



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA DE SISTEMAS
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACION DE OPERACIONES

**“Establecimiento y Determinación de Índices de Calidad
del Agua. Enfoque Basado en Lógica difusa”**

Presentado Por:
Ismar González

Proyecto presentado ante la ilustre Universidad de Los Andes como requisito final para
Optar al título de Ingeniero de Sistemas

Tutor:
Prof. Eliezer Colina Morles

Junio del 2006

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a los profesores Eliezer Colina y Sebastián Medina por apoyarme y sobre todo por tenerme tanta paciencia.

Al jefe de la planta de potabilización de agua “General Eleazar López Contreras” ubicada en Ejido Estado Mérida, el señor Giordano Mendoza por toda su colaboración.

A la Ilustre Universidad de los Andes, y a la Escuela de Sistemas, en especial a sus secretarías (Judith, Omaira, Marisol y la señora Eduvigis) por ser parte importante en mi formación académica.

DEDICATORIA

A mis padres “José Valdemar y Maria Crelia”, ejemplo de verdadera humildad y sencillez quienes hasta el ultimo momento creyeron y siguen creyendo en mi, apoyándome en cada decisión tomada y guiándome hacia el camino correcto, sin ustedes hubiese sido imposible alcanzar este triunfo.

A mi ángel guardián mi abuelo “José Rosario”, mi figura paternal eterna, cada paso que doy es siguiendo tus consejos, sin nunca dejar de ser la persona que tu poco a poco formaste.

A mi incomparable tía “Rosa Virginia”, hasta el momento no he conocido una persona que amara tanto a la vida como tu, eres mi ejemplo a seguir, hoy solo soy parte de lo tu querías que yo fuese, te fuiste físicamente pero sigues presente en cada recuerdo y en mi corazón, un lugar que te ganaste no como tía sino como una verdadera madre.

A mi tía “Carmen” un ser capaz de unir el agua y el aceite, sólo por ver a su familia unida.

A mi hermano “Miguel Ángel”, con quien he contado toda mi vida, quiero que sepas que este triunfo también es tuyo.

A mi Madrina Egdilia y tío José Rosario (Chayo) quienes ahora son las bases fundamentales de esta familia, siempre contarán conmigo para lo que sea.

ÍNDICE GENERAL

I Generalidades

1.1. Introducción.....	12
1.2. Antecedentes de la investigación.....	13
1.3. Planteamiento del problema.....	14
1.4. Justificación e importancia de la investigación.....	15
1.5. Objetivos.....	16
1.5.1. Objetivo general.....	16
1.5.2. Objetivos específicos.....	16

II Marco Teórico

2.1. Valoración y Monitorización de la calidad del agua.....	18
2.2 Marcos de Referencia para Programas de Valoración y Monitorización de la Calidad del Agua.....	21
2.3 Diseño de Redes de la Monitorización	24
2.4 Antecedentes sobre Índices de Calidad del Agua.....	26
2.5 Definición de un Índice de calidad del agua.....	27
2.6 Clasificación de los Índices de Calidad del Agua.....	27

INDICE GENERAL

2.7 Usos de los Índices.....	29
2.8 Procedimiento general para la formulación de un Índice de Calidad del Agua.....	29
2.9 Normas de Calidad del agua.....	32
2.10 Estándares de calidad del agua.....	33
2.11 Parámetros que rigen la calidad del agua.....	34
2.11.1 Parametros Físicos.....	35
2.11.2 Parámetros Químicos.....	39
2.11.3 Parámetros Microbiológicos.....	45
2.12 Sistemas difusos.....	46
2.12.1 Estructura de los sistemas difusos.....	46
2.12.1.1 Difusificación.....	48
2.12.1.2 Mecanismo de inferencia difusa.....	49
2.12.1.3 Desdifusificación.....	50
2.13 Tipos de Sistemas difusos.....	53
2.13.1 Mamdani.....	54
2.13.2 Takagi-Sugeno.....	57
2.14 Matlab.....	60
2.15 Unfuzzy.....	61

III MARCO METODOLOGICO

3.1. Procedimiento General y Elementos de Cálculo de los Índices de Calidad del agua.....62

 3.1.1 Selección de Variables.....63

 3.1.2 Determinación de Funciones de Calidad (Curvas) para cada variable (Subíndices).....64

 3.1.3 Asignación de Pesos a cada Subíndice (Ponderación).....65

 3.1.4 Cálculo Agregado de los Índices a partir de los Subíndices.....65

 3.1.4.1 Formulaciones.....66

 3.1.5 Escalas de Clasificación.....67

IV Análisis Comparativo de los Índices y resultados

4.1. Aplicaciones.....69

 4.1.1 Caso 1: Unificación del cálculo del Índice de Calidad General para los ríos Portuguesa, Montalbán y La Fría, del Estado Mérida.....69

 4.1.1.1 Conjuntos de Datos.....71

 4.1.1.2 Cálculo de los índices de calidad.....73

 4.1.1.3 Cálculo del Índice de Calidad General por medio de un Modelo Difuso.....80

 4.1.1.4 Resultados caso 1.....82

INDICE GENERAL

4.1.2 Caso 2: Modelo Difuso para el Cálculo del Índice de Calidad General basado en mediciones de variables para los ríos: Portuguesa, Montalbán y La Fría, del Estado Mérida.....	86
4.1.2.1 Conjuntos de Datos.....	86
4.1.2.2 Cálculo del Índice de Calidad General por medio de un Modelo Difuso.....	86
4.1.2.3 Resultados caso 2.....	89
4.1.3 Caso 3: Comparación de los resultados arrojados por los casos 1 y 2 con los niveles estándar de las normativas nacionales e internacionales.....	90

V Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones.....	94
5.2 Recomendaciones.....	96
Bibliografía.....	97

Índice de Figuras

4.1.2.1	Valoración de la calidad del agua en función de Coliformes Fecales.....	102
4.1.2.2	Valoración de la calidad del agua en función del pH.....	103
4.1.2.3	Valoración de la calidad del agua en función de la DBO5.....	104
4.1.2.4	Valoración de la calidad del agua en función de Nitratos.....	105
4.1.2.5	Valoración de la calidad del agua en función del Fosfato.....	106
4.1.2.6	Valoración de la calidad del agua en función de la Temperatura.....	107
4.1.2.7	Valoración de la calidad del agua en función de la Turbidez.....	108
4.1.2.8	Valoración de la calidad del agua en función de los Sólidos Totales.....	109
4.1.2.9	Valoración de la calidad del agua en función del % de Saturación del Oxígeno Disuelto.....	110
4.1.2.10	Valoración de la calidad del agua en función del Nitrógeno Amoniacal no Ionizado.....	111
4.1.2.11	Valoración de la calidad del agua en función de Coliformes Totales.....	112
4.1.2.12	Valoración de la calidad del agua en función de Sólidos Suspendidos.....	113
4.1.2.13	Valoración de la calidad de agua en función de Nitritos más Nitratos.....	114
4.1.2.14	Valoración de la calidad del agua en función de la Alcalinidad.....	115
4.1.2.15	Valoración de la calidad del agua en función de la Dureza.....	116

Índice de Tablas

4.1.2.4.2 Salida arrojada por el primer Modelo Difuso para el Río Montalbán.....	118
4.1.2.4.3 Salida arrojada por el primer Modelo Difuso para el Río La Fría.....	119
4.1.2.4.5 Salida arrojada por el segundo Modelo Difuso para el Río Montalbán.....	120
4.1.2.4.6 Salida arrojada por el segundo Modelo Difuso para el Río La Fría.....	121

RESUMEN

En el presente trabajo se proponen dos procedimientos, basados en el uso de Lógica Difusa, los cuales permiten evaluar la calidad del agua superficial. Uno de estos modelos utiliza fórmulas de agregación para el cálculo de Índices de Calidad del Agua a partir de subíndices propuestos por Helmond y Breukel, 97 en [1]. El otro modelo cuenta con valores medidos en sitio o en un laboratorio de variables físico-químicas y bacteriológicas del agua en estudio. Estos modelos pueden ser aplicados a cualquier cuerpo de agua superficial, contribuyendo así con la planificación de actividades en estudios de este tipo.

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso de los índices que determinan la calidad del agua, clasificación, procedimiento general para la formulación de un Índice, criterios de diseño para un Índice y se contó con la asesoría de expertos tanto en el área del modelo difuso como en el cálculo de los índices.

El procedimiento para escoger los índices, que fueron incluidos en el trabajo, requirió de una comparación minuciosa, del conjunto de formulas; basado en las variables de estudio.

Se efectuó ciertos ajustes para el cálculo de estos índices, dada la escasez de ciertos datos, y finalmente se comparó las variables más importantes en estudio, con las normativas tanto nacionales como internacionales. Los Índices de Calidad parecen ser la metodología más práctica para acercar puntos de vista lejanos como lo son el de profesionales del sector, los legisladores y la comunidad en general. Entre las características naturales más resaltantes de los tres ríos en estudio fueron detectados valores ligeramente elevados del contenido de Coliformes, particularmente en época de lluvias. Estos coliformes obligan a la desinfección de las aguas para poder utilizarlas bien sea como agua potable, o con fines de riego de cultivos destinados al consumo humano.

Palabras clave: Lógica Difusa, Índices de calidad, Estimación, Parámetros.

CAPITULO 1

Generalidades

1.1. Introducción

El agua, elemento esencial para la vida, es necesaria también para múltiples propósitos: consumo doméstico, riego, cría de animales, recreación, navegación, propagación de la vida acuática, procesos industriales, generación de energía, refrigeración, transporte, dispersión y dilución de residuos.

El suministro de agua de las poblaciones venezolanas, para algunos de los objetivos antes mencionados, depende del número de habitantes y varía entre 200 a 500 litros por persona y por día; de estas cifras, cerca del 80% se convierten en desecho. La eliminación de las aguas residuales se realiza por medios de sistemas de alcantarillado que las conducen, por lo general, a una quebrada, un río o al mar.

En el caso de que se trate de aguas residuales netamente domésticas, la carga contaminante está constituida por desechos provenientes del cuerpo humano, por los residuos jabonosos de las operaciones de lavado y limpieza, y los que resultan de la preparación de alimentos. En general, contienen los desperdicios de las diferentes actividades en que se utiliza el agua en edificaciones habitacionales, comerciales e industriales, como planteles educativos, centros hospitalarios, etc.

En Venezuela, ríos, lagos y extensas zona del mar se encuentran afectados como consecuencia de estos tipos de vertidos. En el estado Mérida se conoce que los residuos que se originan en la ciudad, principalmente los de origen doméstico, están causando la degradación de los ríos que circundan la ciudad.

En la medida en que los asentos poblacionales aumentan en cantidad y en número de habitantes, las cantidades de aguas residuales domésticas se incrementan, además de las provenientes de procesos industriales, afectando de manera amenazante a la calidad de las aguas superficiales, disminuyendo así su capacidad de auto purificación, produciendo finalmente la degradación de los cursos de agua transformándolos en vehículos de transporte de contaminantes

La preocupación por los problemas de degradación ambiental, asociados al uso y manejo de los recursos naturales, no es nueva. Tampoco lo son los esfuerzos por controlar los impactos generados por ellos. No obstante, el control de estos problemas ha probado ser mucho más difícil de lo esperado.

1.2. Antecedentes de la investigación

La lógica difusa, ha sido muy utilizada en las últimas décadas, tanto a nivel mundial como en nuestro país, para el estudio y solución de problemas en diversas áreas del saber y la ciencia, pero su empleo ha sido mucho más reciente para el estudio de ambientes con incertidumbre, para la toma de decisiones y la gestión de expertos, véase por ejemplo [López, 2000, Lira M., 2000].

En cierto nivel, la lógica difusa puede ser vista como un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas en lenguaje natural a un lenguaje matemático formal. Mientras la motivación original fue ayudar a manejar aspectos imprecisos del mundo real, la práctica temprana de la lógica difusa permitió el desarrollo de aplicaciones prácticas. Aparecieron numerosas publicaciones que presentaban los fundamentos básicos con aplicaciones potenciales. Esta fase marcó una fuerte necesidad de distinguir la lógica difusa de la teoría de probabilidad. Tal como la entendemos ahora, la teoría de conjuntos difusos y la teoría de probabilidad tienen diferentes tipos de incertidumbre.

Desde que el control difuso fue propuesto por E. H. Mamdani en 1974, diferentes estudios aplicados a la teoría del control difuso han mostrado que el aprendizaje difuso y/o los algoritmos de control difuso son de las áreas más activas y fructíferas de la investigación en los últimos años dentro del campo de la lógica difusa. A partir de la década de los ochenta, la lógica difusa ha desempeñado una función vital en el avance de soluciones prácticas y sencillas para una gran diversidad de aplicaciones en la ingeniería y la ciencia. Debido a su gran importancia en los sistemas de navegación de vehículos espaciales, control de vuelo, control satelital de altitud, control de velocidad en misiles y similares, el área de la lógica difusa se ha vuelto una parte importante e integral de los procesos industriales y de manufactura.

1.3. Planteamiento del problema

Es de una dificultad considerable poder medir, ponderar o evaluar la calidad de algo, pues el término calidad por si solo no dice mucho, debe medirse la calidad en términos de ciertas propiedades, pero la dificultad pudiera verse incrementada al referirse a la calidad de un sistema complejo, compuesto por innumerables variables y más aun si no se tiene claro sobre cuáles propiedades debe medirse ésta. Véase por ejemplo [Johan Vilorio, 2005]

Las aguas superficiales han sido y son usadas sin ninguna medida de manejo que garantice el mantenimiento de su calidad y de los procesos ecológicos que mantienen la dinámica fluvial natural.

Estos cuerpos de agua, tratándose de ríos, se han convertido en una problemática ambiental debido a que por un lado, es el receptor común de efluentes domésticos e industriales como por ejemplo curtiembres, fábricas de detergentes, aceites servicios de lavado y engrase de vehículos, hospitales y, principalmente en el curso inferior de sus causes, sus aguas presentan una considerable cantidad de contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica, que al ser reutilizadas en el riego de cultivos como legumbres, hortalizas, maíz, etc. constituyen un riesgo para la salud de la comunidad. Por otro lado, es necesario realizar estudios cada vez mas integrados de tal manera que permitan establecer un mejor entendimiento del ecosistema y conlleven a proponer mejores políticas y programas de minimización de la contaminación de los ríos (control y recuperación de los ríos).

Estas condiciones se traducen en un verdadero problema ambiental que, en época de lluvia (o temporada de vacaciones para el caso del estado Mérida) cobra su máxima expresión. En este contexto ambiental, se consideró diseñar e implementar dos modelos utilizando Lógica Difusa que permitirán evaluar la calidad del agua, los cuales pueden ser aplicados a cualquier cuerpo de agua superficial, contribuyendo así con la planificación de actividades en estudios de este tipo, como lo son recreación, uso domestico, agrícola, industrial, etc. El procedimiento que se propone comprende una serie de pasos que constituyen una guía para aquellas personas que tienen la responsabilidad de llevar a cabo programas de evaluación de la calidad del agua.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

Es importante el estudio de la calidad de las aguas de los ríos, ya que, son estos, los que abastecen de agua a las plantas de potabilización, para el consumo humano en las ciudades.

Los análisis de las muestras de agua son necesarios además para determinar la composición física-química y bacteriológica del agua, y así decidir si su calidad es adecuada para usos benéficos. También son importantes para comprender relaciones hidrológicas y geoquímicas de sistemas naturales y evaluar la influencia de actividades humanas sobre la calidad de las aguas.

Además, la determinación de la calidad de las aguas de los ríos puede servir como base de datos a las redes nacionales de registros de calidad del agua y para futuros proyectos de tratamientos de agua. El conocimiento de estos datos también alertará a la población y al gobierno nacional del grado de contaminación de las aguas, que está trayendo como consecuencias el desequilibrio del ecosistema.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar e implementar dos modelos, haciendo uso de Lógica Difusa, que permitan unificar en un índice de calidad general, la información que arrojan diferentes tipos de índices, basados en variables que controlan la calidad del agua superficial.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar los parámetros que rigen la calidad del agua de los ríos Portuguesa, Montalbán y la Fría, del Estado Mérida.
 - Comparar con los niveles estándares de las normativas nacionales e internacionales.
 - Proponer un sistema de evaluación de la calidad del agua superficial, utilizando índices de calidad.
 - Contribuir al conocimiento y aplicación de nuevas herramientas para la evaluación del estatus ambiental de los ríos, en base a la caracterización de sus componentes, y estimación de los índices de calidad de sus aguas.
-

CAPITULO II

Marco Teórico

Marco Teórico

2.1 Valoración y Monitorización de la calidad del agua

La calidad del agua entendida como la condición del agua con respecto a la presencia o ausencia de su contaminación, involucra las acciones de valoración y monitorización. Tales términos son frecuentemente confundidos y usados como sinónimos.

De acuerdo con lo expresado por UNESCO/WHO/UNEP en [2], el proceso de la valoración de la calidad del agua, corresponde a la evaluación de la naturaleza química, física y biológica del agua, en relación con su calidad natural, efectos humanos y uso pretendido, incluidos: consumos, recreación, irrigación y pesca; y particularmente, usos que puedan afectar la salud pública o la salud de los sistemas acuáticos.

Los principales objetivos de la valoración de la calidad del agua son:

- Verificar si la calidad observada del agua es adecuada para el uso pretendido.
- Determinar tendencias en la calidad del agua y en la evaluación de impactos tales como la liberación de contaminantes o los efectos de medidas de restauración.
- Estimar el flujo de nutrientes o contaminantes.
- Valorar el entorno y trasfondo de la calidad de los ambientes acuáticos.

El proceso de valoración de la calidad el agua, incluye el uso del monitoreo como principal herramienta para definir la condición del curso. El monitoreo por su parte, abarca en el tiempo periodos de muestreo largos, mediciones estandarizadas, colección de información en un número determinado de estaciones a intervalos de tiempos regulares; con el fin de proveer datos que puedan ser usados para recabar información y definir las condiciones actualizadas del sistema, establecer tendencias y proporcionar igualmente información para verificar las relaciones causa-efecto.

