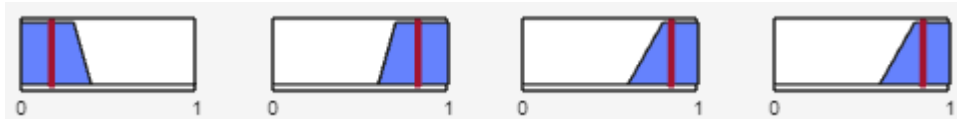


Figura 12: Representación del sistema difuso para el caso [7,43 22 11].

- $\text{pH} = 7,4 / \text{CO}_2 = 42 / \text{HCO}_3 = 23$

Calculadora: normalidad.

MATLAB: normalidad.



Figura 13: Representación del sistema difuso para el caso [7,4 42 23].

- $\text{pH} = 7,42 / \text{CO}_2 = 59 / \text{HCO}_3 = 37$

Calculadora: acidosis respiratoria compensada.

MATLAB: alcalosis metabólica o acidosis respiratoria totalmente compensada.

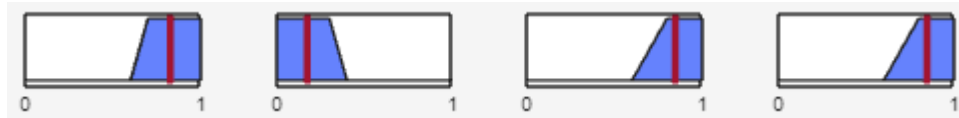


Figura 14: Representación del sistema difuso para el caso [7,42 59 37].

- $\text{pH} = 7,61 / \text{CO}_2 = 31 / \text{HCO}_3 = 20$

Calculadora: alcalosis respiratoria parcialmente compensada.

MATLAB: alcalosis respiratoria parcialmente compensada.



Figura 15: Representación del sistema difuso para el caso [7,61 31 20].

- $\text{pH} = 7,56 / \text{CO}_2 = 19 / \text{HCO}_3 = 25$

Calculadora: alcalosis respiratoria aguda.

MATLAB: alcalosis respiratoria sin compensar.



Figura 16: Representación del sistema difuso para el caso [7,56 19 25].

- $\text{pH} = 7,49 / \text{CO}_2 = 37 / \text{HCO}_3 = 36$

Calculadora: alcalosis metabólica aguda.

MATLAB: alcalosis metabólica sin compensar.



Figura 17: Representación del sistema difuso para el caso [7,49 37 36].

- $\text{pH} = 7,68 / \text{CO}_2 = 63 / \text{HCO}_3 = 41$

Calculadora: alcalosis metabólica parcialmente compensada.

MATLAB: alcalosis metabólica parcialmente compensada.

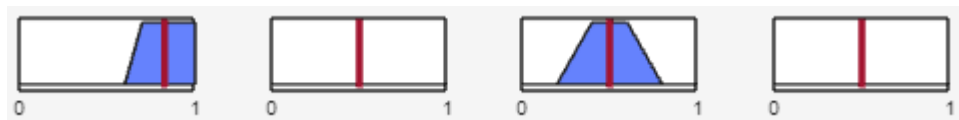


Figura 18: Representación del sistema difuso para el caso [7,68 63 41].

## b) Casos clínicos

Se estudió la eficacia de este nuevo modelo de difusión para la detección de desórdenes ácido-base en 3 casos clínicos reales, extraídos del Centro Nacional Siglo XXI:

- Caso 1: Mujer de 54 años, con historia de 10 años de insuficiencia cardiaca, toma diuréticos de forma regular. Tuvo un resfriado la semana anterior y experimento dificultad respiratoria progresiva. pH: 7.54, PaCO<sub>2</sub>: 26 mmHg y [HCO<sub>3</sub>]: 22 mEq/L. El diagnóstico de los profesionales médicos indica alcalosis respiratoria. Análogamente el diagnóstico realizado por el sistema difuso muestra una alcalosis respiratoria no compensada (Figura 19).



Figura 19: Representación del sistema difuso para el caso 1.

- Caso 2: Un hombre de 47 años sufrió un colapso en la calle y estaba cianótico, sin pulso palpable, cuando llegaron los paramédicos. Se libero la vía aérea y se estableció la ventilación con 100% de oxígeno y se realizó un masaje cardiaco con tórax cerrado. A los 20 segundo había pulso palpable y mejoró el color de la piel. A los 2 minutos, el paciente estaba sensible pero no cooperativo. Se analizaron los gases tras los 20 minutos de la reanimación. pH: 7.51, PaCO<sub>2</sub>: 35 mmHg y [HCO<sub>3</sub>]: 27 mEq/L. Se le diagnosticó alcalosis metabólica. Según nuestro sistema difuso, el paciente en cuestión también tendría una alcalosis metabólica no compensada (Figura 20).

