

## Evaluación de la calidad de agua superficial con un sistema de inferencia difuso

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.004-010>

### **Edith Meryluz Claros-Guerrero**

Universidad Nacional del Santa- Perú  
Doctorado en Matemática  
Docente en Fac. de Ciencias/Universidad Nacional José  
Faustino Sánchez Carrión  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2765-953X>  
E-mail: [eclaros@unjfsc.edu.pe](mailto:eclaros@unjfsc.edu.pe)

### **Fredy Román Paredes Aguirre**

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión  
Docente en Fac. de Ingeniería Química y Metalúrgica  
Maestro en Docencia Superior e Investigación  
Universitaria  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3829-9541>  
E-mail: [fparedes@unjfsc.edu.pe](mailto:fparedes@unjfsc.edu.pe)

---

### **RESUMEN**

El agua dulce es un recurso hídrico que se ha ido deteriorando por causas naturales y actividades antropogénicas, requiriéndose la evaluación de la calidad del agua, comparando los valores de los parámetros físicos, químicos y biológicos con un Índice de Calidad del agua. En este estudio se evaluó la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Huaura (2019-2021), con un sistema de inferencia difuso (FIS), en base a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), y la categorización del uso del agua según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales. El sustento teórico del índice difuso ICARHF se diseñó en cuatro pasos: definir los conjuntos difusos y función de pertenencia; las operaciones de conjuntos difusos; la lógica difusa y las reglas de inferencia. Se analizaron los Informes Técnicos de dos puntos de monitoreo de la calidad del agua superficial en la Cuenca del Río Huaura (2019-2021). Se implementó la lógica del FIS (ICARHF) con Matlab R2022a. El índice difuso, se correlaciona con el índice de calidad ambiental de recursos hídricos superficiales (ICARHS) ( $r=0.92$ ), aceptando que no existe diferencia estadística significativa, entre ambos índices. Los resultados comprueban que, si es posible diseñar un sistema de inferencia difuso para determinar la calidad de agua superficial, dependiendo del uso, al que se destine el agua, basado en la información disponible en las entidades gubernamentales y no gubernamentales, aun cuando se cuenta con poca información accesible.

**Palabras clave:** Índice de calidad de agua, Lógica difusa, Recurso hídrico.

## 1 INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas, están afectando negativamente la calidad del agua, considerando que el término de calidad del agua, no está directamente relacionado con un grado de pureza absoluto o próximo al absoluto; se aproxima más al concepto de "natural" (Koch, Bianchi, Grutka, Martins, de Almeida, da Silva, da Rosa y Alessi, 2023), estas actividades como la minería, ganadería, producción y disposición de residuos, generan presencia de materia orgánica, a través de descargas de aguas residuales domésticas, escorrentías agrícolas, efluentes de procesos industriales (Quiñones-Huatangari, Ochoa, Milla-Pino, Bazán, Gamarra y Ráscon, 2020; Uddin, Nash, Rahman y Olbert, 2023), y según el informe del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), la calidad del agua en el Perú, está siendo afectado por la contaminación de los ríos, a lo largo de su cauce, por vertimiento de relaves mineros, aguas servidas urbanas y desagües industriales (INEI, 2017), con efectos dañinos para la salud y el ecosistema, requiriéndose la evaluación de la calidad del agua, para mantener la salud humana y proteger el medio ambiente (Nayak, Patil y Patki, 2020), y esto se determina comparando características físicas, químicas y biológicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares de calidad ambiental (ECA), para obtener los índices de calidad del agua (ICA) (ANA, 2018), para ello, se recurre a ecuaciones matemáticas, que califican el cuerpo de agua y proporciona un número único que expresa la calidad del agua (Yogendra & Puttaiah, 2008), permitiéndose la evaluación de la calidad del recurso hídrico con mayor facilidad en diferentes lugares, en vez de comparar valores numéricos de varios parámetros (Nayak et al., 2020) de una muestra de agua, cuyos valores permitirá conocer información relevante para favorecer la gestión medioambiental eficiente a nivel local, regional y nacional.