Dependiendo del objetivo del programa, la monitorización se divide en dos conjuntos:

- **Monitorización del objetivo particular:** direccionado a un área y problema específico y que involucre un conjunto simple de variables.

- **Monitorización multiobjetivo:** el cual cubre varios usos del agua como: abastecimiento y consumo humano, manufactura industrial, pesquerías o vida acuática, lo requiere el registro de un conjunto numeroso de variables.

Objetivos de la Monitorización

- El requisito fundamental en la mayoría de los programas de monitoreo es determinar la variación espacial de la calidad de las aguas superficiales. Este objetivo tiene en cuenta lo siguiente:
 - (a) Determinar la distribución superficial de la contaminación y las tasas de migración de los contaminantes.

 - (b) Monitorear la efectividad de medidas para controlar o remediar la contaminación.
-

- En todos estos casos, el propósito es obtener resultados que reflejen exactamente la condición de las aguas. Esto supone la necesidad de obtener muestras no contaminadas representativas de la condición en un punto específico dentro del sistema de aguas superficiales en forma periódica.

 - Otro objetivo de la monitorización, es la vigilancia (o control de calidad) de las aguas que se utilizan para el suministro de agua. El requisito en este caso no es un muestreo representativo de la condición en el acuífero, sino que se relaciona monitorización con la aceptabilidad de agua bombeada para un uso determinado y/o con el control de cualquier proceso de tratamiento necesario.

 - El crecimiento en la disposición de residuos urbanos a industriales y la intensificación del cultivo agrícola están ocasionando un riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Esto requerirá una mayor ampliación de las actividades de monitoreo de aguas subterráneas, especialmente:
 - (a) Para identificar el inicio de la contaminación de las aguas subterráneas por una actividad dada, tan pronto como sea posible, de manera que permita la introducción de medidas de control a tiempo.

 - (b) Para proporcionar aviso anticipado de la llegada de aguas contaminadas a las fuentes importantes de suministro de aguas subterráneas, a fin de conceder tiempo para iniciar acciones correctivas.

 - (c) Para determinar responsabilidad legal en la contaminación de aguas subterráneas incidentes de contaminación de aguas subterráneas.
-

La exactitud y significación de los resultados del monitoreo necesitan ser evaluados en forma regular. Una acción de seguimiento apropiada, tal como el control de fuentes de contaminación, descontaminación del suelo y de acuíferos, tratamiento del suministro de agua, modificaciones en la explotación del acuífero, etc., debe tomarse siempre en cuenta. La carencia de acciones de seguimiento niega la justificación para implementar los programas de monitoreo.

2.2 Marcos de referencia para Programas de Valoración y Monitoreo de la calidad del agua.

El desarrollo de los marcos para las practicas de monitoreo, nacieron como instructivos para examinar categorías y contenidos. De acuerdo con Ward, R., Timmerman, J., Peters C., Adriaanse, M. 2003 en [3] los siguientes autores (tabla 2.2.1), contribuyeron con los primeros desarrollos.

Tabla 2.2.1. Marcos de referencia para la valoración de la calidad del agua. Ver [4]

Ricker y Hines	Zinder y Shapiro
<ol style="list-style-type: none"> 1. Determinar los problemas de la calidad del río. 2. Analizar la hidrológia. 3. Seleccionar los métodos de valoración. 4. Identificar, coleccionar y coleccionar los datos requeridos. 5. Analizar los datos, formular el método y probar la capacidad de predicción. 6. Pronosticar los impactos sobre la planeación de alternativas. 7. Comunicar los resultados. 8. Evaluar el programa. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Planear y diseñar la red. 2. Definir el personal. 3. Definir las facilidades y equipamiento. 4. Muestrear. 5. Asegurar la calidad. 6. Inspeccionar la distribución de los datos. 7. Interactuar a nivel de agencias

Es notorio que desde un principio existió cierta diversidad en el criterio del marco lógico para el monitoreo que, posteriormente, fue modificado de acuerdo a nuevas concepciones, como las mostradas en las Tablas 2.2.2 y 2.2.3.

Tabla 2.2.2. Concepciones de Ward y Cofino

Ward	Cofino
<ol style="list-style-type: none"> 1. Diseñar la Red. 2. Colectar las muestras. 3. Analizarlas en laboratorio. 4. Manejar los datos. 5. Analizar los datos. 6. Utilizar la información. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Analizar las necesidades de información. 2. Diseñar. 3. Planear. 4. Ejecutar. 5. Evaluar. 6. Presentar.

Tabla 2.2.3. Concepciones en 1995 y 1996

Esfuerzo Intergubernamental sobre el monitoreo de la calidad del agua	Adriaanse
<ol style="list-style-type: none"> 1. Objetivo. 2. Coordinación/Colaboración. 3. Diseño. 4. Implementación. 5. Interpretación. 6. Evaluación del programa de monitoreo. 7. Comunicación. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Administración del agua, necesidades de información y utilización de la información. <ol style="list-style-type: none"> a) Estrategia de monitoreo y diseño de la red. b) Muestreo, análisis de laboratorio y manejo de datos. c) Análisis de los datos y reporte.

Tabla 2.2.4 Concepción de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA 2003)

USEPA(2003)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Establecer la estrategia para el programa de monitoreo. 2. Definir los objetivos del monitoreo. 3. Diseñar el monitoreo. 4. Establecer los indicadores principales y suplementarios de calidad del agua. 5. Asegurar la calidad. 6. Administrar los datos. 7. Analizar los datos/Evaluarlos. 8. Generar el reporte. 9. Realizar una evaluación programática. 10. Determinar el soporte general y planear la infraestructura necesaria.

Tabla 2.2.5. Marcos De Referencia En La Unión Europea Y Los Estados Unidos.

UNECE “Ciclo de Monitoreo”	Estados Unidos “Marco de Monitoreo”
<ol style="list-style-type: none"> 1. necesidades de información. 2. Valoración de las estrategias de los programas de monitoreo. 3. Colección de datos. 4. Manejo de datos. 5. Análisis de los datos. 6. Evaluación y reporte. 7. Utilización de la información en la administración del agua. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desarrollo de los objetivos. 2. Diseño del programa de monitoreo. 3. Colección de campo y obtención de los datos de laboratorio. 4. Complementación y manejo de los datos. 5. Evaluación e interpretación de datos. 6. Transporte de los resultados y hallazgos. 7. Entendimiento, protección y restauración de la aguas.

2.3 Diseño de Redes de Monitorización

Las redes de control de la calidad de los ríos y lagos, son sistemas que vigilan la calidad de las aguas y el estado ambiental de los ríos. Con ellas se pueden detectar las agresiones que sufren los ecosistemas fluviales y se recoge información de tipo ambiental, científico y económico sobre los recursos hídricos.

Operaciones que se llevan a cabo en un sistema de monitorización:

- **El Muestreo**
 - a. Métodos de muestreo, rutas, equipamiento y entrenamiento requerido
 - b. Análisis de procedimientos para el muestreo de campo.
 - c. Proceso de toma de la muestra/preservación y transporte.
 - d. Aseguramiento de la calidad/seguridad del empleado

 - **Análisis de Laboratorio**
 - a. Programación y procedimientos simples.
 - b. Métodos de análisis de laboratorio.
 - c. Control de calidad.
 - d. Registro de datos/etiquetado.

 - **Manejo de Bases de Datos**
 - a. Definición de metadatos.
 - b. Visualización y verificación de los datos.
 - c. Necesidades de Hardware
 - d. Manejo de software de base de datos.
 - e. Almacenamiento, recuperación, comportamiento y procedimientos de distribución.
 - f. Plantilla para la ubicación de datos de Internet
-

- **Análisis de datos**
 - a. Métodos de análisis de datos para cada objetivo de información.
 - b. Software de análisis.
 - c. Interpretación del resultado del análisis de datos relativo a los propósitos de información.
 - d. Relación de los resultados con los objetivos de administración y manejo.

- **Reporte**
 - a. Formatos, contenidos, frecuencias y distribución.
 - b. Evaluación de la efectividad del reporte en encuentros de retroalimentación

- **Utilización de la información para propósitos de manejo**
 - a. Administradores de programas.
 - b. Administradores de agencias e industrias.
 - c. Realizadores de políticas.
 - d. Público en general.
 - e. Auditoria de la efectividad de la utilización.

Todas las actividades deben realizarse de manera bien definida y documentada; sólo de esta manera se podrá generar información consistente y comparable.

2.4. Antecedentes sobre Índices de Calidad del Agua (ICA)

Para las evaluaciones de calidad del agua, diferentes organizaciones de varias nacionalidades involucradas en el control del recurso hídrico, han usado históricamente y de manera regular, Índices Físicoquímicos. Sin embargo, mientras que los índices de calidad del agua aparecen en la literatura a principios de 1965 ver [5], la ciencia del desarrollo de los índices de calidad de agua no madurara hasta los 70s.

Según Ott, W en 1978 [6], presenta una discusión detallada sobre la teoría de índices ambientales y su desarrollo así como también una revisión sobre los índices de la época.

Solo hasta 1980, el Departamento de Calida Ambiental de Oregon, desarrollo su propio índice a partir del NSF, sin embargo, su aplicación fue discontinua dada la dificultad de su calculo en computadores de primera generación.

Entre 1995 y 1996 se desarrollaron, entre otros, los siguientes avances: La estrategia de evaluación de la Florida [7] que formulo un índice en 1995. El índice de British Columbia [8] desarrollado en 1996 y el programa de mejoramiento de la cuenca baja de la WEP en [9] que desarrolló un índice en 1996.

Para el caso latinoamericano, en México se han desarrollado diversos índices de calidad del agua a medida que la normativa se ha desarrollado ver [10]

En Colombia de acuerdo con el Estudio nacional del Agua [11], la medición de parámetros físicoquímicos es una actividad rutinaria.

2.5. Definición de un Índice de calidad del agua

La calidad del agua no es un criterio completamente objetivo, pero está socialmente definido y depende del uso que se le piense dar al líquido, por lo que cada uso requiere un determinado estándar de calidad. Por esta razón, para evaluar la calidad del agua se debe ubicar en el contexto del uso probable que tendrá.

Debido a la cantidad de parámetros que participan en el diagnóstico de la calidad del agua y a lo complejo que éste puede llegar a ser, se han diseñado índices para sintetizar la información proporcionada por esos parámetros. Los índices tienen el valor de permitir la comparación de la calidad en diferentes lugares y momentos, y de facilitar la valoración de los vertidos contaminantes y de los procesos de auto depuración.

Su ventaja radica, en que la información puede ser más fácilmente interpretada que una lista de valores numéricos. Consecuentemente, un índice de calidad del agua es una herramienta comunicativa para transmitir información.

2.6. Clasificación de los Índices de Calidad del Agua

De acuerdo con Ball, R., Church, R. 1980 en [12], los índices de calidad del agua pueden organizarse en categorías dentro de 4 grupos:

- **Grupo Uno:** Se aplica a tensores e incluye dos categorías:
 - a. **Los Indicadores en la fuente:** Los cuales reportan la calidad del agua, generada por tensores en fuentes discretas.
 - b. **Los Indicadores en un punto diferente a la fuente:** Los cuales reportan la calidad del agua, generada por fuentes difusas.
-

- **Grupo Dos:** Miden la capacidad de estrés e incluye cuatro categorías:
 - a. **Medidas Simples como indicadores:** Incluyen muchos atributos y componentes individuales del agua, que pueden ser usados como indicadores de su calidad.
 - b. **Los Indicadores Basados en Criterios o Estándares:** Los que correlacionan las medidas de calidad de agua con los niveles estándar o normales que han sido determinados para la preservación y usos adecuados del agua.
 - c. **Los Índices Multiparametro:** Son determinados por las opiniones colectivas o individuales de expertos.
 - d. **Los Índices Multiparametro Empíricos:** Son establecidos por el uso de las propiedades estadísticas de las mediciones de calidad del agua.

 - **Grupo Tres:** Incluye la categoría única de Indicadores para lagos, específicamente desarrollados para este tipo de sistemas.

 - **Grupo Cuatro:** Incluye cuatro categorías:
 - a. **Indicadores de la vida acuática:** Basados en las diferentes relaciones de tolerancia de la biótica acuática a varios contaminantes y condiciones
 - b. **Indicadores del Uso del Agua:** Evalúan la compatibilidad del agua con usos como, abastecimientos y agricultura.
 - c. **Indicadores Basados en la Percepción:** Los cuales se determinan por las opiniones del público y los usos de los cuerpos de agua.
-

2.7. Usos de los Índices:

Los índices pueden ser usados para mejorar o aumentar la información de la calidad del agua y su difusión comunicativa, sin embargo, no pretenden reemplazar los medios de transmisión de la información existente. De acuerdo con] Ott, W. 1978 en [6], los posibles usos de los índices son:

- **Manejo del Recurso:** En este caso los índices pueden proveer información a personas que toman decisiones sobre las prioridades del recurso.
- **Clasificación de Áreas:** Los índices son usados para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.
- **Aplicaron de la normativa:** En situaciones específicas y de interés, es posibles determinar si esta sobrepasando la normativa ambiental y las políticas existentes.
- **Información pública:** En este sentido, los índices pueden tener utilidad en acciones de concientización y educación ambiental.
- **Investigación Científica:** Tiene el propósito de simplificar una gran cantidad de datos de manera que se pueda analizar fácilmente y proporcionar una visión de los fenómenos medioambientales.

2.8 Procedimiento general para la formulación de un Índice de Calidad del Agua

Muchos de los recientes índices de calidad de agua tienen como aspecto común, su cálculo sobre la base de los siguientes 3 pasos:

- Selección de parámetros.
 - Determinación de los valores para cada parámetro: subíndices.
 - Determinación del índice por la agregación de los subíndices.
-

Seguidamente para la determinación de los subíndices pueden ser utilizados varios métodos:

- Darle un valor nominal o numérico, previa comparación del valor del parámetro con un estándar o criterio.
 - Convertir el parámetro en un número dimensional por medio de diagramas de calibración. En este caso se debe desarrollar para cada parámetro su propio diagrama, en el caso que se indique la correlación entre el parámetro y su valor en la escala de calidad. Esta escala generalmente esta entre 0 y 100, aunque también se acostumbra escalarlos entre 0 y 1.
 - Una alternativa para el diagrama de calibración es realizar una tabla de calibración. En esta tablas, el valor del parámetro esta igualmente relacionado con la escala de calidad.
 - Desarrollar para parámetro una formulación matemática, con el fin de convertir los valores del parámetro de acuerdo con varias escalas, con lo cual los valores del parámetro conservan sus unidades originales.
-

El índice puede darse por medio de la agregación de alguna de las siguientes formulas (Tabla 2.8.1) que, comúnmente corresponden a una función promedio como de puede apreciar a continuación:

Tabla 2.8.1 Formulas de agregación para el cálculo de Índices de Calidad del Agua a partir de Subíndices (Helmond y Breukel. R. 1997 en [1])

Método	Formula
Promedio no Ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi$
Promedio Aritmético Ponderado	$ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qiWi$
Promedio Geométrico no Ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n qi \right)^{1/n}$
Promedio Geométrico Ponderado	$ICA = \left(\prod_{i=1}^n qi \right)^{Wi}$
Subíndice Mínimo	$ICA = \min(q1, q2, \dots, qn)$
Subíndice Máximo	$ICA = \max(q1, q2, \dots, qn)$
Promedio no Ponderado Modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi \right)^2$
Promedio Ponderado Modificado	$ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qiWi \right)^2$

ICA: Índice de Calidad del Agua.

n: Numero de parámetros.

q_i : Escala de calidad (Subíndice) del parámetro i.

W_i : Factor de ponderación del parámetro i.

2.9. Normas de Calidad del Agua:

De este modo, la contaminación y la degradación de la calidad del agua interfieren en los usos vitales y legítimos, en escalas que varían desde el nivel local al regional e internacional, dada la naturaleza transfronteriza y unidireccional de los sistemas fluviales y la inmensidad de mares y océanos, Por lo tanto, los criterios de calidad del agua son necesarios para garantizar la existencia de un recurso de calidad apropiado para cada proceso de consumo concreto y la legislación al respecto se utiliza como un medio administrativo para lograr y mantener sus propiedades para el mayor numero de usuarios posibles de la masa de agua.

La calidad del agua y las normas aplicadas varían y proceden de organismos diferentes; existen normas internacionales establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS), y la Unión Europea (UE), normas regionales aplicadas por estados individuales e incluso normas locales establecidas por autoridades locales individuales. Las normas y niveles se establecen a partir de parámetros físicos, químicos y microbianos, teniendo en cuenta los diferentes usos para los que se debe asegurar la calidad del agua. El último objetivo de la imposición de las normas es la protección de los usuarios finales, ya sean seres humano, animales domésticos o industrias.

2.10. Estándares de Calidad del Agua

Al discutir la calidad del agua, se observa que existen diversos conjuntos de estándares, entre los cuales se encuentran:

1. Los relacionados con la preservación de la salud pública, que se refieren a:
 - Calidad del agua bruta (superficial).
 - Calidad del agua tratada (potable).

2. Los relacionados con la protección del ecosistema, que se refieren a:
 - Calidad del agua conteniendo peces (protección de la pesca).
 - Calidad del agua de baño.

El primer conjunto de estándares trata de la calidad del agua en origen y en el punto de suministro al público. La calidad del agua bruta, se define en las normas nacionales e internacionales por el grado de tratamiento necesario que permiten la transformación de las aguas superficiales en agua potable. Por ejemplo un primer tipo de aguas solo requiere tratamiento sencillo y desinfección, un segundo tipo precisa de un tratamiento físico y químico normal y desinfección. Estas categorías, y los niveles estándar de los diferentes parámetros de calidad, vienen definidos en la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 5.021-Decreto N° 883 (Apéndice A) y en la directiva de la Unión Europea 75/440/CEE (Apéndice B).

