

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
Programa de Doctorado en Matemática



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**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**

**Tesis para optar el grado académico de
Doctor en Matemática**

Autora:

Ma. Claros Guerrero, Edith Meryluz

Asesor:

Dr. Morales Marchena, Herón Juan
Código ORCID: 0000-0002-5394-0958
DNI. N° 32837715

Línea de Investigación
**Modelado matemático de fenómenos naturales,
sociales y de procesos industriales**

Nuevo Chimbote - PERÚ
2024



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CERTIFICACIÓN DE ASESORAMIENTO DE TESIS

Yo, **Dr. Morales Marchena, Herón Juan**, mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis titulada: **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** que tiene como autora a **Claros Guerrero, Edith Meryluz**, alumna del Doctorado en Matemática ha sido elaborado de acuerdo al Reglamento de Normas y Procedimientos para optar el Grado de Maestro y Doctor de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, noviembre del 2024

Dr. Morales Marchena, Herón Juan

ASESOR

DNI N° 32837715

Código ORCID: 0000-0002-5394-0958



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

Evaluación de la calidad de agua superficial de la cuenca del rio Huaura, distrito de Huaura con un sistema de inferencia difuso, basado en agentes contaminantes.

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN MATEMÁTICA

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

.....
Dr. Vera Obeso, Fidel Alejandro
PRESIDENTE
CODIGO ORCID 0000-0002-9125-0464
DNI N°32857547

.....
Dr. Moore Flores, Teodoro
SECRETARIO
CODIGO ORCID 0000-0002-1755-3459
DNI N°32763522

.....
Dr. Morales Marchena, Herón Juan
VOCAL
CODIGO ORCID 0000-0002-5394-0958
DNI N°32837715



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los veintiún días del mes de noviembre del año 2022, siendo las 11:30 horas, en el aula multimedia N° 01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 532-2022-EPG-UNS de fecha 29 de setiembre de 2022, conformado por los docentes: Dr. Fidel Alejandro Vera Obeso (Presidente), Dr. Teodoro Moore Flores (Secretario) y Dr. Herón Juan Morales Marchena (Vocal), con la finalidad de evaluar la tesis titulada: **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**; presentado por la tesista **Edith Meryluz Claros Guerrero**, egresada del programa de **Doctorado en Matemática**.

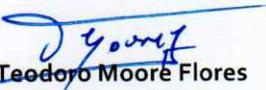
Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 607-2022-EPG-UNS de fecha 17 de noviembre de 2022.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como: APROBADO
asignándole la calificación de: DIEINUEVE

Siendo las 12:30 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.


Dr. Fidel Alejandro Vera Obeso
Presidente


Dr. Teodoro Moore Flores
Secretario


Dr. Herón Juan Morales Marchena
Vocal

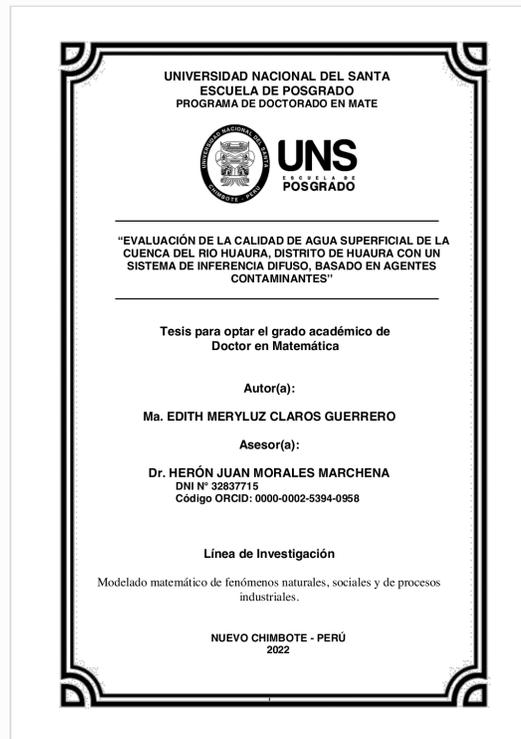


Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Heron Morales
Assignment title: Tesis actualizada
Submission title: Tesis actualizada
File name: Tesis_Doctoral_-_Claros_Guerrero_Edith_-_ACTUALIZADO_202...
File size: 2.79M
Page count: 121
Word count: 31,020
Character count: 158,155
Submission date: 19-Mar-2024 10:18PM (UTC-0500)
Submission ID: 2325414160



Tesis actualizada

ORIGINALITY REPORT

20%

SIMILARITY INDEX

21%

INTERNET SOURCES

9%

PUBLICATIONS

10%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	hdl.handle.net Internet Source	3%
2	bdigital.unal.edu.co Internet Source	1%
3	www.redalyc.org Internet Source	1%
4	repositorio.unfv.edu.pe Internet Source	1%
5	repositorio.unh.edu.pe Internet Source	1%
6	repositori.uji.es Internet Source	1%
7	cybertesis.uni.edu.pe Internet Source	1%
8	www.oefa.gob.pe Internet Source	1%
9	repositorio.udh.edu.pe Internet Source	<1%

Dedicatoria

A mis padres:

Antero Claros y Laura Guerrero
Pilares de mi vida, personas de honor,
ejemplo de constancia, de perseverancia
para lograr sus objetivos.

A mi hijo:

Daniel Enrique
Para que te sirva de ejemplo, que no es
tarde para conseguir lo que se desea, y se
consigue con trabajo, voluntad y
persistencia.

Agradecimiento

Un especial agradecimiento al asesor de la Tesis Dr. HERÓN JUAN MORALES MARCHENA, por la paciencia y predisposición en apoyarnos en las diferentes etapas del desarrollo de la Tesis.

A mis colegas y amigos de la UNJFSC, que me facilitaron información y sugerencias para la elaboración de esta investigación.

A los docentes del Doctorado en Matemática de la Universidad Nacional del Santa, quienes con su cátedra y recomendaciones nos ampliaron el panorama para realizar la investigación.

A la oficina de Administración Local del Agua (ALA – Huaura), por proporcionarme los Informes de Monitoreo de Aguas Superficiales del Río Huaura.

INDICE

=OKA) E'ASESORIA DE TESIS.....	ii
CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR	iii
ACTA DE SUSTENTACION	iv
RECIBO DIGITAL DEL TURNITIN	v
Dedicatoria.....	vi
Agradecimiento.....	vii
Lista de Tablas	x
Lista de Figuras.....	xi
Resumen	xii
ABSTRACT.....	xiii
Introducción	xiv
CAPITULO I	15
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	15
1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación	15
1.2. Antecedentes de la Investigación	17
1.3. Formulación del Problema de Investigación.....	25
1.4. Delimitación del estudio.....	25
1.5. Justificación e importancia de la investigación.....	26
1.6. Objetivos de la investigación	27
CAPÍTULO II	29
MARCO TEÓRICO.....	29
2.1. Fundamentos teóricos de la investigación	29
1) Lógica Difusa.....	29
2) Fuzzificación:	31
3) Defuzzificación	38
4) Sistema de Lógica difusa (FLS)	39
5) Calidad de Agua	44
6) Agentes Contaminantes	46
7) Índice de calidad de agua (ICA).....	50
2.2. Marco Conceptual	52
CAPÍTULO III	56
MARCO METODOLÓGICO.....	56
3.1. Hipótesis central de la investigación	56

3.2.	Variables e indicadores de la investigación	56
1)	Variables de la Investigación	56
2)	Definición operacional.....	57
3)	Indicadores	57
3.3.	Métodos de la investigación	58
3.4.	Diseño o esquema de la investigación	58
3.5.	Población y muestra	59
3.6.	Actividades del proceso investigativo.....	60
3.7.	Técnicas e instrumentos de la investigación.....	62
3.8.	Procedimiento para la recolección de datos.....	62
3.9.	Técnicas de procesamiento y análisis de los datos.	63
CAPÍTULO IV		64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		64
4.1	Resultados de la investigación.....	64
4.2	Discusión de la investigación	107
CAPÍTULO V		111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		111
1.1.	CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN	111
1.2.	RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		113
ANEXOS		116

Lista de Tablas

Tabla 1: Forma canónica de un sistema basado en reglas difusas.....	40
Tabla 2_ Parámetros de Calidad de Agua (ECA-Agua) en el Rio Huaura	51
<u>Tabla 3</u> Valoración del ICA-PE y actualización con ICARHS – Autoridad Nacional del Agua	52
Tabla 4_ Definición conceptual de las variables de Investigación	57
Tabla 5_ Definición operacional de las variables de Investigación	57
Tabla 6_ Agentes físicos químicos biológicos e inorgánicos	65
Tabla 7_ Variable: INPUT del Sistema de Inferencia difuso para agentes contaminantes	71
<u>Tabla 8</u> OUTPUT del Sistema de Concentración de Contaminantes e INPUT del Sistema de Calidad de Agua	73
Tabla 9_ OUTPUT del Sistema de Inferencia difuso CALIDAD	76
Tabla 10_ Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema químicos1	80
Tabla 11_ Resultados de la variable: CQUIMICO1	81
Tabla 12_ Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema químicos2	83
Tabla 13_ Resultados de la variable: CQUIMICO2	83
Tabla 14_ Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema Inorganico1	85
Tabla 15_ Resultados de la variable: concentraNI	86
Tabla 16_ Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema Inorganico2	87
Tabla 17_ Resultados de la variable: concentraMI	88
Tabla 18_ Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema coliformes	89
Tabla 19_ Resultados de la variable: coliformes	90
Tabla 20_ Universo de Discurso de los parámetros Químicos, inorgánicos y biológicos (Input) e Índice (Output) del Agua	92
Tabla 21_ Resultados del Sistema: CALIDAD	94
Tabla 22_ Resultados de Monitoreo de calidad de Agua Superficial del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 – 2021	101
Tabla 23_ Índice de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 -2021-ICARHS -ANA**	102
Tabla 24_ Índice de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 -2021- ICARHF	104
Tabla 25_ Resultados del ICARHS Vs ICARHF en CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 - 2021	105
<u>Tabla 26</u> Comparación entre ICARHS VS ICARHF	106
<u>ANEXO 3</u> Calidad de Agua y Concentración de contaminantes en la Cuenca del Rio Huaura – CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 – 2021- CALIDAD	120
ANEXO 4 Índice de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 -2021- ICARHF	121

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Funciones de pertenencia (Universo discreto y Universo continuo)</i>	31
Figura 2 <i>Esquema de investigación</i>	58
Figura 3 <i>Etapa 1- Construcción del Primer Sistema de Inferencia Difuso</i>	65
Figura 4 <i>Subsistemas de agentes contaminantes</i>	66
Figura 5 <i>Etapa 2- Construcción del Sistema de Inferencia Difuso final</i>	66
Figura 6 <i>Sistema de inferencia difuso: CALIDAD</i>	91
Figura 7 <i>Relación entre la proporción de contaminantes generados por los parámetros y el índice de calidad del agua.</i>	96
Figura 8 <i>Correlación entre los contaminantes generados por dos grupos de parámetros – índice de calidad del agua</i>	97
Figura 9 <i>Diseño de la Interfaz de usuario del Sistema Difuso: CALIDAD</i>	98
Figura 10 <i>Interfaz de usuario del Sistema de Inferencia Difuso: CALIDAD</i>	99
Figura 11 <i>Sección que relaciona la proporción de contaminantes del grupo químico2, con el índice de calidad del agua.</i>	100
Anexo 1 SUBSISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSO	117
<i>Anexo 2: Reglas inferencia y comportamiento de DBO, DQO y OD y la concentración de contaminantes (químicos1)</i>	118

Resumen

El índice de calidad del agua superficial, es acorde a la categorización y uso del río, en esta investigación se propone un sistema de inferencia difuso (CALIDAD), para la evaluación de la calidad del agua superficial del río Huaura (ICARHF), categoría 3: Uso de bebidas de animales y riego de vegetales, con reglas de inferencia difuso condicionales IF -THEN, tipo Mamdani. Se evaluó doce parámetros, agrupados en subíndices relacionado a la materia orgánica (ICAMOF): Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO), Demanda Química del Oxígeno (DQO), Oxígeno Disuelto y Coliformes termotolerantes, y para los parámetros Físico Químico y Metal (ICAFQF): pH, Arsénico, Aluminio, Manganeso, Hierro, Cadmio, Plomo y Cobre. Se comparó con el ICARHS, metodología propuesta por el ANA que compara dos Sub índices S1 y S2. En la evaluación se separa los parámetros en subsistemas acorde a su interacción en el agua o propiedades comunes, cada subsistema tiene como INPUT, Bajo, aceptable y alto, con funciones de pertenencia triangulares para Aceptable, donde $x_k \in U_k$ y $\mu_{A_k}(x_k) = 1$; $x_k = ECA$, para algún parámetro $k = 1, \dots, 12$ y funciones trapezoidales con límite máximo permisible intervalo ($I_k = [0, x_n] \subset U_k$) y $\mu_{A_k}(I_k) = 1$. Se obtiene el fuzzy CALIDAD, con OUTPUT, Pésimo, Malo, Regular, Bueno, Excelente. Se consideró datos de dos puntos de monitoreo. CD Quipico (Buena Calidad) y Puente Huaura (pésima calidad). Los resultados obtenidos por el sistema CALIDAD se correlaciona linealmente con 0.92, y con prueba t-student de dos colas, $p=0.6255 > 0.05$, estadísticamente no hay diferencia significativa entre los resultados del ICARHS y ICARHF, por lo que sistema de inferencia difuso CALIDAD permite identificar los parámetros contaminantes y simular la calidad del agua, en base a los requerimientos del usuario, de manera amigable y sencilla en el manejo.

Palabras claves. Sistema inferencia difuso, Índice, calidad de agua, Mamdani.

ABSTRACT

The surface water quality index is consistent with the categorization and use of the river; in this research a fuzzy inference system (CALIDAD) is proposed, for the evaluation of the surface water quality of the Huaura River (ICARHF), category 3 : Use of animal beverages and irrigation of vegetables, with IF -THEN conditional fuzzy inference rules, Mamdani type. Twelve parameters were evaluated, They were grouped into sub-indices related to organic matter (ICAMOF): Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Dissolved Oxygen and Thermotolerant Coliforms, and for the Physical Chemical and Metal parameters (ICAFQF): pH, Arsenic, Aluminum, Manganese, Iron, Cadmium, Lead and Copper. It was compared with the ICARHS, a methodology proposed by the ANA that compares two Sub-indices S1 and S2. In the evaluation, the parameters are separated into subsystems according to their interaction in the water or common properties, each subsystem has as INPUT, Low, acceptable and high, with triangular membership functions for Acceptable, where $x_k \in U_k$ y $\mu_{A_k}(x_k) = 1$; $x_k = ECA$, form some parameter $k = 1, \dots, 12$ and trapezoidal functions with maximum permissible interval limit ($I_k = [0, x_n] \subset U_k$) y $\mu_{A_k}(I_k) = 1$.

The CALIDAD fuzzy is obtained, with OUTPUT, Terrible, Bad, Regular, Good, Excellent. Data from two monitoring points were considered. CD Quipico (Good Quality) and Puente Huaura (terrible quality).

The results obtained by the QUALITY system correlate linearly with 0.92, and with the two-tailed t-student test, $p=0.6255 > 0.05$, there is no statistically significant difference between the results of the ICARHS and ICARHF, so that the fuzzy inference system CALIDAD allows identifying contaminating parameters and simulating water quality, based on user requirements, in a friendly and easy-to-use manner.

Keywords: Fuzzy inference system, Index, water quality, Mamdani.

Introducción

Los residuos orgánicos e inorgánicos que continuamente son vertidos en los cauces naturales ya sea de forma natural, o por las actividades del ser humano, genera afectación a la calidad del agua, daño causado en el ecosistema, que no se puede conocer en su real dimensión, y consecuentemente afectan la calidad de vida de los seres vivos dependientes del líquido elemento.

Esta incertidumbre continua, exige una gestión adecuada de los organismos competentes, que requiere de la recopilación de una gran cantidad de información referente a parámetros exigidos por la normatividad vigente, que son difíciles de evaluar, más aún, si nos referimos a fenómenos medio ambientales que son impredecibles, por lo que se hace necesaria contar con una herramienta comprensible y fácil de manipular, que permita valorar los resultados obtenidos de los monitoreos de calidad de agua, que están normados por ley, como protección del líquido vital, evaluando la presencia de agentes o parámetros contaminantes en el agua, y comparando con estándares de calidad aceptados internacionalmente (ECA-agua).

En esta investigación se propone un sistema de inferencia difuso, que hace uso de reglas de inferencia difusas, haciendo uso de expresiones condicionales, comparando resultados del Índice de Calidad del Agua del Rio Huaura, obtenidos con el ICARHS, metodología propuesta por la Autoridad Nacional del Agua, y el ICARHF (Índice de Calidad del Agua del Rio Huaura Fuzzy) propuesta en la tesis, la investigación está estructurada por:

Capítulo I: Problema de investigación, donde se plantea el problema, se presentan los antecedentes de la investigación, se delimita, justifica y se presenta los objetivos.

Capítulo II: Marco Teórico y conceptual

Capitulo III: Marco metodológico que explica el proceso a seguir en el diseño del sistema de inferencia difuso.

Capitulo IV: Resultados y Discusión, se describe el proceso y los resultados obtenidos en la investigación y el contraste con investigaciones similares.

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

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento y fundamentación del problema de investigación

El ser humano desde su nacimiento, observa, experimenta y trata de controlar lo que lo rodea para lograr satisfacer sus necesidades básicas de subsistencia como beber agua, alimentarse, vivienda y otros, aprovechando de los medios de su entorno. Esa búsqueda continua del bienestar, genera consecuencias muchas veces negativa en el medio ambiente, más aún, debido al crecimiento poblacional, que genera insuficiencia de bienes, alimentos y agua para satisfacer nuestras necesidades básicas de supervivencia, las que se vienen agotando, ya que ésta demanda es satisfecha por los ríos que proveen el agua para la vida humana y la agricultura (Gupta et al, 2017), sin embargo, la agricultura como otras actividades antropogénicas, recurre a sustancias externas que busca incrementar la productividad y esto perturba el equilibrio ecológico, a través de residuos líquidos y sólidos que son vertidos en los cauces naturales de los ríos, generando destrucción de los habitats y contaminando su cauce, la calidad de las aguas superficiales y subterráneas se ha ido deteriorando durante mucho tiempo debido tanto a las actividades naturales como a las humanas (Galal Uddin et al, 2021), por ende, si esto continua, no se puede hablar de desarrollo sostenible si no aprendemos a manejar los recursos de manera racional, que nos permita preservar el medio ambiente y la protección de la vida.

Toda esta coyuntura nos conlleva a la búsqueda de la solución de los problemas ambientales causados por las actividades económicas, y debido a la complejidad de la naturaleza, la literatura existente nos sugiere que se tiene que efectuar una gestión adecuada en las Instituciones gubernamentales, referentes al agua, para ello se requiere de la recopilación y el análisis de grandes conjuntos de datos de calidad del agua que pueden ser difíciles de evaluar y sintetizar (Galal Uddin et al, 2021), de tal manera que sea posible identificar las

características particulares que afecta el entorno, tal como lo menciona Tremante y Brea (2014), quien considera que:

Reconocer, fenómenos que se tenían por estáticos son en realidad dinámicos; tropezarse con factores impredecibles o caóticos, como el clima; descubrir que lo más concreto que se puede imaginar algo depende al mismo tiempo de la mente del observador; o en general, experimentar grandes dificultades para conciliar la teoría con la práctica; son cosas que tienden a pasar cuando se entra en detalles, sin demasiados prejuicios, en los más variados campos de la investigación científica. p.123.

En nuestro país, existen normativas, como por ejemplo la ley de recursos hídricos N°29338, que en su artículo 83° menciona que: “Está prohibido verter sustancias contaminantes y residuos de cualquier tipo en el agua y en los bienes asociados a ésta, que representan riesgos significativos según los criterios de toxicidad, persistencia o bioacumulación”. (Ley N° 29338, 2009), y mediante el Decreto Supremo N°004-2017-MINAM, se aprueba los estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA), que contiene los parámetros que son de obligatorio cumplimiento para la conservación de los cuerpos de agua, según las condiciones naturales, usos y vienen a ser referentes obligatorios en los trabajos de investigación, sobre los instrumentos de la gestión ambiental, así como en la ejecución de proyectos, programas de investigación, capacitación relacionada a la gestión de los recursos hídricos.

La preocupación de los entes gestores encargados de la conservación del líquido elemento, y de las entidades técnicas es cómo transferir los complicados datos de calidad del agua a información que sea comprensible y beneficiosa para los formuladores de políticas, así como para el público (Hussein Hassanin et al, 2018). Una alternativa de evaluación de la calidad de agua, es a través de las herramientas que nos provee la matemática, mediante la modelación y simulación de procesos, entre ellos tenemos el análisis y obtención de los índices de calidad de agua, que proporciona un número único que expresa la calidad general del agua en un lugar determinado, en función de varios parámetros de calidad del agua (Yogendra & Puttaiah, 2008).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA), ente rector del sistema Nacional de la Gestión de los Recursos Hídricos en el Perú, han elaborado una metodología que nos permitirá conocer como determinar el Índice de calidad de Agua denominado ICA- PE, que menciona:

En el Perú, la evaluación de la calidad del agua se realiza a través de la comparación de los resultados de un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos con los valores establecidos en el ECA - Agua según la categoría del cuerpo de agua superficial correspondiente; lo que determina su cumplimiento o incumplimiento, precisando únicamente los parámetros críticos y su correspondiente concentración. (Autoridad Nacional del Agua(ANA), 2018, p.21).

Sin embargo, la misma entidad considera que: “esta evaluación es ambigua a la hora de precisar o establecer el nivel de calidad de agua del recurso hídrico, es decir si esta tiene una calidad excelente, buena, regular, mala o pésima” (ANA, 2018, p.21)

En base a las recomendaciones del ANA y de los documentos de gestión, para ésta investigación se propuso elaborar un sistema de inferencia difuso para conocer el índice de calidad del agua superficial, haciendo uso de reglas de inferencia difusa, ya que con la lógica difusa, el analista puede usar un conjunto de expresiones condicionales cualitativas, aumentando así la conciencia inicial a través de procesos de inferencia o "aprendizaje" (Oladipo ét al, 2021), y se tuvo en cuenta los agentes naturales, o provocados por actividades antrópicas mediante la manipulación de sustancias químicas, físicas o biológicas, incorporando los diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos para la determinación de los índices de calidad del agua utilizando las diversas ecuaciones matemáticas, que califica el cuerpo de agua (Gupta ét al, 2017; Yogendra & Puttaiah, 2008), nos centramos en analizar los principales agentes contaminantes tomando como base de comparación, los resultados de los monitoreos de la calidad del agua superficial de la cuenca del Rio Huaura, realizados por la Autoridad Local del Agua (ALA – Huaura), en el tramo de la Cuenca del Rio Huaura, que abarca el ámbito del distrito de Huaura, localizada en la costa central del Perú, perteneciente al sistema hidrográfico de la vertiente del océano pacífico de la Cordillera de los Andes, y teniendo en cuenta la clasificación de los Cuerpos de Agua Continentales Superficiales según Resolución Jefatural N° 056-2018-ANA, el Rio Huaura está clasificado en la categoría 3, Aguas utilizadas para el riego de vegetales, y para bebida de animales.

1.2. Antecedentes de la Investigación

Dimas, L. (2011), en su tesis “*La contaminación de agua del Rio Huallaga – Tingo María*”, planteo como objetivo determinar los indicadores físicos, químicos y microbiológicos y la calidad del agua del Rio Huallaga de Tingo María, concluyendo que el impacto causado al rio Huallaga en Tingo María por la contaminación es preocupante, toda

vez que afecta tanto al ecosistema acuático, y el sector urbano de los alrededores en la salud y economía, en su investigación realizaron análisis microbiológicos y fisicoquímicos, tomando 27 muestras, tomadas en tres horarios diferentes, y obtuvieron los siguientes promedios: coliformes fecales 293.8 m.o./ml (mañana), 894.4 m.o./ml (medio día) y 345.0 m.o./ml (noche); de estafilococos patógenos 46.1 X 10³/ml (mañana), 63.2 x 10³/ml (medio día) y en la noche 44.2 x 10³/ml; salmonella, 70% (mañana), 90% (medio día) y 70 % (noche), y con porcentajes similares en Vibrio, y consideran que esos resultados obtenidos indican la peligrosidad del uso del agua en recreación y consumo humano, puesto que se encuentra fuera de los límites permisibles para uso recreacional según ley 28817 sobre los ECAs y límites permisibles.

A su vez, Aguirre *et al.* (2017), en su artículo: “*Aplicación de la lógica difusa para determinar la calidad de cuerpos de agua de la cuenca del río Rímac*”, explica que la finalidad de la investigación es determinar la calidad de cinco cuerpos de agua que forman parte de la Cuenca del Río Rímac que pertenece a la Categoría 1 A2: "Poblacional y Recreacional" Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. La metodología que usan en el trabajo es el Análisis de Grey Clustering y el Índice de la calidad de agua de Prati, que les permitieron realizar el análisis de forma objetiva, y les permitió establecer un criterio adecuado para la selección de los cuerpos de agua y los puntos de monitoreo representativos aquellos más próximos al Río Rímac (aguas abajo), y concluyen que los cinco cuerpos de agua en estudio, no se encontraban contaminados, según los requerimientos para pertenecer a la Categoría 1 A2, y no representan un riesgo para la salud de las personas, por lo que se puede potabilizar mediante un tratamiento convencional, además se muestra en los resultados que el método usado en la evaluación de la calidad de agua, presenta una respuesta que no es dicotómica (sí o no), sino categoriza según el grado de la contaminación, que puede ser (contaminado al 40%, al 60%, al 80%, etc.).

Vergara, G., & Gayoso, J. (2008), en su investigación: *Una aplicación de métodos de conocimiento base y clasificación difusa para predecir calidad de agua en tres comunas del sur de Chile*, los autores, buscan demostrar la aplicabilidad de una técnica de análisis espacial y modelación para apoyar la gestión del territorio, y resolver problemas de tipo ambiental, con variables de distinta naturaleza (continuas, discretas, ordinales, categóricas), que tenga la capacidad de simular con suficiente sensibilidad la probabilidad de provisión de agua de calidad discriminando entre áreas con diferente potencial, y utilizan la clasificación difusa

para generar índices sintéticos de la estimación de la probabilidad de conservar el agua libre de sedimentos en cauces en época de lluvias (turbidez del agua), e identifican diferentes funciones de pertenencia según los indicadores para el sistema de apoyo a la decisiones (Reynolds et al. 1996, Schmoldt y Rauscher 1996), con técnicas de análisis jerárquico (AHP) y clasificación difusa, además de la Combinación lineal ponderada (WLC), en base a la información evalúan los indicadores que le permite cumplir con la finalidad de la investigación, alguno de los cuales se detalla a continuación:

Indicador: Calidad ZMC – Cobertura vegetal, Función de pertenencia: Lineal Monotónica Creciente, cuya tendencia presenta Aumentos en el grado de cobertura del suelo alrededor de los cursos de agua reducen en forma significativa los posibles impactos de las actividades productivas (Gallo et al. 2005), y se categoriza en: Cobertura vegetal: sin cobertura permanente, muy abierta, abierta, semidensa y densa. 0-0,2; 0,2-0,4;0,4-0,6;0,6-0,8;0,8-1,0, si el indicador es Cruce de cauce, sugiere función de pertenencia Sigmoidal monotónica decreciente, cuya tendencia expresa valores de número de cruce de cauces por km² y están basados en los estudios realizados por Beaudry et al. (2003). Valores bajo 0,25 cruces/km² producen efectos marginales sobre la calidad del agua, y valores > 1,0 cruces/km² tendrán una fuerte influencia sobre la calidad del recurso; y los niveles y categorías se expresa como: 0-0,25; 0,25-0,6; 0,6-0,8; > 0,8 cruces/km²; además de otros indicadores como Distancia de caminos, tamaño de la propiedad, pendiente del terreno, drenaje del terreno y densidad de caminos, cada uno de ellos categorizado mediante una clasificación difusa.

Obtuvieron como resultado que, de las tres comunas: Corral (algunos puntos de turbidez), Lanco (altos niveles de turbidez), Pucón (niveles muy reducidos de turbidez). Según los investigadores la clasificación de las variables mediante técnicas difusas constituye una forma de aproximación para determinar la verdadera naturaleza de éstas y sus efectos sobre la producción de agua de calidad, validando los resultados a través de la evaluación de los niveles de turbidez en diferentes cursos de agua en las comunas de estudio, y resalta la ventaja de la metodología pues se puede integrar múltiples variables hidrológicas por la flexibilidad para desarrollar modelos ambientales, donde la información subjetiva debe ser correlacionada para validar los resultados.

Dutra de Oliveira, *et al* (2014), en su investigación: *Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy*, presenta un nuevo enfoque de desarrollo para IQA (Índice de calidad de Agua) propuesto por Souza y Libânio, utilizando Lógica

Difusa, se utilizó para conocer la variación de la calidad de agua, en base a nueve parámetros, asignándoles pesos respectivos: Oxígeno Disuelto (OD) (17%), coliformes termotolerantes (15%), pH(12%), demanda bioquímica del oxígeno (DBO) (10%), fósforo total (10%), nitrato (10%), temperatura (10%), turbidez (8%) y sólidos totales (8%). En esta investigación se consideran los datos operacionales de los periodos 2003-2011 de seis sistemas de abastecimiento de agua en los estados de Sao Paulo, Minas Gerais y Espírito Santo, utilizándose datos diarios extraídos de informes de control operativo. El autor considera que los valores censurados son frecuentes en el monitoreo en el área ambiental y ocurren cuando las concentraciones de la muestra están muy cerca de cero y pueden estar por debajo del límite de detección (LD) de métodos analíticos. Los datos son diferentes del resto y su ocurrencia puede indicar características reales de la población o errores de medición o grabación, que puede distorsionar gravemente los resultados de las pruebas estadísticas. En este artículo el parámetro pH, toma valores que se encuentran en el rango 5 a 9 descartando los valores fuera de ese rango, considera además que los datos ambientales presentan distribución no normal y asimetría positiva, siendo no recomendable los métodos paramétricos, para la elaboración del Índice de Qualidade da Água Bruta Fuzzy (IQABF), utilizaron los mismos parámetros definidos por la metodología DELPHI, como el índice de IQAB reemplazando el color verdadero por el color aparente. Divide los parámetros en dos grupos para la formulación del índice Biológico Fuzzy (IBF) y del índice Físico Químico Fuzzy (IFQF), en base a las siguientes etapas:

1. **Definición de las funciones de cada parámetro de entrada:** Utiliza funciones trapezoidales en las puntas y triangulares en los medios, los parámetros de entrada de la primera etapa del sistema lo particionan en tres subconjuntos Fuzzy: Bajo (B), Medio (M), Alto(A). La salida de la primera etapa tiene respuesta los índices IBF e IFQF divididos en cinco conjuntos Fuzzy: Pésimo (P) [$0 < IQABF \leq 19$], Malo [$19 < IQABF \leq 36$], Regular (RG) [$36 < IQABF \leq 51$], Bueno (B) [$51 < IQABF \leq 79$], y óptimo (OP) [$79 < IQABF \leq 100$]. Los rangos estipulados para cada función se definieron en función a los límites máximos y mínimos encontrados según la normatividad vigente de Brasil.