El enfoque de la lógica difusa tiene ventajas inherentes de "flexibilidad" y capacidad para abordar la "vaguedad" y la "incertidumbre" de manera más eficaz. (Nayak et al., 2020), proporcionando condiciones para el razonamiento, la inferencia, el control y la toma de decisiones en casos de incertidumbre que permite abordar problemas en el mundo real (Zadeh, 1978; Sarkheil, Rahbari y Azimi, 2021), a través de la inclusión de un término lingüístico de fácil comprensión para la población, por su capacidad para reflejar los pensamientos humanos y la experiencia en los ICAs, que procesa información no lineal, incierta, ambigua y subjetiva (McKone y Deshpande, 2005; Oladipo, Akinwumiju, Aboyeji y Adelodun, 2021) cuyo éxito se basa en la posibilidad que tiene de resolver problemas complejos, difícil de solucionar utilizando métodos tradicionales (Martínez & Andrade, 2016), y simula el patrón de razonamiento humano en el diseño del ICA (Oladipo et al., 2021).

Este artículo se basa en los resultados de la tesis doctoral: Evaluación de la calidad de agua superficial de la Cuenca del río Huaura, distrito de Huaura, con un sistema de inferencia difuso, basado en agentes contaminantes, cuyo objetivo del estudio es evaluar la calidad del agua superficial de la Cuenca del Río Huaura con un sistema de inferencia difuso tomando como referencia los estándares

de calidad ambiental relacionados al agua (ECAs-Agua) y el uso al que está destinado el agua del Río Huaura, en el Distrito de Huaura.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para cumplir con el objetivo de la investigación se procedió a construir un FIS, que permita determinar la calidad del agua, a partir de la observación de los hechos y la generalización de reglas de inferencia, tal que se busca emular el comportamiento de lo observado, en cuatro pasos: (1) Definir los conjuntos borrosos y función de pertenencia; (2) operaciones de conjuntos borrosos; (3) lógica difusa; y (4) reglas de inferencia (Uddin et al., 2021). Se analizaron los Informes Técnicos de Monitoreo de la Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Río Huaura (2019-2021), de dos puntos de monitoreo: Punto 25 RHuau2: Río Huaura, aguas debajo de la Bocatoma CD Quipico (571 msnm) y el Punto 26 RHuau3: Río Huaura, aguas abajo del puente de Huaura (54 msnm). Los parámetros se eligieron según la categorización de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), quien establece que el uso del agua del Río Huaura, está clasificado en la categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales (MINAM., 2017), se consideraron 12 parámetros, acorde a la metodología del ICARHS (ANA, 2020): Oxígeno disuelto (OD), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Coliformes termo tolerantes, Potencial de Hidrógeno (pH), Arsénico(As), Cadmio (Cd), Manganeso(Mn), Plomo (Pb), Aluminio (Al), Hierro (Fe) y Cobre (Cu).

El proceso se realizó en dos etapas, en la primera, se buscó conocer la concentración de contaminantes en el agua, mediante la presencia de parámetros que superen los valores establecidos en el ECA, se identificó el universo de discurso de cada parámetro. Se seleccionó la función de pertenencia triangular para la variable lingüística normal o aceptable, cuando el valor del ECA del parámetro seleccionado es único, y trapezoidal si el valor del ECA es un intervalo; y para las variables lingüísticas Muy baja, Baja, Alta y Muy alta, medidos de 0 (presencia nula de contaminantes), a 100 (concentración Muy alta), se caracteriza con funciones trapezoidales. Se recurre al operador máx que extrae el máximo grado de pertenencia de algún parámetro que exceda los valores del ECA. Se agruparon los parámetros en subsistemas, respetando las características e interacción en el agua, la correlación de los parámetros, siguiendo enfoques teóricos y estadísticos (Uddin et al., 2021), en estricto cumplimiento a lo reglamentado en los ECA y las normativas vigentes en el Perú (MINAM., 2017), con reglas de inferencia condicionales IF – THEN, tipo Mamdani, para cada subsistema.