El segundo conjunto de estándares se enfoca en la protección de los ecosistemas, y vienen definidas en la Gaceta Oficial de Venezuela como aguas destinadas a la pesca y balnearios (Apéndice A). Para la UE la directiva de peces de agua dulce, 78/689/CEE, Esta diseñada para mantener la calidad del agua adecuada para el sostenimiento de los peces salmónidos o de litoral; mientras que la directiva relativa a la calidad del agua de baño, 76/160/CEE, fija valores límites y guía para sustancias microbiológicas, físicoquímicas y otras (Apéndice B)

2.11. Parámetros que Rigen la Calidad del Agua

A continuación se presenta una descripción de los parámetros determinantes más importantes de la calidad del agua, como son:

- **Parámetros Físicos:**

1. Temperatura
2. Turbidez
3. Sólidos Totales
4. Sólidos Disueltos Totales
5. Sólidos Suspendidos Totales

- **Parámetros Químicos:**

1. Dureza
2. Alcalinidad
3. pH
4. Oxígeno Disuelto
5. Demanda Bioquímica de Oxígeno
6. Demanda Química de Oxígeno

- **Parámetros Microbiológicos:**

1. Coliformes Fecales
 2. Coliformes Totales
-

2.11.1. Parámetros Físicos:

Temperatura:

Es importante conocer la temperatura del agua con toda precisión, ya que ésta juega un papel muy importante en la solubilidad de las sales y de los gases (entre los que es fundamental la del oxígeno), en la disolución de las sales y por lo tanto en la conductividad eléctrica, en la determinación del pH, en el conocimiento del origen de el agua y de eventuales mezclas, en las relaciones biológicas (las cuales tienen una temperatura óptima para poder realizarse), etc. Además, esta medida es muy útil para estudios limnológicos y de contaminación de ríos, y desde el punto de vista industrial es importante para los cálculos de cambios térmicos.

Una temperatura elevada implica la aceleración de la putrefacción y , por lo tanto, un aumento de la demanda de oxígeno. Paralelamente disminuye la solubilidad de éste. Cuando el contenido de oxígeno disminuye por debajo de 3 o 4 mg/l de oxígeno, es muy perjudicial para la vida de los peces.

Las reacciones biológicas que se desarrollan en el agua son influenciadas grandemente por la temperatura, pudiendo actuar sobre las poblaciones como un factor de control o como un factor letal. En efecto, para todas las especies existe una temperatura óptima en la cual se desarrollan, temperatura que depende de la especie, de la edad, de la estación, etc. Temperaturas inferiores hacen que el metabolismo se reduzca, temperaturas superiores hacen que se sobre activen los procesos de síntesis y de catabolismo, adquiriendo estos últimos cierto predominio.

Se sabe que la temperatura es una medida del calor y se produce como consecuencia de la absorción de las radiaciones caloríficas por la capa de aguas más superficiales. De modo general, la temperatura de las aguas superficiales está influenciada por la temperatura del aire y cuanto menos profunda es la columna de agua, mayor es la influencia de ésta.

Parámetros Físicos:**Turbidez**

La turbidez del agua es producida por materias en suspensión, como arcillas, limos, sedimentos, materias orgánicas e inorgánicas finamente divididos, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros organismos microscópicos. La turbidez es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y se absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. La correlación de la turbidez con la concentración en peso de la materia en suspensión es difícil de establecer, ya que en la dispersión luminosa también intervienen el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas.

Las partículas que producen la turbiedad en le agua varían en tamaño desde dimensiones coloidales (aproximadamente 10 nm) hasta diámetros del orden de 0,1 mm. Pueden dividirse en tres clases generales: arcillas, partículas orgánicas, resultado da la descomposición de restos de plantas y animales; y partículas fibrosas, por ejemplo, los minerales asbestos.

La turbiedad orgánica, consecuencia de la acumulación de microorganismos superiores puede ocurrir en cantidades tan grandes que las aguas se tornan turbias y de fea apariencia. Ejemplos de esto son los restos de algas en el agua superficial y el residuo proveniente de las bacterias de hierro en los sistemas de distribución (el agua rojiza es una manifestación de esto)

La determinación de la turbidez es de gran importancia en agua para consumo humano y en una gran cantidad de industrias procesadoras de alimentos y bebidas. La turbiedad del agua natural puede variar desde menos de 1 UNT hasta 1000 UNT. Los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda. Es posible lograr la remoción de la turbiedad mediante simple filtración o, de manera más efectiva, por medio de una combinación de coagulación, sedimentación y filtración.

Parámetros Físicos**Sólidos Totales**

Toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos se clasifica como materia sólida. En ingeniería ambiental es necesario medir la cantidad el material sólido contenido en una gran variedad de sustancias líquidas y semilíquidas que van desde aguas potables hasta aguas poluidas, aguas residuales, residuos industriales y lodos producidos en los procesos de tratamiento.

Sólidos totales es la expresión que se aplica a los residuos de material que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su consecutivo secado en estufa a una temperatura definida. Los sólidos totales retenidos por un filtro, y los sólidos disueltos o porción que atraviesa el filtro.

En aguas potables, la determinación de sólidos totales es la de mayor interés, por ser muy pequeña la cantidad existente se sólidos suspendidos. La determinación de sólidos suspendidos totales es importante para evaluar la concentración de aguas residuales y para determinar la eficiencia de las unidades de tratamiento.

Parámetros Físicos**Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

Los sólidos disueltos totales en el agua comprenden sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica. Los principales iones que contribuyen a los SDT son carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato, sodio, potasio, calcio y magnesio. Los SDT en el agua pueden deberse a fuentes naturales, descargas de efluentes de aguas servidas, escurrimientos urbanos o descargas de desechos industriales.

Sólidos Suspendidos Totales

Las aguas de los ríos llevan a veces grandes cantidades de materiales en suspensión como consecuencia de la erosión del suelo producida fundamentalmente por la lluvia. La materia en suspensión de un río depende del tramo de su curso, de la litología de su cuenca y la de sus afluentes, de la pluviométrica de cada zona, de la intensidad media de la lluvia, de la pendiente del río y de la cuenca, de la vegetación, etc., pudiendo el río iniciarse en una corriente clara y luego, a través del curso, recibir afluentes con cantidades variables de materia en suspensión, incrementando la de la corriente principal. En general, en todos los ríos se produce un incremento de materia en suspensión a lo largo de su curso. La materia en suspensión en una corriente tiene una correlación positiva con el caudal del río, aumentando en general a medida que aumente éste.

2.11.2 Parámetros Químicos

Dureza:

La dureza es una característica química del agua que esta determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio. La dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que se consuma más jabón, al producirse sales insolubles. En calderas y sistemas enfriados por agua, se producen incrustaciones en las tuberías y una pérdida en la eficiencia de la transferencia de calor. Además le da un sabor indeseable al agua potable. Grandes cantidades de dureza son indeseables por razones antes expuestas y debe ser removida antes de que el agua tenga uso apropiado para las industrias de bebidas, lavanderías, acabados metálicos, teñido y textiles.

La mayoría de los suministros de agua potable tienen un promedio de 250 mg/l de dureza. Niveles superiores a 500 mg/l son indeseables para uso domestico. La dureza es caracterizada comúnmente por el contenido de calcio y magnesio y expresada como carbonato de calcio equivalente.

Existen dos tipos de dureza:

Dureza Temporal: Esta determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como "Dureza de Carbonatos".

Dureza Permanente: está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como "Dureza de No carbonatos".

Parámetros Químicos:

Interpretación de la Dureza:

<u>Dureza como CaCO₃</u>	<u>Interpretación</u>
0-75	agua suave
75-150	agua poco dura
150-300	agua dura
> 300	agua muy dura

En agua potable el límite máximo permisible es de 300 mg/l de dureza.
En agua para calderas el límite es de 0 mg/l de dureza.

Alcalinidad:

La alcalinidad de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones de hidrogeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias básicas (alcalinas). La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampona de un agua.

En las aguas naturales la alcalinidad se presenta usualmente en forma de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio, sodio, potasio. En algunas aguas es posible encontrar otras clases de compuestos (boratos, silicatos, fosfatos, etc.) que contribuyen a su alcalinidad. La alcalinidad del agua se determina por titulación con un ácido mineral diluido y se expresa como mg/l de carbonato de calcio equivalente a la alcalinidad determinada.

Parámetros Químicos:**pH:**

La calidad del agua y el pH son a menudo mencionados en la misma frase. El pH es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH. Por ejemplo, las reacciones del cloro solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor de entre 6,5 y 8.

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H^+) en una sustancia.

La acidez es una de las propiedades más importantes del agua. El agua disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua. El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra. Tendrá entonces un pH alrededor de 7. El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica. Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. Cuanto más se aleje el pH por encima o por debajo de 7, más básica o ácida será la solución. El pH es un factor logarítmico; cuando una solución se vuelve diez veces más ácida, el pH disminuirá en una unidad. Cuando una solución se vuelve cien veces más ácida, el pH disminuirá en dos unidades.

Parámetros Químicos:**Oxígeno Disuelto:**

El Oxígeno Disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelta en el agua y que es esencial para los riachuelos y lagos saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal. Generalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir.

Gran parte del oxígeno disuelto en el agua proviene del oxígeno en el aire que se ha disuelto en el agua. Parte del oxígeno disuelto en el agua es el resultado de la fotosíntesis de las plantas acuáticas. Otros factores también afectan los niveles de OD; por ejemplo, en un día soleado se producen altos niveles de OD en áreas donde hay muchas algas o plantas debido a la fotosíntesis. La turbulencia de la corriente también puede aumentar los niveles de OD debido a que el aire queda atrapado bajo el agua que se mueve rápidamente y el oxígeno del aire se disolverá en el agua.

Además, la cantidad de oxígeno que puede disolverse en el agua (OD) depende de la temperatura también. El agua más fría puede guardar más oxígeno en ella que el agua más caliente. Una diferencia en los niveles de OD puede detectarse en el sitio de la prueba si se hace la prueba temprano en la mañana cuando el agua está fría y luego se repite en la tarde en un día soleado cuando la temperatura del agua haya subido. Una diferencia en los niveles de OD también puede verse entre las temperaturas del agua en el invierno y las temperaturas del agua en el verano. Asimismo, una diferencia en los niveles de OD puede ser aparente a diferentes profundidades del agua si hay un cambio significativo en la temperatura del agua.

Los niveles de oxígeno disuelto típicamente pueden variar de 0 - 18 partes por millón (ppm) aunque la mayoría de los ríos y riachuelos requieren un mínimo de 5 - 6 ppm para soportar una diversidad de vida acuática. Además, los niveles de OD muchas veces se expresan en términos de Porcentaje de Saturación.

Parámetros Químicos:**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):**

1.- Medida de la cantidad de oxígeno utilizada en la oxidación bioquímica de la materia orgánica en un tiempo dado, a una temperatura específica y bajo determinadas condiciones. No está relacionada con los requerimientos de oxígeno para la combustión química, la que está totalmente determinada por la disponibilidad del material como alimento biológico y por la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos durante la oxidación.

2.- Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica carbonácea y nitrogenada por acción de los microorganismos en condiciones de tiempo y temperatura especificados (generalmente cinco días y 20° C). Mide indirectamente el contenido de materia orgánica biodegradable.

3.- La demanda bioquímica de oxígeno es una prueba que mide la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios. Existen diversas variantes de la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno, entre ellas las que se refieren al periodo de incubación. La más frecuente es la determinación de DBO a los cinco días (DBO5). Las aguas subterráneas suelen contener menos de 1 ppm; contenidos superiores son indicativos de contaminación. En las aguas residuales domésticas se sitúa entre 100 y 350 ppm, y en las industriales depende del proceso de fabricación, pudiendo alcanzar varios miles de ppm. La relación entre los valores de DBO y DQO es indicativa de la biodegradabilidad de la materia contaminante. En aguas residuales un valor de la relación DBO/DQO menor de 0,2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y orgánico si es mayor de 0,6.

4.- Medida de la cantidad de oxígeno consumido en el proceso biológico de degradación de la materia orgánica en el agua; la DBO5 representa la cantidad de oxígeno consumido por dicho proceso en cinco días. El término "degradable" puede interpretarse como expresión de la materia orgánica que puede servir de alimento a las bacterias. A mayor, DBO mayor grado de contaminación.

Parámetros Químicos:**Demanda Química de Oxígeno:**

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg O₂/litro.

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos, acuíferos, etc.), aguas residuales o cualquier agua que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. No es aplicable para las aguas potables debido al valor tan bajo que se obtendría y, en este caso, se utiliza el método de oxidabilidad con permanganato potásico.

El método mide la concentración de materia orgánica. Sin embargo, puede haber interferencias debido a que haya sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas (sulfuros, sulfitos, yoduros, etc.).

2.11.3 Parámetros Microbiológicos:

Los coliformes son bacterias en forma de bacilos (cilindros) que están ampliamente distribuidas en la naturaleza y son huéspedes intestinales en el hombre y en general de los animales de sangre caliente. Muchas enfermedades infecciosas del hombre como la fiebre tifoidea, la disentería y el cólera son causadas por bacterias patógenas que se transmiten por medio de aguas contaminadas, de ahí la importancia de los coliformes totales y fecales como indicadores inmediatos de contaminación fecal en el agua. Una muestra de agua que no contenga coliformes totales y fecales es considerada libre de enfermedades producidas por bacterias e inclusive por otros gérmenes patógenos, como por ejemplo los virus (hepatitis a, rotavirus, etc.).

Coliformes Totales:

Al utilizar este término, los microbiólogos nos referimos en forma general a la familia de bacterias de los géneros *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Klebsiella*. La mayoría de estos organismos se encuentran en vida libre es decir en el medio ambiente y materia en descomposición, excepto el género *Escherichia* que vive solo en organismos como el hombre y animales de sangre caliente.

Coliformes Fecales:

Con este término se designan principalmente a los órdenes de bacterias *Escherichia* y *Klebsiella* spp. Las bacterias de éstas familias son indicadoras por excelencia de contaminación fecal del agua por heces de origen humano principalmente a la hora de analizar las situaciones en las que hay la posibilidad de contacto con agentes peligrosos para la salud-población no debemos referirnos sólo a la ingestión de agua residual depurada o al contacto con la piel y mucosas. En los sistemas de reutilización pueden resultar afectadas diversas matrices ambientales, de entre las cuales se deben destacar el aire, las aguas subterráneas, la tierra y los vegetales.

2.12 Sistemas Difusos

El sistema de inferencia difusa es una estructura computacional muy popular basada en los conceptos de la teoría difusa, en reglas del tipo si-entonces y en métodos de inferencia difusa. Los sistemas de inferencia difusa, actualmente han encontrado diversas aplicaciones exitosas dentro de una variedad de áreas tales como el control automático, la clasificación de datos, análisis de decisiones, los sistemas expertos, la predicción de series de tiempo, la robótica y el conocimiento de patrones. A causa de su naturaleza multidisciplinaria los sistemas de inferencia difusas son conocidos como sistemas expertos, modelos difusos, controladores lógicos difusos o simplemente como sistemas difusos.

2.12.1 Estructura de los sistemas difusos

Motivado por Zadeh y validado por Mamdani, el uso de los sistemas difusos han sido aplicados en una gran variedad de áreas tales como el control automático, el procesamiento digital de señales, las comunicaciones, los sistemas expertos, la medicina, etc. Sin embargo, las aplicaciones más significativas de los sistemas difusos se han concentrado específicamente en el área del control automático. Esencialmente un sistema difuso, es una estructura basada en conocimiento definida a través de un conjunto de reglas difusas del tipo si-entonces, las cuales, contienen una Cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del experto de como realizar un control adecuado.

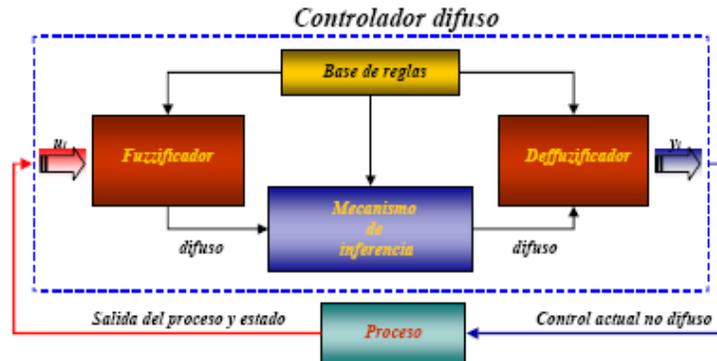


Figura 2.12.1 esquema general del control difuso

La figura 2.12.1 ilustra el diagrama a bloques y los componentes básicos de un sistema difuso en donde los conjuntos clásicos U_i y Y_i son llamados el universo del discurso para u_i y y_i respectivamente. En particular, $u_i \in U_i$ con $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y $y_i \in Y_i$ con $i = 1, 2, \dots, m$ definen las entradas y salidas correspondientes del sistema difuso. De acuerdo a la figura 3.1, es fácil observar que el sistema difuso utiliza conjuntos difusos, definidos por la base de reglas difusa, para cuantificar la información en la base de reglas y que el mecanismo de inferencia opera sobre estos conjuntos difusos para producir nuevos conjuntos difusos, por tanto, es necesario especificar como el sistema convertirá las entradas numéricas $u_i \in U_i$ en conjuntos difusos, un proceso llamado “difusificación”, tales que ellos puedan ser utilizados por el sistema difuso. De igual forma, el proceso llamado “desdifusificación” describe el mapeo de un espacio de acciones de control difuso en acciones de control no difuso. La desdifusificación por tanto, genera una acción de control no difusa la cual denotamos generalmente por y_q^{crisp} y es la mejor representación de una salida difusa inferida. A continuación examinaremos en detalle los elementos que conforman un sistema difuso.

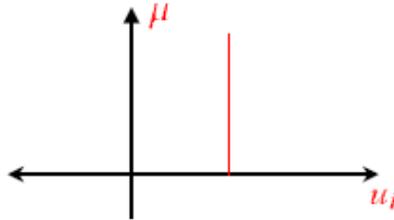


Figura 2.12.2: Función de membresía del singleton.