2. **Definición de las operaciones de la Lógica Fuzzy,** utiliza las operaciones de intersección, unión, complemento de dos conjuntos:

3. **Definición de las reglas de inferencia de Lógica Fuzzy:** Las reglas tienen la función de definir las relaciones entre los subconjuntos Fuzzy de entrada y salida. El estudio se desarrolló según el método de Mamdani con reglas del tipo “si – entonces” y el operador matemático Min – Max (Ross, 2010).

4. **Determinación del Índice de Qualidade da Água Bruta**, se basa en la formulación propuesta por Souza e Libânio (2009), representada por la ecuación:

$$IQAB = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Donde:

w_i : Peso atribuido a cada parámetro definido en la investigación de opinión.

q_i : Puntuación atribuida al parámetro observada en las curvas de calidad.

i : Cada parámetro incluido en el índice

n = número de parámetros.

A continuación, se hace uso de la prueba de hipótesis no paramétrica de Kruskal Wallis, prueba de comparaciones múltiples. Prueba U de Mann-Whitney para comparación entre periodos hidrológicos, con nivel de significancia de 5%. El Test de Wilcoxon para muestras pareadas, para identificar si existe diferencia significativa entre los dos índices, y concluyen con la correlación lineal entre los dos índices utilizando la correlación de Spearman para verificar si los indicadores presentan la misma tendencia de respuesta y obtuvieron como resultados de la misma: un sistema con 6561 reglas, para el cálculo del IQAB se realizó utilizando la propuesta de Souza e Libânio (2009), donde consideró para los parámetros que no tienen evidencia una puntuación de 100. Observaron que existía correlación significativa entre el color aparente y los registros de turbidez de agua cruda ($R^2=91\%$), se observa que el IQAB es mayor en periodos secos (donde la calidad de agua bruta presenta baja variabilidad, es decir mejor calidad), concluyen que al utilizar la lógica Fuzzy en un modelo de Mamdani y Larsen se obtiene valores de IQAF con mediana de 37 a 78. Comparando el IQABF para los seis manantiales se puede concluir que el manantial 4 posee agua de mejor calidad para fines de potabilización. La lógica Fuzzy se muestra más consistente para la cuantificación de cada uno de los ocho parámetros del índice IQAB, favoreciendo su aplicación como evaluación de calidad de las fuentes de agua por parte de los concesionarios de abastecimiento de agua.

Por su parte Sánchez Barboza (2015), en su investigación: *Control borroso para la valoración del impacto ambiental generado por contaminantes emergentes en aguas residuales hospitalarias*, el investigador busca determinar el impacto ambiental de los contaminantes derivados de compuestos farmacéuticos en los recursos hídricos de un centro de salud mediante un sistema de inferencia borrosa, y considera que la relación de

contaminantes llamados emergentes considera una amplia variedad de productos de uso diario con aplicaciones industriales y domésticas, entre ellos los cloroalcanos, pesticidas polares y compuestos, el investigador informa que ha trabajado con los datos base que provienen de los resultados de la investigación publicada por González y Rodríguez (2013), donde se reporta las concentraciones de los fármacos que se encuentran en las aguas residuales de un centro hospitalario (Hospital de Galdakao, España), la selección de los contaminantes analizados en base a la información proporcionada por EDAR (España), agruparon a los compuestos por familia de contaminantes según tipología y función y lo caracterizaron utilizando cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas. El método que se aplicó en esta investigación es clasificar las concentraciones de los fármacos en el agua residual del centro hospitalario mediante variables lingüísticas (pequeña, mediana, alta) para el conjunto borroso de entradas definidas, con funciones de pertenencia trapezoidales. Las variables lingüísticas (baja, considerable, elevada) se consideran como parte del conjunto borroso de salida, y define la variable magnitud del impacto ambiental mediante la función de pertenencia triangular.

Usaron el conectivo “O” en cada regla de inferencia, por ejemplo:

R1: “Si la concentración de x_1 es pequeña, o la concentración x_2 es pequeña, o la concentración x_3 es pequeña, o la concentración x_4 es pequeña, o la concentración x_5 es pequeña, entonces la magnitud del impacto es baja”

Menciona que aplica el sistema experto de Mamdani o Takagi- Sugeno, que utilizan en el FIS, a través de un sistema experto del método de implicación. En esta investigación realiza la agregación de salida, proceso mediante el cual se combinan las salidas de cada regla, y por cada variable de salida, que da como resultado la producción combinada de conjuntos difusos. Utiliza el método del centroide que consiste en calcular el promedio ponderado de la salida. Los resultados que obtienen en este trabajo de investigación es que la determinación del impacto ambiental lo realiza empleando las concentraciones máximas que indican el impacto en un instante de tiempo t , donde los fármacos alcanzan concentraciones promedio, y que en opinión del autor son más cercanas a la realidad. Y concluye que el impacto ambiental producido por fármacos en aguas residuales de hospitales, con un tratamiento borroso, resulta útil debido a la imprecisión y vaguedad que normalmente caracteriza los procesos para evaluación de impactos ambientales.

Nayak *et al.* (2020) en su investigación: *Development of water quality index for Godavari River (India) based on fuzzy inference system*, utiliza un modelo difuso para la predicción de

la calidad del agua de los ríos de la India, como parte del modelo para la defuzzificación, hace uso de funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales con centroide, con métodos de bisectriz y Mean of Maxima (MOM), compara el índice de calidad del agua con NSFQI (National Sanitation Foundation Water Quality Index) donde se considera cinco parámetros excluyendo los coliformes fecales, cambio de temperatura, fosfatos y nitratos) el VWQI (Vedprakash Water Quality Index), donde sólo se tiene en cuenta los más importantes OD, DBO y el pH. En esta investigación se considera cuatro pasos como proceso de su investigación i) elección de parámetros, ii) Determinación de los valores del subíndice iii) Determinación de las ponderaciones apropiadas y iv) Establecimiento del índice final después de combinar sub índices. Para el estudio consideran catorce estaciones de muestreos del río Godavari desde la presa de Gangapur hasta el pueblo de Dasak, periodo de una vez al mes durante 4 años (2013-2016) en un punto a 30 cm por debajo de la superficie del agua. Utiliza como regla difusa si-entonces, y utiliza los operadores para relacionar las variables de entrada y salida del sistema, como método de validación de modelo usa como criterio el error cuadrático medio (MSE) y el coeficiente de correlación. Considera cinco parámetros entre ellos OD, DBO, turbidez, sólidos totales y pH. Se usa el enfoque Mamdani, para desarrollo del sistema de inferencia difuso (FWQI), en el desarrollo de FWQI, se usan cinco parámetros de entrada, clasificado en cinco clases de calidad de agua Muy mala, Mala, Media, Buena y Excelente. Usa un total de 3125 reglas y considera que el método de defuzzificación de bisectriz funciona mejor. Y concluye que el enfoque de lógica difusa es igualmente sensible a todos los parámetros y a pequeños cambios que afectan la calidad del agua. Sin embargo, el rendimiento del modelo difuso cambia considerablemente al cambiar las funciones de pertenencia.

Quiñones-Huatari *et al* (2020) en su artículo: *Water quality index using fuzzy logic Utcubamba River, Perú*, tiene como objetivo proponer un Índice (DWQI) como una aplicación informática que permite el uso del razonamiento aproximado teniendo en cuenta información de campo, y considera los parámetros Oxígeno Disuelto (DO), Demanda Bioquímica del Oxígeno (BOD₅), nitratos(NO₃), pH, coliformes fecales (FC), turbidez (Tur). Cada entrada y variable de salida ha clasificado en: Muy pobre, Pobre, Medio, Alto y Muy Alto, hace uso de las funciones de pertenencia triangular y trapezoidal. Para efectos de simplificación agrupa las variables de entrada en cuatro grupos, Grupo 1, agrupa Oxígeno disuelto y BOD, porque son variables químicas, Grupo 2, Nitratos, proporciona información de los nutrientes en el agua, Grupo 3, formada por Coliformes fecales, parámetro

microbiológico que determina la calidad del agua. Y en el Grupo 4 considera el pH y la turbidez, por ser variables físico químicas y físicas respectivamente. Plantea 10 reglas de inferencia, con ayuda de los expertos, utiliza el algoritmo difuso tipo Mamdani, y lo implementa en Matlab 2017, con el simulador de lógica difusa, como método de defuzzificación el centroide, que representa el centro de gravedad. Evalúa 16 puntos de muestreos en el río Utcubamba y sus afluentes, tomados en octubre del 2014. Para la validación del DQWI, utiliza valores del índice NSF WQI y DWQI, obteniendo un valor de $R^2 = 0.81$, por lo que los índices deben mostrar valores muy similares, a su vez consideran los autores que DQWI, se puede utilizar como una herramienta integral para la evaluación de calidad del agua. En el análisis de la calidad de agua del Río Utcubamba, 8 de 16, son considerados como Bueno en el rango de 71 a 90, y en los puntos restantes se consideran de calidad Media, y concluye entre otros que los conceptos de lógica difusa son efectivos es una herramienta eficaz para abordar estos tipos de problemas.

Oladipo *et al* (2021), en su investigación: *Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: A case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria*, analiza las muestras para quince parámetros: oxígeno disuelto (OD, método de Winkler), sólidos disueltos totales (TDS, utilizando un medidor digital de TDS, Hanna Instruments modelo TDS-02/TDS-03), demanda bioquímica de oxígeno (DBO, valorimetría estándar). métodos), temperatura (termómetro de mercurio, modelo 275-k) y pH (medidor de pH, Hanna Instruments, Beijing, China). La espectrofotometría de absorción atómica (AAS, Buck Scientific VGP 210, EE. UU.) determinó las concentraciones de los iones metálicos (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+}), las concentraciones de Na^+ y K^+ , coliformes totales (TC) y coliformes fecales (FC). En esta investigación realiza la comparación del Surface water quality (SWQ) mediante el sistema WQI (ater quality index) y fuzzy logic inferencial (FLI), mediante análisis de sensibilidad (Crosstab) y Python. Se observa en los resultados que la presencia de coliformes fecales en el 100% de las entradas tuvo una influencia en los resultados de salida para FLI, lo que no ocurre con el WQI, citan a Icaga (2007), quien aduce que WQI puede un rango de calidad y reflejar las variaciones espaciales y temporales de las condiciones de calidad de agua, sin embargo, no refleja las contribuciones de los parámetros limitantes, o la proximidad de los valores de los parámetros a sus límites permisibles. Concluye que la FLI, que considera pH, temperatura, DBO, TDS, OD, concentraciones de metales y los coliformes totales, es más eficaz porque recopila

conocimientos de expertos y gestiona incertidumbres mediante la introducción de un intervalo en lugar de un valor único para los estándares de calidad de agua.

1.3. Formulación del Problema de Investigación

1) Problema general de investigación

En base a lo descrito, nos planteamos la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible evaluar la calidad del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura, distrito de Huaura con un sistema de inferencia difuso, basado en agentes contaminantes?

2) Problemas específicos de investigación

- 1 ¿Es posible evaluar los parámetros físicos químicos del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difuso?
- 2 ¿Es posible evaluar los parámetros inorgánicos del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difuso?
- 3 ¿Es posible evaluar los parámetros microbiológicos y parasitológicos que afecta la calidad de del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura mediante el diseño de reglas de inferencia difuso?

1.4. Delimitación del estudio

En esta investigación está en función a la información obtenida de la evaluación de los parámetros físico químico, inorgánicos y microbiológicos que afectan la calidad del agua superficial, los informes de monitoreo de la calidad del Agua, realizada por el ALA Huaura durante los años 2019-2020-2021; a la investigación documental, los Estándares oficiales de Calidad Ambiental relacionados al agua (ECAs-Agua), y a la normatividad vigente aprobada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), se delimita:

Espacial: Se centra en la evaluación de la calidad de Agua de la Cuenca del Rio Huaura, en el ámbito del distrito de Huaura, de dos puntos de monitoreo: CD Quipico y el Puente de Huaura considerando doce parámetros de calidad de agua, entre parámetros físico, químico y microbiológico que han ocasionado la disminución de la calidad del agua, tomando como

referencia los resultados emitidos en los informes técnicos de monitoreo de Calidad de Agua Superficial de la Cuenca del Rio Huaura, presentado por el ALA Huaura.

Temporal: La investigación considera los datos obtenidos en los informes técnicos desde el año 2019-2021, proporcionado por la entidad local responsable ALA – Huaura

Muestral: Se considera 12 parámetros, entre parámetros físico, químico y microbiológico, que forma parte de la metodología de obtención del índice de calidad del agua proporcionado por el ANA (ICARHS), de acuerdo a la categorización de la Cuenca del Rio Huaura, considerado en la Categoría 3: Aguas para el riego de vegetales y para bebida de animales, según la normativa vigente, y se toma los resultados obtenidos por los monitoreos de calidad de agua Superficial del Rio Huaura, proporcionados por el ALA-Huaura, para realizar ésta investigación.

Teórica: Para el diseño del sistema de inferencia difuso se ha considerado recurrir a la lógica difusa, a través del planteamiento de funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, tomando como base los estándares de calidad de agua (ECAs agua), a través de reglas fuzzy, cuantificadores y modificadores lingüísticos, nos permite conocer la proporción del contaminante en el agua, basados en la propuesta del ANA, organizando los parámetros según la interacción en el agua o propiedades comunes, se recurre al proceso de defuzzificación de centroide y sistema de inferencia tipo Mamdani.

1.5. Justificación e importancia de la investigación

• Justificación Práctica:

La investigación se justifica porque presenta una propuesta de un sistema de inferencia difuso (CALIDAD), que obtiene el Índice de Calidad del Agua Superficial, basado en la interacción de los diferentes agentes contaminantes del cauce del rio, tomando como referencia la propuesta metodológica del ANA, que plantea el ICARHS, que considera, que es necesario considerar los valores máximos permisibles de 12 parámetros o agentes contaminantes. En nuestro FIS, se consideró los 12 agentes contaminantes como variable de entrada, diseñándose el sistema en dos etapas, la primera obtiene la proporción de contaminantes en el agua generado por la presencia de parámetros agrupados según la interacción en el agua y sus propiedades comunes en subsistemas fuzzy, que ingresa en el

sistema fuzzy CALIDAD, para obtener el índice de calidad del agua del río Huaura fuzzy (ICARHF), mediante reglas difusas, con la participación de los expertos en la formulación de las reglas difusas, y validándose los resultados, haciendo uso de la información registrada de en los monitoreos de calidad de Agua Local, proporcionados por el ALA- Huaura, en un momento dado, tomando como referencia los estándares de calidad ambiental según la normatividad vigente (ECAs- Agua) y acorde a la categorización de la Cuenca del Río Huaura (Categoría 3).

- **Justificación teórica:**

El estudio de la calidad de agua, por si mismo, es muy complejo de abordar, porque implica conocer aspectos medioambientales, sociales y naturales que influyen en el ecosistema, sin dejar de lado el aspecto económico, por ende, no existe una formulación determinística a la que se pueda recurrir, sin llegar a cometer errores en la obtención de resultados, por el grado de imprecisión de la información disponible y el alto costo que implicaría obtener la información necesaria para conocer la calidad de agua de manera más precisa, por ese motivo recurrimos a los fundamentos de la lógica difusa, que nos permite establecer relaciones a través de la clasificación difusa valorando el grado de incertidumbre de la información, se proponer un Sistema de Inferencia Difuso, haciendo uso de las variables difusas y de una estructura de reglas compuestas, expresadas en representaciones lingüísticas y conectivos lingüísticos que generan reglas de inferencia relacionando conjuntos difusos (INPUT, OUTPUT), mediante funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales condicionados a la reglamentación vigente y a las características del compuesto o agente contaminante que se ve reflejado en el universo de discurso y en los límites máximos permisibles, proporcionado un marco matemático que nos ha permitido modelar la incertidumbre, y proponer el Sistema de Inferencia difuso CALIDAD, que permite calcular el ICARHF, a través del software MATLAB.

1.6. Objetivos de la investigación

1) Objetivo general

Evaluar la calidad de agua superficial de la Cuenca del Río Huaura, distrito de Huaura, con un sistema de inferencia difuso basado en agentes contaminantes.

2) *Objetivo específico*

- 1) Evaluar los parámetros físicos químicos del agua superficial de la Cuenca del Río Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difusa.
- 2) Evaluar los parámetros inorgánicos del agua superficial de la Cuenca del Río Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difusa.
- 3) Evaluar los parámetros microbiológicos y parasitológicos que afectan la calidad del agua superficial de la Cuenca del Río Huaura mediante el diseño de reglas de inferencia difusa.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos teóricos de la investigación

1) Lógica Difusa

“La lógica difusa fue concebida por primera vez a mediados de los años sesenta por Lofti Zadeh, ingeniero electricista iraní y profesor de la Universidad de California (Berkeley), quien en 1965 publica el primer artículo de lógica difusa llamado Fuzzy Sets, donde se dan a conocer por primera vez los conceptos de esta técnica”. (Sánchez, 2015, p.82)

La lógica difusa: “es una lógica multi-valuada y permite (por medio de conjuntos de pertenencia) una forma práctica de enfocar los problemas tal como se visualiza en el mundo real, contrario a la información binaria (si/no), la lógica difusa emula la habilidad de razonamiento y hace uso de datos aproximados para encontrar soluciones precisas”. (Acosta, 2006, p.13).

Carvajal (2013), sostiene que la lógica difusa es un sistema lógico de inteligencia artificial (IA) que usa variables cuyos valores son palabras en lugar de números (variables lingüísticas-lenguaje natural). Aunque las palabras son inherentemente menos precisas que los números, el uso de la lógica difusa está más cerca de la intuición y del razonamiento humano. (p. 59).

“La Lógica Difusa proporciona un mecanismo de inferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en el conocimiento” y además sostiene que: “La teoría de la lógica difusa proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que pueda ser tratable por un computador”. (González, sf,p.5).

Martínez y Andrade (2016) consideran que: “Los sistemas de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada definidas en términos difusos por medio de reglas que producen uno o varios valores de salida” (p. 152), un método de razonamiento aproximado no probabilista, que puede definirse como una extensión de la lógica multivaluada que facilita

enormemente el modelado de información cualitativa de forma aproximada. Su éxito se debe principalmente a la posibilidad de resolver problemas de una gran complejidad y poco definidos que, mediante métodos tradicionales, son difíciles de solucionar.

El nivel difuso de comprender y describir un sistema complejo se expresa en forma de un conjunto de restricciones donde la salida se basa en ciertas condiciones de la entrada. (Ross, 2010).

Conjuntos difusos y funciones de pertenencia

Conjunto clásico: “Un conjunto clásico es una colección de elementos”. (Zatarain, 2011)

Definición 1: Universo de discurso:

Se define U como el universo de discurso, compuesto por todos: “los posibles valores que puede tomar una determinada variable x .” (González, sf)

Por ejemplo, el Universo de discurso continuo son todos los números reales $U = R$.

Definición 2 (Conjunto CRISP o conjunto clásico):

(Acosta, 2006) “Conjuntos *crisp* A , en el universo de discurso U , al conjunto de valores permitidos que puede tomar una variable; y puede ser definido por la enumeración de todos sus miembros o identificando los elementos $x \in A$. Con $A = \{x / x, \text{cumpla una condición}\}$

Si se introduce una función característica (o de pertenencia) para A , denotada $\mu_A(x)$, tal que: $\{\mu_A(x) = 1, \text{ si } x \in A \quad \mu_A(x) = 0, \text{ si } x \notin A\}$ ”.(p. 16)

Definición 3 (Conjunto difuso o fuzzy set)

“Es un conjunto que puede contener elementos de forma parcial, es decir que la propiedad de que un elemento x pertenezca al conjunto A ($x \in A$), puede ser cierta con un grado parcial de verdad”. (Diciembre, 2017).

“Un conjunto difuso A se define como una función de pertenencia que enlaza o empareja los elementos de un dominio o Universo de discurso X con elementos del intervalo $[0,1]$: $A: X \rightarrow [0,1]$. Cuanto más cerca esté $A(x)$ del valor 1, mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto A .” (Galindo Gómez, sf)

Definición 4 (Conjuntos Difusos):

“Un conjunto difuso A definido sobre un universo de discurso U , es caracterizado por una función de pertenencia $\mu_A(x)$, que toma valores en el intervalo $[0,1]$. La función de pertenencia brinda una medición del grado de similitud de un elemento en U al subconjunto difuso, con un grado parcial de verdad”. (Acosta, 2006, p.17)

Observación:

“Los conjuntos difusos pueden ser caracterizados sólo por sus funciones de pertenencia, mientras que los conjuntos crisp pueden ser caracterizados por sus funciones de pertenencia, por la descripción de sus elementos, o por la lista de sus elementos” (Acosta, 2006, p.19)

2) Fuzzificación:

Es el proceso de hacer que una cantidad nítida sea borrosa. Hacemos esto simplemente reconociendo que muchas de las cantidades que consideramos nítidas y deterministas en realidad no son deterministas en absoluto, conllevan a una incertidumbre considerable. La forma que surge de la imprecisión, ambigüedad o vaguedad, entonces la variable probablemente sea borrosa y pueda representarse mediante una función de pertenencia

Definición 5 (Funciones de Pertenencia):

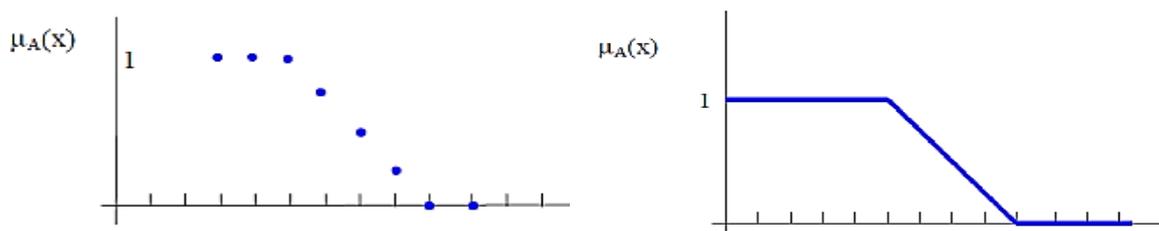
“Su definición exacta depende del concepto a definir, del contexto al que se refiere, de la aplicación” (Galindo Gómez, sf).

Zatarain (2011), considera que “las funciones de pertenencia son la forma de representar gráficamente un conjunto difuso sobre un universo”, generalmente para ello se eligen funciones sencillas.

$$A = \{x, \mu_A(x) / x \in U, \quad \mu_A(x): X \rightarrow [0,1]\}$$

Figura 1

Funciones de pertenencia (Universo discreto y Universo continuo)



Nota. Recuperado de “Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi – Sugeno-Kang (TSK)”, de Diciembre, S. 2017.p.28.

Definición 6 Características de las funciones de pertenencia:

Sea el conjunto difuso A, se cumple que:

1. El **núcleo** de una función de pertenencia de algún conjunto difuso A, se define como esa región del universo que se caracteriza por ser miembro total y completo del conjunto A, es decir:

$$\text{Núcleo}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\}$$

Un conjunto difuso se dice que es **normal** si su núcleo no *vacío*.

2. El **soporte** de una función de pertenencia de un conjunto difuso A se define como esa región del universo que se caracteriza por ser distinto de cero en el conjunto A.

$$S(A) = \{x \in U / \mu_A(x) > 0\}$$

Un conjunto difuso se dice que es “**singleton**” si su soporte es un único punto.

3. Los límites de una función de pertenencia para un conjunto difuso A, se define como esa región del Universo que contiene elementos que tiene una pertenencia distinta de cero pero completa, es decir

$$x \in U / 0 < \mu_A(x) < 1$$

Los elementos con algún grado de pertenencia, o pertenencia parcial.

4. Un conjunto fuzzy normal es aquel cuya función de pertenencia tiene al menos un elemento x en el universo cuyo valor de pertenencia es la unidad. En conjuntos borrosos, donde uno y solo un elemento tiene una pertenencia igual a uno, el elemento normalmente se conoce como el prototipo del conjunto, o el elemento prototípico.

$$x \in U / \mu_A(x) = 1$$

5. **Conjunto Normalizado**, convierte un conjunto difuso No normalizado en uno normalizado, dividiendo por su altura.

$$\mu_B(x) = \frac{\mu_A(x)}{h(A)}$$

6. Un **conjunto fuzzy convexo**, se describe mediante una función de pertenencia cuyos valores de pertenencia son estrictamente monótonas crecientes, o cuyos valores de membresía son estrictamente monótonas decrecientes.

Es decir, si para cualquier elemento x, y, z en un conjunto fuzzy A, la relación:

$x < y < z \rightarrow \mu_A(y) \geq [\mu_A(x), \mu_A(z)]$, entonces se dice que A es un conjunto difuso convexo.

7. Los puntos de cruce de una función de pertenencia se definen como los elementos del universo para el cual el conjunto difuso A tiene valores iguales a 0.5, es decir $\mu_A(x) = 0.5$.

8. La **Altura** del conjunto difuso A, es el máximo valor de la función de membresía:
 $h(A) = \{\mu_A(x)\}$

Si $h(A) < 1$, se dice que el conjunto difuso es subnormal.

La $h(A)$, puede verse como el grado de validez o credibilidad de la información expresada por A. (Klir y Yuan, 1995).

Si A es conjunto difuso normal convexo de un solo punto definido en la línea real entonces A es denominado número difuso.

Las funciones de pertenencia pueden ser:

Forma triangular:

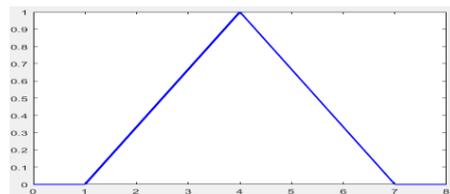
Cada función se describe por tres puntos: *izquierdo-abajo*, *medio-arriba* y *derecha-abajo*.

Los límites inferiores y superior son a y b , respectivamente, y el valor modal m :

con $a < m < b$

Es una función continua

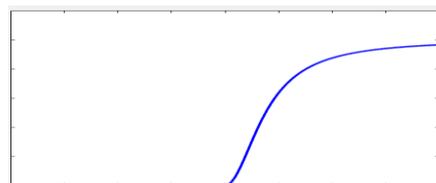
$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{si } m < x < b \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



Forma Gamma:

Definido por su límite inferior a y el valor $k > 0$.

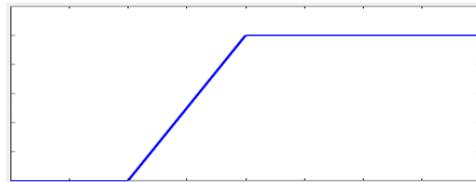
$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & \text{si } a < x \end{cases}$$



Características de la función:

- Rápido crecimiento a partir de a
- Cuanto mayor es el valor de k , el crecimiento es más rápido aún.
- Nunca se toma el valor 1, aunque tienen una asíntota horizontal en 1.
- Se aproxima linealmente por:

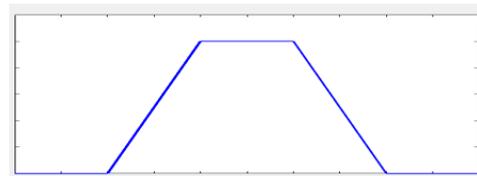
$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{si } a < x < m \\ 1 & \text{si } x \geq m \end{cases}$$



Forma trapezoidal:

Cada función se describe por cuatro puntos: *izquierdo-abajo*, *izquierda-arriba*, *derecha-arriba*, y *derecha-abajo*. Se define los límites inferior y superior: a y d , límites de soporte inferior y superior: b y c

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \text{ ó } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a < x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c \leq x < d \end{cases}$$



Se pueden realizar algunas operaciones:

Operaciones entre conjuntos:

Consideremos los subconjuntos fuzzy A y B en el conjunto universo U .

$$A = \{(x, \mu_A(x)), \mu_A(x) \in [0,1]\}$$

$$B = \{(x, \mu_B(x)), \mu_B(x) \in [0,1]\}$$

Se va definir operaciones entre los conjuntos A y B , mediante sus funciones de pertenencia: $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$.

- **Igualdad:**

Dos conjuntos difusos, definidos sobre un Universo (U), son iguales si tienen la misma función de pertenencia:

$$A = B \leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U$$

- **Inclusión:**

Un conjunto difuso está incluido en otro si su función de pertenencia toma valores más pequeños:

$$A \subseteq B \leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U$$

- **Inclusión difusa:**

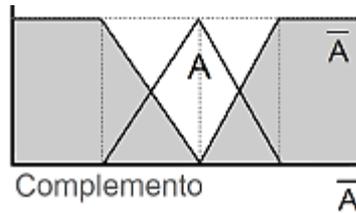
Si el Universo (U) es finito, podemos relajar la condición anterior para medir el grado en el que un conjunto difuso está incluido en otro. (Kosko, 1992) citado por Galindo(s.f)

$$S(A, B) = \frac{1}{\text{card}(A)} \left\{ \text{Card}(A) - \sum_{x \in X} \max\{0, A(x) - B(x)\} \right\}$$

- **Complemento:**

El conjunto difuso $\underline{A} = cA$ denota al complemento del conjunto difuso A y se define:

$$\mu_{\underline{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$



El complemento difuso de A , está definido por una función: $c: [0,1] \rightarrow [0,1]$

Que satisface los siguientes axiomas $\forall a, b [0,1]$

- Condiciones fronteras: $c(0) = 1$; $c(1) = 0$
- c es una función continua
- Monotonicidad: Si $a \leq b$ entonces $c(a) \geq c(b)$
- Involución: $c(c(a)) = a$

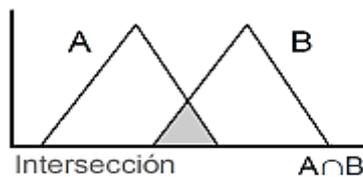
Se tiene una función conocida como el λ - complemento de Sugeno y que viene definido por la siguiente expresión:

$$\mu_{\underline{A}}^{\lambda}(x) = \frac{1 - \mu_A(x)}{1 + \lambda \mu_A(x)}, \text{ con } \lambda \in \langle -1, \infty \rangle$$

- **Intersección:** La operación intersección de A y B se define:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in U$$

Por ejemplo: Si $\alpha_1 < \alpha_2$ entonces $\{\alpha_1, \alpha_2\} = \alpha_1$



La forma generalizada de la intersección es una T-norma.

Se define:

$$\Delta: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = (\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Satisface los axiomas: $\forall a, b, c [0,1]$

- Elemento unidad: $(a, 1) = a$

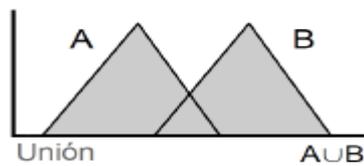
- Conmutatividad: $(a, b) = \Delta(b, a)$
- Monotonicidad: Si $a \leq c$ y $b \leq d$ entonces $(a, b) = \Delta(c, d)$
- Asociatividad: $\Delta((a, b), c) = \Delta(a, \Delta(b, c))$

Entre las T-normas más utilizadas son:

- Mínimo: $(a, b) = (a, b)$
- Producto: $(a, b) = ab$
- Diferencia limitada (o de Lukasiewick):
Si $a \leq c$ y $b \leq d$ entonces $(a, b) = \min(0, a + b - 1)$

- **Unión:** La operación unión de A y B se define:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in U$$



Por ejemplo: Si $\alpha_1 < \alpha_2$ entonces $\{\alpha_1, \alpha_2\} = \alpha_2$

La forma más generalizada de la unión es una T-conorma, se define como:

$$\nabla: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = (\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Una T-conorma satisface los axiomas: $\forall a, b, c \in [0,1]$

- Elemento neutro: $(a, 0) = a$
- Conmutatividad: $(a, b) = \nabla(b, a)$
- Monotonicidad: Si $a \leq c$ y $b \leq d$ entonces $(a, b) = \nabla(c, d)$
- Asociatividad: $\nabla((a, b), c) = \nabla(a, \nabla(b, c))$

Algunas T-conorma más utilizadas son:

- Máximo: $(a, b) = (a, b)$
- Producto: $(a, b) = (a + b) - (ab)$
- Diferencia limitada (o de Lukasiewick):
Si $a \leq c$ y $b \leq d$ entonces $(a, b) = \min(a + b, 1)$

Definición 7 (α – nivel)

Sea A un subconjunto fuzzy de U y $\alpha \in [0,1]$ o α – nivel de A , es el subconjunto clásico de U definido por:

$$[A]^\alpha = \{x \in U, \mu_A(x) \geq \alpha\} \text{ para } 0 < \alpha \leq 1$$

- El nivel cero de un subconjunto fuzzy A esta definido como el menor subconjunto cerrado de U que contiene el conjunto soporte de A ($\underline{\text{supp}} A$).
- Si $U = \{x \in U: \mu_A(x) \geq 0\}$, no es necesariamente igual a $[A]^0 = \underline{\text{supp}} A$

Teorema: Sean A y B subconjuntos fuzzy de U . Una condición necesaria y suficiente para que $A = B$ es que $[A]^\alpha = [B]^\alpha$, para todo $\alpha \in [0,1]$.