En la segunda etapa, se evaluó la calidad del agua en función a la presencia de concentración de contaminantes, mediante reglas fuzzy; para valorar la calidad del agua, se recurre al operador min, es decir a menor grado de contaminación mejor calidad del agua, clasificándose en cinco rangos, que son niveles de sensibilidad que expresan y califican el estado de la calidad del agua, en: Excelente (Muy baja, Baja (min) o No registra contaminación); Bueno (Muy baja (máx), Baja, Normal o

Aceptable (min)); Regular (Baja (máx), Normal o Aceptable (min)), Alta). Malo (Normal o Aceptable (máx), Alta, Muy alta(min)) y Pésimo (Alta (máx) y Muy alta), siendo el universo de discurso de 0 a 100 (ANA, 2018, 2020). Se construyó la lógica del FIS mediante el App Fuzzy Logic Designer, y la interfaz del usuario con el App Designer, componentes del software Matlab R2022a.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el sustento teórico del FIS, en la etapa 1, se procedió a identificar la variable difusa:

$X$ : valores de los parámetros obtenidos del Monitoreo de agua;

$Y$ : concentración de contaminantes en el agua, generado por la presencia de la sustancia (agente  $k$ ), y la función de pertenencia

$$y_k = \mu_{A_k}(x_k)$$

Donde:

$x_k$  = valor máximo establecido en el ECAs para el parámetro  $k$

$A_k$  = conjunto difuso de algún parámetro  $k$ , como conjunto de entrada (Input)

$U_k$  = Universo de discurso del parámetro  $k$ ,  $U_k = [0, x_n]$ ;

Cuando el ECA, de algún parámetro  $k$ , tiene un solo valor, se construye una función de pertenencia triangular, para la variable lingüística: normal o aceptable, denotado por  $x_k \in U_k$ ; con  $\mu_{A_k}(x_k) = 1$ ;

Cuando el ECA, para algún parámetro  $k$ , tiene un intervalo, o más de un valor, se construye la función de pertenencia trapezoidal denotado por  $I_k = [0, x_n] \subset U_k$ ;  $\mu_{A_k}(I_k) = 1$

Se generó subsistemas que valúan parámetros con características o consecuencias similares en el agua ( $L$ ), de los  $n$  parámetros:  $A_s = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_L$ ;  $L < n$ ; con  $U_j$  = Universo de discurso de la proporción del contaminante que genera la presencia de los parámetros 1, ...,  $L$ , de cada subsistema  $j$ ;  $m$  = proporción aceptable;  $U_j = [0, 100]$ ;  $m \in U_j$ ;  $\mu_{B_j}(m) = 1$ , con el operador máx, se obtiene el valor de salida para las reglas de cada subsistema  $j$ .

En la etapa 2:

$Y$ : representa la proporción de la concentración de contaminantes en el agua (input), resultado de la etapa 1 de los subsistemas  $j$ .

$Z$  el índice de Calidad del agua, se define el conjunto difuso  $C$  (output) que representa la calidad del agua, afectado por el conjunto de parámetros que forman parte del subsistema  $j$ ; con el operador min.

Siendo  $U_j =$  Universo de discurso;  $U_j = [0,100]$ ; con  $a \in U_j$ ;  $\mu_{C_j}(a) = 1$ ;  $a =$  valor referencial donde la función de pertenencia de las variables lingüísticas es normal.

Se consideran funciones trapezoidales, para todas las variables lingüísticas: Excelente con un índice de 95-100; Bueno con 80-94; Regular con 65-79; Malo con 45-64; y Pésimo de 0-44 (ANA, 2020; Uddin et al., 2021).

A continuación se implementó el modelo matemático del FIS, a través del App Fuzzy Logic Designer, para los 12 parámetros seleccionados (ANA, 2018, 2020), además de dos sub índices: ICAMOF, índice de calidad de agua Fuzzy, basado en los parámetros relacionados con la Materia Orgánica; ICAFQF, índice de calidad agua Fuzzy físico químico y el ICARHF (Índice de Calidad de Agua del Rio Huaura Fuzzy).