2.12.1.1 Difusificación

El proceso de la difusificación consiste en una transformación de un dato o de un conjunto clásico a su correspondiente conjunto difuso, por tanto, denotemos por U_i^* el conjunto de todos los posibles conjuntos difusos que pueden ser definidos por U_i y dado $u_i \in U_i$, denotemos la transformación difusa de u_i a un conjunto difuso por A_i^{fuz} , el cual es definido en el universo del discurso U_i . La transformación de un conjunto clásico a un conjunto difuso se produce mediante el uso del operador de fuzzificación, Passino en [13], definido por $F: U_i \rightarrow U_i^*$ en donde $F(u_i) = A_i^{fuz}$. Regularmente el uso del fuzzificador tipo singleton es el más utilizado para las aplicaciones en área del control automático y este es definido como un conjunto difuso $A_i^{fuz} \in U_i^*$ con función de membresía

$$\mu_{A_i^{fuz}}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = u_i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.12.1)$$

Cualquier conjunto difuso con la forma (2.12.1) en su función de membresía es llamado “singlen ton”, figura (2.12.2).

2.12.3 Mecanismo de inferencia difusa

El mecanismo de inferencia difusa es el núcleo de cualquier controlador difuso. Su comportamiento dinámico es en general caracterizado por un conjunto de reglas difusas de la forma:

$$\text{Si } x \text{ es } A \text{ entonces } y \text{ es } B \quad (2.12.2)$$

En donde A y B son valores lingüísticos definidos por un conjunto difuso en un universo x y y respectivamente. La cláusula Si, un antecedente, es una condición en el dominio de aplicación; la cláusula entonces, una consecuencia, es una acción de control dado al proceso bajo control. Con un conjunto de reglas difusas, el mecanismo de inferencia difusa es capaz de derivar una acción de control para un conjunto de valores de entrada. En otras palabras, una acción de control es determinada por las entradas observadas, las cuales representan el estado del proceso a ser controlado mediante el uso de las reglas de control. La expresión “Si x es A entonces y es B”, la cual se abrevia regularmente como $A \rightarrow B$, en esencia, es una relación binaria R de las variables x y y en el espacio del producto $X \times Y$. Existen diversos métodos de inferencia difusa que pueden ser formulados a través de los operadores t-norma y s-norma para calcular la relación difusa $R=A \rightarrow B$. En general, los siguientes métodos son los más utilizados:

1. Implicación de Dienes-Rescher ver [14]: En esta implicación la regla difusa (2.12.2) es interpretada como una relación RD en $A \times B$ con función de membresía

$$\mu_{R_D}(x, y) = \text{máx}[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (2.12.3)$$

2. Implicación Lukasiewics [14]: Específicamente, la regla difusa (2.12.2) es interpretada como una relación difusa RL en $A \times B$ con función de membresía

$$\mu_{\mathcal{R}_Z}(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)] \quad (2.12.4)$$

3. Implicación de Zadeht [14]: Aquí la regla difusa (2.12.2) es interpretada como una relación difusa RZ en $A \times B$ con función de membresía

$$\mu_{\mathcal{R}_Z}(x, y) = \max[\min(\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)] \quad (2.12.5)$$

4. Implicación Mamdani [14]: La regla difusa (2.12.2) es interpretada como una relación RM en $A \times B$ con función de membresía

$$\mu_{\mathcal{R}_M}(x, y) = \min[\mu_A, \mu_B], \text{ ó } \mu_{\mathcal{R}_M} = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (2.12.6)$$

Aunque estas cuatro ecuaciones representan diferentes interpretaciones de la regla difusa (2.12.2), la implicación de Mamdani, es la más utilizada para aplicaciones en los sistemas difusos, ecuación (2.12.6).

En general el operador inferencia se aproxima por medio de una t-norma.

2.12.3 Desdifusificación

La Desdifusificación es definida como un mapeo de un conjunto difuso B' en $V \subset R$ (que es la salida de la inferencia difusa) a un elemento de un conjunto clásico $y_q^{crisp} = y^* \in V$. Conceptualmente, la tarea de desdifusificar es especificar un punto, elemento de V , que refleje la mejor representación del conjunto difuso B' . A la fecha no existe un algoritmo óptimo para la defuzzificación, sin embargo, algunos métodos de defuzzificación son prácticos. Como es común, a continuación detallaremos dos de las técnicas más utilizadas para la defuzzificación.

- **El desdifusificador centro de gravedad (COG):** especifica la salida y^* como el centro del área cubierta por la función de membresía del conjunto difuso B , y esta es dada por:

$$y^* = y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^q \prod_{y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q}{\sum_{i=1}^R \prod_{y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q} \quad (2.12.7)$$

En donde R es el número de reglas difusas, b_i^q es el centro del área de la función de membresía de B_q^p asociado con el conjunto difuso implicado \hat{B}_q^i para la i – esima ($j, k, \dots, l; p, q$) i, y

$$\prod_{y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q \quad (2.12.8)$$

Denota el área bajo $\mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q$. Note que el sistema difuso debe ser definido tal que

$$\sum_{i=1}^R \prod_{y_q} \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) dy_q \neq 0 \quad (2.12.9)$$

Para toda u_i , o la salida y_q^{crisp} , no será definida apropiadamente. Este valor no debe ser cero si existe una regla seleccionada para cada posible combinación de las entradas del sistema difuso y si todo el conjunto difuso de la consecuencia tiene área distinta de cero.

- **Desdifusificador centro promedio:** El defuzzificador centro promedio determina la salida clásica y_q^{crisp} usando los centros de cada salida de la funciones de membresía. El valor óptimo o máximo de cada conclusión es representada mediante el conjunto difuso implicado:

$$y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^q \sup_{y_q} \{ \mu_{B_q^i}(y_q) \}}{\sum_{i=1}^R \sup_{y_q} \{ \mu_{B_q^i}(y_q) \}} \quad (2.12.10)$$

Donde el “sup” denota el supremo ($\sup_x \{ \mu(x) \}$) puede ser simplemente pensado como al valor más alto de $\mu(x)$ y b_i^q es el centro del área de la función de membresía de B_q^p asociado con el conjunto de implicación difusa $B_q^{\wedge i}$ para la i -ésima regla ($j, k, \dots, l; p, q$) i . Note que el sistema difuso puede ser definido como:

$$\sum_{i=1}^R b_i^q \sup_{y_q} \{ \mu_{B_q^i}(y_q) \} \neq 0 \quad (2.12.11)$$

Para toda u_i , en donde el $\sup_{y_q} \{ \mu_{B_q^i}(y_q) \} \neq 0$ es regularmente fácil de calcular si $\mu_{B_q^i}(y) = 1$ para al menos un y_q , entonces para varias estrategias de inferencias podemos utilizar los cálculos correspondientes para la i -ésima regla ($j, k, \dots, l; p, q$) i por lo que el conjunto difuso de implicaciones $B_q^{\wedge i}$ es definido en su función de membresía como

$$\mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) = \mu_i(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) * \mu_{B_q^F}(y_q) \quad (2.12.12)$$

Y obtener:

$$\sup_{y_q} \left\{ \mu_{\hat{B}_q^i}(y_q) \right\} = \mu_i(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (2.12.13)$$

Por lo tanto, la ecuación para la desdifusificación centro promedio esta dada por:

$$y_q^{crisp} = \frac{\sum_{i=1}^R b_i^q \mu_i(u_1, u_2, \dots, u_n)}{\sum_{i=1}^R \mu_i(u_1, u_2, \dots, u_n)} \quad (2.12.14)$$

Donde se debe asegurar que $\sum_{i=1}^R \mu_i(u_1, u_2, \dots, u_n) \neq 0$ para toda u_i .

2.13 Tipos de Sistemas difusos

En esta sección se presentan los controladores difusos de tipo Mamdani y Sugeno, los cuales han sido utilizados exitosamente en una gran variedad de aplicaciones en la comunidad del control difuso. Aunque, el objetivo del controlador difuso Mamdani es el de representar a un exitoso operador humano, el controlador difuso de tipo Sugeno sugiere ser más eficiente en cálculos y en métodos de adaptación (learning).

2.13.1 Mamdani

En esta subsección definiremos la construcción de un sistema difuso tipo Mamdani.

Primero, considérese una base de reglas difusas del tipo MISO descritas por (2.12.14)

$$\begin{aligned}
 R^1 &: \text{Si } u_1 \text{ es } A_1^j \text{ y } u_2 \text{ es } A_2^k \text{ y, } \dots \text{, y } u_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y_1 \text{ es } B_1^r \\
 &\quad \vdots \\
 R^j &: \text{Si } u_1 \text{ es } A_1^j \text{ y } u_2 \text{ es } A_2^k \text{ y, } \dots \text{, y } u_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y_j \text{ es } B_j^s \\
 &\quad \vdots \\
 R^m &: \text{Si } u_1 \text{ es } A_1^j \text{ y } u_2 \text{ es } A_2^k \text{ y, } \dots \text{, y } u_n \text{ es } A_n^l \text{ entonces } y_m \text{ es } B_m^t
 \end{aligned} \quad (2.12.15)$$

En donde $A_1^j, A_2^k, \dots, A_n^l$ y B_j^s y B_j^t para R^j , representan los valores lingüísticos correspondientes, Passino en [13].

Si la entrada al sistema difuso es dado por:

$$u_i = x_i^* \quad (2.12.16)$$

Entonces, haciendo uso del difusificador singleton

$$\mu = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i = x_i^* \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.12.17)$$

Se tiene que:

$$(u_i \text{ es } A_i^j) \rightarrow \mu_{A_i^j}(x_i^*) \quad (2.12.18)$$

En donde A_i^j denota el valor lingüístico correspondiente a la i -ésima entrada de la j -ésima regla difusa R^j correspondiente a la base de reglas difusas descritas por (2.12.15). Al hacer uso de la ecuación (2.12.16), la j -ésima regla difusa de la base de reglas (2.12.15) es representada por

$$R^j : \text{Si } x_1^* \text{ es } A_1^j \text{ y } x_2^* \text{ es } A_2^j \text{ y, ..., y } x_n^* \text{ es } A_n^j \text{ entonces } y_j \text{ es } B_j^s \quad (2.12.19)$$

En donde la operación difusa de la j -ésima regla (2.12.19) es definida por:

$$\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i^*) \quad (2.12.20)$$

El motor de inferencia difusa que utiliza esta base de reglas difusas es el mecanismo de inferencia del producto o implicación de Mamdani, por lo que para la j -ésima regla se tiene que:

$$\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i^*) \mu_{B_j^s}(y) \quad (2.12.21)$$

Y la l -regla p se obtiene mediante el operador "OR"

$$\mu_p = \max_{l=1}^M \left[\prod_i^n \mu_{A_i^l}(x_i^*) \mu_{B_{j=l}^s}(y) \right] \quad (2.12.22)$$

En donde el índice M representa el número de reglas para (2.12.15) $B_{q \wedge i}$ y denota el valor lingüístico correspondiente a la salida y_j de la j -ésima regla difusa R^j , con $j=1$.

El método de defuzzificación puede ser obtenido suponiendo que \bar{y}_j es centro de \hat{B}_j , la altura de la l – regla del conjunto difuso es:

$$(2.12.23)$$

$$\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i^*) \mu_{B_j}(\bar{y}_j)$$

$$Y \quad \mu_{\hat{B}_j}(\bar{y}_j) = 1 \quad (2.12.24)$$

Es un conjunto difuso normalizado, sustituyendo la ecuación (2.12.24) en la ecuación (2.12.23) se obtiene que el centro promedio es dado por

$$y^* = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{y}_j \left(\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i^*) \right)}{\sum_{j=1}^m \left(\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i^*) \right)}$$

Teorema 2.12.1 Sistemas difusos con base de reglas difusas, mecanismos de inferencia tipo producto, fuzzificador singleton y defuzzificador centro promedio poseen el siguiente mapeo no lineal.

$$y^{crisp} = \frac{\sum_{j=1}^m \bar{y}_j \left(\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)}{\sum_{j=1}^m \left(\prod_i^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)} \quad (2.12.25)$$

2.13.2 Takagi-Sugeno

El modelo difuso de Takagi-Sugeno (también conocido como modelo TKS) fue propuesto por Takagi, Sugeno y Kang [15], en un esfuerzo para formalizar un método sistemático para generar reglas difusas a partir de un conjunto de datos de entradas y salidas. Una típica regla difusa en el modelo de Sugeno tiene la forma:

$$\text{Si } x \text{ es } A \text{ y } y \text{ es } B \text{ entonces } z = f(x, y) \quad (2.12.26)$$

Donde A y B son conjuntos difusos en el antecedente, mientras $z = f(x, y)$ es una función clásica en la consecuencia. Usualmente $f(x, y)$ es un polinomio en las variables de entrada x y y pero este puede ser cualquier función mientras pueda describir apropiadamente la salida del modelo dentro de la región difusa especificada por la regla de antecedentes. Cuando $f(x, y)$ es un polinomio de primer orden, el sistema resultante de inferencia difusa es llamado modelo difuso de Sugeno de primer orden.

Cuando f es una constante, entonces tenemos un modelo difuso de Sugeno de orden cero, el cual puede ser visto como un caso especial de la regla de inferencia difusa de Mamdani, en la cual cada regla es especificada por un singletón (o una consecuencia pre-desdifusificadora), o un caso especial del modelo Tsukamoto. Sin embargo, un modelo de Sugeno de orden cero es equivalente a una red de funciones básica radiales. Un caso especial del modelo difuso lingüístico se obtiene cuando la consecuencia, el conjunto difuso B_i , es formada por conjuntos difusos de singlentes. Estos sistemas se representan simplemente como números reales b_i , obteniéndose las siguientes reglas:

$$R_i : \text{ Si } x \text{ es } A_i \text{ entonces } y = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, K. \quad (2.12.27)$$

Este modelo se llama modelo singleton. Un método simplificado de inferencia-desdifusificación se utiliza generalmente con este modelo:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^K \beta_i b_i}{\sum_{i=1}^K \beta_i} \quad (2.12.28)$$

Este método de desdifusificación se llama el medio difuso “fuzzy mean”. El modelo difuso del singleton pertenece a una clase general de las funciones aproximadoras, llamadas la extensión de las funciones básicas tomando la forma:

$$y = \sum_{i=1}^K \phi(x) b_i \quad (2.12.29)$$

La mayoría de las estructuras usadas en la identificación de sistemas no lineales, tales como las redes neuronales artificiales, las redes neuronales de funciones básicas radiales [16], o tiras (splines), pertenecen a esta clase de sistemas.

2.12.14 Matlab

MATLAB es el nombre abreviado de “Matrix Laboratory”. MATLAB es un programa para realizar cálculos numéricos con **vectores** y **matrices**. Como caso particular puede también trabajar con números escalares tanto reales como complejos, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de **gráficos** en dos y tres dimensiones. MATLAB tiene también un lenguaje de programación propio.

En cualquier caso, el lenguaje de programación de MATLAB siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, como ya se ha dicho, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo. MATLAB dispone de un código básico y de varias librerías especializadas (**toolboxes**).

Los componentes más importantes del entorno de trabajo de MATLAB 7.0 son las siguientes:

1. El **Escritorio de Matlab (Matlab Desktop)**, que es la ventana o contenedor de máximo nivel en la que se pueden situar (to dock) los demás componentes.

2. Los componentes individuales, orientados a tareas concretas, entre las que se puede citar:

- a. La ventana de comandos (**Command Window**),
 - b. La ventana histórica de comandos (**Command History**),
 - c. El espacio de trabajo (**Workspace**),
 - d. La plataforma de lanzamiento (**Launch Pad**),
 - e. El directorio actual (**Current Directory**),
 - f. La ventana de ayuda (**Help**)
-

- g. El editor de ficheros y depurador de errores (**Editor&Debugger**),
- h. El editor de vectores y matrices (**Array Editor**).
- i. La ventana que permite estudiar cómo se emplea el tiempo de ejecución (**Profiler**).

2.12.15 Unfuzzy

Es un programa de cálculo numérico, orientado a resolver problemas Lógicos Difusos. Por tanto desde el principio hay que pensar que todo lo que se pretenda hacer con el, será mucho más rápido y efectivo si se piensa en términos difusos. El propósito de UNFUZZY es brindar al usuario un ambiente de trabajo adecuado para el diseño, simulación e implementación de Sistemas de Lógica Difusa.

CAPITULO III

Marco Metodológico

CAPITULO III

En este capítulo se establecen y determinan diferentes índices de calidad del agua proveniente de tres ríos de la ciudad de Mérida, dichos resultados serán comparados con normas sanitarias tanto nacionales como internacionales.

3.1. Procedimiento General y Elementos de Cálculo de los Índices de Calidad del agua

El factor común de los índices que vamos a tratar en este capítulo, está en su estructura de cálculo, la cual se basa principalmente en el seguimiento consecutivo de 4 pasos, como lo son:

- Selección de variables.
- Determinación de Funciones de Calidad (curvas) para cada variable (subíndices).
- Asignación de Pesos a cada v subíndice (ponderación).
- Y finalmente, el cálculo agregado del índice a partir de los subíndices, por medio de una expresión matemática.

3.1.1 Selección de Variables

La selección de variables ha estado marcada, desde sus inicios, por la apreciación de expertos, agencias o entidades gubernamentales, que son las que determinan en el ámbito legislativo su importancia al establecerlos como estándares de calidad del agua.

En este aspecto, es usual que la escogencia de variables y en general el diseño de un ICA (Índice de Calidad del Agua), se de a partir de la metodología Delphi, que de acuerdo con [17], es la mas comúnmente usada para el diseño de índices de calidad de agua, este método fue originalmente diseñado por la Rand Corporation [18] y [19] y se constituye como una estrategia efectiva para la integración de opiniones de expertos.