Corolario:

Una función de pertenencia μ_A de un conjunto fuzzy A puede ser expresado en términos de funciones de características de sus α – niveles, esto es:

$$\mu_A(x) = [\alpha, \chi_{[A]^\alpha}(x)]$$

Donde

$$\chi_{[A]^\alpha}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in [A]^\alpha \\ 0 & \text{si } x \notin [A]^\alpha \end{cases}$$

Teorema (Teorema de Representación de Negoita e Ralescu): Sean A_α , $\alpha \in [0,1]$, una familia de subconjuntos clásicos de U de modo que se verifica:

- $\cup A_\alpha \subset A_0$ con $\alpha \in [0,1]$
- $A_\alpha \subset A_\beta$ si $\beta \leq \alpha$
- $A_\alpha = \bigcap_{k \geq 0} A_{\alpha_k}$ si α_k converge para α con $\alpha_k \leq \alpha$

En estas condiciones existe un único subconjunto fuzzy A de U cuyos α – niveles son exactamente los subconjuntos clásicos A_α esto es $[A]^\alpha = A_\alpha$

Definición 8 (Número fuzzy)

Un subconjunto fuzzy A es llamado número fuzzy cuando el conjunto universo en el cual μ_A está definida, es el conjunto de los números reales R , y satisface las condiciones:

- Todos los α – niveles de A son no vacíos, con $\alpha \in [0,1]$

- (ii) Todos los α – *niveles* de A son intervalos cerrados de R
- (iii) $supp A = \{x \in R: \mu_A(x) > 0\}$ es limitado.

3) Defuzzificación

Es la conversión de una cantidad difusa a una cantidad precisa, al igual que la fuzzificación es la conversión de una cantidad precisa a una cantidad difusa. La salida de un proceso puede ser la lógica unión de dos o más funciones de pertenencia difusa definidas sobre el universo de discurso de la variable de salida. Un proceso general de salida difusa puede involucrar muchas partes de salida (más de dos) y la función de membresía representa cada parte de la salida y puede tomar formas distintas de triángulos trapecios, y las funciones de pertenencias no siempre son normales.

$$C_k = \bigcup_{i=1}^k C_i = C$$

Entre ellos pueden ser:

- **Principio de membresía máxima:**

Conocido como el método de altura, este esquema está limitado a las funciones de salida pico, se da mediante la expresión algebraica:

$$\mu_C(z^*) \geq \mu_C(z) \quad \forall z \in Z$$

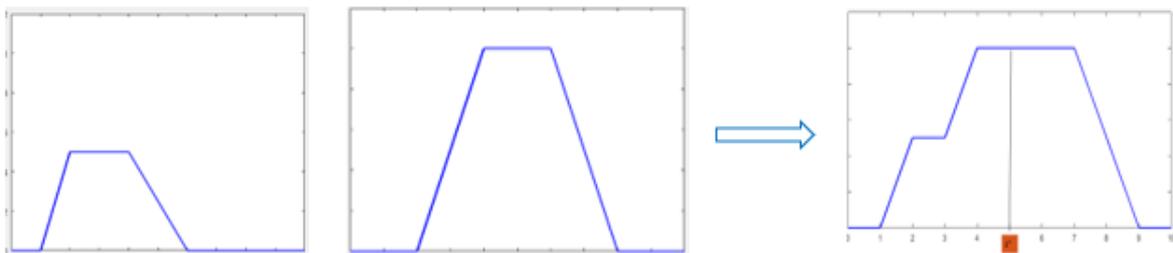
Donde z^* es el valor defuzzificado.

- **Método del Centroide:**

También llamado centro de área o centro de gravedad, da el promedio de las áreas de todas las figuras que representan los grados de pertenencias de un subconjunto fuzzy viene dada por la expresión algebraica:

$$z^* = \frac{\int \mu_C(z) z dz}{\int \mu_C(z) dz}$$

Donde z^* es el valor defuzzificado. Que se representa gráficamente como:



- **Método del promedio ponderado**

Está restringida a funciones de membresía simétrica, y es un método computacionalmente más eficiente, se forma ponderando cada función de pertenencia en la salida por su respectivo valor máximo de membresía. Este método suele aplicarse a funciones asimétricas y de varias salidas escalares.

$$z^* = \frac{\sum \mu_C(\underline{z}) \underline{z}}{\sum \mu_C(\underline{z})}$$

Donde \underline{z} es el centroide de cada función de membresía simétrica.

- **Método de Centro del área más grande:**

Si el conjunto borroso de salida tiene al menos dos subregiones convexas, entonces el centro de gravedad (es decir z^*) se calcula usando el método del centroide de la subregión difusa convexa con el área mas grande se utiliza para obtener el valor defuzzificado z^* , de la salida, se expresa mediante la siguiente expresión algebraica:

$$z^* = \frac{\int \mu_{C_m}(z) z dz}{\int \mu_{C_m}(z) dz}$$

Donde C_m es la subregión convexa que tiene el área más grande que compone C_k . Esta condición se aplica en el caso de que la salida total C_k no sea convexa. En el caso que C_k es convexo, z^* es la misma cantidad determinada por el método del centroide del área mas grande (porque solo hay una región convexa).

4) *Sistema de Lógica difusa (FLS)*

Zatarain (2011) considera que: “El punto de inicio para construir un sistema difuso es obtener una colección de reglas difusas basadas en el conocimiento humano (...)”

Sistemas difusos (basado en reglas)

Ross (2010), considera que, en el campo de la inteligencia artificial o inteligencia de máquinas, hay varias formas de representar el conocimiento, quizá la forma de representar el conocimiento humano es convertirlo en expresiones de lenguaje natural del tipo:

SI premisa (antecedente), ENTONCES conclusión (consecuente) (*)

(*), se conoce como la forma basada en reglas IF-THEN, forma deductiva.

Una inferencia normalmente se expresa de tal manera que, si conocemos un hecho se le denomina premisa, hipótesis, o antecedente, entonces se puede inferir, o derivar, otro hecho llamado conclusión o consecuente.

El sistema basado en reglas difusas es más útil para modelar algunos sistemas complejos que pueden ser observados por los humanos porque hacen uso de variables lingüísticas como sus antecedentes y consecuentes.

La estructura de reglas compuestas puede descomponerse y reducirse a una serie de reglas basadas en representaciones del lenguaje natural, que tiene restricciones en el conjunto de salida, y son asociados a conectivos lingüísticos como “y”, “o”, las restricciones se denotan como:

$$R_1, R_2, \dots R_r$$

Se aplican a las acciones de salida o consecuente de las reglas, como se muestra a continuación:

Tabla 1

Forma canónica de un sistema basado en reglas difusas

Regla 1:	<i>IF condición C^1, THEN restricción R^1</i>
Regla 2:	<i>IF condición C^2, THEN restricción R^2</i>
Regla r:	<i>IF condición C^r, THEN restricción R^r</i>

Nota:

Adaptado de Fuzzy Logic with Engineering Applications (Ross, 2010)

• **Múltiples Antecedentes conjuntivos:**

$$IF x es A^1 y A^2 \dots y A^l, THEN y es B^s$$

Asumiendo a nuevo subconjunto fuzzy, A^s como:

$$A^s = A^1 \cap A^2 \cap \dots \cap A^l$$

Expresado por medio de funciones de pertenencia:

$$\mu_{A^s}(x) = [\mu_{A^1}(x), \mu_{A^2}(x), \dots, \mu_{A^l}(x)]$$

Tomando como base la definición de la operación de intersección difusa estándar, se puede reescribir como:

$$IF A^s, THEN B^s$$

- **Múltiples Antecedentes disyuntivos:**

$$IF x \text{ es } A^1 \text{ o } A^2 \dots \text{ o } x \text{ es } A^l, THEN y \text{ es } B^s$$

Reescribiendo:

$$IF x \text{ es } A^s, THEN y \text{ es } B^s$$

Donde el conjunto fuzzy, A^s se define como:

$$A^s = A^1 \cup A^2 \cup \dots \cup A^l$$

$$\mu_{A^s}(x) = [\mu_{A^1}(x), \mu_{A^2}(x), \dots, \mu_{A^l}(x)]$$

Tomando como base la operación de unión difusa estándar, las entradas y salidas de un sistema (FLS), pueden ser cantidades vectoriales, consideramos:

$$n_{input} \text{ y } m_{output}$$

Sea X un producto cartesiano de n universos X_i para $i = 1, \dots, n$ talque

$$X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$$

Sea Y un producto cartesiano de m universos Y_j con $j = 1, 2, \dots, m$ talque

$$Y = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_m,$$

Donde los vectores:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n) \in R^n$$

y el vector

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \in R^m,$$

Los datos de entrada, reglas, y las acciones de salida o consecuente son conjuntos fuzzy, expresados mediante funciones de pertenencia definidas en un universo de discurso según el contexto de estudio.

El método de evaluación se conoce como razonamiento aproximado o razonamiento interpolativo y se representa por la composición de las relaciones difusas que se forman por las reglas:

$$IF A^s, THEN B^s$$

Técnicas graficas de inferencia

Se refiere a procedimientos que se pueden implementar en una computadora por la velocidad de procesamiento:

1) Sistemas difusos puros o de Mamdani

Mamdani and Assilian (1975), propone una relación fuzzy binaria M , entre x_1 y x_2 (antecedentes) y una simple salida y (consecuente) es descrita por una colección de reglas r lingüísticas IF – THEN,

$$IF x_1 \text{ es } A_1^k \text{ y } x_2 \text{ es } A_2^k, THEN y^k \text{ es } B^k, \text{ donde } k = 1, 2, \dots, r$$

Donde A_1^k y A_2^k , son los conjuntos fuzzy representando el k – ésimo par de antecedentes y B^k , es conjunto fuzzy que representa el k – ésimo consecuente

Si una regla tiene varios antecedentes se utiliza los operadores AND u OR, para la disyunción se emplea la T-conorma (máximo) y para la conjunción habitualmente se usa la T-norma estándar del mínimo, conforme al procedimiento:

- En cada regla R_j , de la base de reglas fuzzy, una condicional “si x es A_j entonces y es B_j ” es modelada por la aplicación \wedge (mínimo).
- Adopta a T-norma \wedge para el conectivo lógico “y”
- Para el conectivo lógico “o” se adopta la T-conorma \vee (máximo) que conecta las reglas fuzzy de las bases de reglas.

La relación fuzzy M es el subconjunto fuzzy de $X \times U$ cuya función de pertinencia es dada por:

$$\mu_{B^k}(y) = \left(\mu_{A_1^k}(\text{input } (i)); \mu_{A_2^k}(\text{input } (j)) \right), k = 1, 2, \dots, r$$

Aunque en la literatura, el método de Mamdani, también utiliza diferentes T_normas, para usar los conectivos de los antecedentes, diferentes operadores de agregación para las reglas y números métodos de defuzzificación

2) Sistemas difusos Takagi- Sugeno- Kang (TSK)

Con este método los autores plantean desarrollar un enfoque sistemático para generar reglas de un conjunto de datos de entrada- salida. Una regla típica, considera dos entradas x e y y salida z , tiene la forma:

$$IF x \text{ es } A \text{ and } y \text{ es } B, THEN z \text{ es } z = f(x, y)$$

Donde $z = f(x, y)$ es una función crisp en el consecuente, usualmente una función polinomial en función de los puntos de entrada x e y , pero puede ser cualquier función que

describa la salida del sistema dentro de la región difusa especificada en el antecedente de la regla al que se le aplica.

Si se tiene A_i y B_i , con $i = 1, 2, \dots, n$, conjuntos difusos. Las reglas difusas se definen como:

$$R_1: x \in A_1 \wedge B_1 \rightarrow z = f_1(x, y)$$

⋮

$$R_n: x \in A_n \wedge B_n \rightarrow z = f_n(x, y)$$

Donde el valor de salida del sistema: $Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$

Donde el valor w_i se obtiene calculando el mínimo de los valores de entrada de cada R_i

3) Sistema de inferencia Tsukamoto

En este método difuso el consecuente de cada regla difusa está representado por un conjunto fuzzy, con una función de pertenencia monótona, es decir la salida inferida de cada regla se define como un valor nítido inducido por la condición del antecedente de la regla, la salida total se calcula por el promedio ponderado de cada regla.

4) Sistemas difusos con fuzzyficador y defuzzyficador

El difusor o fuzzyficador tiene como valores de entrada, los valores concretos de las variables de entrada y como salida grados de pertenencia de los conjuntos difusos, en un intervalo de 0 y 1.

El defuzzificador es el conjunto difuso de salida, resultado del bloque de inferencia y la salida es un valor concreto de la variable de salida, siendo más utilizado el método del centroide, que utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida:

$$y = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy}$$

Acosta (2006), sostiene que: los cuatro elementos que permiten escribir una fórmula matemática que relaciona la salida de un sistema de lógica difusa, con sus respectivas entradas son los siguientes:

- Las reglas definen el comportamiento del controlador

- El fusificador es el módulo responsable de la traducción de los valores de las variables de entrada a valores difuso
- El motor de inferencia se encarga de la interrelación de las reglas de inferencia difusa, acorde al tema de estudio.
- El defusificador se encarga de la traducción del valor difuso de salida, que se genera en el motor de inferencia, a su valor crisp de salida. (p.20)

5) *Calidad de Agua*

La calidad del agua, tiene diferentes definiciones como la que nos expresa Mendoza (1976) citado por (Meza, 2016, p.14), quien considera que:

La calidad del agua se define como el conjunto de características del agua que pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico, la relación entre esta calidad del agua y las necesidades del usuario (...) se puede definir por sus contenidos de sólidos y gases, ya sea que estén presentes en suspensión o en solución (Meza, 2016, p.14).

Muchos autores expresan su opinión al respecto de la definición de calidad de agua, que se debe considerar en relación con el uso y la actividad a la que está destinada y en base al cumplimiento de ciertas características de carácter obligatorio, como la composición natural del agua, parámetros o indicadores de calidad, estándares o límites establecidos, tal como lo menciona:

La calidad de un ambiente acuático se puede definir como i) una lista de concentraciones, especificaciones y aspectos físicos de sustancias orgánicas e inorgánicas y ii) la composición y el estado de la biota acuática presente en el cuerpo de agua. La calidad presenta variaciones espaciales y temporales debido a factores externos e internos al cuerpo de agua (...) la descripción de la calidad del agua puede realizarse básicamente de dos formas: i) midiendo las variables físicas (turbiedad, sólidos totales, etc.) químicas (PH, acidez, etc.) o biológicas (bioensayos) ii) utilizando un índice de calidad del agua. (Sierra Perez , 2011, p. 44)

Por su parte Terrado et al. (2010), considera que la calidad del agua es un atributo multiparamétrico, su evaluación depende principalmente de la información sobre las variables de calidad del agua en diferentes tiempos y lugares, esta información es procesada y culmina en una escala de puntuación que podría ser representado por un índice.

Ahora si consideramos la definición que nos proporciona la entidad nacional como es la Autoridad Nacional del Agua (ANA), quien mediante documentos, normativas y directivas establece que:

La Calidad de agua se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares de calidad ambiental (ECAs), para determinar los índices de calidad del Agua (ICAs) y se clasifica dependiendo del uso para el cual va ser empleada (recreativo, doméstico, agrícola y ganadero, otros). Siendo los **ICAs:** Instrumento fundamental que permiten: “transmitir información de manera sencilla sobre la calidad del recurso hídrico a las autoridades competentes y al público en general; identifica y compara las condiciones de calidad del agua y sus posibles tendencias en el espacio y el tiempo” (ANA, 2018).

Si nos referimos a los estándares de calidad de agua, (Sierra Perez , 2011) considera que “se definen como la aplicación con efectos legales, de un criterio de calidad del agua para limitar determinada descarga o efluente (...), cuando un estándar o norma se establece sobre un cuerpo de agua y haciendo referencia a un objetivo de calidad”

En base a lo descrito, es necesario aclarar que también esta normativa depende del uso al que está destinado el agua, y la zona de impacto, así como las características del cuerpo de agua, tal como lo aclara el autor, quien considera que, “las aguas superficiales deben estar libres de sustancias atribuibles a vertimientos, materiales flotantes como basuras, espumas entre otras, y sustancias que afecten la biota”. (Sierra Perez , 2011):

En el Perú los estándares de calidad de agua (ECA- agua) se aprobó con D.S. N° 004-2017-MINAM, cuya normatividad presenta los nuevos niveles de calidad, que evalúa considerando la categoría a la que pertenece el río, esta investigación se centra en el Río Huaura, que, según la categorización realizada por el ANA, el agua del Río Huaura está destinada para el riego de Vegetales y bebida de animales representados en la categoría 3.

La problemática que involucra las actividades económicas y sociales y los efectos que estas actividades generan en el medio ambiente, obliga a conocer la calidad del recurso hídrico de nuestra zona, y ello, nos conlleva a analizar la responsabilidad que tenemos como sociedad en la preservación de nuestros recursos, y siendo necesario una interacción multidisciplinaria, que pueda plantear alternativas de solución y mitigación si así lo requiera, tal como nos menciona Aguilar (2010):

La sociedad debe percibir el problema con respecto a la calidad del agua, para llevar a cabo acciones de remediación; pero conforme aumenta la preocupación social por la calidad ambiental, se evidencia más la falta de evaluaciones respecto de los beneficios económicos, sociales y

ecológicos del mejoramiento y preservación de los recursos hídricos y acuáticos. Estos aspectos se deben complementar a fin de enriquecer la toma de decisiones. En efecto, un gran número de especialistas coincide en que la integración multidisciplinaria facilita la comprensión y solución de los problemas de la vida real. (Aguilar, 2010, p. 17)

6) Agentes Contaminantes

Existen diversos factores que afectan la calidad del agua de un sistema hídrico, y en muchas ocasiones depende de la zona de estudio, el uso que se hace del territorio como las actividades antrópicas que se desarrollan generan condiciones fluctuantes, por eso los investigadores consideran que es importante conocer periódicamente las mediciones realizadas para evaluar las tendencias de calidad del agua.

Otros indicadores son evidentes cuando la contaminación de las aguas es de origen orgánico, cuando existe mucho material orgánico presente en los arroyos, los microorganismos crean una demanda de oxígeno bioquímico, lo cual permite solamente la sobrevivencia de organismos tolerantes a bajas condiciones de oxígeno. (Mitchell et al. 1991), citado por (Ayala, 2017,p.9-10).

Los agentes contaminantes son los elementos, sustancias o circunstancias que contribuye a disminuir la calidad del agua, que pueden ser físicas, químicas, biológicas, orgánicas o inorgánicas, es decir sustancias también pueden encontrarse en el medio natural, y provocan efectos perjudiciales al medio ambiente y salud de los seres vivos que lo habitan.

Los diversos contaminantes se pueden agrupar en: Sustancias orgánicas biodegradables, compuesto por los organismos en descomposición, así como las heces de los humanos y animales; sustancias orgánicas tóxicas, producidos por el hombre: hidrocarburos, anilinas, etc.; sólidos en suspensión, conformado por los sedimentos que llegan por las escorrentías provenientes por las actividades económicas del ser humano; los metales, pesticidas, herbicidas, detergentes, aceites son productos químicos que se pueden acumular en el agua.

Según (INEI, 2018), la calidad del agua se ve afectado por la contaminación de los ríos causada principalmente por el vertimiento de relaves mineros (parte alta y media de la cuenca), aguas servidas urbanas y desagües industriales a lo largo de todo su cauce (generalmente en la parte media y baja de la cuenca), y que tiene efectos dañinos para la salud y el ecosistema; así como también se ve afectada por el uso de plaguicidas y pesticidas en la actividad agrícola.

Esta contaminación del agua, se evalúa en función a las mediciones de ciertas sustancias que se encuentran en el recurso hídrico conocidos como parámetros, y entre ellos tenemos: “Los parámetros de calidad del agua están clasificados en físicos químicos y microbiológicos” además el autor menciona que en relación a los parámetros químicos se pueden dividir en dos clases: Indicadores (parámetros cuyas concentraciones en el agua se deben a la presencia e interacción de varias sustancias) y sustancias químicas (Sierra Pérez, 2011, p. 55 y 59).

(a) Oxígeno disuelto (OD)

Este parámetro está a la identificación de la contaminación orgánica.

Su concentración aumenta al disminuir la temperatura y la salinidad y posee una relación directa con la pendiente y la aireación del cauce. Cuando existen condiciones aeróbicas se produce una mineralización que consume oxígeno y produce gas carbónico, nitratos y fosfatos. Una vez que se consume todo el oxígeno comienza la descomposición anaeróbica que produce metano, amonio, sulfuro de hidrógeno y mercaptanos. (Mitchell et al.1991) citado por (Ayala, 2017, p.21).

(b) Coliformes termotolerantes

La presencia de este agente contaminante es resultado de la contaminación fecal cuyo origen puede ser los vertidos domésticos sin tratamiento a los cuerpos receptores (ríos, quebradas) y también se puede incrementar por desechos de animales.

(c) Demanda Química del Oxígeno (DQO)

La DQO, es un parámetro químico, se usa como una medida del oxígeno equivalente a contenido de materia orgánica. Se puede medir para determinar la contaminación de cuerpos naturales de agua superficiales por aguas servidas, desechos industriales de tipo orgánico, efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industrial con alto grado de materia orgánica.

(d) Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO)

Es un parámetro, que es considerado un indicador bioquímico relacionado como aporte de la materia orgánica, mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos (bacterias) para oxidar, degradar o estabilizar la materia orgánica en condiciones aeróbicas.

Conocidos la relación entre DQO y DBO se puede conocer la cantidad de materia orgánica biológicamente degradable.

(e) Potencial de Hidrógeno (pH)

Sierra Pérez (2011), considera que el pH es un indicador químico, que puede variar de 0 a 14, relacionado con la concentración de ion hidrógeno (un ácido fuerte) en el agua. El agua se considera ácida ($\text{pH} < 7,0$); neutral si $\text{pH} = 7$ o alcalina cuando el $\text{pH} > 7$. El pH mide el grado de acidez o de alcalinidad, pero no determina el valor de la acidez o alcalinidad. La acidez contenida en el agua es corrosiva, por lo que aguas ácidas deben ser tratadas, por otro lado, la alcalinidad en altas concentraciones genera un sabor desagradable en el agua, y que además en presencia de Ca o Mg, evalúa la dureza, que es una forma de precipitados que ocasiona problemas de taponamiento y obstaculiza el flujo en las tuberías, por lo otro lado origina cambios en la fauna y la flora de los cuerpos de agua, ejerce influencia sobre la toxicidad de ciertos compuestos, como el amoniaco, metales pesados, hidrogeno sulfurado, etc. (pp.62 y 82).

(f) Metales

Entre las sustancias químicas que genera contaminación en el agua tenemos los metales, conocidos como metales pesados, que muchas veces, forman parte de las características particulares de la zona de estudio, y en otras ocasiones generadas por la intervención de la actividad antrópica:

Los metales pesados son de vital importancia para el desarrollo de animales y plantas, sin embargo, cuando se presentan en grandes concentraciones son tóxicos. Una de las características más peligrosas de los metales pesados es que, aunque sus concentraciones en el ambiente son comparativamente bajas, a través de un largo periodo de exposición de organismos vivientes a estos elementos, estas pueden alcanzar niveles peligrosos (Chira & Vargas, 2010, p.93)

Según considera el ANA, como parte de la evaluación para la determinación de la calidad del agua superficial: Arsénico, Cadmio, Manganeso, Plomo, Aluminio, Hierro, Cobre, Aluminio.

El arsénico, es venenoso y muy tóxico, y en aguas naturales se presenta como arseniato y arsénico, y la Organización Mundial de la Salud lo considera como “una de las 10 sustancias químicas más preocupantes para la salud pública” (Organización Mundial de la Salud, 2018) y en cuanto al plomo, producto de la actividades industriales es un elemento relativamente de menor importancia en la corteza terrestre, pero está ampliamente distribuida en bajas concentraciones en rocas sedimentarias y suelos no contaminado y es toxico para los

organismos acuáticos, por su parte el Cadmio, es un metal severamente tóxico pero no es letal, y es introducido al ambiente a través de aguas residuales y uso de fertilizante.

En relación al Manganeso “su evaluación es de gran importancia para controlar las concentraciones de diversos metales trazas existentes en los cuerpos de agua natural. Su elección de este parámetro es para comprobar que su presencia es netamente natural.” (ANA, 2018, p. 28).

Según las características de la zona de estudio, la Cuenca del Rio de Huaura, según el informe de (Peña *et al.*, 2019), la presencia de Manganeso (Mn) en la categoría 3, bebida de animales y riego de vegetales, específicamente en las inmediaciones de la Cuenca media y alta, en algunas muestras superan los límites permisibles, posiblemente se deba a la presencia o contacto con rocas volcánicas y sedimentarias.

El pH de las soluciones en contacto con los minerales es de vital importancia para identificar las características contaminantes, debido a las reacciones que podría generarse por procesos naturales debido al drenaje ácido que se produce en las actividades mineras, o por las acumulaciones de desmonte propias de la actividad en mención, entre los metales pesados para evaluar la calidad del agua superficial, se tiene; Arsénico, Aluminio, Plomo y los metales de transición considerados son Manganeso, Hierro, Cobre y Cadmio.

La remoción del Manganeso y el hierro que tienen características similares y que bajo experiencias narradas por (Burbano & Sánchez, L. D., 2007), que realizó un seguimiento al pH, debido a que la eficiencia de remoción depende de este parámetro. Petrushevki (2003), y que se puede alterar con la dosificación de cloro (pH óptimo de 7), los autores, haciendo una comparación con el agua de los pozos citando a Avendaño (2002) mencionan que contienen mayores concentraciones de hierro y manganeso que las aguas superficiales, debido al bajo pH, a la concentración de CO₂ y al escaso contenido de oxígeno disuelto.

Además (Swistock, 2021) expresa que: niveles de hierro muy elevados, superiores a 5,0 mg/L, pueden causar manchas graves y toxicidad en las plantas de especies sensibles. Los problemas de toxicidad por hierro son más probables cuando el medio de cultivo es ácido (por debajo de pH 6,0). La deficiencia de hierro inducida también puede ocurrir en especies sensibles si el pH es superior a 7,0 a 7. En base a lo expresado existe una relación entre la

concentración de los metales de Manganeseo y de hierro tiene relación a los valores de pH en el agua.

Los metales pesados, presentes en el agua y considerados como referente para evaluar la calidad del agua, debido a su alta densidad y toxicidad significativa:

El exceso de metales como Aluminio, Mercurio, Plomo, entre otros resulta de especial relevancia toxica para las plantas, en especial en suelos ácidos donde la fitotoxicidad por metales tóxicos se manifiesta particularmente tanto en el crecimiento como en la formación de raíces laterales y secundarias (...) el mayor aporte a la contaminación de las aguas por metales pesados es debido a las descargas de aguas residuales producto de diversas actividades antropogénicas (Pabón et al, 2020, p. 10)

Otro de los metales pesados: el cobre, que en bajas concentraciones no son perjudiciales, sin embargo, según lo menciona Flores (2018): (...) a concentraciones ligeramente superiores a las requeridas por las plantas (30 mg·kg⁻¹ de tejido en peso seco), produce efectos tóxicos tales como la inhibición del crecimiento en raíces y brotes (Lequeux et al., 2010; Zhao et al., 2010) p. 121.

7) *Índice de calidad de agua (ICA)*

Según la Autoridad Nacional del Agua, organismo autorizado, considera que el índice de calidad del agua es un instrumento fundamental que permiten: “transmitir información de manera sencilla sobre la calidad del recurso hídrico a las autoridades competentes y al público en general; identifica y compara las condiciones de calidad del agua y sus posibles tendencias en el espacio y el tiempo” (ANA, 2018).

Existen diversos investigadores que proponen los Índices de calidad del Agua (ICAs), que han considerado en base a las características y las normatividades de cada zona de estudio, pero basándose en las normas internacionales de calidad de agua, en nuestro país la Autoridad Nacional del Agua, en el año 2018, aprobó la metodología que nos sirve de guía para encontrar el índice de calidad de agua ICA- PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales, que luego fue modificada en el año 2020, aprobándose el ICARHS, en el cual consideran que es necesario conocer los valores máximos permisibles de 12 parámetros, los cuales se han considerado en ésta investigación (Ver Tabla 2).

En nuestro país, la evaluación de la calidad del agua se realiza mediante la comparación de los resultados de un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua, con los valores establecidos en el ECA – Agua, según la categoría del cuerpo de agua superficial. Los valores del ECA- Agua para la categoría 3: Riego de Vegetables, Bebida de animales, entre otros:

Tabla 2
Parámetros de Calidad de Agua (ECA-Agua) en el Rio Huaura

Factores	Componentes (Parámetros)	ECA – Agua	
		Unidad	Estándar: D1// D2
Físico – Químico	Oxígeno Disuelto	$\frac{mg}{L}$	>4 / >5
	PH	Unidad	6.5 -8.5 / 6.5 – 8.4
	Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO)	$\frac{mg}{L}$	15
	Demanda Química del Oxígeno (DQO)	$\frac{mg}{L}$	40
Inorgánico-Metales	Cobre	$\frac{mg}{L}$	0.2 // 0.05
	Manganeso	$\frac{mg}{L}$	0.2
	Cadmio	$\frac{mg}{L}$	0.01 // 0.05
	Hierro	$\frac{mg}{L}$	5
	Plomo	$mg L$	0.05
	Aluminio	$\frac{mg}{L}$	5
	Arsénico	$\frac{mg}{L}$	0.1 // 0.2
Microbiológicos	Coliformes Termotolerantes (44,5 °C)	$\frac{ug}{L}$	1000

Nota:

Estándar de Calidad Ambiental - Agua

D1: Agua para riego

D2: Bebida de animales

Según la Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales aprobado mediante Resolución Jefatural N°068-2018-ANA, donde se establece que el valor del índice se presenta como un número adimensional comprendido entre un rango, y permite establecer escalas en cinco rangos, que son niveles de sensibilidad que expresan y califican el estado de la calidad del agua, como Pésimo, Malo, Regular, Bueno y Excelente, y que mediante Resolución Jefatural N°084-2020-ANA, establece mejoras en el ICA-PE, “para evidenciar la afectación real al

cuerpo de agua por punto de muestreo” (ANA,2020b), aprueba el Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS), y en base a estos documentos se realiza una comparación de ambos rangos, siendo más estricto en la versión de ICARHS, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Valoración del ICA-PE y actualización con ICARHS – Autoridad Nacional del Agua

ICA – PE*	ICARHS **	Calificación	Interpretación
90 - 100	95 -100	Excelente	La calidad del agua está protegida, ausencia de amenaza o daño, su condición está muy cercana a los niveles naturales o deseables
75 - 89	80-94	Bueno	La calidad del agua se aleja un poco de la calidad natural agua. Sin embargo, las condiciones deseables pueden estar con algunas amenazas o daños de poca magnitud
45 -74	65-79	Regular	La calidad de agua natural ocasionalmente es amenazada o dañada. La calidad del agua a menudo se aleja de los valores deseables. Muchos de los usos necesitan tratamiento
30-44	45-64	Malo	La calidad de agua no cumple con los objetivos de calidad, frecuentemente las condiciones deseables están amenazadas o dañadas. Muchos de los usos necesitan tratamiento
0-29	0-44	Pésimo	La calidad del agua no cumple con los objetivos de calidad, casi siempre está amenazada o dañada. Todos los usos necesitan tratamiento

Nota: Adaptado de:

* Metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA-PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales. ANA (2018)

** Actualización del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS) (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2020c)

Según la actualización del ICA- PE, por el ANA (2020c), evalúa el índice de calidad con dos subíndices, agrupados según la naturaleza de los parámetros, que denomina S1: Materia orgánica, y S2: Físico-químico Metal

2.2. Marco Conceptual

1. Sistema

Es una colección de elementos estructurales y no estructurales interconectados y organizados para conseguir el objetivo, controlando los recursos, energía e información disponible.