Para el ICAMOF, se considera el subsistema1:OD con  $U_1 = [0,130]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 15$  mg  $L^{-1}$ , que indica la capacidad recuperadora del curso de agua, y su ausencia provoca la descomposición anaeróbica; DQO con  $U_2 = [0,250]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 40$  mg  $L^{-1}$ , mide la contaminación de aguas servidas y efluentes de aguas residuales domésticas e industrial de tipo orgánica; DBO con  $U_3 = [0,10]$  mg  $O_2 L^{-1}$  y  $ECA > 4$  ó  $> 5$ , mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos (bacterias) para oxidar, degradar o estabilizar la materia orgánica en condiciones aeróbicas. El subsistema2, con el parámetro Coliformes termotolerantes, como agente contaminante que resulta de la contaminación fecal por vertidos domésticos sin tratamiento y desechos de animales que se incorpora a los cuerpos receptores.

Para el ICAFQF, se considera el subsistema3, que contiene pH, con  $U_4 = [0,14]$  y  $ECA: 6.5 - 8.5$  ó  $6.4 - 8.4$ , que es la concentración de iones hidronio contenidos en una solución, si  $pH < 7$  (agua ácida) ocasiona corrosividad; agua neutra  $pH = 7$  (ideal) y agua alcalina  $pH > 7$ , sabor desagradable, y origina cambios en la fauna y la flora de los cuerpos de agua (Sierra Ramirez, 2011), fuentes de contaminación por iones de Mn con  $U_5 = [0,0.3]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 0.2$  mg  $L^{-1}$  y Fe con  $U_6 = [0,8]$  mg  $L^{-1}$ ,  $ECA = 5$  mg  $L^{-1}$ , se producen a partir de aguas residuales industriales (minería, plaguicidas, productos químicos orgánicos y otros) y la velocidad de reacción depende del pH.

En el subsistema4, se incluyeron As con  $U_7 = [0,0.30]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 0.1$  ó  $0.2$ ; Pb con  $U_8 = [0,0.1]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 0.05$  y Cd con  $U_9 = [0,0.1]$  mg  $L^{-1}$ ,  $ECA = 0.01$  ó  $0.05$ . El As, metal pesado, venenoso y muy tóxico; Pb es un elemento ampliamente distribuido en bajas concentraciones en rocas sedimentarias y es tóxico para los organismos acuáticos; Cd, metal tóxico para plantas y animales, los cuales son producto de actividades industriales (plantas concentradoras de minerales, avícolas y otras) e introducidos al ambiente a través de las aguas residuales y uso de fertilizantes.

En el subsistema5, se consideró el Al con  $U_{10} = [0,8]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 5$  mg  $L^{-1}$ , por ser de relevancia tóxica para las plantas (Pabón, Benítez, Sarria y Gallo, 2020) y Cu,  $U_{11} = [0,1]$  mg  $L^{-1}$  y  $ECA = 0.2$  ó  $0.05$ , ya que a niveles superiores, genera efectos tóxicos en el crecimiento de las plantas.

Las reglas de inferencia condicionales IF – THEN de tipo Mamdani, para cada subsistema, tiene la siguiente sintaxis:

**R<sub>1</sub>**: Si los valores de  $x_1$  (DBO) es baja y los valores de  $x_2$  (DQO), es baja y altos valores de  $x_3$  (OD), entonces la proporción de contaminantes en el agua del rio es bajo.

De manera similar se construyen las reglas de inferencia, para los 5 subsistemas considerados en esta investigación.

En relación al output del FIS, se construye 145 reglas de inferencia con el operador AND, de la forma:

**R<sub>1</sub>**: Si la proporción del contaminante  $y_1$  es muy baja y la proporción de  $y_2$  es muy baja, y la proporción de  $y_3$  es muy baja y la proporción de  $y_4$  es muy baja, proporción de  $y_5$  es muy baja entonces Índice de Calidad del agua es  $z_5$  (excelente).