Para la presente investigación se contó con la colaboración directa del jefe de la planta “Eleazar López Contreras” de Aguas de Ejido, del Estado Mérida, señor Giordano Mendoza el cual dada a su experiencia en el ámbito estudiado y junto con representantes académicos y otras personas que tienen relación con la calidad del agua, se estableció que las variables a estudiar en este proyecto fuesen las siguientes:

- **Parámetros Físicos:**
 1. Turbidez
 - **Parámetros Químicos:**
 1. Dureza
 2. Alcalinidad
 3. pH
 4. Oxígeno Disuelto
 - **Parámetros Microbiológicos:**
 1. Coliformes Fecales
 2. Coliformes Totales
-

Ahora bien, cuando en las aguas se vierten aguas residuales no tratadas, deben estudiarse otros parámetros de calidad como los son:

Demanda Bioquímica de Oxígeno.
Demanda Química de Oxígeno.
Sólidos Totales.
Sólidos Disueltos Totales.
Sólidos Suspendidos Totales.
Temperatura.
Nutrientes en especial N y P. *
Compuestos orgánicos volátiles.
Metales, por ejemplo, Hg, Pb y Cd.
Pesticidas.
Nitratos. *
Nitritos + Nitratos. *
Nitrógeno amoniacal. *

Los parámetros identificados con * son los que se analizan en la siguiente investigación, además de los parámetros físicos-químicos y bacteriológicos expuestos anteriormente.

3.1.2 Determinación de Funciones de Calidad (Curvas) para cada variable (Subíndices)

En cuanto a la funciones de calidad comúnmente entendidas como curvas de calidad, cabe destacar que, las variables son expresadas en diferentes unidades (mg/l, % saturación, conteos/volumen etc.), lo que hace imposible en primera instancia su agregación. Como consecuencia de esto, se busca transformar las variables a una misma escala adimensional, para lo cual se establecen dichas funciones.

Desde la metodología Delphi, es notorio que el cálculo de cada función para cada variable en un índice de calidad de agua requiere de 3 pasos:

- Combinar las evoluciones de los expertos en cada sesión en único subíndice para los usos propuestos (abastecimiento público, recreación, pesca, agricultura, industria, etc.).
 - Combinar estos subíndices en un único índice de uso general.
 - Establecer una única función para cada subíndice.
-

Los investigadores promediaron todas las curvas para producir, de la misma manera, una curva promedio para cada contaminante. Luego las curvas fueron graficadas a través del uso de la media aritmética con un límite de confianza del 80 % sobre este valor medio. Límites de confianza cercanos a la media representaba un contaminante variable, hecho que se verifica en los estudios, mientras que límites de confianza amplios representaba desacuerdos entre las respuestas. Ver Figuras (3.1.2.1 a 3.1.2.11)

3.1.3 Asignación de Pesos a cada Subíndice (Ponderación)

En el diseño de sistemas de indicación de calidad del agua, la asignación de pesos (ponderación) de cada variable, tiene que ver mucho con la importancia de los usos pretendidos y la incidencia de cada variable.

El establecimiento de los pesos para los subíndices, fue una tarea crítica. Era importante que los pesos sumaran uno, con la atenuante de tener en cuenta las valoraciones dadas por los expertos. Para lograr esto se calcularon promedios aritméticos de las valoraciones para todas las variables, los pesos temporales eran calculados dividiendo la importancia de cada parámetro sobre la valoración del peso de la variable de mayor importancia.

3.1.4. Calculo Agregado de los Índices a partir de los Subíndices

Al proceder a la agregación del índice se ha observado que la escogencia de la fórmula es un factor clave, tanto así, que muchas de las discusiones se han centrado en demostraciones de las bondades de la fórmula final, en la medida en que esta es más o menos sensible y reduce o amplía el escalamiento. Como hecho común, es apreciable la tendencia generalizada a utilizar promedios, bien sea aritméticos o geométricos ponderados.

Es importante anotar que en estudios más recientes, los casos novedosos están precisamente en este punto, en algunos estudios buscan mayor complejidad matemática, dadas las mejores herramientas computacionales de nuestra época, lo que a su vez a llevado al desarrollo de fórmulas específicas para cursos de aguas particulares.

3.1.4.1 Formulaciones

A continuación se listan los diferentes índices objeto de estudio (Tabla 2.8.1) y se presenta de manera comparativa su número de variables, su estructura y su fórmula de agregación.

Como se puede ver en la Tabla 2.8.1, existen muchas formulaciones y/o ecuaciones utilizadas para el cálculo de un ICA, al igual que ha existido marcada preferencia desde inicio por el cálculo de una tendencia central.

Un estudio de [20], llevo a cabo una revisión de diferentes formulaciones para la agregación de los subíndices y concluyo, para la época, que el promedio aritmético ponderado modificado [21] y la suma ponderada modificada [22], proveen los mejores resultados para el cálculo de la “calidad general del agua”.

De la misma forma, el promedio geométrico ponderado ha sido ampliamente empleado bajo el criterio de su utilidad, sobre todo cuando existe una gran variabilidad entre las variables en la muestra.

Para efectos de estudio, se llevo a cabo una minuciosa comparación de las formulaciones establecidas en la Tabla 2.8.1, basándose en las variables físico-químicas y bacteriológicas del agua. Para apreciar mejor este estudio se sugiere ver Tabla 4.1.4.1.1 donde se muestra las variables que utiliza cada fórmula. Luego tomando en cuenta que ciertas formulaciones, se encuentran inmersas en otras, como lo son: Promedio Ponderado y Promedio Armónico Cuadrado no Ponderado, y detallando que el Promedio Geométrico no Ponderado no se puede utilizar dada la inmensa escasez de datos ni tampoco las fórmulas de Subíndice Mínimo y Subíndice Máximo por falta de información, se llego a la conclusión de que los índices que formaran parte de este estudio son los siguientes: Ver Tabla 3.1.4.1.2

- **Promedio Aritmético Ponderado**
 - **Promedio No Ponderado Modificado**
 - **Promedio Geométrico Ponderado**
-

3.1.5 Escalas de clasificación

Las categorías, esquemas o escalas de clasificación, son un punto de igual o mayor interés que los anteriores, pues es aquí donde finalmente el valor obtenido del índice totalizado por la fórmula de agregación es transformado en una característica que define la calidad final del agua.

A este respecto, es conveniente aclarar que tales categorías deben ser definidas con anticipación y deben tener concordancia con el desarrollo de las curvas de los subíndices, con el fin de que los sistemas puedan leerse por separado desde los subíndices y guarden armonía con el totalizado. Es decir, cada curva de cada subíndice debe haberse desarrollado con el mismo sistema de clasificación final que permita, por ejemplo, que si para el Oxígeno Disuelto el valor de calidad de 50, está en una categoría de calidad de agua media, todas las demás variables incluidas en el índice, tengan la misma equivalencia respecto a la misma categoría. De otra manera, puede darse el caso de contrariedades en la clasificación final.

En la tabla 3.1.5.1., es apreciable la gran diferencia que existen en este aspecto entre diferentes índices, los cuales de acuerdo con la opinión de expertos y a los estándares manejados por diferentes agencias estatales pueden clasificar el agua de manera diferente de acuerdo al valor obtenido por la agregación final de los subíndices.

Tabla 3.1.5.1. Escalas de Clasificación Comparativas de 4 Índices

Escala/Índice	ICA1	ICA2	ICA3	ICAGeneral
Excelente	85-100	88-100	88-100	100
Buena	65-90	68-90	68-90	90
Media	45-70	55-70	45-70	70
Mala	20-50	35-60	25-50	50
Muy Mala	0-25	0-40	0-30	30

CAPITULO 4

Análisis Comparativo de los Índices y resultados

CAPITULO IV

Análisis Comparativo de los Índices y resultados

4.1. Aplicaciones

Con el fin de dar mayor claridad a la problemática expuesta es en este capítulo, seguidamente se establecerán tres casos, a manera de aplicaciones que demuestran el comportamiento de algunos de los índices estudiados y que confirman lo expuesto con anterioridad.

Tales aplicaciones son:

- **Caso 1:** Unificación del calculo del ICAGeneral para los ríos:
 - Portuguesa.
 - Montalbán
 - La Fría.
- **Caso 2:** Modelo Difuso para el Cálculo del ICAGeneral basado en mediciones de variables para los ríos antes mencionados.
- **Caso 3:** Comparar los resultados arrojados por los casos 1 y 2 con los niveles estándar de las normativas nacionales e internacionales.

4.1.1 Caso 1: Unificación del cálculo del ICAGeneral para los ríos:

- Portuguesa.
 - Montalbán
 - La Fría.
-

Tras una exhaustiva comparación de los índices expuestos en la Tabla 2.1 se decidió introducir al modelo tres tipos de índices, los cuales se presentan a continuación:

- **Promedio Aritmético Ponderado**

$$ICA1 = \sum_{i=1}^n qiWi$$

Donde:

- $ICA1$: Índice de Calidad del Agua
- qi : Subíndice de Parámetro i
- W_i : Factor de Ponderación para el Subíndice i
- n : numero de variables

- **Promedio No Ponderado Modificado**

$$ICA2 = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi^2 \right)$$

Donde:

- $ICA2$: Índice de Calidad del Agua
- qi : Subíndice de Parámetro i
- n : numero de variables

- **Promedio Geométrico Ponderado**

$$ICA3 = \prod_{i=1}^n qi^{Wi}$$

Donde:

- $ICA3$: Índice de Calidad del Agua
 - qi : Subíndice de Parámetro i
 - W_i : Factor de Ponderación para el Subíndice i
 - n : numero de variables
-

4.1.1.1 Conjuntos de Datos

El conjunto de datos tenidos en cuenta para este análisis se muestran a continuación:

Tabla 4.1.1.1.Datos del Río Portuguesa

	% OD	CF	pH	Fosf	Nitra	Turb	N+Ni	N_amo	Alc	CT	Dur
Enero	82	679	9,2	0,004	0,956	5,20	0,216	0,00010	34	700	31
Febrero	80	380	8,7	0,002	0,528	7,80	0,119	0,00025	35	387	40
Marzo	77	148	7,9	0,001	1,104	5,30	0,025	0,00032	32	180	36
Abril	88	267	7,8	0,008	0,676	5,20	0,153	0,00023	32	200	38
Mayo	78	160	8,2	0,006	0,759	7,81	0,172	0,00044	28	180	24
Junio	78	220	8,8	0,001	1,022	6,22	0,231	0,00050	32	310	30
Julio	79	140	7,9	0,002	0,654	4,77	0,113	0,00060	29	150	25
Agosto	92	325	8,9	0,003	1,421	5,30	0,221	0,00050	28	350	32
Septiembre	86	444	8,3	0,008	1,042	6,50	0,020	0,00074	31	460	34
Octubre	81	115	7,4	0,005	0,350	5,38	0,125	0,00020	29	140	35
Noviembre	88	98	8,3	0,004	0,421	4,69	0,019	0,00010	32	105	36
Diciembre	82	540	8,7	0,002	0,985	4,34	0,226	0,00090	33	590	28

Tabla 4.1.1.2. Datos del Río Montalbán

	% OD	CF	pH	Fosf	Nitra	Turb	N+Ni	N_Am	Alc	CT	Dur
Enero	83	584	8,3	0,005	1,25	4,5	0,055	0,0007	30	625	34
Febrero	78	238	7,9	0,002	1,012	5,2	0,272	0,0003	28	325	32
Marzo	77	155	8,2	0,001	0,152	3,5	0,077	0,0002	26	190	26
Abril	89	235	7,4	0,006	1,04	4,6	0,187	0,0005	26	280	30
Mayo	76	80	8,9	0,003	0,517	6,2	0,102	0,0001	22	90	24
Junio	84	110	7,2	0,003	0,904	6,7	0,248	0,0004	26	180	32
Julio	80	160	8,6	0,007	0,803	3,2	0,016	0,0006	25	220	28
Agosto	94	444	8,7	0,008	0,485	4,7	0,172	0,0006	28	480	32
Septiembre	86	560	8,0	0,006	1,42	4,9	0,261	0,0002	26	577	30
Octubre	79	125	7,8	0,002	0,161	5,1	0,022	0,0003	28	135	30
Noviembre	90	95	8,2	0,001	0,719	5,3	0,012	0,0001	26	95	28
Diciembre	93	518	9,2	0,005	0,843	3,4	0,192	0,0004	30	540	26

Tabla 4.1.1.3 Datos del Río La Fría

	%OD	CF	pH	Fosf	Nitrato	Turb	N+Ni	N amo	Alc	CT	Dur
Enero	83	23	7,8	0,004	1,02	0,30	0,102	0,0001	34	43	40
Febrero	80	43	7,7	0,006	1,4	0,22	0,063	0,0007	27	54	24
Marzo	80	16	7,4	0,005	0,625	0,03	0,055	0,0005	30	26	34
Abril	94	93	7,3	0,007	0,433	0,20	0,175	0,0002	25	93	23
Mayo	79	92	7,2	0,0006	0,978	1,4	0,240	00001	26	101	29
Junio	84	180	7,1	0,003	0,795	1,2	0,235	0,0006	33	292	28
Julio	82	60	7,2	0,005	0,396	0,05	0,010	0,0002	30	78	32
Agosto	98	10	8	0,002	1,025	015	0,141	0,0005	28	25	34
Septiembre	87	180	7,4	0,003	0,127	0,30	0,148	0,0008	30	260	26
Octubre	87	34	7,6	0,001	0,928	0,12	0,021	0,0006	22	43	24
Noviembre	90	65	8	0,004	0,354	0,13	0,005	0,0003	28	82	25
Diciembre	84	120	7,8	0,002	1,21	0,18	0,127	0,0002	31	160	27

4.1.1.2 Calculo de los índices de calidad

- **Promedio Aritmético Ponderado**

$$ICA1 = \sum_{i=1}^n qiWi$$

Este índice también se conoce como INSF (Índice de la Fundación Nacional de Saneamiento) de los Estados Unidos. Originalmente esta diseñado para ser modelado por las siguientes variables de calidad:

Tabla 4.1.1.2.1 (Variables de Calidad con su respectivo Factor de Ponderación)

Parámetro	Factor de ponderación
Oxigeno Disuelto	0.17
Coniformes Fecales	0.16
pH	0.11
DBO	0.11
Cambio de T°	0.10
Fosfatos totales	0.10
Nitratos	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos Totales	0.07

Si por alguna razón, alguna de estas variables llegara a faltar, como es nuestro caso, que no contamos con: DBO, Cambio de T° y Sólidos Totales, el valor total del índice puede ser calculado por la distribución de sus pesos entre las demás variables, haciendo uso del Prorratio por Cociente, como se muestra a continuación:

Tabla 4.1.1.2.2 (Calculo del nuevo Factor de Ponderación utilizando Prorratio por Cociente)

Parámetro	Factor de ponderación Inicial	% que aporta al modelo	% que se le sumara al FPI	Factor de ponderación final
Oxigeno Disuelto	0.17	23.61	0.066108	0,236
Coniformes Fecales	0.16	22.22	0.062216	0,222
pH	0.11	15.27	0.042756	0,153
DBO	0.11			
Cambio de T°	0.10			
Fosfatos totales	0.10	13.88	0.038864	0,139
Nitratos	0.10	13.88	0.038864	0,139
Turbidez	0.08	11.11	0.031108	0,111
Sólidos Totales	0.07			
	0.72	100%	0.28	1

Nota: No contamos con las variables de color rojo y recordar que la suma total de los pesos originales = 1

El **0.72** resulta de restarle a la suma total de los pesos originales, los pesos correspondientes a las variables faltantes, es decir $1 - (0.11 + 0.10 + 0.07)$

El **0.28** resulta de sumar todos los **% que se le sumara al FPI**.

Para llegar a los resultados expuestos en la Tabla 4.2.1.2.2 se procede de la siguiente manera:

- Para calcular el **% que aporta al modelo** dividido el $FPI/0.72$
- Para calcular el **% que se le sumara al FPI** se multiplica el **% que aporta la variable al modelo** por la suma de los pesos de las variables faltantes es decir por **0.28**.

Teniendo definido ya los pesos para cada variable, se procede a calcular su correspondiente subíndice, para los lograr esto, se debe tener a la mano el valor numérico de la variable en estudio y Ver Figuras (4.1.2.1 a 4.1.2.15)

Un ejemplo de lo anterior expuesto se puede apreciar a continuación:

Tabla 4.1.1.2.3 (Calculo del ICA1 al Río Portuguesa para el mes de Enero del año 2005)

Parámetro	Resultado	Unidades	Q-valor	Factor de ponderación	Subtotal
Oxígeno Disuelto	82	% sat	87	0,236	20.532
Coniformes Fecales	679	#/100 ml	26	0,222	5.772
pH	9.2	Unidades	40	0,153	6.12
DBO		mg/l			
Cambio de T°		°C			
Fosfatos totales	0.004	mg/l PO4-P	99	0,139	13.761
Nitratos	0.956	mg/l NO3	97	0,139	13.483
Turbidez	5.20	NTU	87	0,111	9.657
Sólidos Totales		mg/l			
Sumatoria de índice				1	69.325

Para hacer más fácil este procedimiento se sugiere automatizar estos cálculos, utilizando por ejemplo una hoja de cálculo en Excel o una Red Neuronal.

- **Promedio No Ponderado Modificado**

$$ICA2 = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi^2 \right)$$

Para el cálculo de este ICA solo es necesario conocer los subíndices correspondientes a cada variable, Ver Figuras (4.1.2.1 a 4.1.2.15).

Tabla 4.1.1.2.4 (Calculo del ICA2 al Río Portuguesa para el mes de Enero del año 2005)

Parámetro	Resultado	Q-valor	Subtotal
Oxígeno Disuelto	82	87	15.138
pH	9.2	40	3.2
DBO			
Nitratos+Nitritos	0.216	80	12.8
Sólidos suspendidos			
Turbidez	5.20	87	15.138
Nitrógeno Amoniacal no iónico	0.00010	99	19.602
Sumatoria de Índice			65.878

- **Promedio Geométrico Ponderado**

$$ICA3 = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

De igual manera, tal como se procedió con el primer ICA1, se presenta a continuación, los parámetros con sus pesos originales y sus pesos modificados, dada a la escasez de datos.