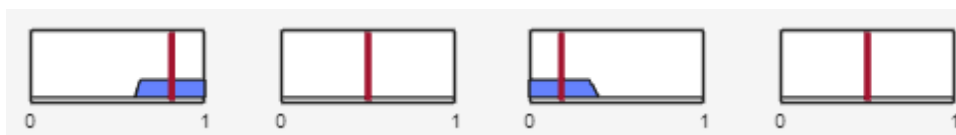


Figura 20: Representación del sistema difuso para el caso 2.

- Caso 3: Una mujer de 66 años, con historia de enfermedad pulmonar obstructiva crónica, ingresa a sala de urgencias con edema pulmonar obvio. pH: 7.10, PaCO<sub>2</sub>: 25 mmHg y [HCO<sub>3</sub>]: 8 mEq/L. El diagnóstico de la mujer por parte de los sanitarios es una acidosis metabólica parcialmente compensada, con hipoxemia grave, de forma similar, exceptuando la hipoxemia, el resultado del sistema difuso fue el mismo (Figura 21).



Figura 21: Representación del sistema difuso para el caso 3.

## 7. Discusión

### a) Ejemplos

De forma general, la calculadora y el sistema difuso coinciden en las salidas en la mayoría de los casos, pero existen dos excepciones. En el siguiente caso:  $\text{pH} = 7,43$  /  $\text{CO}_2 = 22$  /  $\text{HCO}_3 = 11$ ; existe una discrepancia. El pH está dentro del rango fisiológico, mientras que los valores de dióxido de carbono y los de bicarbonato son bajos en comparación con su rango. Por una parte, esto puede deberse a que existe una acidosis metabólica por el descenso en los niveles de bicarbonato. Esta ya habría sido compensada completamente, ya que el pH no se encuentra alterado, mediante un descenso del dióxido de carbono. Por otra parte, el descenso de la  $\text{PaCO}_2$  puede provocar una alcalosis respiratoria, que se ve totalmente compensada gracias al descenso del bicarbonato. Mediante el sistema difuso empleado se determina que ambas posibilidades son válidas, mientras que la calculadora determina como válida la existencia de una alcalosis respiratoria compensada. El otro caso sería:  $\text{pH} = 7,42$  /  $\text{CO}_2 = 59$  /  $\text{HCO}_3 = 37$ ; aquí ocurre algo similar al caso anterior. En esta situación el pH también está dentro del rango fisiológico, pero los niveles de dióxido de carbono y bicarbonato son elevados, ocurriendo el caso contrario al del ejemplo, pero manteniéndose la compensación completa. De la misma forma, la calculadora determina la situación de acidosis respiratoria como válida, mientras que el sistema difuso de MATLAB contempla ambas como válidas.

Como ya se comentaba en material y métodos, estos dos casos pertenecen a las situaciones donde el pH ya ha sido compensado completamente y no se puede saber cuál era la condición preexistente, generando esta ambigüedad. Una posible solución para poder determinar la condición sería emplear ecuaciones de compensación, como las establecidas por la "American Thoracic Society" (ATS). Estas ecuaciones de compensación son diferentes según la situación ácido-base y que sistema fisiológico sea el causante de la alteración, permitiendo el cálculo de la compensación esperada en cada caso. Mediante el uso de estas ecuaciones se podrían comparar los resultados de la compensación esperada con la real y así determinar realmente cuál es la situación ácido-base en la que se encuentra el paciente.

### b) Casos clínicos

Los desórdenes ácido-base pueden surgir como consecuencia de diversas condiciones médicas, desde trastornos respiratorios hasta desequilibrios metabólicos. La detección temprana y precisa de estos desórdenes es esencial para proporcionar un tratamiento efectivo y mejorar los resultados clínicos.

En este contexto, la implementación de nuevos modelos de difusión permite optimizar la identificación de desórdenes ácido-base en casos clínicos reales. El modelo difuso coincide con el diagnóstico médico para los tres casos clínicos comparados en este trabajo, por lo que podría haber un gran potencial a la hora de usar este modelo como herramienta médica en casos reales y sería de interés estudiar de forma más profunda su posible implementación.

## 8. Conclusiones

En conclusión, las pruebas y evaluaciones realizadas han destacado limitaciones significativas, especialmente en situaciones que involucran diagnósticos complejos, como por ejemplo la diferenciación de acidosis respiratoria compensada o alcalosis metabólica compensada, que, por sus propios valores de pH,  $\text{PaCO}_2$  y la  $[\text{HCO}_3^-]$  plantea un desafío por la incapacidad del sistema para discernir entre los diversos trastornos en tales casos.

Además, la omisión de variables críticas, como pueden ser la  $\text{PaO}_2$  o  $\text{SaO}_2$ , así como la incapacidad del propio sistema difuso de interpretar el historial clínico del paciente, contribuyen a resultados imprecisos y, en ocasiones contradictorios, como los observados con anterioridad. Estos hallazgos resaltan la necesidad de una revisión profunda y la implementación de mejoras en las reglas del sistema de entrada o incluso en los parámetros de entrada para corregir el problema de inferencia.