Para validar el FIS, se recurrió a los valores obtenidos de los monitoreos (Tabla 1), de calidad de agua del rio Huaura de dos puntos de Monitoreo, según la normatividad vigente en el Perú, están a cargo de las Autoridades Locales del Agua (ALA -Huaura), estos puntos fueron seleccionados, porque se encuentran en la jurisdicción del distrito de Huaura, ámbito de estudio de la tesis, y a la vez cuentan con mayor cantidad de valores de parámetros seleccionados; ya que no siempre se puede tomar todas las muestras, debido a que está condicionado a la época de estiaje y avenida de acuerdo a las características de la Cuenca, como se puede observar en el rio Huaura, en el mes de octubre 2019, no se tomaron muestras de coliformes termotolerantes, porque el caudal del rio era muy bajo, y no cumplía con el protocolo de monitoreo de calidad de agua.

Tabla 1. Resultados de monitoreo de calidad de agua superficial del rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura:2019 – 2021

Fecha		Parámetros físico químico y biológico											
		DBO	DQO	OD	Coli	pH	Mn	Fe	Pb	As	Cd	Al	Cu
		mg O <sub>2</sub>	--mg L <sup>-1</sup> ---	ug L <sup>-1</sup>		-----mg L <sup>-1</sup> -----							
03 201 9	RHua u2	2	3	7.72	5400	6.85	0.21	5.74	0.000	0.008	0.000 1	4.62	0.01
	RHua u3	2	2	7.73	>40000	7.21	0.21	6.48	0	0.008	0.000 1	5.50	0.01
10 201 9	RHua u2	3	27	5.93	0*	7.85	0.06	0.47	0.002	0.005	0.000 1	0.30	0.02
	RHua u3	3	32	4.91	0*	7.07	0.05	0.14	0.000	0.004	0.000 1	0.07	0.00
06 202 0	RHua u2	2	16	7.32	4600	8.36	0.02	0.11	0.000	0.004	0.000 1	0.18	0.00
	RHua u3	9	42	8.39	>40000	7.76	0.02	0.19	0.002	0.003	0.000 1	0.12	0.00
11 202 0	RHua u2	3	2	7.64	490	8.31	0.02	0.35	0.001	0.004	0.000 1	0.29	0.00
	RHua u3	10	37	2.26	40000	7.62	0.03	0.20	0.004	0.003	0.000 1	0.15	0.00

05 202	RHua u2	2	16	7.68	33	8.49	0.03	0.27	0.001	0.004	0.000 1	0.19	0.00
1	RHua u3	5	16	8.36	2800	7.77	0.02	0.12	0.000	0.003	0.000 1	0.08	0.00

0\* no se realizaron muestreo para este parámetro

Los valores obtenidos de los monitoreos de calidad de agua, se ingresaron en la interfaz del FIS, que se implementó en el software Matlab, mediante reglas condicionales tipo Mamdani, y con método de defuzzificación el centroide, como centro de gravedad, con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales coincidiendo con Quiñones-Huatangari et al. (2020), mientras Nayak et al. (2020) considera que el método de defuzzificación de la bisectriz funciona mejor. En este estudio se obtuvieron los índices fuzzy: ICAMOF, ICAFQF e ICARHF, todos independientes en el cálculo, puesto que, no necesita de un registro histórico de datos, y son obtenidos a tiempo real, y ante la ausencia del valor de un parámetro en el monitoreo, la lógica del sistema asume que el parámetro se encuentra en el rango permisible, que puede verse como una ventaja, ya que no impide la obtención del índice, sin embargo podría influir en el resultado final.

Para efectos de validación del índice difuso, resultado del FIS, se compara con los valores obtenidos por el índice ICARHS (ANA, 2020) cuya metodología exige conocer los valores del total de parámetros a evaluar (F1-Alcance), cantidad de datos que no cumplen la normativa requiriéndose datos históricos, como mínimo información de 4 monitoreos (F2-Frecuencia), totalidad de excedentes que indica la desviación de los datos (resultados del monitoreo) respecto al estándar (F3-Amplitud), para obtener el Subíndice1 y Subíndice 2, siendo el ICARHS, el menor valor de ambos, es decir el índice depende de los valores de los subíndices y ante la ausencia de alguno de los valores se dificulta el cálculo del índice.