2. Variable de entrada

Variable que está generada por el ambiente que influencia el comportamiento del sistema

3. Variable de salida

Variable que está generada por el sistema que influencia el comportamiento del ambiente.

4. Variables lingüísticas

Es una colección de atributos que puede adquirir las variables (entrada – salida), donde cada atributo se representa con un conjunto difuso.

5. Conjunto difuso

Es el conjunto donde un elemento puede pertenecer parcialmente ese conjunto y simultáneamente pertenecer parcialmente al complemento de ese conjunto.

6. Sistema de inferencia difuso (fis)

El sistema recibe varias entradas numéricas y entrega varias salidas numéricas, contiene un bloque difusor (fuzzificador) que convierte las entradas en conjuntos difusos, que al ser evaluados mediante reglas de inferencia de la forma IF – THEN produce conjuntos difusos que el bloque concreor (defuzzificador) los convierte en salidas concretas.

7. Fuzzificación

Es un procedimiento matemático que convierte un elemento del universo de discurso en números difusos.

8. Defuzzificación

Es un procedimiento matemático en el que se convierte elementos de un conjunto difuso en valores concretos o crisp

9. Índice de Calidad de Agua

Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito.

10. Agente contaminante

Sustancias que se encuentran en el medio natural y provoca efectos perjudiciales en el mismo medio ambiente y en la salud de los seres vivos que lo habitan.

11. pH

El pH, indica la acidez del agua. Se considera normal en el rango 6.5 - 7.5 (ECAs-Agua), el pH bajo (< 5,0) puede dar lugar a altos niveles tóxicos de metales como el hierro y el manganeso (Swistock, 2021).

12. Oxígeno disuelto

Según el ANA (2018), “es un parámetro ambiental vital, cuya evaluación permite informar y/o reflejar la capacidad recuperadora de un curso de agua y la subsistencia de la vida acuática”.

13. Manganeseo

Su presencia en el agua puede causar sabor, manchas y los problemas de acumulación y su evaluación es de gran importancia para controlar las concentraciones de diversos metales trazas existentes. ANA (2018)

14. Demanda química del oxígeno (DQO)

La DQO, es un parámetro químico, que determina la cantidad del oxígeno equivalente a contenido de materia orgánica.

15. Demanda bioquímica del oxígeno (DBO)

Determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y muestra la capacidad de autodepuración del cauce del río.

16. Coliformes termotolerantes

Mide la contaminación fecal en el agua que podría ser generado por los vertidos domésticos sin tratamiento a los ríos.

17. Metales pesados

Son elementos químicos con alta densidad y presentan toxicidad para los seres humanos y medio ambiente.

18. Arsénico

“Metal pesado venenoso y muy toxico, puede generarse por descargas industriales o uso de insecticidas” (Organización Mundial de la Salud, 2018)

19. Plomo

Metal pesado tóxico para los organismos acuáticos, y está presente en bajas concentraciones en rocas sedimentarias.

20. Hierro

El hierro es un metal de transición que puede darle al agua sabor, olor y color desagradable.

21. Cobre

“Son esenciales para el desarrollo normal de las plantas son componentes naturales y/o catalíticos de proteínas y enzimas” (Flores, 2018).

22. Cadmio

Metal severamente tóxico, pero no letal, y es introducido al ambiente a través de aguas residuales y uso de fertilizante.

23. Índice de calidad de agua (ICA)

Constituyen herramientas matemáticas que integran información de varios parámetros, permitiendo transformar grandes cantidades de datos en una escala única de medición de calidad del agua

24. Sub índice de calidad

Se clasifica según la naturaleza de los parámetros y que guardan relación entre si (ANA, 2020a).

S1: Materia Orgánica

S2: Físico-químico Metal

25. Clasificación del Índice de Calidad de Agua (ICARHS)

Medida que brinda información sobre la calidad del recurso hídrico, correlacionando la proporción de sustancias físicos, químicos, inorgánicos y biológico presentes en el agua y sus posibles tendencias en el espacio y el tiempo.

En esta investigación se clasifica según lo establecido en la valoración del ICARHS (aprobado con Resolución Jefatural N°084-2020-ANA)

- Excelente Calidad: 95 – 100 de ponderación - Ausencia de amenazas o daños
- Buena Calidad: ponderación de 80-94 - Condiciones que pueden alterar, aunque en poca magnitud.
- Regular Calidad- Ponderación: 65 a 79 – Agua amenazada o dañada, con usos que necesitan tratamiento. .
- Mala Calidad, Ponderación: 45-64 – No cumple los estándares- muchos usos que necesitan tratamiento.
- Pésima Calidad, ponderación de 0-44, No cumple los estándares - Todos los usos necesitan tratamiento previo para el consumo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Hipótesis central de la investigación

1. Hipótesis General

Es posible evaluar la calidad del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura, Distrito de Huaura, con un sistema de inferencia difuso basado en agentes contaminantes.

2. Hipótesis Específicas

- Las reglas de inferencia difuso permiten evaluar los parámetros físicos químicos que afectan la calidad del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura, distrito de Huaura.
- Las reglas de inferencia difuso permiten evaluar los parámetros inorgánicos que afectan la calidad del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura, distrito de Huaura.
- Las reglas de inferencia difuso permiten conocer los parámetros microbiológicos que afectan la calidad del agua superficial de la Cuenca del Río Huaura, distrito de Huaura.

3.2. Variables e indicadores de la investigación

Según nuestra propuesta de investigación, se enmarca en una investigación explicativa, en la que la variable 1, influye en la variable 2, sin embargo, no se utilizará la terminología de variable dependiente e independiente, ya que acorde a las características de nuestro sistema, la variable: agente contaminante, determina la proporción de contaminantes y eso determinará la calidad del agua.

1) Variables de la Investigación

Variable 1: Calidad de Agua

Variable 2: agentes contaminantes

2) Definición operacional

Tabla 4

Definición conceptual de las variables de Investigación

Variables	Definición conceptual	Dimensiones
Calidad de agua	“Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito”. INEI (2018)	<ul style="list-style-type: none"> ● Índices de Calidad del Agua (ICAs)
Agentes contaminantes	“Aquellas sustancias que se encuentran en el medio natural y que provocan efectos perjudiciales en el medio ambiente y en la salud de los seres vivos que lo habitan” (Roperio Portillo, 2020).	<ul style="list-style-type: none"> ● Físicos químicos ● Metales ● Microbiológicos

3) Indicadores

Para efectos de la investigación se están considerando los parámetros físicos químicos orgánicos e inorgánicos y biológicos, según la prevalencia de las sustancias y valores relativamente altos o que han sobrepasado los Estándares de Calidad establecidos por las instituciones pertinentes para garantizar la calidad de agua del río y las recomendaciones del ANA, para el cálculo de Índice de Calidad de Agua.

Tabla 5

Definición operacional de las variables de Investigación

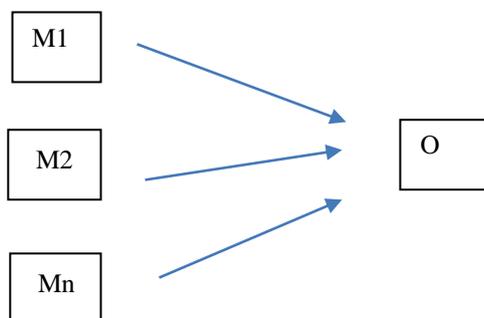
Variable	Dimensiones	Indicadores
Calidad de agua	<ul style="list-style-type: none"> ● Índices de Calidad del Agua (ICARHF) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Excelente ● Buena ● Regular ● Mala ● Pésima ● Oxígeno Disuelto ● PH ● DBO ● DQO
	<ul style="list-style-type: none"> ● Físicos químicos 	
AGENTE CONTAMINANTE	<ul style="list-style-type: none"> ● Metales 	<ul style="list-style-type: none"> ● Arsénico ● Plomo ● Cadmio ● Manganeso ● Hierro ● Cobre ● Aluminio
	<ul style="list-style-type: none"> ● Microbiológicos y parasitológico 	<ul style="list-style-type: none"> ● Coliformes termotolerantes

3.3. Métodos de la investigación

La investigación, hace uso del método inductivo, ya que, a partir de la observación de los hechos, y a través de la generalización de reglas de inferencias se busca emular el comportamiento de lo observado, sin embargo, tenemos que reflexionar en lo mencionado en Behar (2008) “(...) que se considera valida mientras no se encuentre ningún caso que no cumpla el modelo propuesto” p.40.

3.4. Diseño o esquema de la investigación

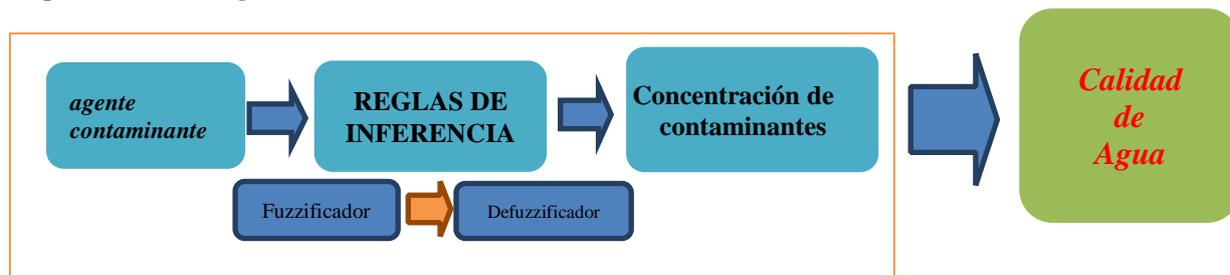
La investigación se enmarca dentro del diseño no experimental transeccional, descriptivo comparativo, ya que se ha buscado información relacionada con el objeto de estudio, sin considerar administrar o controlar la información, sin embargo, se ha diseñado el sistema para comparar los resultados obtenido en diferentes monitoreos de Calidad de Agua realizado por el ALA- Huaura, en diferentes tiempos.



Donde M_i : Muestra i , con quien vamos a contrastar los resultados del estudio, $i:1, \dots, n$

Resultados que se obtienen del siguiente sistema de inferencia difusa

Figura 2
Esquema de investigación



3.5. Población y muestra

1. Población

La población estuvo compuesta por: Todos los agentes contaminantes o parámetros que afectan la calidad del agua superficial del Río, según la normatividad vigente.

Los agentes contaminantes se eligieron en base al Decreto Supremo N°004-2017-MINAM, que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, y según la categorización de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), establece que la cuenca del Río Huaura, se ubica en la categoría 3: Riego de vegetales y bebidas de animales. (Ver Anexo)

En la subcategoría D_1 : Riego de vegetales: “aguas utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas”. (DECRETO SUPREMO N°004-2017-MINAM, 2017)

En la subcategoría D_2 : “aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno equino o camélido, y para animales menores como ganado porcino, ovino, caprino, cuyes, aves y conejos” (DECRETO SUPREMO N°004-2017-MINAM, 2017)

2. Muestra

La muestra estuvo compuesta, sólo por los agentes contaminantes que disminuyen la calidad del agua superficial de la cuenca superficial del río Huaura, distrito de Huaura, según la normatividad vigente o alcancen valores por encima del máximo permisible, en base a los documentos emitidos por la Administración Local del Agua Huaura en el: Resultado de Monitoreo participativo de la calidad de los recursos hídricos superficiales en la Cuenca del Río Huaura, correspondiente a los años 2019-2021, cuyos resultados, según los documentos mencionados, se obtuvieron mediante monitoreo de calidad de agua en diferentes tomas de muestras de agua, analizadas por laboratorios acreditados por INDECOPI, y para medir los parámetros in situ se utilizaron equipos como Multiparámetros PONSEL MESURE ODEON SN-ODEOA -1072 y Multiparámetro HANNA INSTRUMENTS 991301. (Ver Anexo).

En base a lo expuesto, los parámetros elegidos, para evaluar la proporción de contaminantes en el agua del río Huaura y que forma parte de nuestra investigación, son los siguientes:

Parámetros Físicos y Químico:

- Oxígeno Disuelto
- pH
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Parámetros Inorgánicos-metales

- Arsénico (As)
- Plomo (Pb)
- Manganeseo (Mn)
- Cadmio (Cd)
- Hierro (Fe)
- Aluminio (Al)
- Cobre (Cu)

Microbiológicos:

- Coliformes Termotolerantes

3.6. Actividades del proceso investigativo

Para alcanzar el objetivo de la investigación: Evaluar la calidad de agua superficial de la Cuenca del Río Huaura, distrito de Huaura, con un sistema de inferencia difuso basado en agentes contaminantes, y absolver la pregunta de investigación, se han realizado las siguientes actividades:

1. Se analiza la información proporcionada en los informes técnicos de la Administración Local de Agua Huaura, identificando los parámetros físico químicos de la Cuenca del Río Huaura.
2. Se identifica el universo de discurso de cada parámetro
3. Se propone el tipo de función de pertenencia para cada parámetro, siguiendo la recomendación de Acosta (2016) que sugiere que las funciones de pertenencia pueden ser caracterizada “por la descripción de sus elementos, o por la lista de sus elementos”
4. Garantizar que las funciones de pertenencia cumplan las propiedades del principio de normalidad, motricidad y de simetría. Reyna (2018). Haciendo uso de cuantificadores y modificadores lingüísticos acorde a las características de la información recopilada.

5. Correlacionar las funciones de pertenencia de cada parámetro o agente físico, químico (Oxígeno Disuelto, DBO, DQO, pH), siguiendo las recomendaciones de obtención del ICARHS, para cumplir el objetivo específico 1, además de evaluar los parámetros en bases a características similares o efectos similares (planteando 2 subsistemas: químicos 1, químicos 2) y determinar la proporción de contaminantes en el agua de río, basados en la información que se deriva de la presencia de éstas sustancias en el agua.
6. Correlacionar las funciones de pertenencia de cada parámetro inorgánicos (metales), siguiendo las recomendaciones de la metodología de obtención del ICA- PE y mejorado con el ICARHS, para cumplir con el objetivo específico 2, de manera similar a los componentes químicos, en este caso se separa en subsistemas: inorgánicos 1 e inorgánicos 2, para determinar la proporción de contaminantes en el agua de río, basados en la información que se deriva de la presencia de estas sustancias en el agua.
7. Correlacionar las funciones de pertenencia del parámetro microbiológico (coliformes termo tolerante), para medir la proporción de contaminantes en el agua, generado por esta sustancia, siguiendo las recomendaciones de la metodología de obtención del ICA- PE, y mejorado con el ICARHS para cumplir con el objetivo específico 3
8. Evaluar la salida (output del subsistema) para determinar el índice de calidad del agua, basado en la metodología antes mencionada.
9. Formalizar las características del sistema de inferencia difuso, identificando las operaciones de los conjuntos difusos, propiedades, teoremas y reglas que den el sustento matemático, acorde a las características de la información y a la función de pertenencia elegida, mediante reglas difusas.
10. Interpretar los resultados (output) del sistema difuso, obtenidos, a través del proceso de defuzzificación acorde a las características del sistema evaluado y a las recomendaciones que emiten las instituciones pertinentes.
11. Discutir los resultados con investigaciones de otros autores para contrastar los resultados y metodología utilizados.

3.7. Técnicas e instrumentos de la investigación

Las técnicas de investigación utilizado en la investigación son:

- Observación, mediante la cual, a través de fichas de registros, lista de cotejo, se han registrado los valores de los parámetros contenidos en los estándares de calidad de agua, según la normatividad vigente.
- Análisis documental, mediante el cual se han registrado la información teórica que da sustento a la investigación: lógica difusa, calidad de agua, estándares de calidad, normatividad nacional e internacional, investigaciones similares que nos permiten mostrar los antecedentes de la investigación y la discusión de los resultados.
- Pruebas iterativas, para evaluar los resultados obtenidos del sistema de inferencia difuso, se realiza pruebas iterativas recurrentes, para lograr una mejor aproximación y se ajuste mejor a la información que se obtiene en la realidad.
- Entrevista, debido a la característica de la temática de investigación, y estando ante una situación de incertidumbre se recurre a entrevistar a especialistas conocedores de la temática ambiental, se ha recurrido a la opinión de profesionales en Ingeniería Ambiental, Ingeniería Química y Biólogo, quienes han participado en calidad de expertos para plantear las reglas de inferencias difusas que forman parte de nuestro sistema.

3.8. Procedimiento para la recolección de datos

La recolección de los datos, para el ingreso al sistema se da en función a la información contenida en los informes técnicos de la Administración Local del Agua Huaura, durante los años 2019-2021 (remitidos mediante documento Ver Anexo 2)

El análisis documental, la entrevista, nos permite identificar las características de los parámetros y las consecuencias que implica su presencia en el agua, para describir la variable de investigación, construyendo nuestras variables lingüísticas, que forma parte del sistema de inferencia difuso, plantear las reglas de inferencia difusa y las funciones de pertenencia, así como los universos de discurso.

El análisis documental también nos permite conocer e identificar los parámetros y valores que se consideran como aptos, según el ECAs- Agua, lo que nos sirve de base para

plantear las funciones de pertenencia, ya sea funciones de pertenencia triangulares o trapezoidales.

3.9. Técnicas de procesamiento y análisis de los datos.

El procesamiento de la información se ha realizado, mediante el análisis del rango de variación de los parámetros de acuerdo a los estándares establecidos para evaluar la calidad de agua, a través del diseño de reglas de inferencia difuso, correlacionando las funciones de pertenencia que nos permite describir la proporción de contaminante que contiene el cauce del río Huaura, y el cómo afecta la calidad del agua, a través de los resultados obtenidos en los monitoreos de calidad de agua, realizada por la Autoridad Local del Agua Huaura, pertenecientes al ANA.

El diseño del sistema de inferencia difuso, se realiza en el software Matlab 2017, a modo de prueba, haciendo uso de las Reglas de Mamdani, la fuzzificación a través de reglas de inferencia y funciones de pertenencias triangulares y trapezoidales

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la investigación

4.1.1 Diseño y construcción del sistema de inferencia difuso

1) Diseño del sistema de inferencia difuso

Para evaluar los agentes contaminantes entre ellos: físico, químico y biológico que afecta la calidad del agua superficial del Río Huaura y se toma de referencia, la metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICA – PE y la reformulación del Índice a través de la propuesta del ICARHS, basado en la Metodología Canadiense (CCME_WQI). aplicado a los cuerpos de aguas continentales superficiales y a los informes técnicos de los resultados del monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del Río Huaura, elaborados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), sobre la Categoría 3, que corresponde a aguas para el riego de vegetales y para bebida de animales, y basándonos en el ECA -Agua, que fue aprobado con D.S N°004-2017-MINAM, y cuyos parámetros son de cumplimiento obligatorio para la conservación de los cuerpos de agua, según las condiciones naturales y clasificación.

El sistema difuso se diseña teniendo en cuenta las recomendaciones antes descritas, se agruparon los agentes contaminantes o parámetros según su naturaleza, y en base a los resultados de monitoreos de calidad de agua que realiza el ALA- Huaura, a la vez se ha considerado agrupar aquellos agentes que no evidencia presencia o tiene poca presencia en el agua del río (según los resultados de los documentos oficiales), de acuerdo a la zona de estudio: Cuenca Baja del río Huaura, y estos son:

Tabla 6
Agentes físicos químicos biológicos e inorgánicos

Clasificación	Agente
Físicos químicos	<ul style="list-style-type: none"> ● Oxígeno Disuelto ● pH ● DBO ● DQO
Inorgánico	<ul style="list-style-type: none"> ● Arsénico ● Plomo ● Cadmio ● Manganeso ● Hierro ● Cobre ● Aluminio
Microbiológicos y parasitológico	<ul style="list-style-type: none"> ● Coliformes termotolerantes

Nota:

Agentes contaminantes según la clasificación del ECA - Agua

Para cumplir el objetivo el objetivo de investigación, se ha subdividido en subsistemas, que forman parte de la primera etapa, que consiste en identificar los universos de discurso, de cada parámetro según el conjunto difuso, para encontrar la proporción de la concentración de contaminantes en el agua, generados por la presencia de los agentes y/o parámetros (Figura 3, Figura 4), que afectará la calidad del agua, en estricto cumplimiento a lo reglamentado en los ECA-Agua, y en la segunda etapa, se evalúa la calidad del agua en función a la concentración determinada mediante reglas fuzzy en la primera etapa (Figura 5).

Figura 3
Etapa 1- Construcción del Primer Sistema de Inferencia Difuso



Figura 4
Subsistemas de agentes contaminantes

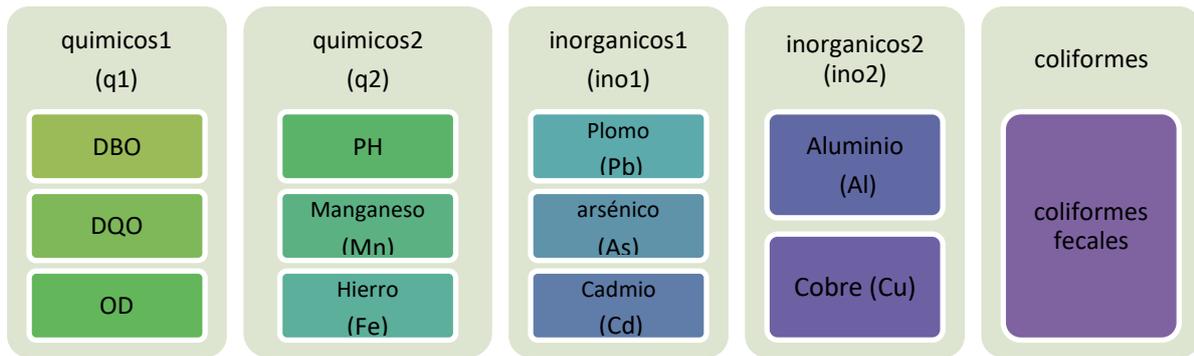
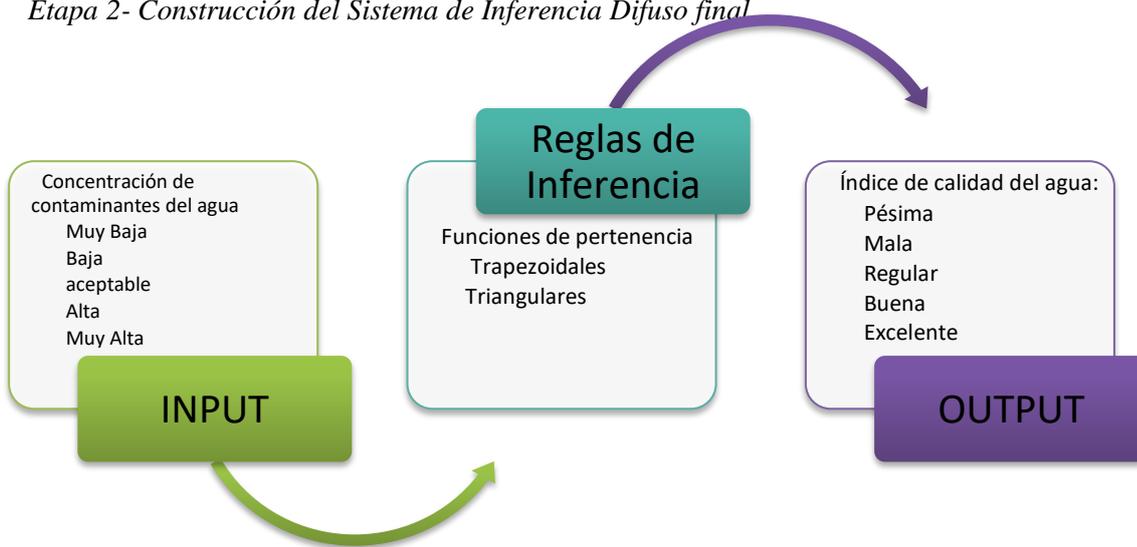


Figura 5
Etapa 2- Construcción del Sistema de Inferencia Difuso final



2) Fundamento teórico del sistema difuso

Se define A y B dos conjuntos fuzzy convexo, con las reglas de inferencia difusa de la forma deductiva IF -THEN ((Ross, 2010)

$$IF \ x \text{ es } A_k \ THEN \ y \text{ es } B_k$$

Donde:

$x \text{ es } A_k$ se conoce como antecedente o premisa,

$y \text{ es } B_k$ es conoce como consecuente o conclusión.

Con A_k y B_k valores lingüísticos definidos por conjuntos fuzzy en los rangos (universos de discurso del parámetro k), $x \in X$ y $y \in Y$.

En la etapa 1, X representa los valores de los parámetros obtenidos del Monitoreo de agua, Y representa la concentración de contaminantes en el agua, generado por la presencia de la sustancia (agente k).

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

Definimos el conjunto difuso A_k , de algún parámetro k , como conjunto de entrada (Input) del primer sistema de la primera etapa:

$$A_k = \left\{ (x, \mu_{A_k}(x)) / x \in U_k \wedge \mu_{A_k}(x) \in [0,1] \right\}$$

x = parámetros físicos, químico, inorgánico y biológico

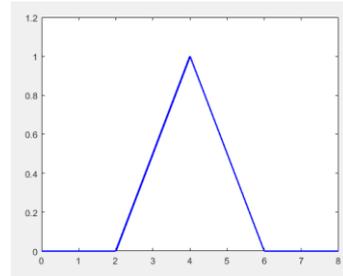
U_k = Universo de discurso del parámetro k

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

$U_k = [0, x_n]$; con $x_k \in U_k$; $\mu_{A_k}(x_k) = 1$

Se define la función de pertenencia triangular:

$$\mu_{A_{acep_k}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < x \leq a \\ \frac{x-a}{x_k-a} & \text{si } a < x \leq x_k \\ \frac{b-x}{b-x_k} & \text{si } x_k < x < b \\ 0 & \text{si } b \leq x \leq x_n \end{cases}$$

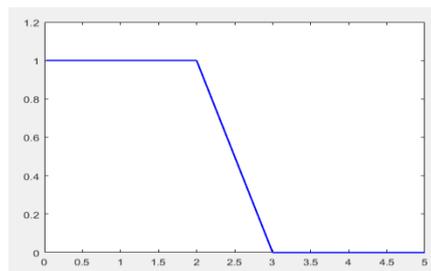


Con $l(x) = \frac{x-a}{x_k-a}$, función monótona creciente continua a la derecha y $r(x) = \frac{b-x}{b-x_k}$

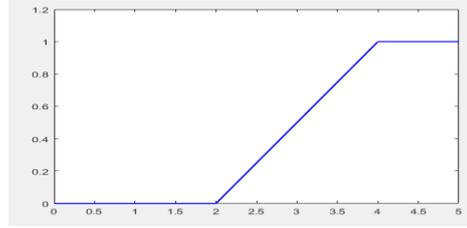
función monótona decreciente continua a la izquierda, con $a, b, x_k \in U_k$.

Y las funciones de pertenencia trapezoidales:

$$\mu_{A_{bajo_k}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < x < a \\ \frac{x_k-x}{x_k-a} & \text{si } a \leq x \leq x_k \\ 0 & \text{si } x_k < x < x_n \end{cases}$$



$$\mu_{A_{alto_k}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < x < x_k \\ \frac{x-b}{b-x_k} & \text{si } x_k \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x < x_n \end{cases}$$

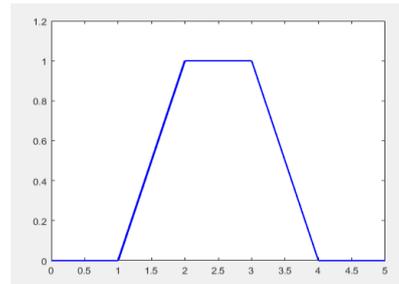


Para los parámetros donde el nivel máximo permisible establecido en el ECAs Agua, es un intervalo I_k :

$$I_k = [0, x_n] \subset U_k ; \mu_{A_k}(I_k) = 1, \text{ para algún parámetro } k,$$

Se define la función de pertenencia trapezoidal:

$$\mu_{A_{acep_k}}(x) = \begin{cases} 0 ; & 0 < x \leq a \wedge b \leq x < x_n \\ \frac{x-a}{x_k-a} ; & a < x \leq x_k \\ 1 ; & x_k < x < x_{k+1} \\ \frac{b-x}{b-x_{k+1}} ; & x_{k+1} \leq x \leq b \end{cases}$$



Con $a, b, x_k, x_{k+1} \in U_k$

Donde $\mu_{A_k}(x)$, una función continua a trozos, convexo, de algún parámetro evaluado k , es decir satisface la condición:

$$A_k(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min[A_k(x_1); A_k(x_2)]; \forall x_1; x_2 \in R, \lambda \in [0,1]$$

Mediante las operaciones de intersección, unión, complemento de dos conjuntos difusos:

$$\begin{aligned} \text{AND: } \mu_{A_k \cap A_{k+1}}(x) &= \mu_{A_k}(x) \cap \mu_{A_{k+1}}(x) = \{\mu_{A_k}(x), \mu_{A_{k+1}}(x)\} \\ \text{OR: } \mu_{A_k \cup A_{k+1}}(x) &= \mu_{A_k}(x) \cup \mu_{A_{k+1}}(x) = \{\mu_{A_k}(x), \mu_{A_{k+1}}(x)\} \\ \text{NOT: } \mu_{A_k}(x) &= 1 - \mu_{A_k}(x) \end{aligned}$$

Para efectos de análisis y simplificación del proceso en la etapa 1, se generaron subsistemas que evalúan parámetros con características o consecuencias similares en el agua (L), asumiendo un nuevo subconjunto difuso como: $A_s = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_L$, con $L < n$, que forma un subsistema j.