Tabla 4.1.1.2.5 (Variables de Calidad con su respectivo Factor de Ponderación)

Parámetros	Factor de Ponderación
% OD	0.103
DBO	0.096
DQO	0.053
pH	0.063
Sólidos Suspendidos	0.033
Coliformes Totales	0.083
Coliformes Fecales	0.143
Nitratos	0.053
Amonio	0.043
Fosfatos	0.073
Fenoles	0.033
Diferencia de Temperatura	0.043
Alcalinidad	0.055
Dureza	0.058
Cloruros	0.068

Tabla 4.1.1.2.6 (Calculo del nuevo Factor de Ponderación utilizando Prorratio por Cociente)

Parámetros	Factor de Ponderación	% que aporta al modelo	% que se le sumara al FPI	Factor de ponderación final
% OD	0.103	16.32	0.0602208	0.16
DBO	0.096			
DQO	0.053			
pH	0.063	9.98	0.0368262	0.099
Sólidos Suspendedos	0.033			
Coliformes Totales	0.083	13.15	0.0485235	0.13
Coliformes Fecales	0.143	22.66	0.0836154	0.23
Nitratos	0.053	8.4	0.030996	0.084
Amonio	0.043			
Fosfatos	0.073	11.57	0.0426933	0.116
Fenoles	0.033			
Diferencia de Temperatura	0.043			
Alcalinidad	0.055	8.72	0.0321768	0.087
Dureza	0.058	9.19	0.0339111	0.092
Cloruros	0.068			

Teniendo definido ya los pesos para cada variable, se procede a calcular su correspondiente subíndice, para los lograr esto, se debe tener a la mano el valor numérico de la variable en estudio y Ver Figuras (4.1.2.1 a 4.1.2.15).

Tabla 4.1.1.2.7 (Calculo del ICA3 al Río Portuguesa para el mes de Enero del año 2005)

Parámetro	Resultado	Q-valor	Factor de ponderación	Subtotal
% OD	82	87	0.16	2.043
DBO				
DQO				
pH	9.2	40	0.099	1.441
Sólidos Suspendidos				
Coliformes Totales	700	27	0.13	1.535
Coliformes Fecales	679	26	0.23	2.116
Nitratos	0.956	97	0.084	1.468
Amonio				
Fosfatos	0.004	99	0.116	1.704
Fenoles				
Diferencia de Temperatura				
Alcalinidad	34	96	0.087	1.487
Dureza	31	90	0.092	1.513
Cloruros				
Sumatoria de Índice				53.81

Como podemos apreciar, estos cálculos son fáciles de realizar. Si se desea acceder a datos mensuales de los restantes ríos se sugiere ver (Tablas 4.1.2.4.2 y 4.1.2.4.3)

4.1.1.3 Calculo de ICAGeneral por medio de un Modelo Difuso

En procura de establecer un índice unificador de las informaciones contenidas en los índices anteriormente presentados, se sugiere construir un modelo difuso para medir la calidad del agua. El modelo a ser construido será posteriormente validado haciendo uso del Toolbox sobre Lógica Difusa contenido en la versión del software Matlab 7. Además de utilizar el Toolbox sobre Lógica Difusa de Matlab, haremos uso también de otro programa Lógico Difuso llamado UNFUZZY. El propósito de UNFUZZY es brindar al usuario un ambiente de trabajo adecuado para el diseño, simulación e implementación de Sistemas de Lógica Difusa. La idea principal del modelo difuso, es la de incorporar la información del mayor número posible de variables que permiten determinar la calidad del agua.

Fases en la Construcción de un Modelo Difuso

- 1.- Definición de las variables de Entrada
- 2.- Definición de los conjuntos difusos correspondientes a cada variable
- 3.- Diseño de la base de reglas
- 4.- Definición de las variables de salida

El orden en el que se deben efectuar estos pasos sólo está regido por las siguientes reglas:

- "El diseño de la base de reglas debe ser posterior al diseño de los Universos de Entrada y de Salida".
 - "Algunos cambios en los Universos de Entrada o de Salida (como el número de conjuntos difusos de alguna variable) implican una redefinición de la Base de Reglas".
-

Estructura del Modelo Difuso para el ICAGeneral (Utilizando Matlab)

```
[System]
Name = 'ModeloFinal'
Type = 'sugeno'
Versión = 2.0
NumInputs = 3
NumOutputs = 1
NumRules = 58
AndMethod = 'min'
OrMethod = 'probor'
ImpMethod = 'prod'
AggMethod = 'sum'
DefuzzMethod = 'wtaver'
```

```
[Input1]
Name = 'ICA1'
Range = [0 100]
NumMFs = 5
MF1 = 'MuyMala':'trimf', [0 12.5 25]
MF2 = 'Mala':'trimf', [20 33 50]
MF3 = 'Media':'trimf', [45 58 70]
MF4 = 'Buena':'trimf', [65 78 90]
MF5 = 'Excelente':'trimf', [85 94 100]
```

```
[Input2]
Name = 'ICA2'
Range = [0 100]
NumMFs = 5
MF1= 'MuyMala':'trimf', [0 20 40]
MF2 = 'Mala':'trimf', [35 48 60]
MF3 = 'Media':'trimf', [55 64 70]
MF4 = 'Buena':'trimf', [68 80 90]
MF5 = 'Excelente':'trimf', [88 94 100]
```

```
[Input3]
Name = 'ICA3'
Range = [0 100]
NumMFs = 5
MF1= 'MuyMala':'trimf', [0 15 30]
MF2 = 'Mala':'trimf', [25 38 50]
MF3 = 'Media':'trimf', [45 58 70]
MF4 = 'Buena':'trimf', [68 78 90]
MF5 = 'Excelente':'trimf', [88 94 100]
```

[Output1]
 Name = 'ICAG'
 Range = [0 1]
 NumMFs = 5
 MF1 = 'MuyMala':'linear', [0 0 0 30]
 MF2 = 'Mala':'linear', [0 0 0 50]
 MF3 = 'Media':'linear', [0 0 0 70]
 MF4 = 'Buena':'linear', [0 0 0 90]
 MF5 = 'Excelente':'linear', [0 0 0 100]

Estructura del Modelo Difuso para el ICAGeneral (Utilizando Unfuzzy)



Descripción : difusor de la calidad del ag

4.1.1.4 Resultados caso 1.

En la tabla 4.2.1.4.1., se listan los valores obtenidos por los diferentes índices de calidad a lo largo del año 2005 para el Río Portuguesa al igual que su correspondiente ICAGeneral arrojado por el modelo difuso.

Tabla 4.1.1.4.1. Salida arrojada por el Modelo Difuso para el río Portuguesa

Mes	ICA1	ICA2	ICA3	ICAG Matlab	ICAG Unfuzzy
Enero	69,33	61,77	54,00	70	64.75
Febrero	71,83	67,90	60,00	70	67.66
Marzo	79,28	82,45	67,73	90	67.66
Abril	79,99	83,90	65,86	90	67.66
Mayo	77,98	76,74	65,20	90	65.67
Junio	72,27	63,04	60,63	70	65.67
Julio	80,79	83,91	66,90	90	80.00
Agosto	73,44	66,26	58,96	70	67.56
Septiembre	75,72	78,15	59,47	90	79.86
Octubre	78,27	75,69	67,84	90	77.36
Noviembre	80,87	82,08	70,80	90	80.00
Diciembre	72,19	65,93	55,18	70	67.16

Para ver resultados de los demás ríos, se sugiere ver (Tabla 4.1.2.4.2 y Tabla 4.1.2.4.3)

Como se puede observar, la clasificación dada por cada índice, es muy parecida, dada a la similitud de las variables que los constituyen. Es aquí donde se nota nuevamente, como las formulas de agregación tienen una gran influencia en el resultado final. Además no podemos dejar a un lado el resultado arrojado por el modelo difuso, el cual toma la información que a su vez generan los demás índices, generando así, un receptor final de información.

Casos como los que se presentaron, pueden conducir al analista a una interpretación errónea del resultado arrojado por el índice, es decir, si por ejemplo, el ICA1 predice que el valor del agua es buena mas no excelente, lo que significa es que algunas de las variables que constituyen el mismo, se encuentran en valores de calidad que no son los adecuados. Como hablamos de un mismo conjunto de datos, para realizar el cálculo de los índices, es importante recordar, que no puede haber una marcada diferencia en los resultados, dado que, para impedir a que esto ocurriera, se llevo a cada índice a una misma escala, si por el contrario, no se hubiese tomado esta iniciativa, hechos como estos generarían perdida de información y conllevarían a un enmascaramiento de la condición real de los cambios que se pueden presentar en un curso de agua.

El comportamiento de los parámetros es un factor clave a la hora de tomar una decisión, puesto que existen variables de cuidado responsables de que ciertos índices no alcancen un valor deseado. Un ejemplo de esto, son los Coliformes Fecales, Coliformes Totales, Nitratos, Fosfatos, DBO y Sólidos Totales. Tales variables cuando se encuentran en un valor medio no permiten que los índices alcancen valores de excelente, a pesar de que las demás variables así lo demuestren.

Para aclarar un poco la interpretación de los resultados, a continuación se hará un breve resumen, del futuro uso que se le puede brindar al cuerpo de agua en estudio:

Escala de clasificación del ICAGeneral según su futuro uso:

Uso como Agua Potable

Valor de ICAG	Interpretación
100	Excelente calidad, no requiere purificación para consumo
90	Purificación menor requerida
70	Dudoso su consumo sin purificación
50	Tratamiento potabilizador necesario
30	Dudosa para consumo

Uso en agricultura

Valor de ICAG	Interpretación
100	No Requiere purificar para riego
90	Purificación menor para cultivos que requieren alta calidad de agua
70	Utilizable en la mayoría de los de los cultivos
50	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos
30	Inaceptable para riego

Uso en Pesca y Vida Acuática

Valor de ICAG	Interpretación
100	Pesca y vida acuática abundante
90	Limite para peces muy sensitivos
70	Dudosa la pesca sin riesgos de salud
50	Vida acuática limitada a especies muy resistentes
30	Inaceptable para actividad pesquera y vida acuática

Uso Industrial

Valor de ICAG	Interpretación
100	No se requiere purificación
90	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua para operación
70	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal
50	Tratamiento para mayoría de usos
30	Uso restringido

Uso Recreativo

Valor de ICAG	Interpretación
100	Cualquier tipo de deporte acuático
90	Cualquier tipo de deporte acuático
70	Precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
50	Dudosa para contacto con el agua
30	Contaminación visible, evitar cercanía

4.1.2 Caso 2: Modelo Difuso para el Cálculo del ICAGeneral basado en mediciones de variables para los ríos antes mencionados.

Sobre la base de las ideas expuestas, se considero establecer un nuevo Índice de Calidad basado ahora, en mediciones de variables, en comparación con el modelo expuesto anteriormente, este modelo difuso, no requiere el tratamiento de sus entradas.

4.1.2.1.1 Conjuntos de Datos

El conjunto de datos tenidos en cuenta para este análisis se muestran en: **ver Tabla 4.2.1.1.1**

4.1.2.2 Calculo de ICAGeneral por medio de un Modelo Difuso

Para lograr esto seguiremos los mismos lineamientos, en cuanto a las fases de Construcción de un Modelo Difuso:

- 1.- Definición de las variables de Entrada
 - 2.- Definición de los conjuntos difusos correspondientes a cada variable
 - 3.- Diseño de la base de reglas
 - 4.- Definición de las variables de salida
-

Estructura del Modelo Difuso para el ICAGeneral (Utilizando Matlab)

```
[System]
Name = 'ModeloGeneral'
Type = 'sugeno'
Versión = 2.0
NumInputs = 7
NumOutputs = 1
NumRules = 299
AndMethod = 'min'
OrMethod = 'probor'
ImpMethod = 'prod'
AggMethod = 'sum'
DefuzzMethod = 'wtaver'

[Input1]
Name = 'ColiformesF'
Range = [0 2500]
NumMFs = 3
MF1 = 'Bajo':'trimf', [0 30 120]
MF2 = 'Medio':'trimf', [100 350 800]
MF3 = 'Alto':'trimf', [700 1500 2500]

[Input2]
Name = 'Ph'
Range = [0 10]
NumMFs = 3
MF1 = 'Bajo':'trimf', [0 3.5 6.5]
MF2 = 'Medio':'trimf', [6 7.3 8.5]
MF3 = 'Alto':'trimf', [8 9 10]

[Input3]
Name = 'OD'
Range = [0 200]
NumMFs = 3
MF1 = 'Bajo':'trimf', [0 25 50]
MF2 = 'Medio':'trimf', [45 80 120]
MF3 = 'Alto':'trimf', [115 160 200]
```

[Input4]

Name = 'Dureza'

Range = [0 200]

NumMFs = 3

MF1 = 'Bajo': 'trimf', [0 15 30]

MF2 = 'Medio': 'trimf', [25 53 95]

MF3 = 'Duras': 'trimf', [80 130 200]

[Input5]

Name = 'Alcalinidad'

Range = [0 200]

NumMFs = 3

MF1 = 'Bajo': 'trimf', [0 15 30]

MF2 = 'Medio': 'trimf', [25 53 95]

MF3 = 'Alto': 'trimf', [85 135 200]

[Input6]

Name = 'ColiformesT'

Range = [0 2500]

NumMFs = 3

MF1 = 'Bajo': 'trimf', [0 30 120]

MF2 = 'Medio': 'trimf', [100 350 800]

MF3 = 'Alto': 'trimf', [700 1550 2500]

[Input7]

Name = 'Turbiedad'

Range = [0 100]

NumMFs = 3

MF1 = 'Bajo': 'trimf', [0 13 25]

MF2 = 'Medio': 'trimf', [23 35 50]

MF3 = 'Alto': 'trimf', [48 75 100]

[Output1]

Name = 'IndiceG'

Range = [0 100]

NumMFs = 5

MF1 = 'MuyMala': 'linear', [0 0 0 0 0 0 30]

MF2 = 'Mala': 'linear', [0 0 0 0 0 0 50]

MF3 = 'Media': 'linear', [0 0 0 0 0 0 70]

MF4 = 'Buena': 'linear', [0 0 0 0 0 0 90]

MF5 = 'Excelente': 'linear', [0 0 0 0 0 0 100]

Estructura del Modelo Difuso para el ICAGeneral (Utilizando Unfuzzy)



Descripción :

4.1.2.3 Resultados caso 2.

En la tabla 4.1.2.3.1., se listan los valores obtenidos por los diferentes índices de calidad a lo largo del año 2005 para el Río Portuguesa al igual que su correspondiente ICAGeneral arrojado por el modelo difuso.

Tabla 4.1.2.3.1. Salida arrojada por el Modelo Difuso para el Río Portuguesa

Mes	CF	pH	%OD	Alc	Dur	CT	Turb	ICAG M	ICAG U
Enero	679	9,2	82	34	31	700	5,20	90	78.33
Febrero	380	8,7	80	35	40	387	7,80	90	78.65
Marzo	148	7,9	77	32	36	180	5,30	100	92.99
Abril	267	7,8	88	32	38	200	5,20	100	93
Mayo	160	8,2	78	28	24	180	7,81	90	78.33
Junio	220	8,8	78	32	30	310	6,22	90	78.33
Julio	140	7,9	79	29	25	150	4,77	100	93.00
Agosto	325	8,9	92	28	32	350	5,30	90	78.33
Septiembre	444	8,3	86	31	34	460	6,50	94.37	81.79
Octubre	115	7,4	81	29	35	140	5,38	97.40	93
Noviembre	98	8,3	88	32	36	105	4,69	100	93
Diciembre	540	8,7	82	33	28	590	4,34	90	75.56

Para ver resultados de los demás ríos, se sugiere ver (Tabla 4.1.2.4.5 y Tabla 4.1.2.4.6)

Al igual que el anterior modelo se sugiere observar las **Escalas de clasificación del ICAGeneral según su futuro uso**, expuestas anteriormente, para lograr una mejor interpretación del resultado.

Los resultados arrojados por el modelo, son muy satisfactorios, como podemos apreciar, variables como los Coliformes Fecales y Coliformes Totales, tienen una fuerte influencia, respecto a la salida final, nótese, que para valores bajos de esta dos variables, existe una gran posibilidad de obtener una agua de excelente calidad, mientras que para valores superiores a 140 ya comienza a decaer su calidad.

4.1.3 Caso 3: Comparar los resultados arrojados por los casos 1 y 2 con los niveles estándar de las normativas nacionales e internacionales

A continuación se presentan los resultados y análisis, en forma individual, de los parámetros mas importantes estudiados en los casos 1 y 2 y, en algunos casos, se correlacionan los resultados de un parámetro con otro que tenga íntima relación.

- **TURBIDEZ:** La mayoría de las aguas residuales tienen una turbidez importante y su consumo directo es inadecuado. Según el decreto nacional N° 833, las aguas del subtipo 1A (que solo requieren desinfección) deben tener una turbiedad menor a 25 UNT. En las Tablas (4.2.1.1.1 a 4.2.1.1.3) se observa que en promedio los tres ríos en estudio pertenecen al subtipo de aguas 1ª. La UE (Union Europea) no presenta un valor de turbidez para las aguas superficiales que van hacer acondicionadas para consumo humano, solo presenta un valor de materias totales en suspensión, que son registradas como sólidos suspendidos totales. Así, los valores de turbidez sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda. Es posible lograr la remoción de la turbiedad mediante simple filtración o, de manera más efectiva, por medio de una combinación de coagulación, sedimentación y filtración.

La determinación de la turbidez es de gran importancia en aguas para consumo humano. Las partículas en suspensión pueden ocasionar gustos y olores desagradables. Así, un consumidor solo utilizara con reserva un agua turbia; aunque las calidades químicas y bacteriológicas sean satisfactorias, y preferirá un agua no controlada cuya nitidez sea perfecta. Para el agua potable la turbiedad no debe exceder el valor guía de 5 UNT; sin embargo, en este valor la turbiedad suele ser perceptible y, por consiguiente, desagradable para los consumidores. Además, una turbiedad excesiva puede proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular el crecimiento de las bacterias en el agua y, de por sí, ejercer una significativa demanda de cloro. Entonces es de importancia vital que en la producción de un agua potable segura, usando cloro como desinfectante, se mantenga la turbiedad baja.

Esto indica que todas las aguas de los ríos La Fría, Portuguesa y Montalbán deberán someterse a un proceso de tratamiento convencional, pasando a ser aguas de subtipo 1B, ya que la sola desinfección no remueve las bacterias en suspensión. Sin embargo, debe recordarse que la turbidez cambia significativamente al presentarse lluvias fuertes, por lo que el tipo de tratamiento va a quedar establecido por las condiciones meteorológicas que se presenten al momento de tratar el agua.