No obstante, a pesar de las limitaciones, el sistema ha demostrado eficacia en escenarios concretos y casos más simples, no solo frente a situaciones hipotéticas diseñadas para devolver un *output* definido, sino también en escenarios clínicos reales. Esto sugiere que, con las mejoras señaladas, presenta el potencial de convertirse en una herramienta valiosa para el personal médico, contribuyendo a la mejora de la eficiencia de los procesos de diagnóstico, la toma de decisiones en entornos clínicos y el tratamiento de diversas condiciones médicas. Este análisis crítico no solo proporciona calidad sobre las áreas que requieren atención inmediata, sino que también establece una base sólida para futuras iteraciones y mejoras en la implementación de sistemas difusos en el ámbito médico.

## 9. Bibliografía

1. American Thoracic Society. Interpretation of Arterial Blood Gases (ABGs)..Recuperado el 25 de noviembre de 2023, de <https://www.thoracic.org/professionals/clinical-resources/critical-care/clinical-education/abgs.php>
2. Aristizábal-Salazar, R. E., Calvo-Torres, L. F., Valencia-Arango, L. A., Montoya-Canon, M., Barbosa-Gantiva, O., & Hincapié-Baena, V. (2015). Equilibrio ácido-base: el mejor enfoque clínico. *Revista colombiana de anestesiología*, 43(3), 219-224.
3. Artázcoz Artázcoz, M., & Arilla Iturri, S. (2008). Gasometría arterial. *Rev. Rol enferm*, 450-456.
4. Barros, D., Quero, C. G., & Río, F. G. (2010). Protocolo de interpretación clínica de la gasometría arterial en la insuficiencia respiratoria. *Medicine-Programa de Formación Médica Continuada Acreditado*, 10(63), 4372-4374.
5. Casadesús, R., & de Castro, I. (2018). De la lógica difusa a la inteligencia artificial. Hacia un futuro transhumano. *Ars Brevis*, (24), 47-82.
6. Cortés-Telles, A., Gochicoa-Rangel, L. G., Pérez-Padilla, R., & Torre-Bouscoulet, L. (2017). Gasometría arterial ambulatoria. Recomendaciones y procedimiento. *Neumología y cirugía de tórax*, 76(1), 44-50.
7. de Paula, J. M. P., Hidalgo, S. F., Toranzo, E. M., Doza, J. P., & de Paula, J. F. P. (2012). Alteraciones del equilibrio ácido-base. *Diálisis y Trasplante*, 33(1), 25-34.
8. Duarte, O. G. (1999). Sistemas de lógica difusa: fundamentos. *Ingeniería e Investigación*, (42), 22-30.
9. Eduardo, C., & De Vito, E. L. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, 6(3), 126-136.
10. Kassir, E. E. (2015). Sistemas De Control Difuso. Eslava Zuluaga, AF.
11. Mathivet, V. (2018). Inteligencia artificial para desarrolladores: conceptos e implementación en c. Ediciones ENI.
12. MathWorks Inc., (2023). Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide
13. Morales Luna, G. (2002). Introducción a la lógica difusa. Centro de Investigación y Estudios Avanzados. México.
14. Olivera, D., & de la Sota, P. (2018) Capítulo 4: Biofísica del equilibrio ácido-base del organismo animal. Biofísica para estudiantes de Ciencias Veterinarias, 64..
15. Rodríguez-Roisin, R. O. B. E. R. T. O., & de la SEPAR, G. D. T. (1998). Normativa sobre la gasometría arterial. *Archivos de Bronconeumología*, 34(3), 142-153.
16. Rodríguez-Villar, S., Do Vale, B. M., & Fletcher, H. M. (2020). El algoritmo de la gasometría arterial: propuesta de un enfoque sistemático para el análisis de los trastornos del equilibrio ácido-base. *Revista Española de Anestesiología y Reanimación*, 67(1), 20-34.
17. Sánchez Díaz, J. S., Martínez Rodríguez, E. A., Peniche Moguel, K. G., Díaz Gutiérrez, S. P., Pin Gutiérrez, E., Cortés Román, J. S., & Rivera Solís, G. (2018). Interpretación de gasometrías: solo tres pasos, solo tres fórmulas. *Medicina crítica (Colegio Mexicano de Medicina Crítica)*, 32(3), 156-159.
18. Sánchez-Díaz, J. S., Martínez-Rodríguez, E. A., Méndez-Rubio, L. P., Peniche-Moguel, K. G., Huanca-Pacaje, J. M., López-Guzmán, C., & Calyeca-Sánchez, V. (2017). Equilibrio ácido-base. Puesta al día. Teoría de Henderson-Hasselbalch. *Medicina Interna de México*, 32(6), 646-660.
19. Vera Carrasco, O. (2018). Trastornos del equilibrio ácido-base. *Revista Médica La Paz*, 24(2), 65-76.
20. Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer*, 21(4), 83-93.
21. Swearingen, P. L. (2003). *Manual of Medical-Surgical Nursing Care: Nursing Interventions & Collaborative Management*.