En ambas metodologías, se valúa en una escala de 00-100, estableciendo cinco rangos: 95-100 Excelente (E); 80-94 Bueno (B); 65-79 Regular (R); 45-64 Malo (M); 0-44, Pésimo (P) (Tabla 2)

Tabla 2. Valores del Índice ICARHS Vs ICARHF en CD Quipico y Puente de Huaura: 2019 – 2021.

Monitoreo de Calidad de Agua	ICARHS <sup>†</sup>			ICARHF <sup>‡</sup>				
	S1	S2	Decisión	ICAMOF	ICAFQF	Índice	Decisión	
<b>CD Quipico</b>	2019	42.66 (P)	74 (R)	Pésimo	32.74 (P)	81.25(B)	48.27	Pésimo
	2020	99.2 (E)	81 (R)	Regular	83.28 (B)	88.76(B)	83.65	Bueno
	2021	89.4 (B)	99(E)	Bueno	96.37(E)	88.76(B)	88.76	Excelente
<b>Puente Huaura</b>	2019	42.46 (P)	99 (E)	Pésimo	32.74 (P)	70.24(R)	42.45	Pésimo
	2020	42.44 (P)	99(E)	Pésimo	31.31 (P)	88.76(B)	46.23	Pésimo-Malo
	2021	42.68 (P)	99 (E)	Pésimo	32.74 (P)	88.33(B)	43.76	Pésimo

Pésimo (P); Malo(M); Regular (R); Bueno (B); Excelente (E); Subíndice1 (S1) Índice de Calidad de Agua - Materia Orgánica (ICARHS); Subíndice2 (S2): Índice de Calidad de Agua -Parámetros Físicos – Químicos:  $ICARHS = \min(S_1, S_2)$

$$\dagger CCMEWQI = 100 - \left( \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$$

‡ Sistema de Inferencia difuso (FIS), propuesto en esta investigación.

Para el cálculo del ICARHS del año 2019, se recurrió a información de monitoreos correspondiente a los años 2017 y 2018, ya que es necesario para esta metodología contar con la totalidad de valores de los parámetros a considerar para el cálculo del índice.

Según se observa en la Tabla 1 y Tabla 2, existe contaminación por presencia de materia orgánica en el agua del río Huaura, especialmente en aguas abajo del puente del río Huaura, ya que es una zona colindante con la capital del distrito, por lo que el ICAMOF en ambos puntos de monitoreo, es pésimo; y en relación a la presencia de los metales, no superan el ECA, lo que no influye considerablemente en la disminución de la calidad del agua superficial.

Al contrastar los resultados obtenidos por ambas metodologías, la diferencia sustancial es que el ICARHS, necesita información de las frecuencias (número de datos, que no cumplen los ECA, sobre la cantidad total de datos), mientras que el FIS, evalúa los resultados por cada monitoreo sin necesidad de conocer la frecuencia, se usa la información de todos los parámetros y presenta el resultado a tiempo real. Sin embargo, al no considerar como referencia datos históricos, podría dar información errónea, para tal caso, se recurre al análisis personalizado por cada parámetro, y ello permite conocer el porcentaje de afectación a la variación de un indicador, para identificar el grupo de sustancias que están afectando el ecosistema natural, postulándose como una herramienta computacional, que permite identificar puntos de muestreo, con poca información disponible, y dependiendo del uso, al que se quiera destinar el agua.

Ya que la lógica difusa permite evaluación de la información subjetiva, los resultados deben ser correlacionados para validar los resultados (Vergara & Gayoso, 2008), y para determinar si existe diferencia estadística en los resultados de ambas metodologías se obtiene el coeficiente de correlación de Pearson y con  $r=0.92$ , representa una correlación alta y positiva, por lo que se acepta que no existe diferencias significativas entre los resultados del índice ICARHS y el índice difuso ICARHF, concordando con lo obtenido por Oliveira et al. (2014), quienes encontraron correlación significativa de  $R^2 = 91\%$  entre los resultados del índice difuso (IQABF) y el IQAB, mientras que Quiñones-Huatangari et al. (2020) obtiene  $R^2 = 0.81$ , entre el índice difuso (DQWDI) y los valores del índice NSF WQI.