Expresado por la función de pertenencia del subsistema j

$$\mu_{A_s}(x) = \{\mu_{A_1}; \mu_{A_2}; \dots; \mu_{A_L}\}$$

Basado en la definición estándar de operación unión se tendrá:

$$IF \ x \ es \ A_s \ THEN \ y \ es \ B_j$$

Entonces definimos:

$$B_j = \left\{ \left(y, \mu_{B_j}(y) \right) / y \in U_j \wedge \mu_{B_j}(y) \in [0,1]; j = 1, \dots, 5 \right\}$$

Donde:

U_j = Universo de discurso de la proporción del contaminante generado por la presencia de los parámetros $1, \dots, L$

m = Proporción aceptable en relación al valor máximo establecido en el ECA para los parámetros $1, \dots, L$.

$$U_j = [0,100]; \text{ con } m \in U_j; \mu_{B_j}(m) = 1$$

Entonces, el valor de salida para r reglas del j –ésimo subsistema es:

$$\mu_{B_j^r}(y) = \left\{ \mu_{A_1^r}(x(\text{input } 1)); \dots; \mu_{A_L^r}(x(\text{input } (L))) \right\}$$

Donde: $\mu_{A_k^r}$ es la función de pertenencia del conjunto fuzzy del k –ésimo parámetro, contenido en el subsistema j con L parámetros con características similares y r número de reglas de inferencia.

En la etapa 2, Y representa la proporción de la concentración de contaminantes en el agua, afectado por los agentes contaminantes seleccionados según su propiedades o reacciones en el agua contenidos en los subsistemas j , y Z el índice de Calidad del agua afectada por la presencia de los contaminantes, entonces:

$$z_j = \mu_{B_j}(y_j)$$

Se define el conjunto difuso C_j (output) que representa la calidad el agua, afectado por el conjunto de parámetros que forman parte del subsistema j .

$$C_k = \left\{ \left(z, \mu_{C_j}(z) \right) / z \in U_j \wedge \mu_{C_j}(z) \in [0,1] \right\} j = 1, \dots, 5$$

Mediante la operación AND

$$AND - S: \mu_{C_k \cap C_{k+1}}(z_i) = \{\mu_{C_k}(y_i), \mu_{C_{k+1}}(y_i)\}$$

Donde:

U_j = Universo de discurso del índice de calidad del agua generado por la presencia de los parámetros contenidos en el subsistema j

a = valor referencial donde la función de pertenencia de las variables lingüísticas es normal.

$U_j = [0,100]$; con $a \in U_j$; $\mu_{C_j}(a) = 1$.

Haciendo uso de la relación T, con los elementos del universo de discurso Z, entonces el valor de salida r reglas del j –ésimo subsistema es:

$$\mu_C(z_i) = \{\{\mu_{B_1}(y_i), \dots, \mu_{B_5}(y_i)\}\}$$

Basado en la definición estándar de la operación intersección de la regla de inferencia:

IF y es B_j THEN z es C_j

Donde: $\mu_{C_j}^r$ es la función de pertenencia del conjunto fuzzy del j –ésimo sistema, que contiene los parámetros k , con características similares y r número de reglas de inferencia.

Tabla 7

Variable: INPUT del Sistema de Inferencia difuso para agentes contaminantes

VALORES	A ₁ = DBO	A ₂ = DQO	A ₃ = OD	A ₄ = pH	A ₅ = Mn	A ₆ = Fe	A ₇ = Pb	A ₈ = As	A ₉ = Cd	A ₁₀ = Al	A ₁₁ = Cu	A ₁₂ = CF
BAJO	A _{1₁}	A _{2₁}	A _{3₁}	A _{4₁}	A _{5₁}	A _{6₁}	A _{7₁}	A _{8₁}	A _{9₁}	A _{10₁}	A _{11₁}	A _{12₁}
ACEPTABLE	* A _{1₂}	* A _{2₂}	A _{3₂}	A _{4₂}	* A _{5₂}	* A _{6₂}	* A _{7₂}	A _{8₂}	A _{9₂}	* A _{10₂}	A _{11₂}	* A _{12₂}
ALTO	A _{1₅}	A _{2₃}	A _{3₃}	A _{4₃}	A _{5₃}	A _{6₃}	A _{7₃}	A _{8₃}	A _{9₃}	A _{10₃}	A _{11₃}	A _{12₃}
	químico 1			químico 2			Inorgánico 1			Inorgánico 2		coliforme

Nota:

* la función de pertenencia es triangular

De acuerdo a la categorización se entiende que:

$\mu_{A_{1_1}}$ = representa la función de pertenencia del conjunto difuso del parámetro 1 (DBO) categorizado como Muy bajo, siendo una función de pertenencia TRAPEZOIDAL de la forma:

$$\mu_{A_{1Mbajo}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < x < a_1 \\ \frac{x_k - x}{x_k - a_1} & \text{si } a \leq x \leq x_k \\ 0 & \text{si } x_k < x < x_n \end{cases}$$

Con x_k = valor expresado en el ECA-agua para DBO

$$\mu_{A_{k2,4}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < x \leq a_i \\ \frac{x - a_i}{x_k - a_i} & \text{si } a_i < x \leq x_k \\ \frac{b_i - x}{b_i - x_k} & \text{si } x_k < x < b_j \\ 0 & \text{si } b_j \leq x \leq x_n \end{cases}$$

$$i = 2; i = 4; j = 1; j = 2$$

$\mu_{A_{1_2,3,4}}$ = representa la función de pertenencia del conjunto difuso del parámetro 1 (DBO) categorizado como ACEPTABLE, siendo una función de pertenencia TRIANGULAR de la forma:

$$\mu_{A_{1ACCEPTABLE_k}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < x \leq a \\ \frac{x - a}{x_k - a} & \text{si } a < x \leq x_k \\ \frac{b - x}{b - x_k} & \text{si } x_k < x < b \\ 0 & \text{si } b \leq x \leq x_n \end{cases}$$

Con x_k = valor expresado en el ECA-agua para DBO, de manera similar se define las funciones de pertenencia de los parámetros $\mu_{A_{23}}$ (DQO); $\mu_{A_{73}}$, $\mu_{A_{83}}$, $\mu_{A_{93}}$ y $\mu_{A_{(103)}}$, ya que se cuenta como un solo valor como máximo en la norma mencionada.

Sin embargo, según la normativa, algunos parámetros estipulan un intervalo de aceptabilidad, por ende, la función de pertenencia varia, por ejemplo, para A_{32} (OD), cuya función de pertenencia estaría representada por la siguiente expresión algebraica que representa una función trapezoidal:

$$\mu_{A_{3acep_k}}(x) = \begin{cases} 0 & 0 < x \leq a \wedge b \leq x < x_n \\ \frac{x-a}{x_k-a} & a < x \leq x_k \\ 1 & x_k < x < x_{k+1} \\ \frac{b-x}{b-x_{k+1}} & x_{k+1} \leq x \leq b \end{cases}$$

La función trapezoidal, cuyo valor de aceptabilidad se representa en el intervalo $x_k < x < x_{k+1}$, esto se considera para A_{43} , A_{53} , A_{63} y $A_{(11)3}$

En relación:

$\mu_{A_{13}}$ = representa la función de pertenencia del conjunto difuso del parámetro 1 (DBO) categorizado como **ALTO**, siendo una función triangular de la forma:

$$\mu_{A_{alto_k}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < x < x_k \\ \frac{x-b}{b-x_k} & \text{si } x_k \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x < x_n \end{cases}$$

Con x_k = valor expresado en el ECA-agua para DBO, y de manera similar para todos los parámetros observados.

De manera similar planteamos las variables lingüísticas del sistema de inferencias para conocer la concentración de contaminantes en el río.

Tabla 8

OUTPUT del Sistema de Concentración de Contaminantes e INPUT del Sistema de Calidad de Agua

Concentración contaminante	$B_1 =$ quimicos1	$B_2 =$ quimicos2	$B_3 =$ inorganico1	$B_4 =$ inorganico2	$B_5 =$ coliformes
MUY BAJA	B_{11}	B_{21}	B_{31}	B_{41}	B_{51}
BAJA	B_{12}	B_{22}	...	...	B_{52}
ACEPTABLE	B_{13}	...	...	...	...
ALTA	⋮	...	...	...	...
MUY ALTA	B_{15}	B_{25}	B_{35}	B_{45}	B_{55}

En este caso las funciones de pertenencia trapezoidales, de B_{kj} , con

$k = 1, 2, \dots, 5$, conjuntos difusos

$j = 1, \dots, 5$ variables lingüísticas (Muy baja, baja, normal o aceptable, alta, Muy Alta)

Si m satisface la condición $\mu_B(m) = 1$, entonces:

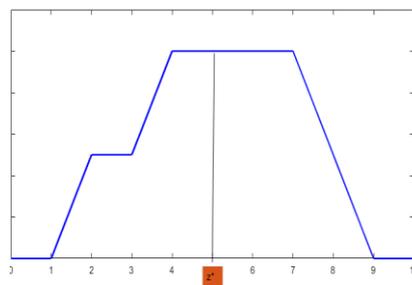
$$\mu_{B_{k1}}(y) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < y < a_1 \\ \frac{m - y}{m - a_1} & \text{si } a_1 \leq y \leq m \\ 0 & \text{si } m < y < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{B_{k2,3,4}}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < y \leq a_i \\ \frac{y - a_i}{m - a_i} & \text{si } a_i < y \leq m \\ \frac{b_i - y}{b_i - m} & \text{si } m < y < b_i \\ 0 & \text{si } b_i \leq y \leq 100 \end{cases} \quad i = 2, 3$$

$$\mu_{B_{k5}}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < y < m \\ \frac{y - b_5}{b_5 - m} & \text{si } m \leq y \leq b_5 \\ 1 & \text{si } b_5 < y < 100 \end{cases}$$

En esta investigación se ha optado por el método del centroide como método de defuzzificación, que se representa con la siguiente expresión algebraica:

$$y^* = \frac{\int \mu_B(y) y dy}{\int \mu_B(y) dy}$$



Se definieron las siguientes reglas de inferencia, haciendo uso del sistema de inferencia de Mamdani, T_norma, la condición IF- THEN, y defuzzificación Centroide, se obtiene:

Para el subsistema: químicos 1

R_1 : IF $x_1 \in A_{11} \wedge x_2 \in A_{12} \wedge x_3 \in A_{33}$ THEN $y \in B_{11}$

Si se tiene presencia de DBO, con $x = x_1 < 15$ y presencia de DQO con $x = x_2 < 40$ y presencia de OD, con $x = x_3 > 4$ entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua (B_{11}).

Para el subsistema químicos 2:

R_1 : IF $x_1 \in A_{51} \wedge x_2 \in A_{61} \wedge x_3 \in A_{43}$ THEN $y \in B_{31}$

Si se tiene presencia de Mn, con $x = x_1 < 0.2$ y presencia de Fe, con $x = x_2 < 0.2$ y presencia de valores de PH, con $x = x_3 = 7$ entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua (B_{21})

Para el subsistema inorgánico 1

R_1 : IF $x_1 \in A_{71} \wedge x_2 \in A_{81} \wedge x_3 \in A_{91}$ THEN $y \in B_{31}$

Si se tiene presencia de plomo con $x = x_1 < 0.05$ y presencia de arsénico con $x = x_2 < 0.1$ y presencia de Cadmio, con $x = x_3 < 0.01 \in A_{91}$, entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua (B_{31})

Para el subsistema inorgánico 2

R_1 : IF $x_1 \in A_{(10)1} \wedge x_2 \in A_{(11)1}$ THEN $y \in B_{41}$

Si se tiene presencia de Aluminio, con $x = x_1 < 5$ y presencia de cobre con $x = x_2 < 1$ entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua (B_{41})

Para el subsistema coliformes

R_1 : IF $x_1 \in A_{(12)1}$ THEN $y \in B_{51}$

Si se tiene presencia de coliformes fecales con $x = x_1 < 1000$ entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua (B_{51})

Para el sistema 2:

La variable de entrada son los resultados obtenidos en FIS (de la primera etapa), que representa las funciones de pertenencias trapezoidales $\mu_{B_{k_j}}(y)$, los cuales fueron definidas anteriormente.

A continuación, se presenta las funciones de pertenencias de las variables lingüísticas de salida del sistema de inferencia difuso, tomando como referencia la metodología para la determinación del índice de calidad de agua ICARHS aplicado a los cuerpos de aguas continentales superficiales, se plantea el universo de discurso para cada función de pertenencia, según el detalle siguiente:

$$\mu_{C_{pésimo}}(z) = \begin{cases} 1 & ; & 0 < z < 40 \\ \frac{44 - z}{4} & ; & 40 \leq z \leq 44 \\ 0 & ; & 44 < z < 100 \end{cases}$$

$$\mu_{C_{malo}}(z) = \begin{cases} 0 & ; & 0 \leq z < 44 \wedge 64 < z \leq 100 \\ \frac{z - 40}{5} & ; & 40 \leq x < 45 \\ 1 & ; & 45 \leq x \leq 60 \\ \frac{64 - z}{4} & ; & 60 \leq x \leq 64 \end{cases}$$

$$\mu_{C_{regular}}(z) = \begin{cases} 0 & ; & 0 \leq z < 60 \wedge 79 < z \leq 100 \\ \frac{z - 60}{5} & ; & 60 \leq x < 65 \\ 1 & ; & 65 \leq x \leq 75 \\ \frac{79 - z}{4} & ; & 75 \leq x \leq 79 \end{cases}$$

$$\mu_{C_{\text{bueno}}}(z) = \begin{cases} 0 & ; \quad 0 \leq z < 75 \wedge 95 < z \leq 100 \\ \frac{z-75}{5} & ; \quad 75 \leq z < 80 \\ 1 & ; \quad 80 \leq z \leq 90 \\ \frac{90-z}{5} & ; \quad 90 \leq z \leq 95 \end{cases}$$

$$\mu_{C_{\text{excelente}}}(z) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < y < 90 \\ \frac{z-90}{5} & \text{si } 90 \leq y \leq 95 \\ 1 & \text{si } 95 < y < 100 \end{cases}$$

$C_1 = \{ \mu_c(z): z \rightarrow [0,1] \}$ y $\mu_c(z) =$ función de pertenencia de las variables lingüísticas de calidad de agua.

$$C_i = \left\{ (z, \mu_{C_i}(z)) / z_{C_i} \in U_i, \mu_{C_i}(z) \in [0,1] \right\}$$

$$Q = \{ \mu_{C_1}(z) \cap \mu_{C_2}(z) \cap \mu_{C_3}(z) \cap \mu_{C_4}(z) \cap \mu_{C_5}(z) \}$$

$$Q = \left\{ \bigcap_1^5 \mu_{C_i} \right\}$$

Tabla 9
OUTPUT del Sistema de Inferencia difuso CALIDAD

Contaminación Vs Calidad de agua	PÉSIMO (1)	MALO (2)	REGULAR (3)	BUENO (4)	EXCELENTE (5)
Muy baja (1)	-	-	-	C_{14}	C_{15}
Baja (2)	-	-	C_{23}	C_{24}	-
Normal (3)	-	C_{32}	C_{33}	-	-
Alta (4)	C_{41}	C_{42}	-	-	-
Muy alta (5)	C_{51}	-	-	-	-

Nota:

C_{ij} : representa las reglas de pertenencia entre el conjunto difuso i y el conjunto difuso j

- : No existe relación entre el conjunto difuso i y el conjunto difuso j

Cabe mencionar que se usa el término “normal” o “aceptable”, en el sentido que la contaminación alcanza el máximo permisible, sin embargo, si existe contaminación en el agua.

Se definieron las siguientes reglas de inferencia, haciendo uso del sistema de inferencia de Mamdani, T_norma, T_conorma y la condición IF- THEN, y defuzzificacion Centroide.

Haciendo uso de la T_conorma, se tiene por ejemplo una regla de inferencia que relaciona la concentración de contaminantes generada por la presencia de los agentes contaminantes y lo establecido en los ECA- Agua (normatividad vigente) obtenidos en el primer sistema de inferencia difuso:

$$R_1: \text{If } y_1 \in B_{11} \vee y_2 \in B_{21} \vee y_3 \in B_{31} \vee y_4 \in B_{41} \vee y_5 \in B_{51} \text{ THEN } z \in C_{15}$$

En términos literales:

R_1 : Si la concentración de contaminantes de químicos 1 es muy baja o la concentración de contaminantes por químicos 2 es muy baja, o la concentración de contaminantes por inorgánicos 1 es muy baja o la concentración de contaminantes por inorgánicos 2 es muy baja y la concentración de contaminantes por coliformes es muy baja entonces la calidad del agua del Rio Huaura es Excelente.

Generalizando:

$$\mu_T(z_i) = \bigcap_i \{ \mu_{C_i}(z_i) \}$$

$$R_1: \text{IF } y_1 = \{ \mu_{A_{11}}(x_1), \mu_{A_{12}}(x_2), 1 - \mu_{A_{31}}(x_1) \} \wedge y_2 = \{ \mu_{A_{41}}(x_2), \mu_{51}(x_2), \mu_{A_{61}}(x_2) \} \wedge y_3 = \{ \mu_{A_{71}}(x_3), \mu_{A_{81}}(x_3), \mu_{A_{91}}(x_3) \} \wedge \{ \mu_{A_{(10)1}}(x_4); \mu_{A_{(11)1}}(x_4) \} \vee y_5 = \mu_{A_{(12)1}}(x_5) \} \text{ THEN } z \in C_{15}$$

R_1 : Si los valores de DBO y de la DQO es muy baja o los valores de OD son altas entonces la concentración de contaminantes en el agua es baja, ó si los valores del Mn, es baja y la presencia de Fe es baja o altos valores de pH, entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua, ó si se tiene baja concentración de Pb, valores de As bajos, presencia de Cd con valores bajos, entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua, ó

si se tiene presencia de concentración baja de Al o la presencia de valores bajo en Cu entonces existe baja concentración de contaminantes en el agua ó si es muy baja la concentración de contaminantes por baja presencia de valores de coliformes termo tolerantes entonces la calidad del agua del Rio Huaura es Excelente.

A continuación, se analiza por cada subsistema de la etapa 1, y de la etapa 2, de manera más detallada haciendo uso del software de MATLAB, para el diseño de las reglas de inferencia con las funciones de pertenencia del FIS.

En la actualización del Índice de Calidad de Agua propuesto por el ANA, plantea conocer el S1: ICAMO y S2: ICAFQ, siendo el ICAMO, el índice de calidad de agua basado en los parámetros relacionados con la Materia Orgánica, evaluando los parámetros Químicos1 y Coliformes Termotolerantes, y ICAFQ, se obtiene con inorganicos1 e Inorgánicos2.

3) *Diseño de los Subsistemas de inferencia difuso en Matlab*

Etapa 1.

Para alcanzar el objetivo específico 1: Evaluar los parámetros físicos químicos del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difuso:

- **Subsistema: químicos 1**

Diseñamos el subsistema de inferencia: químicos 1, (Ver Anexo 1) donde se especifican las variables de entrada, las reglas de inferencia, la variable de salida:

- 1. Denotamos como $A = \text{Parámetros físico químicos}$;**

Que contiene a los parámetros: Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO), Demanda Química del Oxígeno (DQO), y Oxígeno Disuelto (OD), los cuales se ingresan al software

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U, \mu_A(x): X \rightarrow [0,1]\}$$

- 2. Analizamos las características de DBO, DQO y OD.**

Como sabemos la DBO, determina la cantidad de materia orgánica biodegradable, que muestra la capacidad de autodepuración del cauce; la DQO mide la cantidad de materia orgánica presente en el agua, tal que, si se incrementa la concentración ambos parámetros influyen en la disminución del contenido de OD en los cuerpos de agua, lo que afecta el ecosistema acuático y la calidad del agua, por lo descrito, se observa que ante el incremento de alguno de los parámetros mencionados la calidad del agua disminuye.

La poca presencia de la concentración de OD en el agua, genera la muerte masiva de organismos aerobios ($0 - 4 \text{ mg/L}$), de acuerdo al ECA – Agua, el valor aceptable de Oxígeno Disuelto en el agua es $> 4 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ o $> 5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ para bebida de animales y riego de plantas respectivamente.

Es decir que a mayor concentración de OD, mejor será la calidad del agua, por ende, menor proporción de contaminantes en el agua.

3. Definición de las funciones de pertenencia

Se identifica los universos de discurso de cada parámetro, que nos permite construir la función de pertenencia, clasificando las concentraciones de los contaminantes físico químicos DBO, con los variables lingüísticas: Bajos valores, normales, y altos valores, de manera similar para DQO, considerándose funciones de pertenencia trapezoidales en las puntas y triangulares en los medios cercanos a los valores ECAs – Agua, como variable de entrada.

Para lograr una equivalencia del DBO, DQO y OD, se recurre al complemento de A. Donde A mide la cantidad concentración de OD que afecta la calidad del agua.

$$\mu_{\underline{A}_3}(x) = 1 - \mu_{A_3}(x)$$

Los universos de discurso, funciones de membresía de cada parámetro se representa con funciones trapezoidales en los extremos y triangular cerca a los valores del ECAs – Agua, además de la variable de salida de la primera etapa se divide en 5 conjunto fuzzy, Muy baja proporción, baja proporción, nivel aceptable, alta proporción y muy alta proporción, se muestra a continuación:

Tabla 10

Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema QUIMICOS1

PARÁMETRO	UNIVERSO DE DISCURSO	FUNCIÓN DE MEMBRESÍA
<p>A_1: DEMANDA BIOQUÍMICA DEL OXIGENO (DBO) mg/L</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Normales ● Altos valores 	<p>$[0, 130] \frac{mg}{L}$</p> <p>ECA-Agua:</p> <p>15 mg/L</p>	
<p>A_2=DEMANDA QUÍMICA DEL OXIGENO (DQO) mg/L</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Normales ● Altos valores 	<p>$[0, 250] \frac{mg}{L}$</p> <p>ECA- Agua:</p> <p>40 mg/L</p>	
<p>*A_3=OXÍGENO DISUELTO (OD) mg/L</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Aceptable ● Altos valores 	<p>$[0, 10] \frac{mg}{L}$</p> <p>ECA-Agua:</p> <p>> 4 mg/L</p> <p>>5 mg/L *</p>	
<p>B_1= CQUIMICOS1</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Muy Baja proporción de contaminantes ● Baja proporción ● Nivel aceptable ● Alta proporción ● Muy alta proporción 	<p>$[0, 100]$</p>	

Nota:

La tabla presenta el conjunto difuso (A_1, A_2 y A_3) con el Universo de Discurso, el valor de ECA-agua, y las funciones de pertenencia o membresía de los subconjuntos difusos Bajo, Normal y Altos Valores.

* ECA-Agua, para bebida de animales.

Teniendo en cuenta que la calidad del agua, se verá afectada por el incremento de la concentración de algunos de los parámetros químicos mencionados, recurrimos a la T_conorma para correlacionar las funciones de pertenencia.

$$A_i = \left\{ (x, \mu_{A_i}(x)) / x \in U, \mu_{A_i}(x): X_i \rightarrow [0,1] \right\}$$

Entonces:

$$(A_1, A_2, \underline{A_3}) = (A_1, A_2, \underline{A_3})$$

Siendo el objetivo conocer la variación de la concentración de contaminantes generados por la presencia de los parámetros, asigna la etiqueta a la variable respuesta “CQUIMICO1”, para tal efecto usamos el Sistema basado en reglas fuzzy tipo Mamdani, con defuzzificación: centroide, con el FIS tipo Mamdani:

$$IF x_1 es A_1^k y x_2 es A_2^k y x_3 es \underline{A_3}^k, THEN y^k es B^k, \text{ donde } k=1, 2, 3$$

Se construye las reglas de inferencia, por ejemplo:

R_1 : Si los valores de x_1 (DBO) es baja y los valores de x_2 es baja (DQO), y altos valores de x_3 (OD), entonces la proporción de contaminantes en el agua del rio es bajo.

4. Resultados del Subsistema:

De acuerdo a las reglas difusas que representan el subsistema difuso, se muestra en la Tabla 11, evaluando valores teóricos, que me permite representar posibles valores que arroja el sistema considerando los parámetros, haciendo uso de la T_ norma. La representación de las reglas de inferencia y resultados gráficos se aprecian en el Anexo 2.

Tabla 11

Resultados de la variable: CQUIMICO1

DBO	DQO	OD	CQUIMICO1	
5	17	8	6.08	MUY BAJO
12.4	26.4	6	40.9	ACEPTABLE
15	40	5	52.8	ACEPTABLE
17.9	47	3.8	60.6	ALTO
60	90	2	87.6	MUY ALTO

Nota: Esta tabla muestra los valores de DBO, DQO; OD y la proporción de contaminantes que genera y la calificación cualitativa que se les otorga.

- **Subsistema: QUIMICOS2**

Diseñamos el subsistema de inferencia al que denominamos: químicos 2; en el cual se muestra la relación existente entre el pH, Manganeseo (Mn) y Hierro (Fe) como variables de entrada y, como la interacción de los mismos genera cierta proporción de contaminantes en el agua, lo que se refleja en la variable de salida: cquimico2 (Ver Anexo 1).

- 1. Evaluamos pH, Mn y Fe, como indicador de Calidad de Agua:**

El pH del agua, varia teóricamente desde 0 a 14, de tal manera que el agua puede ser ácida ($\text{pH} < 7,0$), neutral ($\text{pH} = 7,0$) o alcalina ($\text{pH} > 7,0$), según el ECA – agua, consideran un valor aceptable según la clasificación del río Huaura, valores entre 6.5 – 8.5, donde los valores mayores o menores a ese intervalo afectaría la calidad del agua.

Sin embargo, se han observado en diversas investigaciones la interacción del pH con la presencia de los metales como Mn y Hierro, la remoción del Mn y Fe, están relacionados con la variación de los valores del pH, tal como lo menciona Avendaño (2002) citado por (Burbano & Sánchez, L. D., 2007), indica que a mayores concentraciones de Hierro y de Manganeseo, los valores del pH serán bajos.

- 2. Funciones de pertenencia para cada parámetro:**

Donde A es el conjunto difuso que mide la cantidad presente de Fe y Mn en el agua, que afecta sus características naturales, para tal efecto se identifica el universo de discurso que corresponde a los valores de pH, Mn y Fe. (Ver Tabla 12)

Se construye las reglas de inferencia, por ejemplo:

R_1 : Si los valores de x_1 (Mn) son bajos y los valores de x_2 son bajas (Fe), los valores de x_3 son altos (pH), entonces la proporción de contaminantes en el agua del río es bajo.

Tabla 12

Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema QUIMICOS2

PARÁMETRO/VARIABLE LINGÜÍSTICA	UNIVERSO DE DISCURSO	FUNCIÓN DE MEMBRESÍA
<p>A_4=Potencial de Hidrogeno (pH)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valores bajos • Valores aceptables • Valores altos 	<p>[0,14]</p> <p>ECAs - Agua :</p> <p>6.5 – 8,5</p>	
<p>A_5: Manganeseo (Mn) $\frac{mg}{L}$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valores bajos • Valores aceptables • Valores altos 	<p>[0,0.3] $\frac{mg}{L}$</p> <p>ECAs- Agua: $\frac{0.2mg}{L}$</p>	
<p>A_6: Hierro (Fe) $\frac{mg}{L}$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valores bajos • Valores aceptables • Valores altos 	<p>[0,8] $\frac{mg}{L}$</p> <p>ECAs- Agua: $5 \frac{mg}{L}$</p>	
<p>$B_2 = CQUIMICOS2$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Muy Baja proporción de contaminantes • Baja proporción • Nivel aceptable • Alta proporción • Muy alta proporción 	<p>[0,100]</p>	

Nota: La tabla presenta el conjunto difuso (A_4 ; A_5 y A_6) con el Universo de Discurso, el valor de ECA-agua, y las funciones de pertenencia o membresía de los subconjuntos difusos Bajo, Normal y Altos Valores.

Donde las reglas de inferencia permiten la variable de salida CQUIMICOS2 que mide el nivel de contaminación del agua, medidos entre 0 a 100.

3. Resultados del Subsistema:

De acuerdo a las reglas difusas que representan el sub sistema difuso, se muestra en la Tabla 13, evaluando valores teóricos, que me permite representar posibles valores que arroja el sistema considerando los parámetros, haciendo uso de la T_conorma. La representación de las reglas de inferencia y resultados gráficos se aprecian en el Anexo 2

Tabla 13*Resultados de la variable: CQUIMICO2*

PH	Mn	Fe	CQUIMICO2	
7	0.01	3	9.02	Muy bajo
7.7	0.2	4	39.7	Bajo
3	0.25	6	89	Muy alto
9	0.1	5	51.8	Alto

Nota: Valores de pH, Manganeso y Hierro, la proporción de contaminantes que genera y la calificación.

Para alcanzar el objetivo específico 2: Evaluar los agentes inorgánicos del agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difuso.

Subsistema: INORGANICOS1

Según la normativa que aprueba en ECA-Agua, en la categoría inorgánicos incluye a los metales, como consecuencia en ésta investigación se ha considerado evaluar los metales en dos subsistemas: inorganicos1 que contiene los metales Arsénico (As), plomo (Pb) y Cadmio (Cd), producto de fundiciones en yacimientos mineros de la zona alto andina o Cuenca Alta del rio Huaura, o resultado del uso indiscriminado de fertilizantes que contiene derivados de alguna de éstas sustancias químicas, y el otro subsistema: inorganicos2 que contiene los metales Aluminio (Al) y Cobre (Cu), según se establece en el documento normativo de elaboración del índice de calidad de Agua Superficial (ANA, 2020). Ver Anexo 1.

➤ **Analizando las características de los metales**

Se consideró el arsénico (metal pesado) es venenoso y muy tóxico, en aguas naturales y al plomo, es un elemento relativamente de menor importancia en la corteza terrestre, pero es tóxico para los organismos acuáticos.

La calidad del agua se ve afectada por la presencia de los metales pesados, y en base a los documentos técnicos y a los límites permisibles descritos en el ECA – Agua, y se construye

el universo de discurso de cada variable de entrada, a la vez se identifica los conjuntos difusos de la variable de salida concentrNI (Ver Tabla 14)

Se construye las reglas de inferencia, por ejemplo:

R_1 : Si la concentración de $x = x_1$ (Arsénico) es baja o la concentración de $x = x_2$ (Plomo) y la concentración de $x = x_3$ (Cadmio) es baja entonces el efecto de la proporción del contaminante en el agua es baja.

Tabla 14

Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema INORGANICO1

PARÁMETRO	UNIVERSO DE DISCURSO	FUNCIÓN DE MEMBRESÍA
<p>$A_8=ARSÉNICO$</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Valores aceptables ● Altos valores 	<p>$[0 - 0.30] \frac{mg}{L}$</p> <p><i>ECAs – agua:</i></p> <p>$0.1 \frac{mg}{L}^*$</p> <p>$0.2 \frac{mg}{L}^{**}$</p>	<p>Membership function plots plot points: 181</p> <p>input variable "arsenico"</p>
<p>$A_7=PLOMO$</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Valores aceptables ● Altos valores 	<p>$[0 - 0.1] \frac{mg}{L}$</p> <p><i>ECAs- agua:</i></p> <p>0.05 mg/L</p>	<p>Membership function plots plot points: 181</p> <p>input variable "Plomo"</p>
<p>$A_9=CADMIO$</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Valores aceptables ● Altos valores 	<p>$[0 - 0.1] \frac{mg}{L}$</p> <p><i>ECAs- agua:</i></p> <p>0.01 mg/L^*</p> <p>0.05 mg/L^{**}</p>	<p>Membership function plots plot points: 181</p> <p>input variable "cadmio"</p>
<p>$B_3=CONCENTRANI$</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Muy Baja proporción ● Baja proporción ● Nivel aceptable ● Alta proporción ● Muy alta proporción 	<p>$[0, 100]$</p>	<p>Membership function plots plot points: 181</p> <p>output variable "concentrANI"</p>

Nota:

La tabla presenta el conjunto difuso (A_9 ; A_8 y A_7) con el Universo de Discurso, el valor de ECA-agua, y las funciones de pertenencia o membresía de los subconjuntos difusos Bajo, Normal y Altos Valores.