- **DUREZA:** Con respecto a la dureza de las aguas, en las Tablas (4.2.1.1.1 a 4.2.1.1.3) se observa que las aguas de los tres ríos en estudio pertenecen a las categorías de aguas muy blandas (<30) y aguas blandas (entre 30 y 60 mg/l). Un agua satisfactoria para uso doméstico y lavado de ropa debe contener menos de 50 mg/l. Según el decreto nacional N° 833, las aguas que van a ser tratadas para uso doméstico del subtipo 1A y 1B no deben contener más de 500 mg/l de dureza. Los ríos en estudio presentaron valores muy bajos en comparación con este límite, por lo que en relación con este parámetro no hay inconveniente. La UE no presenta valores estándar para este parámetro.
 - **ALCALINIDAD:** La alcalinidad está estrechamente ligada con la dureza. Si la alcalinidad es mayor que la dureza, esto debe significar que hay otras sales básicas además de calcio y magnesio. En caso contrario, debe haber sales de calcio y magnesio que no son carbonatos. El decreto N° 833 y la UE no fijan un valor de alcalinidad.
 - **pH:** El pH del agua representa su acidez o su alcalinidad. Su origen en las aguas puede ser natural o artificial. El valor de pH compatible con la vida de los peces está comprendido entre 6 y 9 según la UE, y entre 6.5 y 8.5 según el decreto nacional N° 833. Al observar las Tablas (4.2.1.1.1 a 4.2.1.1.3) se observa que las aguas de los ríos La Fría, Portuguesa y Montalbán presentan valores promedio de pH dentro del rango 6.5 y 8.5, pero si los analizamos puntualmente notamos que una gran cantidad de estos puntos excede a lo 8.5. Sin embargo, como estamos hablando de aguas no tratadas estos resultados no generan una polémica, al contrario proporcionan a las plantas de tratamiento una seguridad de que, los resultados finales serán óptimos. Las ligeras variaciones del pH en los tres ríos en estudio son causadas por la influencia de los desechos domésticos tanto ácidos como alcalinos.
-

- **OXIGENO DISUELTO:** Los niveles de %OD en las aguas naturales y en las aguas residuales dependen de las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas que prevalecen en el cuerpo del agua. En las Tablas (4.2.1.1.1 a 4.2.1.1.3) se observa que en promedio todos los ríos presentan valores altos de %OD (todos por encima de 60%) Estos valores indican que son aguas superficiales con grandes capacidades de reaireación y que se encuentran muy próximas a la saturación. El decreto N° 833 indica que el %OD debe ser mayor a 40% para aguas de subtipo 1A y 1B que van a ser acondicionadas para el consumo. La UE establece más de 70% para las aguas del tipo 1A, más de 50% para las de tipo 1B y más de 30% para las de tipo 1C.
 - **COLIFORMES FECALES Y TOTALES:** Los resultados de los parámetros microbiológicos son indispensables para determinar el grado de calidad del agua, en vista de que la contaminación microbiológica procede principalmente de las heces de humanos y animales de sangre caliente. Según el decreto N° 833, las aguas que van hacer acondicionadas para el consumo humano del subtipo 1A (que solo requieren desinfección) deben tener un valor de Coliformes Totales menor a 2000 NMP/100ml, mientras que las aguas de subtipo 1B (que requieren de un tratamiento convencional) deben tener un valor de Coliformes Totales menor a 10.000. Los valores de la UE son algo diferentes. Para las aguas del tipo 1A se tiene un valor guía de 50 NMP/100ml, las de tipo 1B tienen un valor de 5000 y las del tipo 1C un valor de 50.000 para coliformes totales, mientras que para los coliformes fecales se tienen valores de 20 para las aguas del tipo 1A, 2000 para las del tipo 1B y 20.000 para las del tipo 1C.
-

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La calidad del agua no es un criterio completamente objetivo, pero está socialmente definido y depende del uso que se le piense dar al líquido, por lo que cada uso requiere un determinado estándar de calidad. Por esta razón, para evaluar la calidad del agua se debe ubicar en el contexto del uso probable que tendrá.

Debido a la cantidad de parámetros que participan en el diagnóstico de la calidad del agua y a lo complejo que éste puede llegar a ser, se han diseñado índices para sintetizar la información proporcionada por esos parámetros. Los índices tienen el valor de permitir la comparación de la calidad en diferentes lugares y momentos, y de facilitar la valoración de los vertidos contaminantes y de los procesos de auto depuración.

Esta herramienta, puede ser utilizada por cualquier planta de potabilización, o ente público o privado, encargado de llevar acabo estudios de este tipo. Dicha herramienta les ayudara, a la hora de tomar una decisión, que a la final, beneficiara no solo a los seres humanos como receptor final de estas aguas, sino también a cualquier ser vivo que este en contacto directo a estos cuerpos de agua.

Los Índices aquí expuestos, tienen una apreciada diferencia a primera vista, con respecto al resultado numérico, sin embargo es importante aclarar, que en cuanto al análisis e interpretación de estos resultados, la diferencia es mínima, ya que como se puede apreciar en (ver Tablas 4.1.2.4.1 y 4.1.2.4.4) los resultados están enmarcados en el mismo conjunto de interpretación.

Los ICA parecen ser la metodología mas practica para acercar puntos de vista lejanos como lo son el de profesionales del sector, los legisladores y la comunidad en general.

Poseen una fácil interpretación de los resultados, a partir de allí, la información puede y debe ser filtrada y validada con mayor detalle por medio de la observación directa de los datos y variables originales.

Los índices de calidad del agua están diseñados para finalmente comunicar un evento u otro a los tomadores de decisión y al público en general para efectos de control y regulación.

Un solo índice puede no ser indicativo de toda la dinámica del sistema. Puede indicar que la calidad no es apta para abastecimiento, pero puede ser utilizada para recreación y ser apta para el desarrollo de la biótica acuática.

La características naturales mas resaltantes de los tres ríos son las siguientes:

En general las características físico-químicas de los ríos Portuguesa y Montalbán son muy similares. Esto concuerda con la suposición de que estos ríos nacen de acuífero común.

Tienen alto % de saturación en Oxígeno Disuelto debido a la abundante turbulencia del movimiento de sus aguas.

Las aguas tienen una acidez natural caracterizada por valores de pH que oscilan entre 7 y 9 a lo largo del año.

Los valores de dureza obtenidos indican que las aguas son muy blandas, esta propiedad, unida con la baja alcalinidad y el pH ligeramente ácido hacen que la capacidad buffer de las aguas sea pobre (poca capacidad para neutralizar descargas ácidas y básicas).

Fueron detectados valores ligeramente elevados del contenido de Coliformes, particularmente en época de lluvias. Estos coliformes obligan a la desinfección de las aguas para poder utilizarlas bien sea como agua potable, o con fines de riego de cultivos destinados al consumo humano.

El comportamiento de los parámetros es un factor clave a la hora de tomar una decisión, puesto que existen variables de cuidado responsables de que ciertos índices no alcancen un valor deseado.

5.2 Recomendaciones

Es reconocible que a la fecha, existe dificultad en definir un único índice de calidad de agua como solución definitiva. Sin embargo, las instituciones, agencias, así como los investigadores en calidad del agua, deberían tratar de desarrollar un método único.

Cuando se desea comparar el resultado de varios índices, utilizando un mismo conjunto de datos, es importante recordar, que no puede haber una marcada diferencia en los resultados, dado que, para impedir a que esto ocurra, se debe llevar a cada índice a una misma escala, si por el contrario, no se toma esa iniciativa, hechos como estos generarían pérdida de información y conllevarían a un enmascaramiento de la condición real de los cambios que se pueden presentar en un curso de agua.

Las aguas del río La Fría, deberá someterse a un proceso de tratamiento convencional, pasando a ser aguas de subtipo 1B, ya que la sola desinfección no remueve las bacterias en suspensión. Sin embargo, debe recordarse que la turbidez cambia significativamente al presentarse lluvias fuertes, por lo que el tipo de tratamiento va a quedar establecido por las condiciones meteorológicas que se presenten al momento de tratar el agua.

Bibliografía

- [1] Van Helmond, C. Breukel. R. 1997. Physico-Chemical Water Quality Índices. In: J.J. Ottens, F.A.M. Claessen, P.G. Stoks, J.G. Timmerman And R.C Wards (Eds)-Monitoring, Taylor-Made II. Proceedings Of AN Internacional Workshop On Information Strategies In Water Management, The Netherlands, 475-479.
- [2] UNESCO/WHO/UNEP, 1992. Water Quality Assessments – A guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring – Second Edition.
- [3] Ward, R., Timmerman, J., Peters C., Adriaanse, M. 2003. In Search Of A Common Water Quality Monitoring Framework And Terminology. En: Proceedings Of Water Taylor Made Monitoring IV www.mtm-conference.nl/.
- [4] Nelson Josué Fernández Parada, Fredy Solano Ortega, 'Índices de calidad y de Contaminación del agua, Aportes a su entendimiento y a su Análisis', Primera edición, Editorial JAVA E. U, marzo 2005.
- [5] Horton, R., 1965. An Index Number System For Rating Water Quality, Jr. Of Wpcf, Vol. 37.
- [6] Ott, W. 1978. Environmental Índices, Theory And Practice, Aa Science, Ann Arbor, Michigan.
- [7] SAFE, 1995. Strategic Assesment Of Florida's Environmen. Florida Stream Water Quality Index. Statewide Summary. USGS. 1994 Arkansas.
- [8] BCWQI. 1996. Ministry Of Environmen, Lanas, And Parks. The Water Quality Section. British Columbia Water Quality Status Report. April, Victoria.
- [9] WEP, 1996, Lower Great Miami Watershep Enhancement Program (WEP). Miami Valley River Index. <http://www.mvrpc.org/wq/wep/Htm>.

- [10] Montoya, H., Contreras, C., García, V. 1997. Estudio Integral de la Calidad del agua en el Estado de Jalisco. Com. Nal. Agua., Geren. Reg. Lermasantiago. Guadalajara. 106 Pp.
- [11] IDEAM, 2000. Estudio Nacional del Agua. En: <http://ideam.gov.co>
- [12] Ball, R., Church, R. 1980. Water Quality Indexing And Scoring. Journal Of The Environmental Engineering Division, American Society of Engineers, 106, EE4, 757-771.
- [13] Kevin M. Passino, S. Yurkovich, Fuzzy Control, Addison Wesley Longman Inc. 1998.
- [14] L.X. Wang, A course in fuzzy systems and control, Prentice Hall Inc., 1997.
- [15] Jang, J.-S. R. and N. Gulley, "Gain scheduling based fuzzy controller design," Proc. Of the International Joint Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society Biannual Conference, the Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference, and the NASA Joint Technology Workshop on Neural Networks and Fuzzy Logic, San Antonio, Texas, Dec. 1994.
- [16] S. Ferrari, M. Maggioni and N.A. Borghese, Multiscale Approximation with Hierarchical Radial Basis Function Network, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 15. No.1, 178-188, January 2004.
- [17] Dinius, S. 1987. Design Of An index of Water Quality, Water Res. Bull., 23:5, 833-843.
- [18] Helmer, O. Rescher, N. 1958. On The Epistemology Of The Inexact Sciences. Management Science 6(1).
- [19] Dalkey, N., Helmer, O. 1963. An Experimental Application Of the Delphi Method to the use of Experts. Management Science 9:458-467.
- [20] House, M. A. 1989. A Water Quality Index for River Management. Journal of the Institute of Water & Environmental Management 3: 336-344.
- [21] Stojda A, Dojilido J., Woyciechowska J., 1985, Water Quality Assesment With Water Quality Index, Gospod. Wod 12, 281-284.

[22] Couillard, D., Lefebvre, Y. 1985. Análisis of Water Quality Index. Journal of Environmental Management 21: 161-179.

[23] RICKERT, David. (1998). Evaluación de la calidad del agua para determinar la naturaleza y grado de contaminación del agua por la agricultura y actividades afines.

[24] <http://www.fao.org/docrep>.

[25] Miguel Peña, Hernán Alvarez y Ricardo Carelli, Modelado e Identificación con un Modelo Difuso del tipo Takagi-Sugeno.

[26] <http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/trabajos/rios/Presenta.htm>.

[27] <http://www.tecnun.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/11CAgu/130RioLa.htm#Parámetros%20que%20se%20estudian%20en%20una%20red%20típica>.

[28] http://www.sideapa.gob.mx/mod.php?mod=userpage&menu=2208&page_id=42

[29] <http://www.snet.gob.sv/Hidrologia/monitoreo.htm>

[30] Fernando Gómez Salas, “Sistemas difusos jerárquicos para modelado y control”. Tesis que se presenta para obtener el grado de maestro en ciencias, en el centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional de México.

[31] http://www.ambientum.com/enciclopedia/aguas/2.01.16.16_1r.html

[32] Rebeca Pastora Cárcamo. “Procedimiento para la determinación de la calidad del agua utilizando indicadores biológicos. Estudio de caso: Cuenca alta del Río Mocotíes, Municipio Rivas Dávila, Estado Mérida”, Tesis que se presenta para obtener el grado de Magíster Scientiae en Gestión de Recursos Naturales Renovables y Medio Ambiente, Centro Interamericano de desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de los Andes.

[33] Sánchez, J.C y Peña R., Calidad de las aguas de los Ríos Uracoa, Yabo y Morichal Largo. I Jornadas nacionales de Hidrológica, Meteorología y Climatología. CIDIAT.Universidad de los Andes.

[34] Maria. M. Vivas Maldonado, Análisis de la Calidad del agua de los Ríos que circundan a la ciudad de Mérida. CIDIAT. Universidad de los Andes.

[35] Cubillos, Armando., Calidad del agua en la planificación y manejo del desarrollo. CIDIAT. Universidad de los Andes.

FIGURAS

Figura 4.1.2.1. Valoración de la calidad del agua en función de Coliformes Fecales