Por lo que el FIS, es una herramienta eficaz para abordar problemas de calidad de agua (Quiñones-Huatangari et al., 2020) ya que recopila conocimientos de expertos y gestiona incertidumbres mediante la introducción de un intervalo en lugar de un valor único (Oladipo et al., 2021), en los que generalmente se basan los estándares de calidad de agua, además que el FIS, realiza



la evaluación en tiempo real, sin necesidad de contar con una data, que debido al costo económico de los análisis de agua o a la complejidad geográfica de la zona, dificulte la obtención de la información que se requiera para evaluar la calidad del agua superficial.

#### **4 CONCLUSIONES**

Si es posible diseñar un sistema de inferencia difuso de calidad de agua superficial, basado en la información disponible de las entidades gubernamentales y no gubernamentales respecto al monitoreo de ciertos parámetros de interés de acuerdo al objetivo de la institución, basado en reglas de inferencia difuso, si... entonces..., por lo que es importante identificar el universo de discurso de cada parámetro a evaluar, basados en la normatividad vigente, la ubicación de la zona y la categorización del uso del agua del río, que se va a analizar, y la opinión de los expertos para formular adecuadamente las reglas de inferencia y simular su interacción, en base a los requerimientos del usuario, de manera amigable y sencilla en el manejo a tiempo real.

## REFERENCIAS

ANA. (2018). *Metodología para la determinación del índice de calidad de agua Ica-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales*. Perú Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12543/2440>

ANA. (2020). *Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS)*. Perú Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4479>

INEI. (2017). *Estadísticas Ambientales*. (INFORME TÉCNICO N° 12 - Diciembre 2017). Retrieved from <https://m.inei.gov.pe/biblioteca-virtual/boletines/estadisticas-ambientales/2017/1/#lista>

Koch, S., Bianchi, V., Grutka, S. A., Martins, C. T. A., de Almeida Alves, A. A., da Silva, J. A. G., da Rosa, J. A., & Alessi, O. (2023). Diagnosis of Water Quality in an Urban Wetland. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(2), e03225-e03225. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n2-022>

Martínez, R. N., & Andrade, S. H. H. (2016). Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas. *Elementos*, 6(6), 149-166. <https://doi.org/10.15765/e.v6i6.842>

Nayak, J. G., Patil, L., & Patki, V. K. (2020). Development of water quality index for Godavari River (India) based on fuzzy inference system. *Groundwater for sustainable development*, 10, 100350. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100350>

Oladipo, J. O., Akinwumiju, A. S., Aboyeji, O. S., & Adedun, A. A. (2021). Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: A case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria. *Environmental Challenges*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100038>

Oliveira, M. D. d., Rezende, O. L. T. d., Oliveira, S. M. A. C., & Libânio, M. (2014). Nova abordagem do índice de qualidade de água bruta utilizando a lógica fuzzy. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 19, 361-372. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000803>

Pabón, S., Benítez, R., Sarria, R., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18. <https://doi.org/10.31908/19098367.1734>

Quiñones-Huatangari, L., Ochoa, L., Milla-Pino, M., Bazán C, J., Gamarra T, O., & Rascón, J. (2020). Water quality index using fuzzy logic Utcubamba River, Peru. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(1), 6-18. <https://doaj.org/article/dadddef3eba4410db1e63a476d8cc8ef>

Sarkheil, H., Rahbari, S., & Azimi, Y. (2021). Fuzzy-Mamdani environmental quality assessment of gas refinery chemical wastewater in the Pars special economic and energy zone. *Environmental Challenges*, 3, 100065. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100065>

Sierra Ramirez, C. A. (2011). *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Ediciones de la U.

Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, 122, 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>



Vergara, G., & Gayoso, J. (2008). Una aplicación de métodos de conocimiento base y clasificación difusa para predecir calidad de agua en tres comunas del sur de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 29(2), 127-135. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000200005>

Yogendra, K., & Puttaiah, E. (2008). Determination of water quality index and suitability of an urban waterbody in Shimoga Town, Karnataka. *Proceedings of Taal2007: The 12th world lake conference*,

Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 1(1), 3-28. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)80004-9](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)80004-9)