* Riego de vegetales

** Bebida de animales.

Resultados del Subsistema:

De acuerdo a las reglas difusas que representan el subsistema difuso, se muestra en la Tabla 15, evaluando valores teóricos, que me permite representar posibles valores que arroja el sistema considerando los parámetros. La representación de las reglas de inferencia y resultados gráficos se aprecian en el Anexo 2

Tabla 15
Resultados de la variable: concentraNI

Arsénico	Plomo	Cadmio	concentraNI	
0.033	0.02	0.002	16.2	muy baja
0.056	0.033	0.006	20.6	Baja
0.098	0.05	0.01	40.9	aceptable
0.115	0.059	0.012	69.3	Alta
0.172	0.085	0.015	86.5	Muy alta

Nota: Esta tabla muestra los valores de Arsénico, Plomo y Cadmio, la proporción de contaminantes que genera y la calificación cualitativa que se les otorga

Subsistema: INORGANICOS2

Denotamos como: A= Parámetros inorgánicos

$$A_i = \left\{ (x, \mu_{A_i}(x)) / x \in U, \mu_{A_i}(x): X \rightarrow [0,1] \right\}$$

- $\rightarrow \exists x_k \in A_i; A_i(x_k) = 1; i = 10,11$
- Si x_1 es más próximo a x que el valor x_2 , $\rightarrow A(x_1) > A(x_2)$
- Si x_1 y x_2 son equidistantes de $x \rightarrow A(x_1) = A(x_2)$

➤ Analizamos las características de: Aluminio y Cobre

Según el ECA -agua, considera como valor aceptable mientras que para el Cobre (Cu), es de 0.2 mg/L, para la categoría D1: Riego de vegetales y de 0.5 mg/L, D2: Bebida de animales y para Aluminio (Al), es de 5 mg/L, en ambas categorías.

Cabe mencionar que, de acuerdo a los informes técnicos del ALA- Huaura, no se visualiza que ambos compuestos inorgánicos superen los límites máximos permisibles, sin

embargo, como parte de la evaluación del índice de calidad de agua, si los considera el ANA, por lo tanto, en este trabajo, también se los considera, asumiendo teóricamente la existencia de concentración de ambos químicos en el agua, y si la presencia de alguno de ellos sobrepasa el límite establecido por la normatividad vigente, afecta la calidad de agua, entonces recurrimos a la T_norma, para correlacionar las funciones de pertenencia.

$$A_i = \left\{ (x, \mu_{A_i}(x)) / x \in U, \mu_{A_i}(x): X_i \rightarrow [0,1] \right\}; i = 10,11$$

Tabla 16

Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema Inorganico2

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIVERSO DE DISCURSO</i>	<i>FUNCIÓN DE MEMBRESÍA</i>
<p><i>A₁₀=ALUMINIO</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Valores aceptables ● Altos valores 	<p>$[0 - 8] \frac{mg}{L}$ ECAs =5 mg/L</p>	
<p><i>A₁₁=COBRE</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ● Bajos valores ● Valores aceptables ● Altos valores 	<p>$[0 - 1] \frac{mg}{L}$ ECAs= 10 mg/L 0.2 mg/L * 0.5 mg/L **</p>	
<p><i>B₄</i>= concentraMI</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Muy Baja proporción ● Baja proporción ● Nivel aceptable ● Alta proporción ● Muy alta proporción 	<p>$[0, 100]$</p>	

Nota:

La tabla presenta el conjunto difuso (*A₁₀* y *A₁₁*) con el Universo de Discurso, el valor de ECA-agua, y las funciones de pertenencia o membresía de los subconjuntos difusos Bajo, Normal y Altos Valores.

* Riego de vegetales

** Bebida de animales.

Se construye las reglas de inferencia, por ejemplo:

R₁: Si los valores de $x = x_1$ (Al) es baja y los valores de $x = x_2$ (Cu) es baja entonces la proporción de contaminantes en el agua es baja.

Resultados del Subsistema:

De acuerdo a las reglas difusas que representan el subsistema difuso, se muestra en la Tabla 17, evaluando valores teóricos, que me permite representar posibles valores que arroja el sistema considerando los parámetros. La representación de las reglas de inferencia y resultados gráficos se aprecian en el Anexo 2.

Tabla 17
Resultados de la variable: concentraMI

Aluminio	Cobre	concentraMI	
1	0.1	6.08	muy baja
3	0.195	26	baja
5	0.3	42.5	aceptable
6	0.3	61.2	alto
7	0.8	86.5	Muy alto

Nota:

Esta tabla muestra los valores de aluminio y Cobre la proporción de contaminantes que genera y la calificación cualitativa que se les otorga.

Para alcanzar el objetivo específico 3: Evaluar los parámetros microbiológicos y parasitológico del agua superficial de la Cuenca del río Huaura que afecta la calidad de agua mediante el diseño de reglas de inferencia difuso.

Entre los parámetros microbiológicos consideramos como parte del sistema difuso los coliformes termo tolerantes, debido a que la presencia de este parámetro en el agua se debe a la contaminación fecal, que se da generalmente por los vertidos domésticos a los cuerpos de agua, y según las características del río Huaura, tiene pueblos aledaños a la vertiente del río Huaura, que generan que este agente se incremente.

- **Subsistema: coliformes**

En base a la información de los informes técnicos y del ECA- agua, se construye el universo de discurso y la función de pertenencia.

A_{12} = coliforme termotolerante

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U_{11}, \mu_A(x): X \rightarrow [0,1]\}$$

- $\rightarrow \exists x \in A; A(x) = 1$
- Si x_1 es más próximo a x que el valor x_2 , $\rightarrow A(x_1) > A(x_2)$
- Si x_1 y x_2 son equidistantes de $x \rightarrow A(x_1) = A(x_2)$

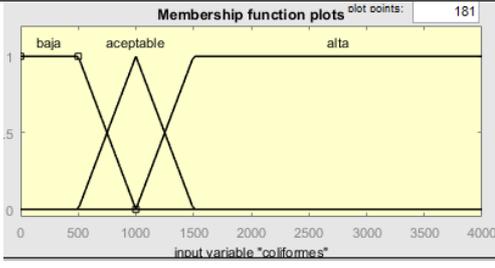
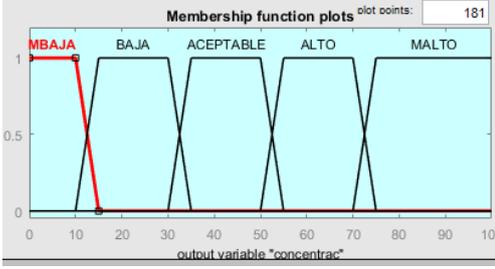
Se construye las reglas de inferencia, por ejemplo:

R_1 : Si la los valores de coliformes termo tolerantes x_1 es baja entonces la proporción del contaminante en el agua es baja.

Quedando establecido que existe relación directa entre la presencia de coliformes fecales y la concentración de contaminantes generados por este agente en el agua, cuyo universo de discurso se valúa de 0 a 100, tal como se observa en las Tablas siguientes.

Tabla 18

Variables Input – Output y Universo de Discurso del subsistema coliformes

<i>PARÁMETRO</i>	<i>UNIVERSO DE DISCURSO</i>	<i>FUNCIÓN DE MEMBRESÍA</i>
<i>A₁₂=COLIFORME TERMO TOLERANTE</i>	$[0 - 40000] \frac{ug}{L}$ ECAs-agua: 1000 ug/L.	
<i>B₅= concentrac</i> <ul style="list-style-type: none"> • Muy Baja • Baja proporción • Nivel aceptable • Alta proporción • Muy alta proporción 	$[0, 100]$	

Nota:

La tabla presenta el conjunto difuso (A_{11}) con el Universo de Discurso, el valor de ECA-agua, y las funciones de pertenencia o membresía de los subconjuntos difusos Bajo, Normal y Altos Valores.

Resultados del Subsistema:

De acuerdo a las reglas difusas que representan el sub sistema difuso, se muestra en la Tabla 19, evaluando valores teóricos, que me permite representar posibles valores que arroja el sistema considerando el parámetro evaluado. La representación de las reglas de inferencia y resultados gráficos se aprecian en el Anexo 2

Tabla 19
Resultados de la variable: COLIFORMES

coliformes	concentrac	
305	13.7	Bajo
720	34.9	Bajo
1000	45	Aceptable
1329	66.5	Alto
2500	79.8	Muy alto

Nota: Valores de coliformes de termotolerantes, proporción de contaminantes que genera y la calificación cualitativa.

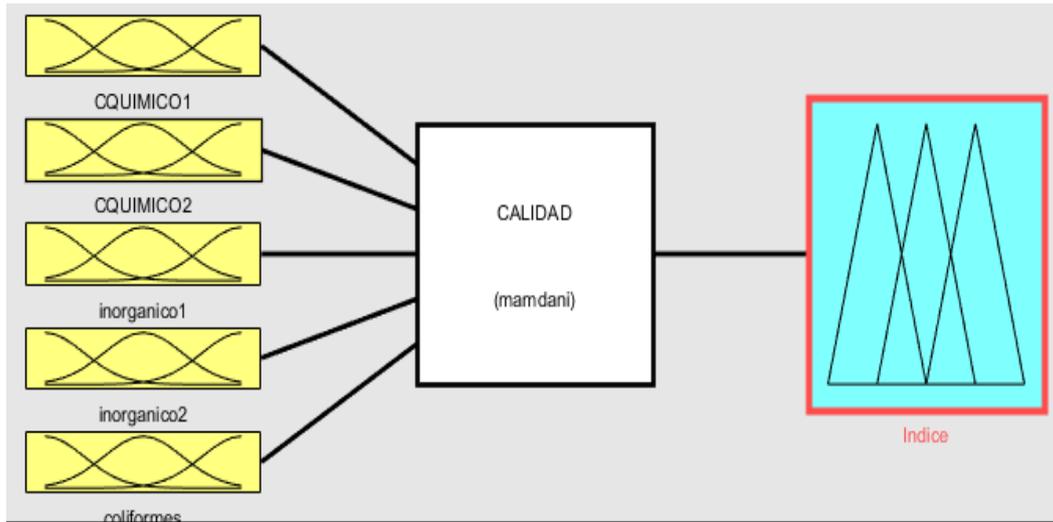
4) *Diseño del Sistema de Inferencia Difuso: CALIDAD*

Iniciamos la Etapa 2, del sistema Fuzzy, y con el propósito de alcanzar el objetivo general: Evaluar la calidad de agua superficial de la Cuenca del rio Huaura, distrito de Huaura, con un sistema de inferencia difuso basado en agentes contaminantes.

Consideramos las variables de salida de la etapa 1: CQUIMICO1(Demanda química del Oxígeno (DBO), Demanda bioquímica del Oxígeno (DQO) y Oxígeno Disuelto(OD)), CQUIMICO2 (PH, Manganeseo y Hierro), concentraNI (Arsénico, Plomo, Cadmio), concentraMI (Aluminio y Cobre), y concentrac(Coliformes), que forman parte de los subsistemas (Ver Anexo 1) , construimos el sistema de inferencia difuso:

Figura 6

Sistema de inferencia difuso: CALIDAD



Definimos:

Y= subsistemas obtenidos de la proporción de la concentración de contaminantes en el agua, debido a la presencia de los parámetros A_k siendo $k=$ algún agente contaminante descritos en la etapa 1, entonces:

$$B_j = \left\{ \left(x, \mu_{B_j}(y) \right) / y \in U_j \wedge \mu_{B_j}(y) \in [0,1] \right\}$$

Se define la variable lingüística índice de calidad de agua (Q)

$$C_1 = \{ \mu_c(z): Y \rightarrow [0,1] \} \text{ y}$$

$\mu_c(z)$ = función de pertenencia de las variables lingüísticas de calidad de agua.

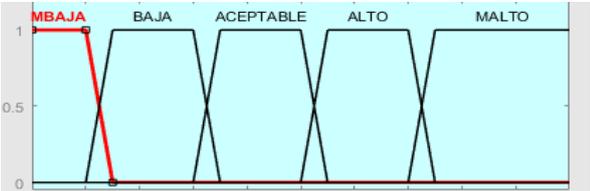
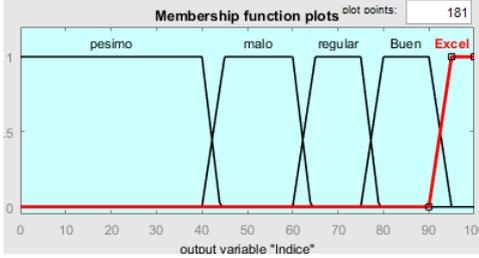
$$Q = \{ \mu_{c_1}(y) \cup \mu_{c_2}(y) \cup \mu_{c_3}(y) \cup \mu_{c_4}(y) \cup \mu_{c_5}(y) \cup \mu_{c_6}(y) \}$$

$$Q = \left\{ \bigcup_1^6 \mu_{A_{c_i}}(x): y \rightarrow [0,1] \right\}$$

A continuación, según lo mostrado en la Tabla 11, Tabla 13, Tabla 15, Tabla 17, y Tabla 19 respectivamente, se clasifica las funciones de pertenencia del OUTPUT del sistema, mediante las variables lingüísticas: Excelente Calidad, Buena calidad, Regular calidad, Mala calidad, Pésima calidad, considerándose funciones trapezoidales, basados en las recomendaciones de la reglamentación gubernamental vigente.

Tabla 20

Universo de Discurso de los parámetros Químicos, inorgánicos y biológicos (Input) e Índice (Output) del Agua

<i>VARIABLES /UNIVERSO DE DISCURSO</i>		<i>FUNCIÓN DE PERTENENCIA</i>
E N T R A D - I N P U T	$B_1 = \text{CQUIMICO1}$ $B_2 = \text{CQUIMICO2}$ $B_3 = \text{concentraNI}$ $B_4 = \text{concentraMI}$ $B_5 = \text{concentrac}$ $[0, 100]^*$	Muy Bajo; Bajo, aceptable, alto y muy alto Trapezoidal todas 
S A L I D A - O U T P U T	$C_1 = \text{Índice}$ $[0, 100]^*$	Excelente Calidad Buena calidad Regular calidad Mala calidad Pésima calidad 

Nota:

* Representa el Universo de discurso expresado en valores de 0 a 100

Donde las reglas de inferencia permiten la variable de salida “índice” que mide el índice de calidad del Agua del río Huaura medidos entre 0 a 100, categorizados tomando como referencia el documento técnico emitido por el ANA, en relación a la metodología de obtención del Índice de Calidad del agua (ICARHS).

Para conocer la calidad del agua del Rio, diseñamos el Sistema basado en reglas fuzzy tipo Mamdani, reglas IF – THEN, cuyas reglas de inferencia, se construye en base a la información registrada en la (Tabla 9), donde relacionamos las variables lingüísticas:

- Excelente:

Para que el rango de resultados que se encuentran en esta categoría, la proporción de contaminación del agua producto de interacciones de agentes contaminantes en el agua, se deben encontrar entre Muy Baja, Baja (min) o no registrar contaminación por ningún efecto

- Bueno:

Para que el rango de resultados que se encuentran en esta categoría, la proporción de contaminación del agua producto de interacciones de agentes contaminantes en el agua, se deben encontrar entre Muy Baja (max), Baja, normal o aceptable (min).

- Regular

Para que el rango de resultados que se encuentran en esta categoría, la proporción de contaminación del agua producto de interacciones de agentes contaminantes en el agua, se deben encontrar entre baja (max) normal o aceptable (min), Alta.

- Malo:

Para que el rango de resultados que se encuentran en esta categoría, la proporción de contaminación del agua producto de interacciones de agentes contaminantes en el agua, se deben encontrar entre normal o aceptable (máx.), Alta, Muy Alta(min).

- Pésimo

Para que el rango de resultados que se encuentran en esta categoría, la proporción de contaminación del agua producto de interacciones de agentes contaminantes en el agua, se deben encontrar entre Alta (máx.), Muy Alta.

Cabe indicar que se usa: Min (operador and)

Por ejemplo:

R_1 : 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).

En este sistema se hace uso del método de defuzzificación: Centroide, generándose 161 reglas de inferencia, que nos permite obtener los siguientes resultados:

Resultados del Sistema:

Usamos los resultados obtenidos de la salida de los subconjuntos fuzzy obtenidos en la primera etapa, como variables de salida CQUIMICO1 (Tabla 11); CQUIMICO2 (Tabla 13); concentraNI (Tabla 15), concentraMI(Tabla 17) y concentrac (Tabla 19) respectivamente, ingresamos los valores seleccionados al sistema como dato de la variable de entrada (INPUT), obteniéndose lo siguiente:

Tabla 21

Resultados del Sistema: CALIDAD

	Proporción de contaminantes					Índice de Calidad de Agua	
	cquimico1	cquimico2	concentraNI	concentraMI	concentrac		
Muy baja	6.08	9.02	6.08	6.08	0	96.4	Excelente
Baja	22.1	29.3	20.8	26	13.7	86.2	Bueno
Aceptable	46	--	40.9	42.5	45	81.3	Bueno
Alto	65.8	55	69.3	61.2	66.5	37.7	Pésimo
Muy alto	80.8	89	86.5	86.5	79.8	20.8	Pésimo

Nota:

Se están utilizando los valores obtenidos en las Tablas 11, Tabla 13, Tabla 15, Tabla 17, y Tabla 19

Analizando los resultados obtenidos en la Tabla 21, se observa, por ejemplo:

Para una proporción aceptable de Cquimico1, contaminantes generados por valores fuera de rango aceptable de DBO, DQO y OD, sin información de contaminantes generados por cquimico2 (Mn, PH y Fe), además de presencia aceptable de contaminantes generados por concentraNI (Pb, As y Cd), presencia aceptable de contaminantes generados por concentraMI (Al, Cu), y por la presencia de proporción aceptable de contaminantes generados por coliformes termotolerantes, la calidad de agua sería de 81.3 que estaría categorizado como Bueno, ante ello el ANA concluye “que la calidad del agua se aleja un poco de la calidad natural del agua, sin embargo las condiciones deseables pueden estar con algunas amenazas o

daños de poca magnitud” (ANA, 2020c), sin embargo se tiene que tener en cuenta que la función de pertenencia “brinda la medición de un grado parcial de la verdad” (Acosta, 2006).

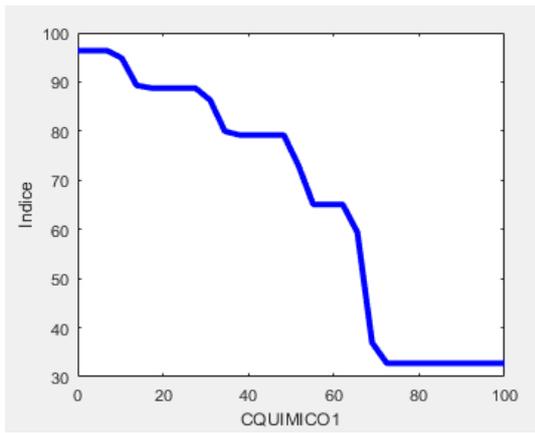
De manera similar se podría interpretar los resultados generados por el sistema de reglas de inferencia difuso, que forma parte del Sistema CALIDAD.

A continuación, se muestran las diferentes correlaciones entre los parámetros físicos, químicos y biológicos con el Índice de Calidad del Agua, cuya variable de salida es Índice, denominado para diferenciarlo ICARHF.

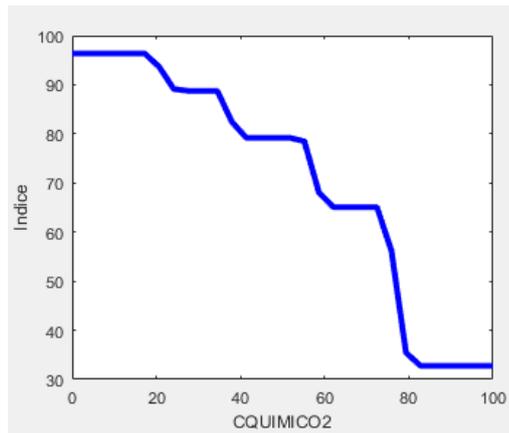
Si observamos la Figura 7 en los gráficos a), b), c), d), e) y f) se visualiza la relación que existe entre la proporción de contaminantes producto de la interacción de parámetros físicos químicos y biológicos en el agua, con el índice de calidad de la misma, donde la relación es inversa, es decir a mayor proporción de contaminantes menor será el índice de calidad del agua; mientras que en la figura 8, se está correlacionando dos grupos de parámetros con el índice de calidad.

Figura 7

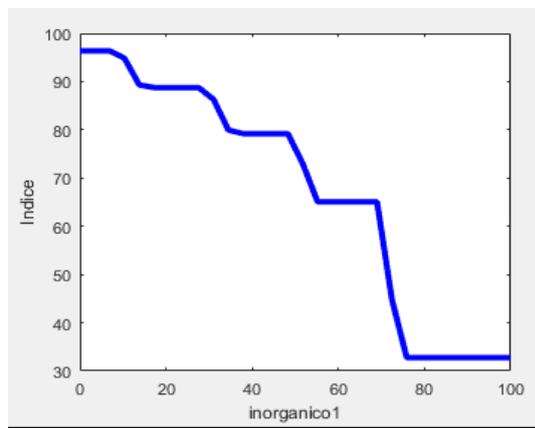
Relación entre la proporción de contaminantes generados por los parámetros y el índice de calidad del agua.



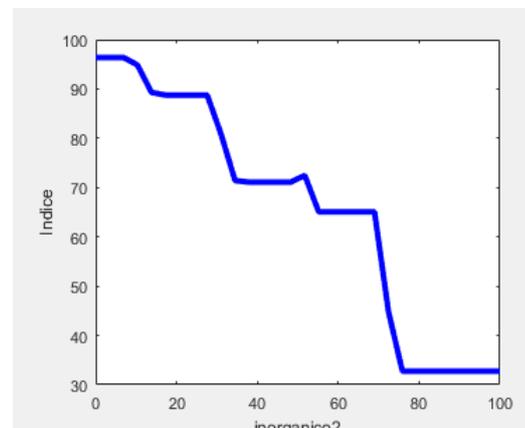
a) Correlación químico1-Índice



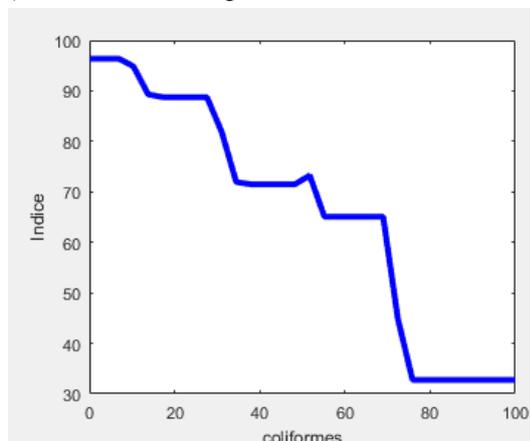
b) Correlación químicos2-Índice



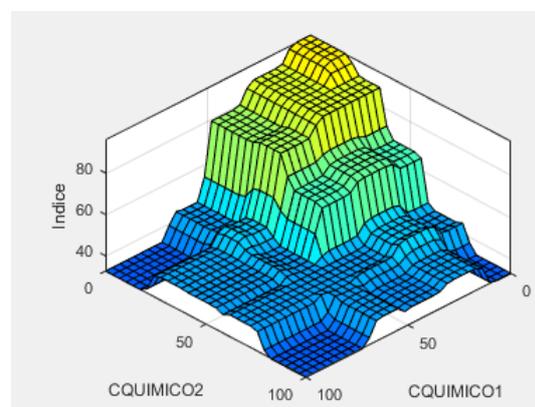
c) Correlación Inorganico1-Índice



d) Correlación inorganicos2-Índice



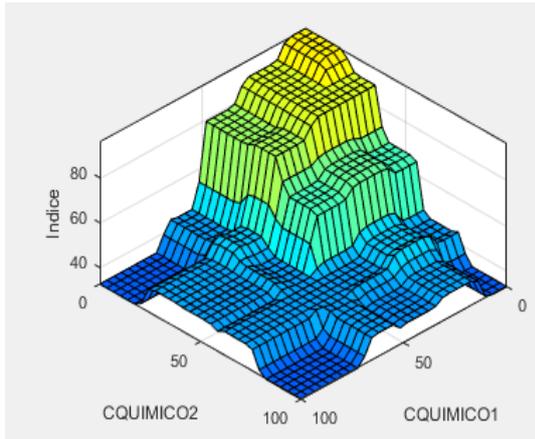
e) Correlación coliformes -Índice



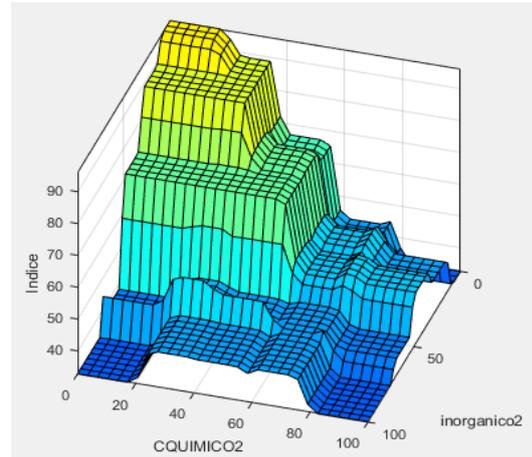
f) Relación entre variables: químicos1-químicos2

Figura 8

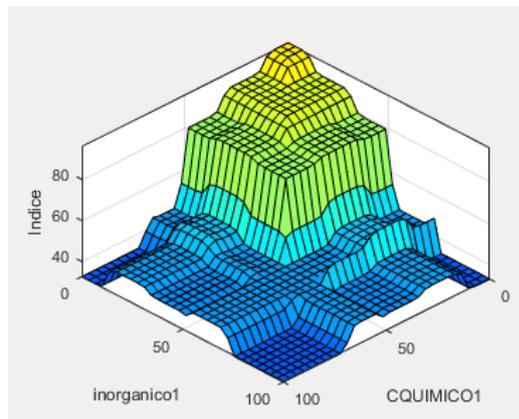
Correlación entre los contaminantes generados por dos grupos de parámetros – índice de calidad del agua



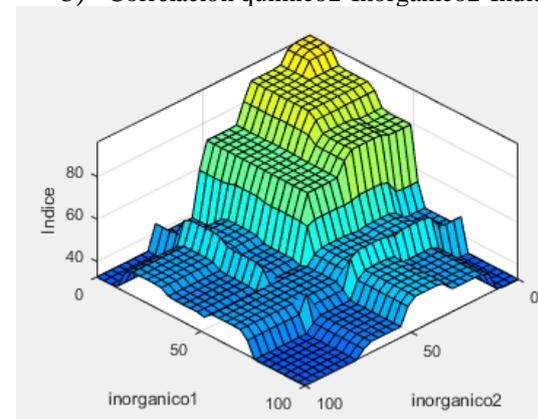
a) Correlación químico2-químico1-Indice



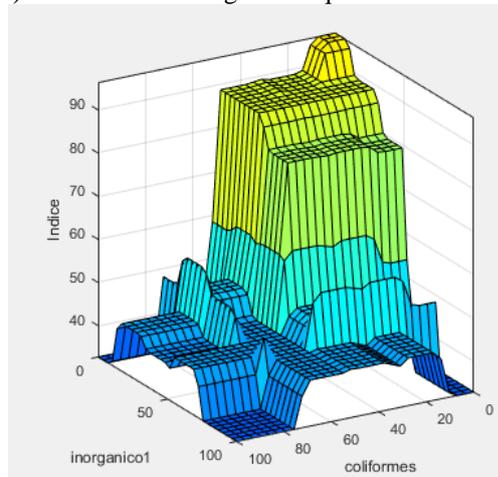
b) Correlación químico2-Inorganico2-Indice



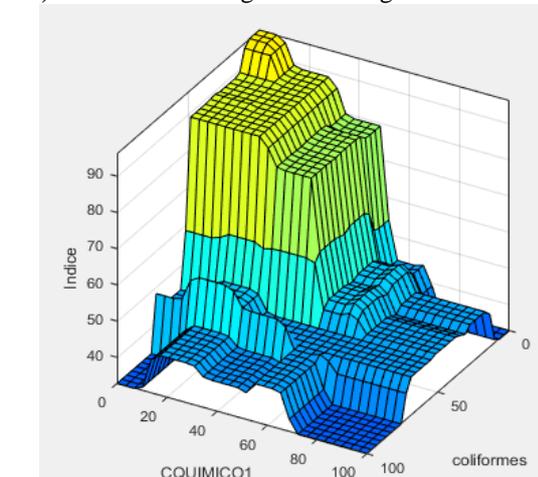
c) Correlación Inorganico1-químico1-Indice



d) Correlación Inorganico1-Inorganico2-Indice



e) Correlación inorganicos1- coliformes - Índice



f) Correlación coliformes- químicos1-Indice

En base a los resultados obtenidos se puede considerar que si es factible evaluar la calidad de agua superficial de la Cuenca del Rio Huaura, distrito de Huaura, con un sistema de inferencia difuso basado en agentes contaminantes.

4.1.2 Diseño de la Interfaz del FIS

1) Interfaz de Usuario del Sistema Difuso: CALIDAD

Para que “sea amigable” con el usuario se propone la siguiente interfaz diseñado con el App Designer del programa MATLAB 2022, en el cual se ha considerado ingresar los valores de los parámetros de calidad de agua, indicando en el mismo, a modo de información el valor de comparación (ECA-agua) y los universos de discurso de cada parámetro considerado, para evitar que el sistema arroje valores fuera de límites establecidos, cada parámetro plenamente identificado con sus unidades correspondientes, además se cita la norma gubernamental, al que se hace referencia, para el diseño y construcción del sistema (Resolución Jefatural N° 084-2020-ANA y el DS N°004-MINAM).

Figura 9

Diseño de la Interfaz de usuario del Sistema Difuso: CALIDAD

Sistema de Inferencia Difuso de Calidad de Agua Superficial (ICARHF) - (EMCG)

Ingrese el resultado del Monitoreo de agua

Quimicos1

DBO [0-100] mg/L **15 mg/L

DQO [0-150] mg/L **40 mg/L

OD [0,10] mg/L ** >4 mg O₂/L

Coliformes Termotolerantes

Coliformes [0,4000] ug/L **1000 ug/L

Quimicos2

PH [0-14] **[0,5-8,5]

Manganeso [0,0,30] mg/L ** 0,2 mg/L

Hierro [0,8] mg/L * 5 mg/L

Inorganicos1

Picloro [0- 0,1]mg/L **0,05 mg/L

Arsenico [0,0,3]mg/L **0,1 mg/L

Cadmio [0,0,1]mg/L **0,01 mg/L

Inorganicos2

Aluminio [0-10]mg/L **5 mg/L

Cobre [0-20] mg NO₂-N/L **1 mg/L

Concentración de Contaminantes

DBO-DQO-OD

Coliformes

pH-Mn-Fe

Pb-As-Cd

Al-Cu

Sub Índice de Calidad de Agua:

ICAMOF

ICAFQF

ICARHF

INDICE DE CALIDAD DE AGUA (ICARHF)

categorizado como:

RECOMENDACIONES

** Resolución Jefatural N°084-2020-ANA imagen referencial

Seleccionar

Nuevo análisis

ICAMOF : INDICE DE CALIDAD DE AGUA AFECTADO POR MATERIA ORGANICA FUZZY
ICAFQF : INDICE DE CALIDAD DE AGUA AFECTADO POR PARAMETROS FISICOS -QUIMICOS-FUZZY
ICARHF : INDICE DE CALIDA DE AGUA FUZZY

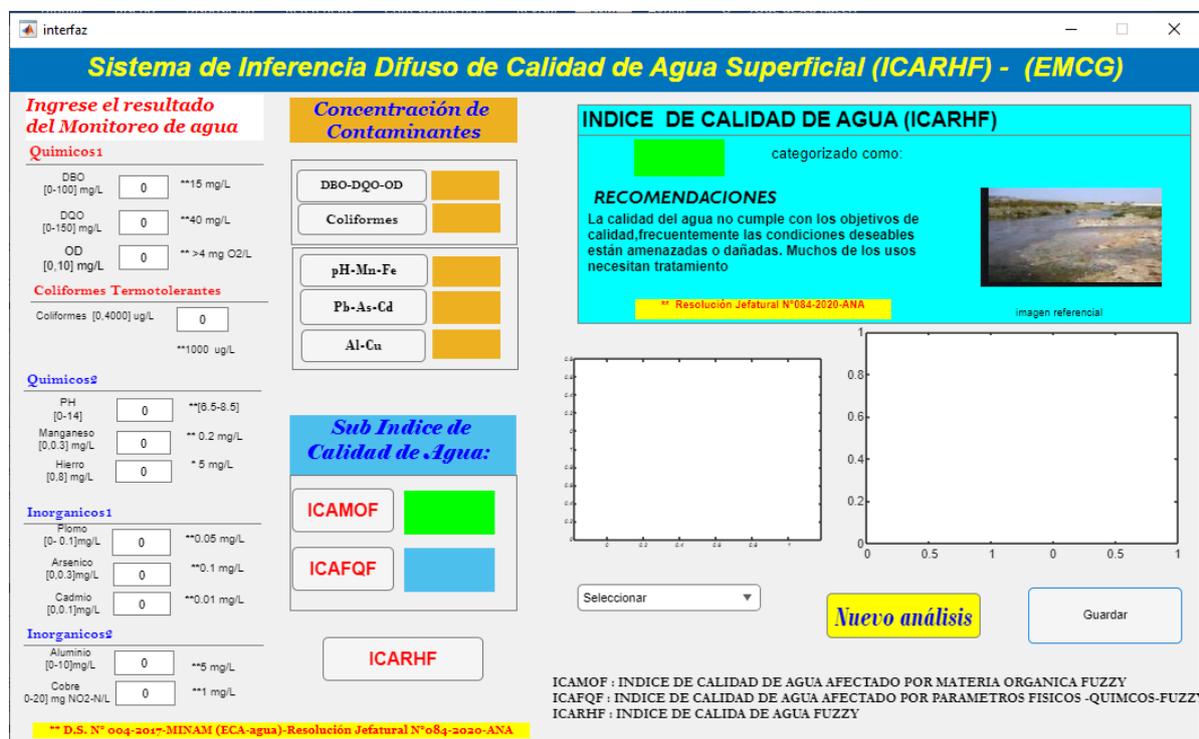
** D.S. N° 004-2017-MINAM (ECA-agua)-Resolución Jefatural N°084-2020-ANA

Cada subsistema identificado como un panel: Quimicos1, Quimicos2, Inorganicos1, Inorganicos2 y Coliformes Termotolerantes, que recibe la información de los resultados de Monitoreo de Calidad de Agua. El sistema evalúa la concentración de los parámetros

registrados en los subsistemas, y además muestra los subíndices ICAMOF, ICAQF, como el ICARHF.

Además, se incluye la recomendación que implica obtener ese resultado, basado en la Resolución Jefatural N° 084-2020-ANA, y una imagen referencial al estado de la calidad del agua, según los resultados. También, se agrega un pop up, que me permite mostrar la relación de la proporción de contaminantes generados por los grupos de contaminantes físicos, químicos y biológicos, presentes en el agua, y el índice de calidad del agua (ICA), en esta sección me permite observar gráficamente, incluso la categorización que se ha diseñado en el sistema FIS, para una mayor interpretación por parte del usuario.

Figura 10
Interfaz de usuario del Sistema de Inferencia Difuso: CALIDAD

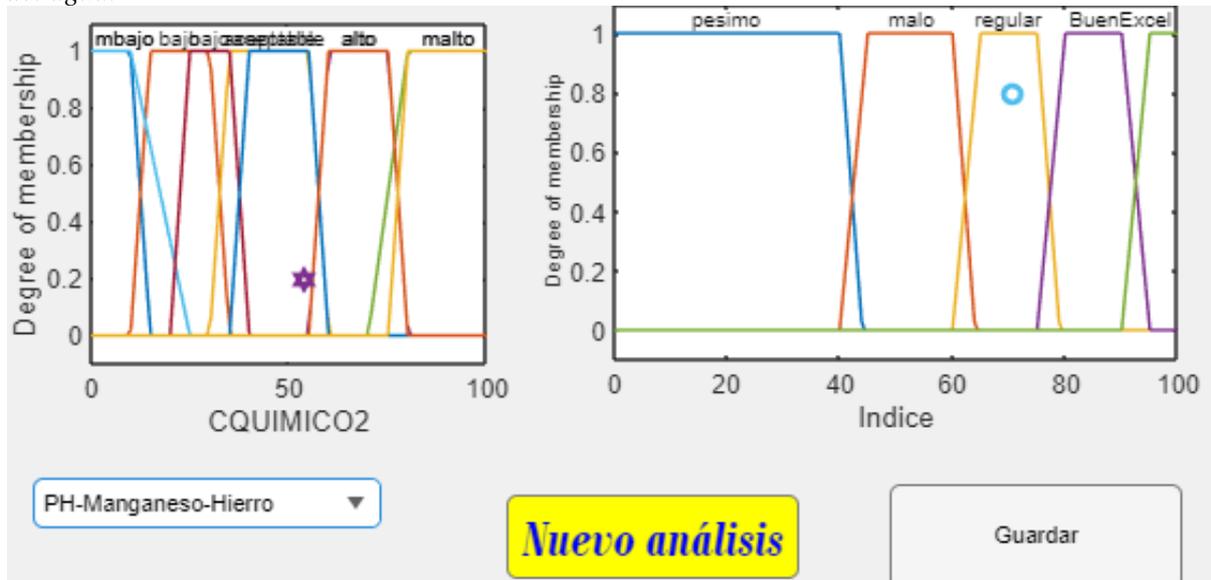


Este sistema FIS, permitirá a los usuarios o entidades gubernamentales interesadas o relacionadas al control de calidad de agua, como el ALA Huaura, el comité de Usuarios de Agua de la zona de estudio, conocer el grado de afectación que tendría el recurso hídrico al incrementarse algunos parámetros, por lo que será factible realizar un diagnóstico adecuado,

a través de una herramienta informática, en el cual se simula resultados basados en inferencias lógicas difusas (Figura 11), a la vez sirve como una alternativa ante la ausencia de resultados de monitoreo de alguno de los parámetros considerados, según la normatividad vigente, debido a diversos factores.

Figura 11

Sección que relaciona la proporción de contaminantes del grupo químico2, con el índice de calidad del agua.



A continuación, se evalúa la calidad de agua del río Huaura, en base a los informes de Monitoreo de Calidad de Agua, proporcionados por el ALA – Huaura.

4.1.3 Evaluación del FIS CALIDAD en el Agua Superficial del Río Huaura.

Según la información proporcionada por el ALA – Huaura, en los Informes Técnicos de Monitoreo de la Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Río Huaura, correspondiente a los años 2019, 2020 y principios del 2021 y al aplicar el sistema de Inferencia Difuso CALIDAD, tomando como base dos puntos de monitoreo que corresponden al Distrito de Huaura: Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA (2019, 2021a,2021b)

- Punto 25 RHuau2: Río Huaura, aguas debajo de la Bocatoma CD Quipico (571 msnm)
- Punto 26 RHuau3: Río Huaura, aguas abajo del puente de Huaura (54 msnm)

Cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 22

Resultados de Monitoreo de calidad de Agua Superficial del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 – 2021

Fecha	Parámetros Físico Químico y Biológico de Calidad de Agua												
	DBO	DQO	OD	Coli	pH	Mn	Fe	Pb	As	Cd	Al	Cu	
03 2019	RHuau2	2	3	7.72	5400	6.85	0.2142	5.745	0.0002	0.00855	0.0001	4.624	0.0083
	RHuau3	2	2	7.73	>40000	7.21	0.21	6.48	0	0.00896	0.0001	5.501	0.0092
10 2019	RHuau2	3	27	5.93	0*	7.85	0.0596	0.478	0.0016	0.0057	0.0001	0.305	0.022
	RHuau3	3	32	4.916	0*	7.075	0.05	0.148	0.0002	0.004	0.0001	0.078	0.002
06 2020	RHuau2	2	16	7.321	4600	8.361	0.0219	0.11	0.0002	0.0042	0.0001	0.184	0.0007
	RHuau3	9	42	8.394	>40000	7.763	0.0192	0.191	0.0016	0.0033	0.0001	0.128	0.002
11 2020	RHuau2	3	2	7.647	490	8.313	0.0249	0.355	0.0009	0.0047	0.0001	0.296	0.0016
	RHuau3	10	37	2.26	40000	7.624	0.0318	0.206	0.0043	0.0036	0.0001	0.154	0.0029
05 2021	RHuau2	2	16	7.688	33	8.495	0.0344	0.27	0.0007	0.0043	0.0001	0.193	0.0015
	RHuau3	5	16	8.365	2800	7.773	0.0245	0.125	0.0004	0.0034	0.0001	0.082	0.0016

Nota

Información obtenida de (Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA, 2021a) (Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA, 2021a) (Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA, 2021b) (Autoridad Local del Agua-ALA HUAURA, 2020a)

* No se tomó muestra de coliformes termo tolerantes

Con esta información, aplicándose la metodología propuesta en el documento de Actualización del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS) basado en la fórmula elaborada por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (ANA, 2020b, p.7), que para el cálculo de la misma, es necesario conocer la cantidad de parámetros que no cumplen el ECA-Agua, en relación al total de parámetros a evaluar (F1-Alcance), además de conocer la cantidad de datos que no cumplen la normativa requiriéndose datos históricos como mínimo información de 4 monitoreos (F2-Frecuencia), además de la totalidad de excedentes que indica la desviación de los datos (resultados del monitoreo), respecto al estándar establecido (F3-Amplitud), obteniéndose el Subíndice 1 y Subíndice 2, siendo el ICARHS, el menor valor de ambos, planteando además escalas de valoración (00-100), estableciendo cinco rangos, de la siguiente manera:

- 95 -100 Excelente
- 80-94 Bueno
- 65-79 Regular
- 45-64 Malo

- 0-44 Pésimo

Al aplicarse la metodología del ICARHS de la Tabla 22, cuyos resultados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23

*Índice de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 -2021-ICARHS -ANA ***

Monitoreo Rio Huaura	ICARHS- ANA		CALIFICACION CRITICA			
	Subíndice S1	Subíndice S2	S1	Escalas S2	ICARHS	
CD Quipico	2019	42.66	74.3	Pésimo	Regular	Pésimo
	2020	99.2	80.7	Excelente	Regular	Regular
	2021	89.4	99.9	Bueno	Excelente	Bueno
Puente Huaura	2019	42.46	99.15	Pésimo	Bueno	Pésimo
	2020	42.44	99.16	Pésimo	Excelente	Pésimo
	2021	42.68	99.9	Regular	Excelente	Pésimo

Nota:

Subíndice1: Índice de Calidad de Agua - Materia Orgánica

Subíndice2: Índice de Calidad de Agua -Parámetros Físicos -Químicos

$$ICARHS = (S_1, S_2)$$

* En este monitoreo no realizaron análisis de coliformes termo tolerantes.

** Se considera la Aplicación

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

Propuesto en la actualización del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales ICARHS) (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2020b,2020c)

Según los resultados del ICARHS, se obtiene que el Índice de Calidad del Agua en los puntos de muestreo CD Quipico, en término general va mejorando la calidad del agua, sin embargo, en el puente de Huaura, que contiene focos de contaminación evidentes en la rivera del rio, la calidad del Agua es Pésimo.

También, es necesario aclarar que para la obtención del índice ICARHS del año 2019, se ha recurrido a información de monitoreos correspondiente a los años 2017 y 2018, puesto que el requisito para el cálculo del índice es necesario información de 4 monitoreos como mínimo, para la aplicación de esa metodología, o considerar registro histórico de todos los parámetros a evaluar, convirtiéndose en una desventaja si se quiere conocer la calidad del agua

en tiempo real si no se dispone de la información previamente registrada en monitoreos similares.

A continuación se procede a evaluar con el sistema difuso CALIDAD, para contrastar los resultados de la Tabla 23, la información que alimenta el sistema son los valores registrados en la Tabla 22, se ingresa al sistema difuso CALIDAD, obteniéndose la proporción de contaminantes y los subíndices ICAMOF (referente a presencia de Materia Orgánica en el Agua) los valores resultados de la aplicación difusa, llámese proporción de contaminantes, que es producto de la interacción de los valores de los parámetros presentes en el agua, resultado de los monitoreos y agrupados según la recomendación de la Autoridad Nacional de Agua (ANA), ingresan como valores de entrada en el sistema difuso, que da como resultado el ICAFQF (Parámetros físicos químicos y metales) y el ICARHF (Índice de calidad del Agua difuso) (Ver Anexo 3).

Si bien, se ha considerado, en base a la normativa vigente (ECA- Agua), los parámetros de Plomo, Arsénico y Cadmio, sin embargo, en ambos puntos de monitoreo seleccionados para la evaluación con el sistema difuso, no superan los Estándares de Calidad reglamentarios en el Perú, tal como Aluminio y Cobre, a excepción de los primeros meses del año 2019, en el cual se encontró presencia de Aluminio en el monitoreo, lo que contrasta con la presencia de Coliformes Termo tolerantes, superando los límites permisibles exigidos según la categoría 3 del agua del Rio Huaura, más aún en el Puente de Huaura, que recibe el vertimiento de aguas residuales de la población adyacente que se ve reflejado en el incremento de proporción de contaminantes por éste parámetro biológico.

Se procede a calificar los subíndices obtenidos basados en la información de la Tabla 22, Anexo 3, Anexo 4, confirmándose que la contaminación por presencia de materia orgánica en el agua del rio Huaura, disminuye la calidad del agua, especialmente en aguas abajo del puente del río Huaura, y en relación a la presencia de los metales seleccionados (Tabla 2), no

superan los ECAS-Agua, lo que no influye considerablemente en la disminución de la Calidad del Agua Superficial.

El ICAMOF en promedio en ambos puntos de monitoreo, es pésimo, descartando el monitoreo de octubre del 2019 (no se realizó al no tenerse el caudal mínimo requerido en esa Zona).

Cabe mencionar, que para la obtención del ICARHF (Índice de Calidad del Agua del Rio Huaura Fuzzy), no se basa en registros históricos, solamente en la información resultado de un monitoreo de agua, es decir el análisis de la calidad de agua es a tiempo real, sin embargo la ausencia de monitoreo de un parámetro afecta el resultado puesto que la lógica del sistema asume que el parámetro se encuentra en el rango permisible, según se muestra en el análisis del monitoreo de calidad de agua de octubre 2019 donde el Sistema difuso arroja Bueno (CD Quipico Ver Anexo 4), por la ausencia de coliformes fecales, Regular en el Puente de Huaura.

Para efectos de comparación con el ICARHS, se consideran sólo los últimos monitoreos de calidad de agua de todos los años.

Tabla 24

Índice de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 -2021- ICARHF

Monitoreo Rio Huaura		Índice de Calidad de Agua Fuzzy			CALIFICACION		
		ICAMOF	ICAFQF	ICARHF	ICAMOF	ICAFQF	ICARHF
CD Quipico	2019	32.74	81.25	48.27	Pésimo	Bueno	Malo
	2020	83.28	88.76	83.65	Bueno	Bueno	Bueno
	2021	96.37	88.76	88.76	Excelente	Bueno	Bueno
Puente Huaura	2019	32.74	70.24	42.45	Pésimo	Regular	Pésimo -Malo
	2020	31.31	88.76	46.23	Pésimo	Bueno	Malo
	2021	32.74	88.33	43.76	Pésimo	Bueno	Pésimo

Nota:

ICAMOF: Índice de Calidad de Agua - Materia Orgánica Fuzzy

ICAFQF: Índice de Calidad de Agua -Parámetros Físicos -Químicos -Fuzzy

ICARHF: Índice de Calidad de Agua Fuzzy

* En este monitoreo no realizaron análisis de coliformes termotolerantes.

** Actualización del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS) (ANA, 2020)

En la tabla comparativa de resultados obtenidos por ambas metodologías, la diferencia sustancial, se basa en que, para la obtención del ICARHS, las frecuencias representan el número de datos, que no cumplen los ECAs Agua, sobre la cantidad total de datos, mientras que el sistema CALIDAD, evalúa los resultados por cada monitoreo sin necesidad de evaluar la frecuencia, considerando todos los parámetros y presenta el resultado a tiempo real del índice de calidad del líquido elemento. Sin embargo, al no considerar como referencia datos históricos, podría dar información errónea, para tal caso, se recurre al análisis personalizado por cada parámetro (Ver Figura 11). Al evaluarse cada parámetro independiente, también permite conocer el porcentaje de afectación a la variación de un indicador, sin necesidad de conocer obligatoriamente el resultado de todos los parámetros requeridos, esto permite identificar el grupo de sustancias que están afectando el ecosistema natural, y sirve por lo tanto de una herramienta computacional, basado en reglas de inferencia difuso, para plantear programas de mitigación y control de la contaminación, identificar puntos de muestreo que son álgidos y tomar las medidas que corresponde a las autoridades inherentes en el control de la salud y del bienestar común.

Tabla 25
Resultados del ICARHS Vs ICARHF en CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 - 2021

Monitoreo Rio Huaura		Índice de Calidad de Agua			Índice de Calidad de Agua Difuso		
		S1	S2	ICARHS	ICAMOF	ICAFQF	ICARHF
CD Quipico	2019	42.66	74	42.66	32.74	81.25	48.27
	2020	99.2	81	99.2	83.28	88.76	83.65
	2021	89.4	100	89.4	96.37	88.76	88.76
Puente Huaura	2019	42.46	99	42.46	32.74	70.24	42.45
	2020	42.44	99	42.44	31.31	88.76	46.23
	2021	42.68	100	42.68	32.74	88.33	43.76

Nota:

ICAMOF: Índice de Calidad de Agua - Materia Orgánica Fuzzy

ICAFQF: Índice de Calidad de Agua -Parámetros Físicos -Químicos -Fuzzy

ICARHF: Índice de Calidad de Agua Fuzzy

* En este monitoreo no realizaron análisis de coliformes termotolerantes.

Según el coeficiente de correlación estadística entre los resultados del ICARHS vs ICARHF, se obtiene 0.92, representando una correlación alta y positiva, para validar los resultados, se aplica la prueba estadística de t- Student, asumiendo varianzas diferentes para dos colas, se plantea las hipótesis:

Hipótesis 1:

H_0 : No existe diferencia significativa en los resultados promedios de los subíndices S1 y el ICAMOF

H_1 : Existe diferencia significativa en los resultados promedios del subíndice S1, y ICAMOF

Hipótesis 2:

H_0 : No existe diferencia significativa en los resultados promedios del subíndice S2 y el ICAFQF

H_1 : Existe diferencia significativa en los resultados promedios del subíndice S2, y el ICAFQF

Hipótesis 3:

H_0 : No existe diferencia significativa en los resultados promedios del ICARHS y el ICARHF

H_1 : Existe diferencia significativa en los resultados promedios del ICARHS y el ICARHF

Para una prueba t-Student de dos colas, con n= 6 observaciones y a un nivel de confiabilidad estadística del 95%, obtiene los siguientes resultados, utilizado el Software Excel,

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Tabla 26
Comparación entre ICARHS VS ICARHF

	<i>S1</i>	<i>ICAMOF</i>	<i>S2</i>	<i>ICAFQF</i>	<i>ICARHS</i>	<i>ICARHF</i>
Media	59.806	51.53	92.185	84.35	59.807	58.85
Varianza	723.487	897.35	133.596	56.57736	723.488	455.50
Grados de libertad	10		9		10	
Estadístico t	0.5036		1.3916		0.068	
p (T<=t) dos colas	0.6255		0.1974		0.947	
Valor crítico de (dos colas)	2.228		2.2622		2.228	
Decisión	p>0.05		p>0.05		p>0.05	
	Se acepta la hipótesis nula para el ICAMOF; ICAFQF e ICARHF					

Nota:

* Los resultados se obtuvieron a través del Microsoft Excel

Se concluye que con una confiabilidad estadística del 95%, se puede asegurar que no existen diferencias entre los resultados de ICARHS e ICARHF en cuanto a la valoración de la calidad del agua y de los sub índices.

4.2 DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACION

En esta investigación se propone un Sistema de Inferencia difusa que obtiene el Índice de Calidad del Agua del Río Huaura, mediante reglas difusas (ICARHF), en base al ECA-Agua, y las recomendaciones del ANA, se han evaluado doce parámetros, los cuales agrupan parámetros relacionados con la materia orgánica (ICAMOF), DBO, DQO, OD y Coliformes termotolerantes, y para los parámetros Físico Químico y Metal (ICAFQF), que conforman pH, As, Al, Mn, Fe, Cd, Pb y Cu (ANA, 2020c, p. 7), arrojan los resultados (Tabla 24), donde se evalúa la calidad de agua con dos subíndices ICAMOF e ICAFQF cuyos resultados tienen concordancia con los obtenidos, al aplicar la metodología del ANA (Tabla 23) donde también se evalúa con dos Sub índices S1 y S2 que permite hallar el ICARHS, que es el mínimo valor de S1 y S2 (ANA, 2020c, p. 10), ver los resultados comparativos (Tabla 25).

En el diseño del sistema difuso para la obtención del ICARHF se consideró dos etapas, donde en la etapa 1, se ingresa los valores de los parámetros resultados de los monitoreos de Calidad de Agua, de acuerdo a las reacciones que puedan generar como parte de su interacción en el agua, y/o propiedades comunes, tal como lo menciona Sánchez Barboza, L. (2015), quien agrupa los compuestos como familia de contaminantes según su tipología, en ésta investigación se agrupa DBO, DQO y OD, como parte de un subsistema a la que denominamos químicos¹, ya que son parámetros químicos, cuya interrelación permite conocer la cantidad de materia orgánica biológicamente degradable; de manera similar se procede con Mn y Fe (químicos²), puesto que ambos metales tienen características similares y están

relacionados con el pH, ya que, a alta concentración de hierro y manganeso se debe a los bajos valores de pH (Burbano & Sánchez, L. D. , 2007). Por su parte, el arsénico (venenoso y toxico), Cadmio (tóxico, pero no letal) cuyos orígenes se derivan por descargas industriales, tal como el plomo, presente en bajas concentraciones en suelos contaminados y tóxico para organismos acuáticos los cuales han sido organizados como parte del subsistema Inorganicos1. El exceso de metales como el Aluminio, Mercurio Plomo y otros, es de relevancia tóxica para las plantas (Pabón *et al.*,2020), y a niveles superiores del Cobre, genera efectos tóxicos en el crecimiento de las plantas (Flores, 2018), ambos metales forman parte del subsistema difuso Inorganicos2, y coliformes termo tolerantes mide la contaminación fecal, se registra como parte del subsistema coliformes. Por su parte Quiñones-Huatari *et al* (2020) evalúan seis parámetros, y agrupan OD y DBO, como Grupo 1, Coliformes fecales (Grupo 3); Nayak *et al.* (2020), considera cinco parámetros OD, DBO, turbidez, sólidos totales y pH.

En cada subsistema se identifican el universo de discurso, y se categoriza en variables de entrada(INPUT) Bajo, Aceptable y Alto, (Tabla 10, Tabla 12, Tabla 15, Tabla 17, Tabla 20) de la primera etapa y se consideran funciones triangulares, para la función Aceptable, en referencia a los valores ECAs ($x_k \in U_k$) y $\mu_{A_k}(x_k) = 1$, para algún parámetro k y funciones trapezoidales cuando el límite máximo permisible en el ECA es un intervalo ($I_k = [0, x_n] \subset U_k$) y $\mu_{A_k}(I_k) = 1$; mientras que para Bajo y Alto, son funciones trapezoidales; en cada subsistema se registra cinco subconjuntos fuzzy en la variable de salida (OUTPUT) que representa la proporción de contaminantes con las variables lingüísticas Muy Baja, Baja, Aceptable, Alta, y Muy alta, con funciones de pertenencia trapezoidales, relacionados proporcionalmente al universo de discurso del parámetro k ; estos valores ingresan como variable de entrada para el fuzzy CALIDAD, y sus variable de salida del ICARHF, se categoriza como Pésimo[$0 < ICARHF \leq 44$], Malo[$45 < ICARHF \leq 64$], Regular[$65 <$

$ICARHF \leq 79$], Bueno [$80 < ICARHF \leq 94$], y Excelente [$95 < ICARHF \leq 100$], de manera similar se analiza para ICAMOF e ICAFQF.

En esta investigación se obtiene los subíndices relacionado a la generación de Materia Orgánica (ICAMOF) y la concentración de agentes químicos (ICAFQF), basado en 12 parámetros, según la normativa peruana vigente, Dutra de oliveira et al (2014), utilizan la información de nueve parámetros y los agrupa en IBF (Índice Biológico Fuzzy) y el índice físico químico fuzzy (IFQF), utiliza datos diarios extraídos de informes de control operativo, en nuestro caso, utilizamos información de los monitoreos de calidad del agua local. Por su parte Dutra de Oliveira, *et al* (2014) basado en el aporte de Souza y Libânio (2009), con funciones trapezoidales y triangulares, dividiendo en subconjuntos fuzzy Bajo (B), Medio (M), Alto(A) y para la salida de la primera etapa tiene respuesta los índices IBF e IFQF divididos en cinco conjuntos Fuzzy: Pésimo(P) [$0 < IQABF \leq 19$], Malo [$19 < IQABF \leq 36$], Regular (RG) [$36 < IQABF \leq 51$], Bueno (B) [$51 < IQABF \leq 79$], y óptimo (OP) [$79 < IQABF \leq 100$]. Según refieren los autores los límites considerados para la elaboración de los subconjuntos fuzzy, se basan en la reglamentación correspondiente de Brasil.

El enfoque utilizando para la elaboración del índice de calidad de agua difuso usado es el del tipo Mamdani e implementado en Matlab y considerando como método de defuzzificación el centroide, representando el centro de gravedad, se hizo uso de funciones triangulares y trapezoidales (Quiñones_Huatari *et al* (2020), Sánchez Barboza, L. (2015), Dutra de Oliveira, *et al* (2014)), mientras Nayak *et al.* (2020) considera que el método de defuzzificación de la bisectriz funciona mejor.

En esta investigación, se considera la información de dos puntos de monitoreo CD Quipico, donde en términos generales se obtiene que el río Huaura tiene Buena Calidad, en esta zona, sin embargo en el punto de monitoreo el Puente Huaura, en los tres años presenta una pésima calidad del agua del río, y se explica porque la zona de evaluación es adyacente

a la ciudad y capital del distrito de Huaura, y se visualiza gran cantidad de residuos orgánicos y basurales en la ribera del río, generando un problema medioambiental y cultural, más aún que aguas abajo, se encuentra el distrito de Carquín, donde se utiliza el agua del río, para irrigar los vegetales que se expenden en los mercados de Huaura, Huacho y Carquín.

Diversos estudios coinciden que los principios de la lógica difusa permite evaluación de la información subjetiva (Vergara Galloso, 2008), que debe ser correlacionada para validar los resultados, en nuestra investigación se obtiene un coeficiente de correlación de 0.95, y para $p_valor=0.6255>0.05$, para una prueba t-student de dos colas asumiendo varianzas diferentes, se acepta que estadísticamente no hay diferencia significativa entre los resultados obtenidos con el ICARHS y el ICARHF (Ver Tabla 26), y concuerda con Dutra de Oliveira, *et al* (2014), quienes obtienen que los resultados del índice difuso (IQABF) presenta un correlación significativa ($R^2=91\%$), con el IQAB mientras que Quiñones_Huatari *et al* (2020) obtiene de $R^2 = 0.81$, entre el índice difuso (DQWDI) y los valores del índice NSF WQI.

De acuerdo a las conclusiones obtenidas por diferentes investigadores consideran que el enfoque de lógica difusa es sensible a todos los parámetros (Nayak *et al*, 2020), es una herramienta eficaz para abordar problemas de calidad de agua (Quiñones- Huatangari *et al.*, 2020), porque 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, otra facilidad que se puede obtener con un sistema difuso, es 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 de estudio no son viables y asequibles obtener esa información que se requiere para la evaluación de los impactos ambientales generados por diversas actividades antropogénicas o por fenómenos naturales que afecta la calidad del líquido elemento.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.1. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

En base a los resultados de la investigación obtenidos y descritos previamente, se puede concluir lo siguiente:

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...

Según lo desarrollado, 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 quienes en base a su conocimiento experto permite formular adecuadamente las reglas de inferencia.

Un sistema de inferencia difuso (CALIDAD), es sensible a la información obtenida de los agentes contaminantes y al objetivo para el cual será destinada el agua, ya que permite identificar los parámetros contaminantes y simular su interacción, y el cómo afecta la calidad del agua, en base a los requerimientos del usuario, de manera amigable y sencilla en el manejo.

Un sistema de inferencia difuso, es una herramienta que permitirá evaluar los impactos ambientales generados por diversas actividades antropogénicas o por fenómenos naturales que afecta la calidad del líquido elemento, a tiempo real.

1.2.RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

En base a los resultados de la investigación obtenidos y descritos previamente, se recomienda lo siguiente:

Revisar la normativa vigente, en relación a los parámetros considerados como parte de la evaluación de la calidad de agua, ya que, en la revisión de los informes de calidad de agua locales, existen parámetros que exceden los límites permisibles, pero no están considerados como parte de los requisitos de análisis de agua por la Autoridad Nacional del Agua, y que varía según la zona de estudio.

Revisar las reglas de inferencia y los agentes contaminantes a considerar según la naturaleza y categorización del agua, que se requiera evaluar mediante un índice de calidad difuso.

A las entidades gubernamentales, recurrir a una herramienta de calidad de agua difuso, que les permitirá simular resultados, y les ayudará a programar actividades de mitigación dirigida a las comunidades adyacentes a los cauces de agua.

Replicar la metodología con funciones de pertenencias diferentes a las triangulares y trapezoidales, para hacer un contraste con los resultados obtenidos en el Sistema de inferencia difuso CALIDAD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H. N. (2006). *Diseño de Controladores dedicados a la lógica difusa*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.
- Aguilar Ibarra, A. (2010). *Calidad del agua : un enfoque multidisciplinario*. Mexico: UNAM.
- Aguirre, A., Palomino, E., & Salazar, G. (2017). Aplicación de la lógica difusa para determinar la calidad de cuerpos de agua de la cuenca del río Rímac. *Revista TECNIA*, 73-78.
- Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA. (2019a). *Informe técnico de los resultados del monitoreo de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura*. Autoridad Nacional del Agua . Huacho: ALA HUAURA.
- Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA. (2021a). *X Monitoreo de la Calidad de los recursos hídricos superficiales en la Unidad Hidrográfica Huaura 13756*. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Huacho: ALA Huaura.
- Autoridad Local del Agua -ALA HUAURA. (2021b). *XI Monitoreo de la Calidad de los recursos hídricos superficiales en la Unidad Hidrográfica Huaura 13756*. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Huacho: ALA HUAURA.
- Autoridad Local del Agua-ALA HUAURA. (2020a). *Informe técnico de los resultados del Primer Monitoreo de la Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura*. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Huacho: ALA HUAURA.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2018). *Metodología para la Determinación del Índice de Calidad de Agua ICA - PE, aplicado a los cuerpos de agua continentales superficiales*. Lima: Autoridad Nacional del Agua.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2020b). *Resolucion Jefatural N°084-2020-ANA*. LIMA. Obtenido de www.ana.gob.pe
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2020c). *ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES (ICARHS)*. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Lima: Autoridad Nacional del Agua (ANA).
- Ayala, M. (2017). *Uso del territorio y la calidad de agua en las microcuencas Rumiyacu y Mishquiyacu para una gestión eficiente de los recursos hídricos, Moyobamba 2016*. Universidad Nacional de San Martín Tarapoto (Tesis de maestría), Tarapoto.
- Behar, D. (2008). *Metodología de la Investigación*. Ediciones Shalom.
- Burbano, L., & Sánchez, L. D. . (2007). Remoción de Hierro y Manganeseo por oxidación - filtración para agua potable. En Restrepo, I., Sánchez, L., A. Galvis, J. Rojas, & I. Sanabria, *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de metas del milenio* (págs. 288-299). Cali - Colombia: Universidad del Valle.
- Cabezas, C. (2018). Enfermedades infecciosas relacionadas con el agua en el Perú. *Rev Perú Med Exp Salud Publica*, 309-316.
- Carvajal Serna, L. (2013). Un modelo de gestión de la calidad y cantidad de agua con lógica difusa gris para el río Aburrá. *Revista Ingenierías Universidad de Medellin*, 59-74.
- Carvalho de Barros, L., & Carlos Bassanezi, R. (2014). *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática*. Campinas: coleção IMECC – Textos didáticos.
- Chira, J., & Vargas, L. (2010). Caracterización Química de Aguas y Sedimentos. En Villacorta, S., Chira, J., Ochoa, M., Sánchez, M., W. Pari, & M. Valencia, *Estudio Geoambiental de la Cuenca del Rio Huaura*. Lima, Perú: INGENMET.

- DECRETO SUPREMO N°004-2017-MINAM. (2017). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias*. Lima, Perú: Diario Oficial El Peruano.
- Diciembre, S. (2017). Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno- Kang (TSK). (*Tesis de grado*). Universitat Jaume, Castellon de la Plana.
- Dimas, L. (2011). Calidad del Agua del Rio Huallaga - Tingo Maria. *Tesis para optar el título*. Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo Maria.
- Dutra de Oliveira, M., Texeira de Rezende, O., Alves Correa Oliveira, S., & Libânio, M. (2014). Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy. *Eng Sanit Ambiental*, 361-372.
- Flores, R. (2018). Efectos adversos de metales pesados en la agricultura de la cuenca baja del rio Huaura-provincia de Huaura 2017. *REvista CIENCIA y TECNOLOGÍA*, 119-131.
- Galindo Gómez, J. (sf). Conjuntos y Sistemas Difusos (Lógica Difusa y aplicaciones). Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación Universidad de Málaga.
- González, C. (sf). *Lógica difusa. Una introducción práctica*. Carlos.Gonzalez@uclm.es. Obtenido de <https://www.esi.uclm.es>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). *Estadísticas Ambientales- Informe Técnico N°04*. Lima: INEI.
- Ley N° 29338. (31 de marzo de 2009). Ley Recursos Hidricos. Lima: Diario Oficial El Peruano.
- Martínez, N., & Andrade, H. (2016). Integración de la lógica difusa a la dinámica de sistemas para la selección de terrenos de cultivos agrícolas. *Revista Elementos* , 149-166.
- Menendez, A. (2010). *Transporte de Contaminantes en el medio acuatico*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Meza, V. (2016). Calidad del Recurso Hidrico de la Subcuenca del Rio Lampa - Huancayo. (*Tesis*). Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.
- Nayak, J. G., Patil, & Patki, V. K. (2020). Development of water quality index for Godavari River (India) based on fuzzy inference system. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 10350.
- Oladipo, J., Akinwumiju, A., Aboyeji, O., & Adelodun,, A. (2021). Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: A case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria. *Environmental Challenges*, 100038. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100038>.
- Pabón, S., Benítez, R., Sarria-Villa, A., & 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.
- Peña, F., Renou, F., Condorio, E. , Sánchez, M., & Pan, W. . (2019). *Hidrogeología de la cuenca del Rio Huaura(13756)-Región Lima*. Lima: INGEMMET.
- Quiñones- Huatangari, L., Ochoa T., L., Milla-Pino, M., Bazan, J., Gamarra T., O., & Rascón, J. (2020). Water quality index using fuzzy logic Utcubamba River, Perú. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(1), 6-18. doi:<https://doi.org/10.22267/rcia.203701.124>
- Reyna, D. (2018). *Fundamentos de Matemática Difusa*. Fundación Universitaria Konrad Lorenz.
- Ross, T. (2010). *Fuzzy Logic whit Engineering Applications*. USA: John Wiley & Sons.

- Sánchez Barboza, L. (2015). Control borroso para la valoración del impacto ambiental generado por contaminantes emergentes en aguas residuales hospitalarias. *Gestión y Ambiente*, 81-93.
- Sierra Perez , C. (2011). *Calidad del agua Evaluación y diagnóstico* . Bogotá: Ediciones de la U.
- Souza, A., Matsura, E., & Miranda, J. (2005). Teoría de Conjuntos Fuzzy aplicada al estudio de la dinámica del agua y de los solutos en el suelo. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 275-279.
- Terrado, M., Barceló, D., Tauler, R., Borrell, E., & de Campos, S. (2010). Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 29(1), 40-52.
- Tremante, P., & Brea, E. (2014). Una visión de la teoría difusa y los sistemas difusos enfocados al control difuso. *Actualidad y Nuevas Tecnologías*, 121-136.
- 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*, 127-135.
- Yogendra, K., & Puttaiah, E. (2008). Determination of water quality index and suitability of an urban water body in Shimoga Town, Karnataka. *Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference, Jaipur, Rajasthan, India*, , 342-346.
- Zatarain, O. (2011). *Lógica Difusa*. Obtenido de https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/icbi/asignatura/logicaDifusa.pdf

Fuentes Electrónicas:

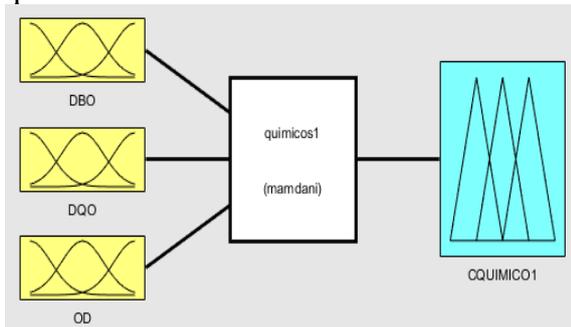
- <https://water.usgs.gov/gotita/characteristics.html>
- Facsa . (01 de enero de 2017). *Facsa. ciclo integral del agua*. Obtenido de <https://www.facsa.com/>
- Organización Mundial de la Salud. (15 de Febrero de 2018). *Organización Mundial de Salud*. Obtenido de Web site OMS: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- Ropero Portillo, S. (05 de Noviembre de 2020). *Ecología Verde*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/que-son-los-agentes-contaminantes-2711.html#:~:text=Cuando%20hablamos%20de%20agentes%20contaminantes,%3A%20f%C3%ADsicos%2C%20qu%C3%ADmicos%20y%20biol%C3%B3gicos>
- Swistock, B. (17 de Agosto de 2021). *Interpretación de los análisis del agua de riego*. Obtenido de Web site PennState Extension: <https://extension.psu.edu/interpretacion-de-los-analisis-del-agua-de-riego>

ANEXOS

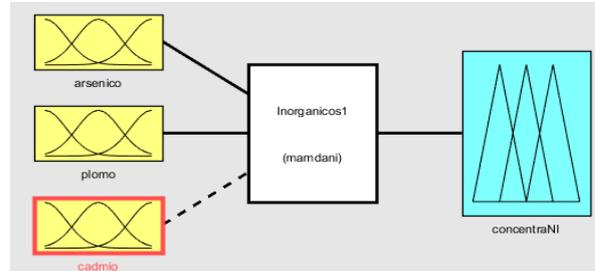
Anexo 1

SUBSISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSO

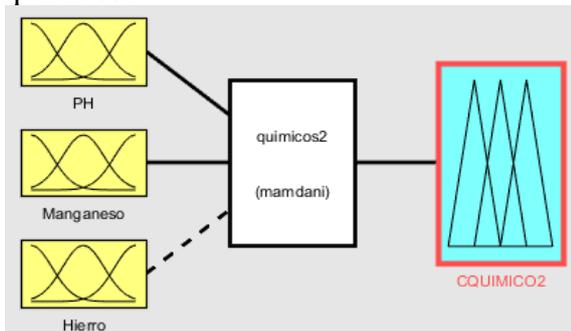
Subsistema de inferencia difuso quimicos1



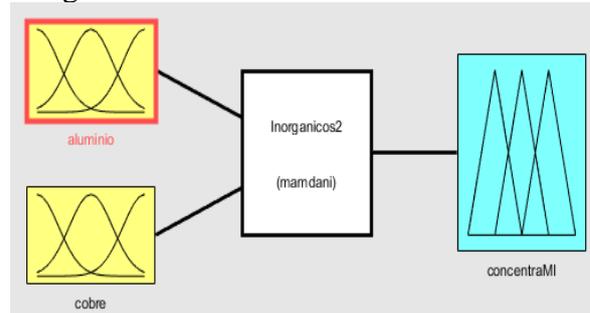
Subsistema de inferencia difuso inorganicos1



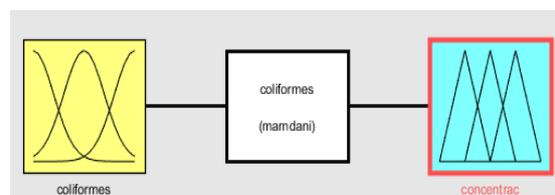
Subsistema de inferencia difuso quimicos2



Subsistema de inferencia difuso inorganicos2

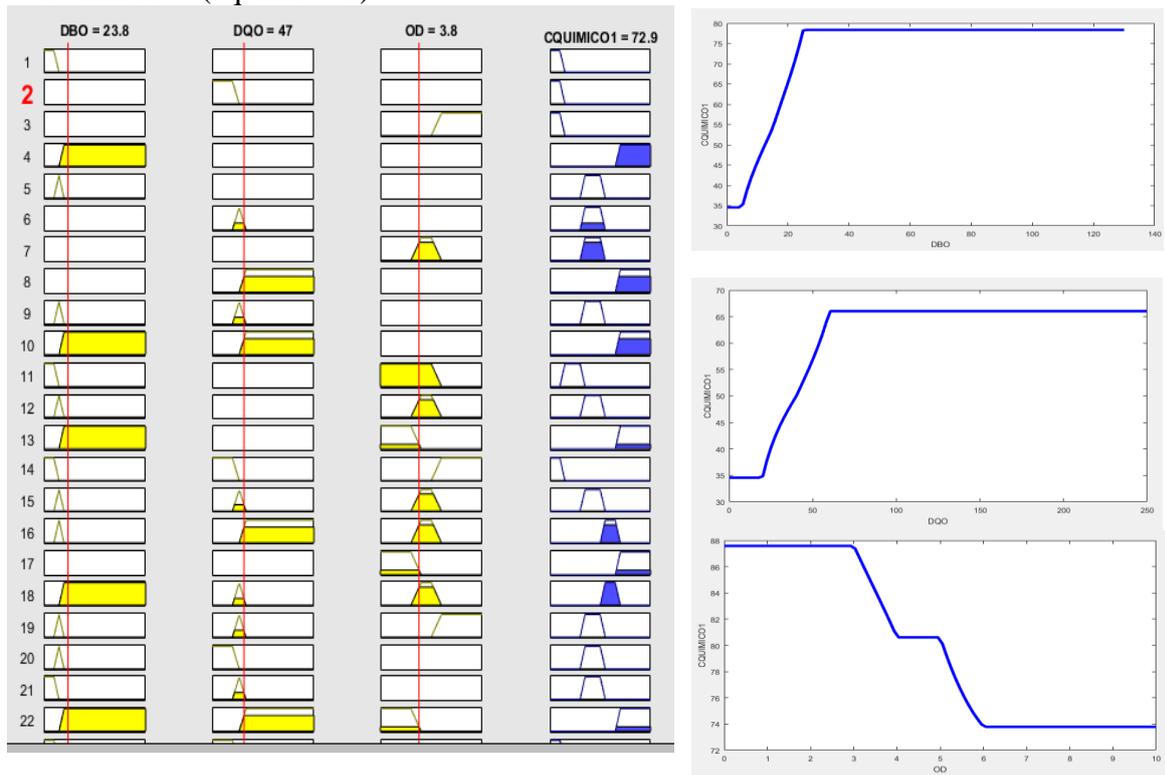


Subsistema de inferencia difuso coliformes

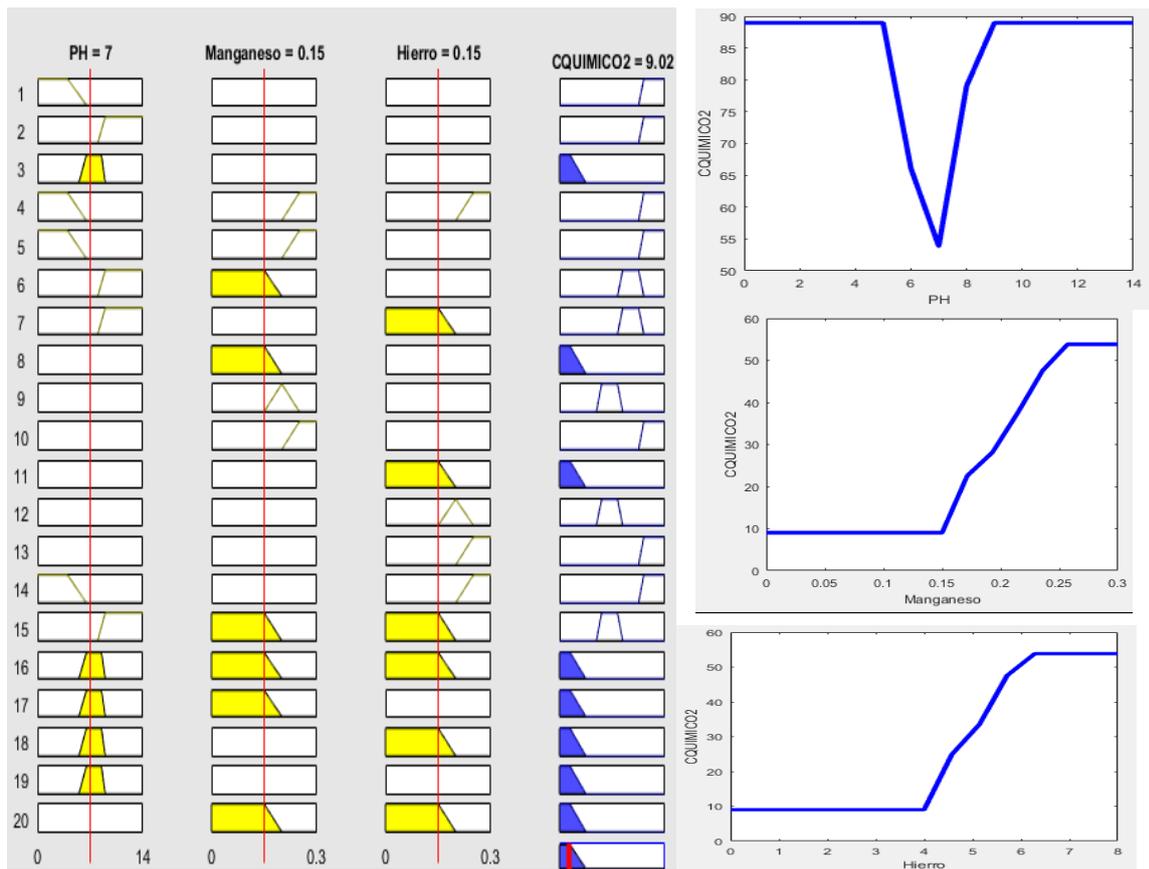


ANEXO 2 Reglas de Inferencia y comportamiento

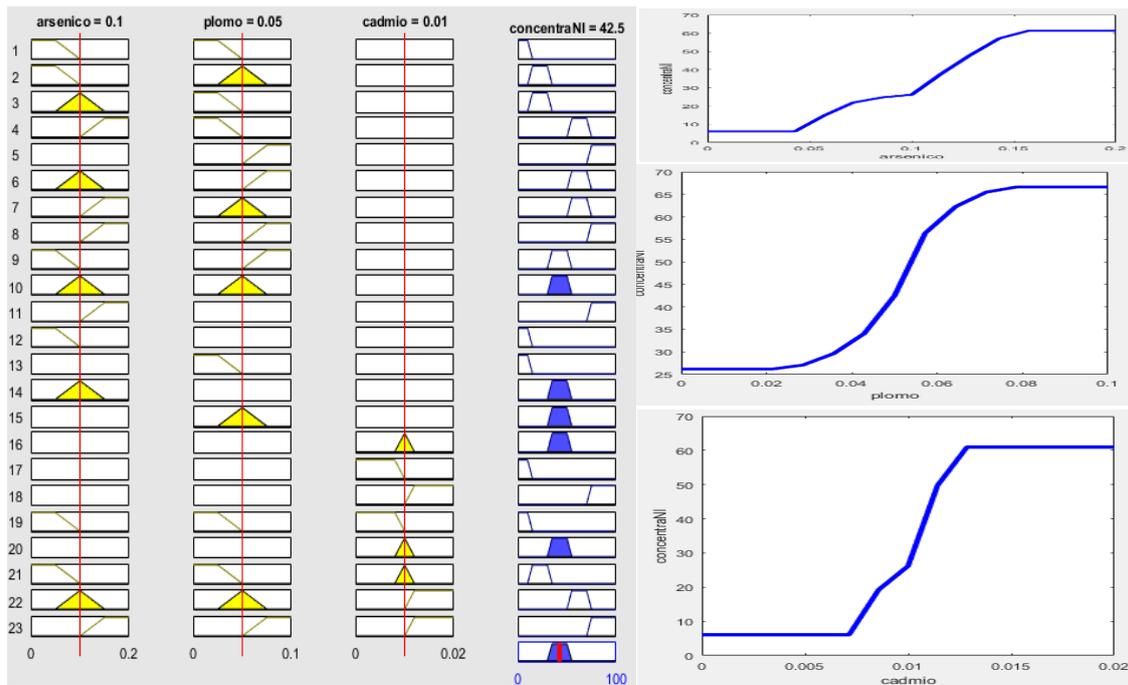
Reglas inferencia y comportamiento de DBO, DQO y OD y la concentración de contaminantes (cquimicos1)



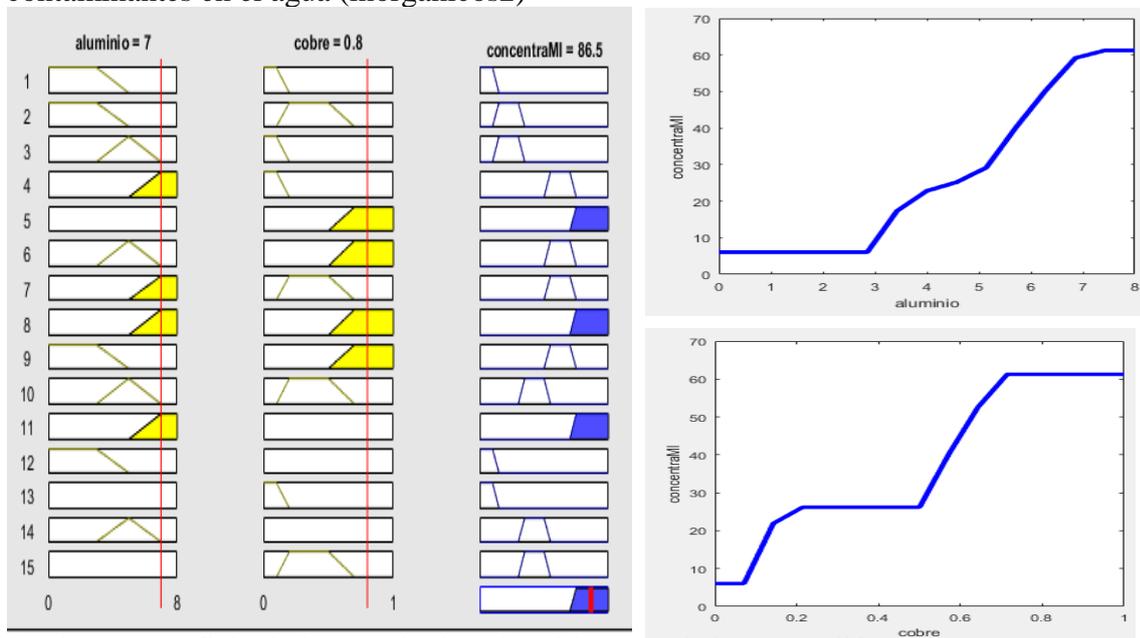
Reglas y superficie de los resultados obtenidos en subsistema quimicos3



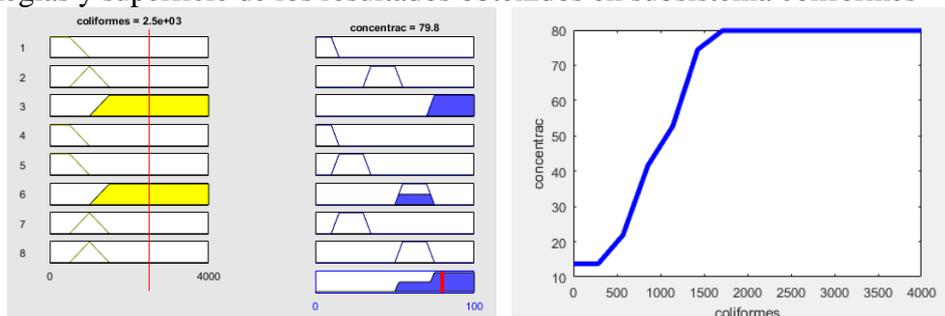
Reglas y superficie de los resultados obtenidos en subsistema inorganicos2



Reglas de inferencia y relación entre el aluminio y el cobre con la concentración de contaminantes en el agua (inorganicos2)



Reglas y superficie de los resultados obtenidos en subsistema coliformes



Anexo 3

Calidad de Agua y Concentración de contaminantes en la Cuenca del Rio Huaura – CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 – 2021- CALIDAD

Monitoreo Rio Huaura	Concentración de Contaminantes						Índice de Calidad de Agua Fuzzy		
	Materia Orgánica		Físicos químicos -Metales				ICAMOF	ICAFQF	ICARHF
	DBO-DQO-OD	Coliforme	Pb-As-Cd	Al-Cu	pH-Mn-Fe				
C D Q u i p i c o	03/2019	6.07	86.46	6.07	25.33	51.55	32.74	81.25	48.27
	10/2019	24.63	6.07	6.07	6.07	35.93	88.76	86.51	86.38
	06/2020	6.07	86.46	6.07	6.07	33.53	32.74	88.76	43.81
	11/2020	6.07	32.5	6.07	6.07	34.15	83.28	88.76	83.65
	05/2021	6.07	6.07	6.07	6.07	31.35	96.37	88.76	88.76
P U E N T E H U A U R A	03/2019	6.07	86.46	6.07	36.20	57.67	32.74	70.24	42.45
	10/2019	47.78	6.07	6.07	6.07	15.28	79.2	96.37	79.2
	06/2020	46.71	86.46	6.07	6.07	35.06	33.21	88.60	48.21
	11/2020	54.02	86.46	6.07	6.07	33.32	31.31	88.76	46.23
	05/2021	6.07	78.11	6.07	6.07	35.17	32.74	88.33	43.76

Nota:

ICAMOF: Índice de Calidad de Agua - Materia Orgánica Fuzzy

ICAFQF: Índice de Calidad de Agua -Parámetros Físicos -Químicos -Fuzzy

ICARHF: Índice de Calidad de Agua Fuzzy

ANEXO 4

Índice de Calidad del Agua Superficial en la Cuenca del Rio Huaura -CD Quipico y Puente de Huaura – Periodo 2019 -2021- ICARHF

Monitoreo Rio Huaura	Índice de Calidad de Agua Fuzzy			CALIFICACION			
	ICAMOF	ICAFQF	ICARHF	ICAMOF	ICAFQF	ICARHF	
CD Quipico	03/2019	32.74	81.25	48.27	Pésimo	Bueno	Malo
	10/2019	88.76	86.51	86.38	Bueno*	Bueno	Bueno
	06/2020	32.74	88.76	43.81	Pésimo	Bueno	Pésimo -Malo
	11/2020	83.28	88.76	83.65	Bueno	Bueno	Bueno
	05/2021	96.37	88.76	88.76	Excelente	Bueno	Bueno
Puente Huaura	03/2019	32.74	70.24	42.45	Pésimo	Regular	Pésimo -Malo
	10/2019	79.2	96.37	79.2	Regular*	Excelente	Regular
	06/2020	33.21	88.60	48.21	Pésimo	Bueno	Malo
	11/2020	31.31	88.76	46.23	Pésimo	Bueno	Malo
	05/2021	32.74	88.33	43.76	Pésimo	Bueno	Pésimo

Nota:

ICAMOF: Índice de Calidad de Agua - Materia Orgánica Fuzzy

ICAFQF: Índice de Calidad de Agua -Parámetros Físicos -Químicos -Fuzzy

ICARHF: Índice de Calidad de Agua Fuzzy

* En este monitoreo no realizaron análisis de coliformes termotolerantes.

** Actualización del Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos Superficiales (ICARHS) (ANA, 2020)

ANEXO 5
ESTANDAR DE CALIDAD AMBIENTAL - AGUA

Tabla N° 1: Estándar de calidad de Amoníaco Total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce (mg/L de NH₃)

Temperatura (°C)	pH							
	6	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	10,0
0	231	73,0	23,1	7,32	2,33	0,740	0,250	0,042
6	153	48,3	15,3	4,84	1,54	0,502	0,172	0,034
10	102	32,4	10,3	3,26	1,04	0,343	0,121	0,029
16	69,7	22,0	6,98	2,22	0,715	0,230	0,089	0,026
20	48,0	15,2	4,82	1,54	0,490	0,171	0,067	0,024
26	33,5	10,6	3,37	1,08	0,354	0,125	0,053	0,022
30	23,7	7,50	2,30	0,767	0,256	0,094	0,043	0,021

Nota:

(*) El estándar de calidad de Amoníaco total en función de pH y temperatura para la protección de la vida acuática en agua dulce, presentan una tabla de valores para rangos de pH de 6 a 10 y Temperatura de 0 a 30°C. Para comparar la temperatura y pH de las muestras de agua superficial, se deben tomar la temperatura y pH próximo superior al valor obtenido en campo, ya que la condición más extrema se da a mayor temperatura y pH. En tal sentido, no es necesario establecer rangos.

(**) En caso las técnicas analíticas determinen la concentración en unidades de Amoníaco-N (NH₃-N), multiplicar el resultado por el factor 1,22 para expresarlo en las unidades de Amoníaco (NH₃).

Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (a)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS-QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (t)	Color verdadero Escala Pt Co	100 (t)		100 (t)
Conductividad	(µS/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitritos (NO ₂ -N) + Nitritos (NO ₃ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 - 8,5		6,5 - 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L	5		5

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (a)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,05
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,05		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Níquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24
ORGÁNICOS				
Bifenilos Policlorados				
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04		0,045
PLAGUICIDAS				
Paratión	µg/L	35		35
Organoclorados				
Aldrin	µg/L	0,004		0,7
Clordano	µg/L	0,006		7
Dicloro Difetil Tricloroetano (DDE)	µg/L	0,001		30
Dieldrin	µg/L	0,5		0,5
Endosulfán	µg/L	0,01		0,01
Endrin	µg/L	0,004		0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01		0,03
Lindano	µg/L	4		4
Carbamato				
Aldicarb	µg/L	1		11
MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Coliformes Totales	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
Escherichia coli	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helmintos	Huevo/L	1	1	**

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b): Después de filtración simple.

(c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

Δ 3: significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

Nota 4:

- El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta Subcategoría.
- Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

ANEXO 6

Carta del ALA – HUAURA



"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
 "Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

CUT: 27183-2022

Huacho, 07 de marzo de 2022

CARTA N° 0053-2022-ANA-AAA.CF-ALA.H

Señora
 Edith Meriluz Claros Guerrero
 DNI N° 15742746
 Av. Mariano Melgar N° 326-7-Hualmay, Huaura, Lima
 meriluzclaros@gmail.com
 Celular N° 947021272
Presente. -

Asunto : Respuesta a Solicitud de Información

Referencia : Solicitud de Acceso a la Información Pública – Formulario N° 003

Tengo el agrado de dirigirme a Usted, para saludarla cordialmente y a la vez dar atención al documento de la referencia, con el cual solicita los resultados de monitoreo de la calidad de agua superficial en la Cuenca del Río Huaura correspondiente a los años 2019, 2020 y 2021.

Sobre el particular, se precisa que se comparten cinco (05) informes técnicos resultantes de los trabajos de monitoreos de calidad del agua superficial en la cuenca del río Huaura en los años del 2019 al 2021, los cuales pueden ser descargados en los links o enlaces que se detallan en el Cuadro N° 01.

Cuadro N° 01.
Monitoreos de Calidad de Agua Superficial en la Cuenca del Río Huaura

Actividad	Año	Informe Técnico	Enlaces de descarga
VII Monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Huaura.	2019	N° 008-2019-ANA-AAA.CF-ALA.H-HHR	https://autoridad-my.sharepoint.com/:f/g/personal/ikhuaman_ana_gob_pe/EIdfoRl-ESwYMcIj3AP7xI6kBYvMio6_e9NAGZNS8SHVA?e=LSXc1Y
VIII Monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Huaura.		N° 046-2019-ANA-AAA.CF-ALA.H-HHR	
IX Monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Huaura.	2020	N° 012-2020-ANA-AAA.CF-ALA.H-HHR	https://autoridad-my.sharepoint.com/:f/g/personal/ikhuaman_ana_gob_pe/EuIUMN1zpcQFKkn1GspWsnBakUz7Zc0eQnpy8snGNeBMQ?e=XMI-R14
X Monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Huaura.		N° 0007-2021-ANA-AAA.CF-ALA.H-KYHR	
XI Monitoreo de la calidad del agua superficial en la cuenca del río Huaura.	2021	N° 0064-2021-ANA-AAA.CF-ALA.H-KYHR	https://autoridad-my.sharepoint.com/:f/g/personal/ikhuaman_ana_gob_pe/EvEVQ_UVf0BKrjsY7_eCarEBgyFf0krobGmpvHAIK6KKA?e=Fh4Ca

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para renovarle los sentimientos de mi consideración y estima.

Av. La Paz Norte N° 185-
 Huacho - Lima
 T: 232 1508

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico
 archivado de ANA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S 070-2013-PCM
 y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S 026-2016-PCM. Su