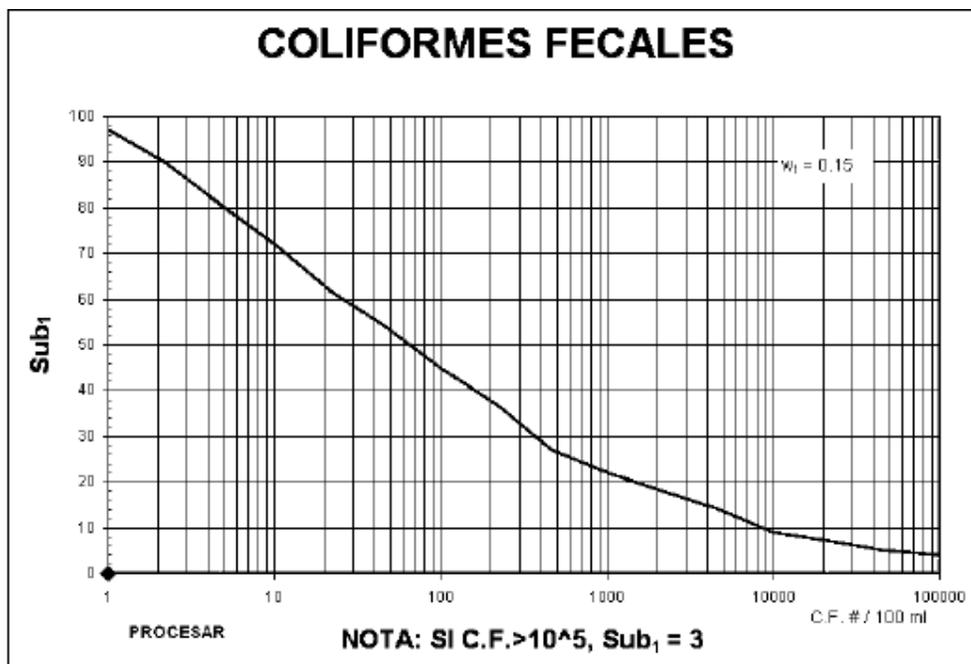


Figura 4.1.2.2. Valoración de la calidad del agua en función del pH

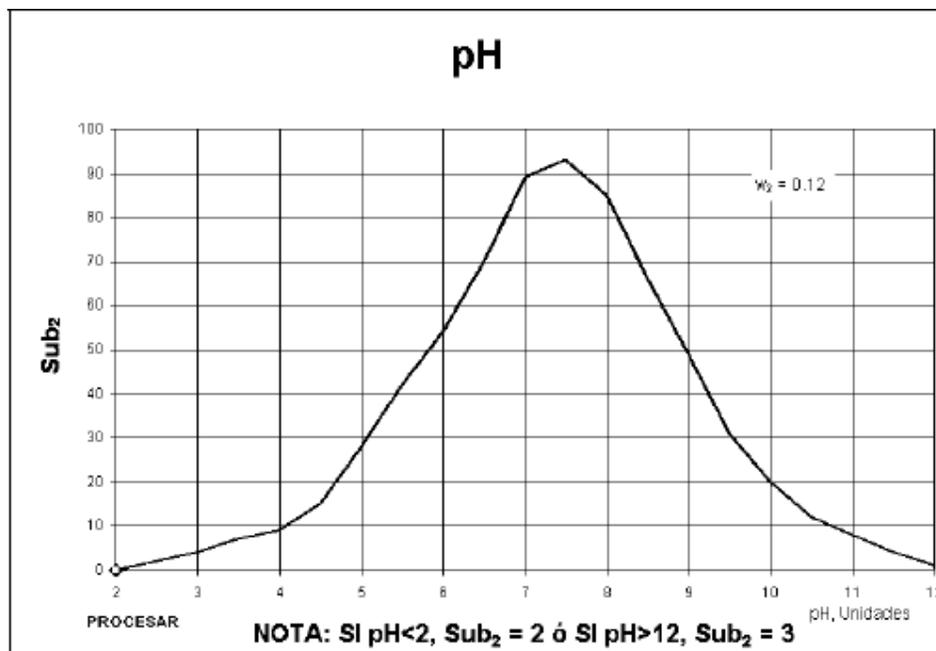


Figura 4.1.2.3. Valoración de la calidad del agua en función de la DBO5

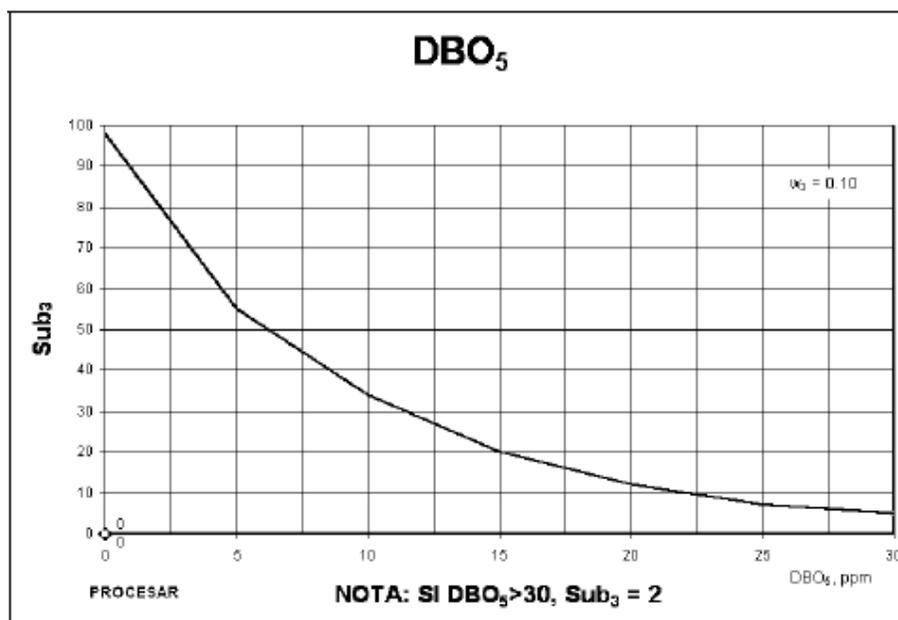


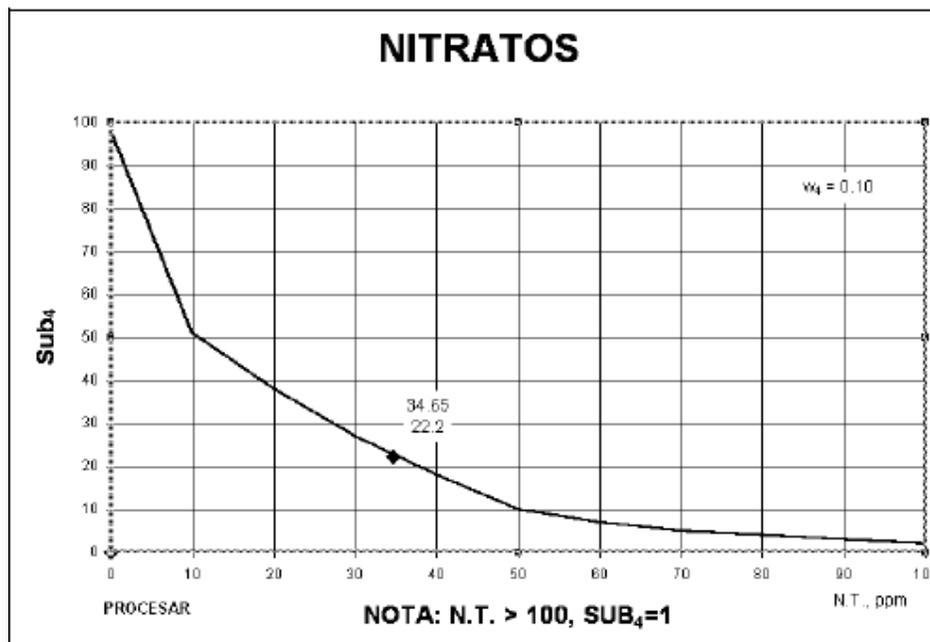
Figura 4.1.2.4. Valoración de la calidad del agua en función de Nitratos

Figura 4.1.2.5. Valoración de la calidad del agua en función del Fosfato

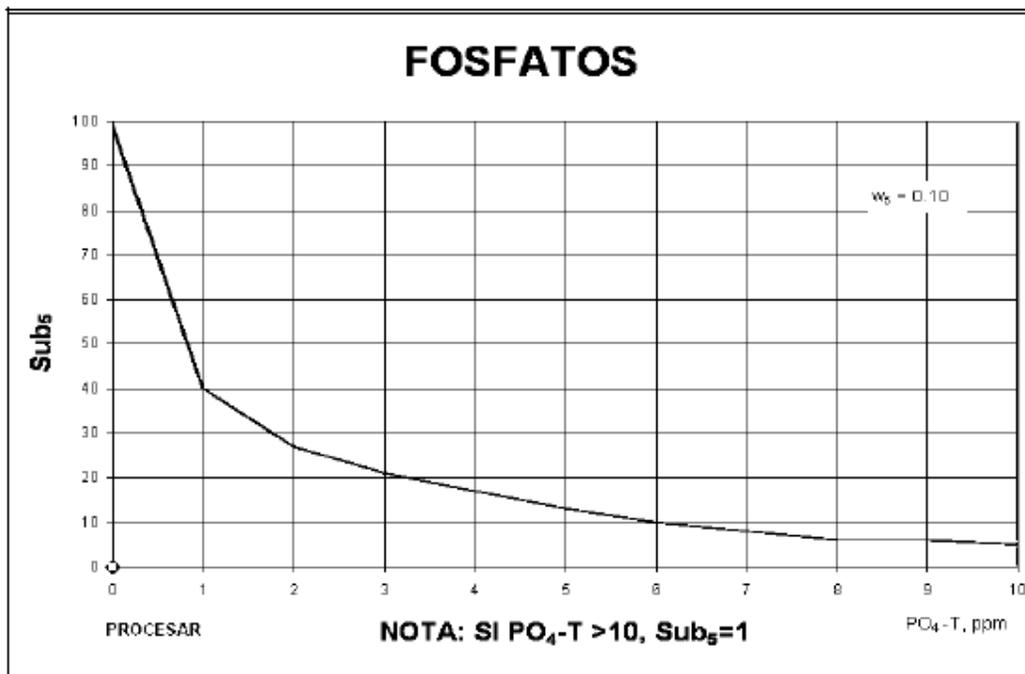


Figura 4.1.2.6. Valoración de la calidad del agua en función de la Temperatura

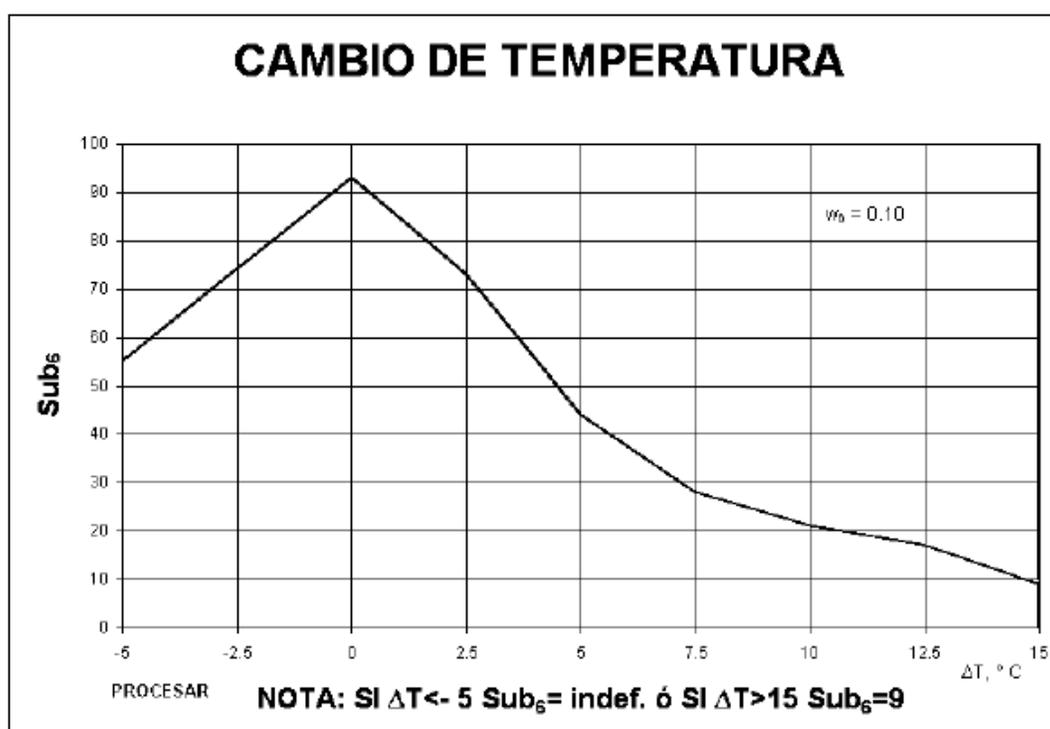


Figura 4.1.2.7. Valoración de la calidad del agua en función de la Turbidez

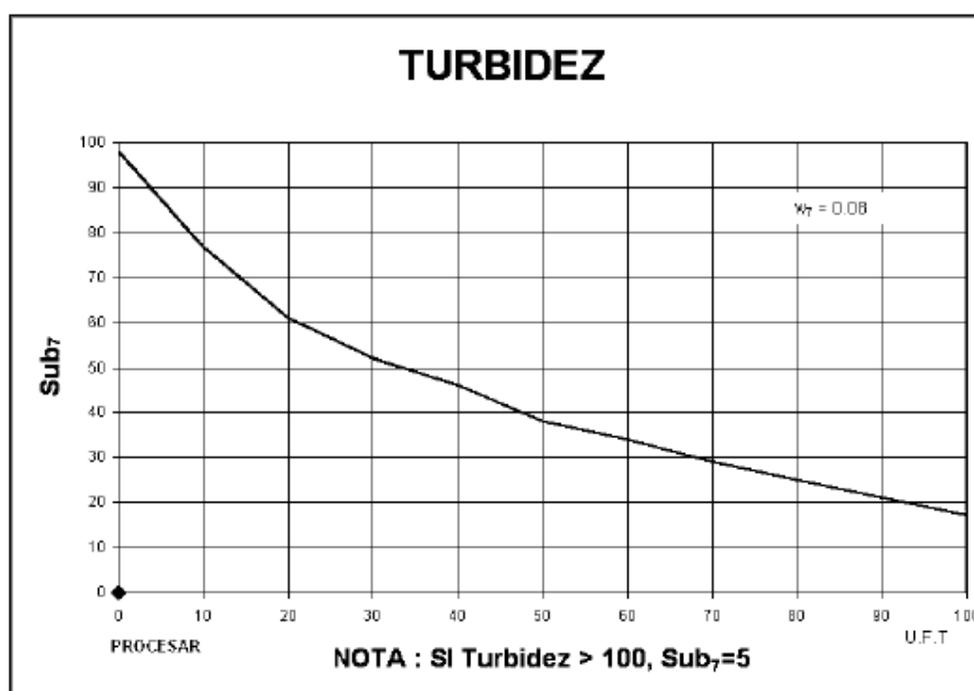


Figura 4.1.2.8. Valoración de la calidad del agua en función de los Sólidos Disueltos Totales

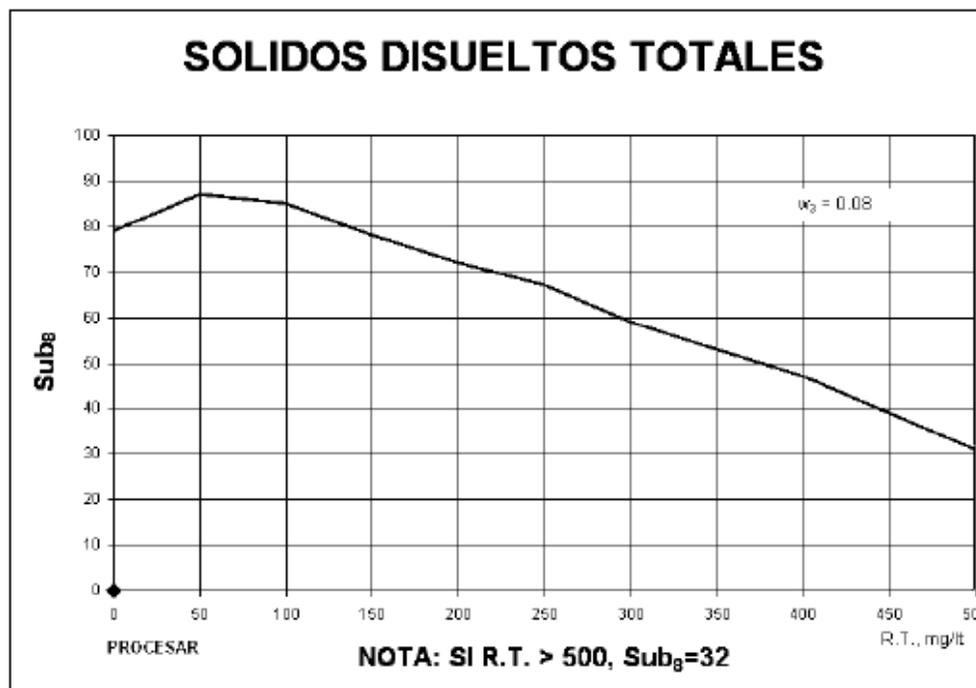


Figura 4.1.2.9. Valoración de la calidad del agua en función del % de saturación de Oxígeno Disuelto

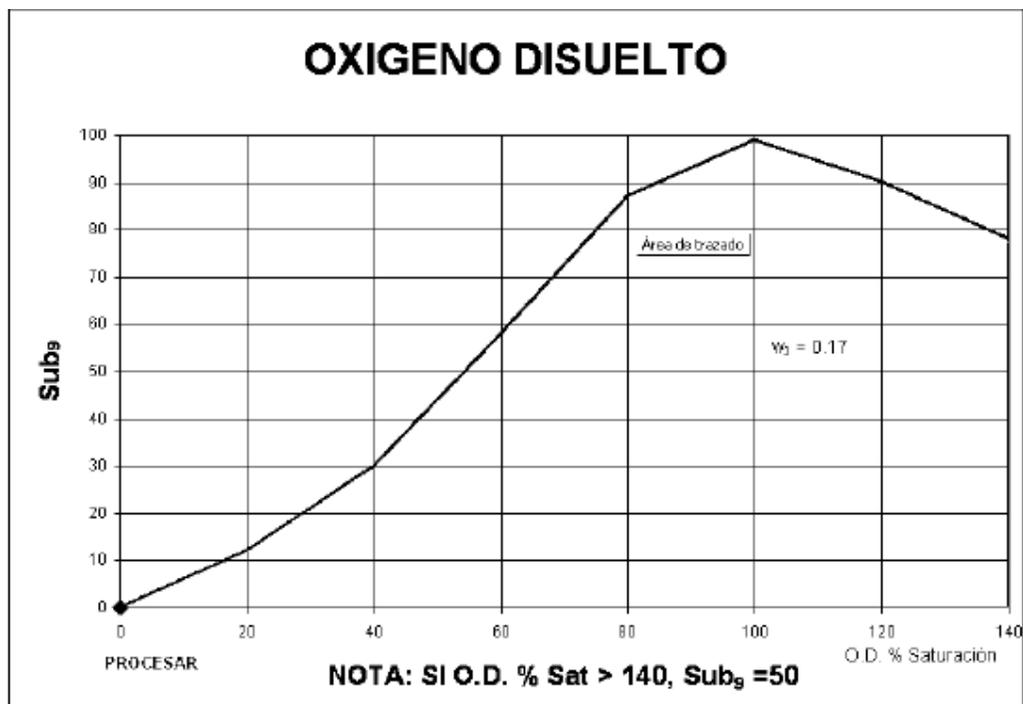


Figura 4.1.2.10. Valoración de la calidad del agua en función del Nitrógeno Amoniacal no ionizado

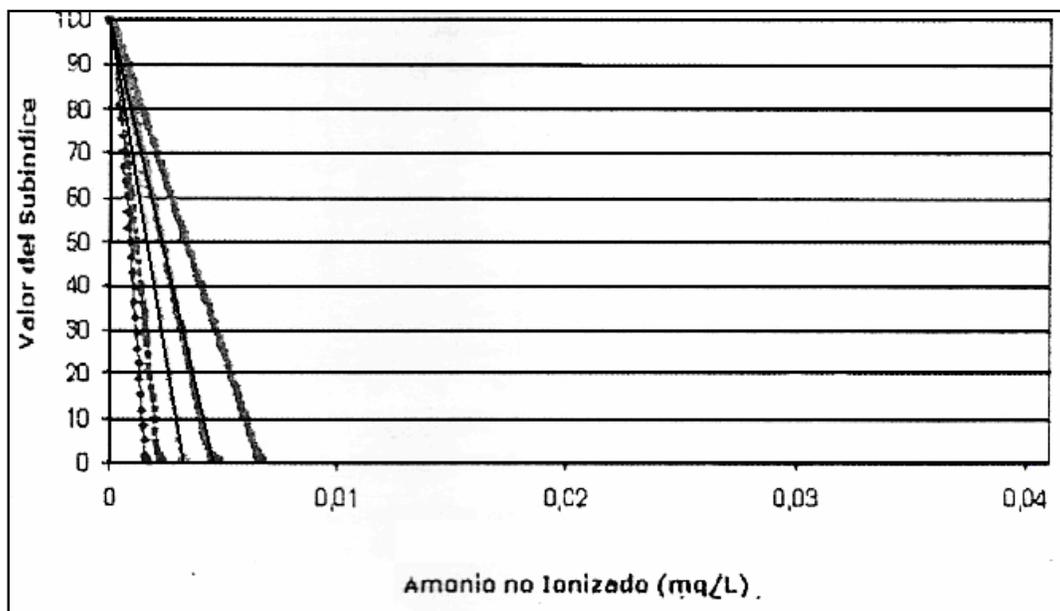


Figura 4.1.2.11. Valoración de la calidad del agua en función de Coliformes Totales

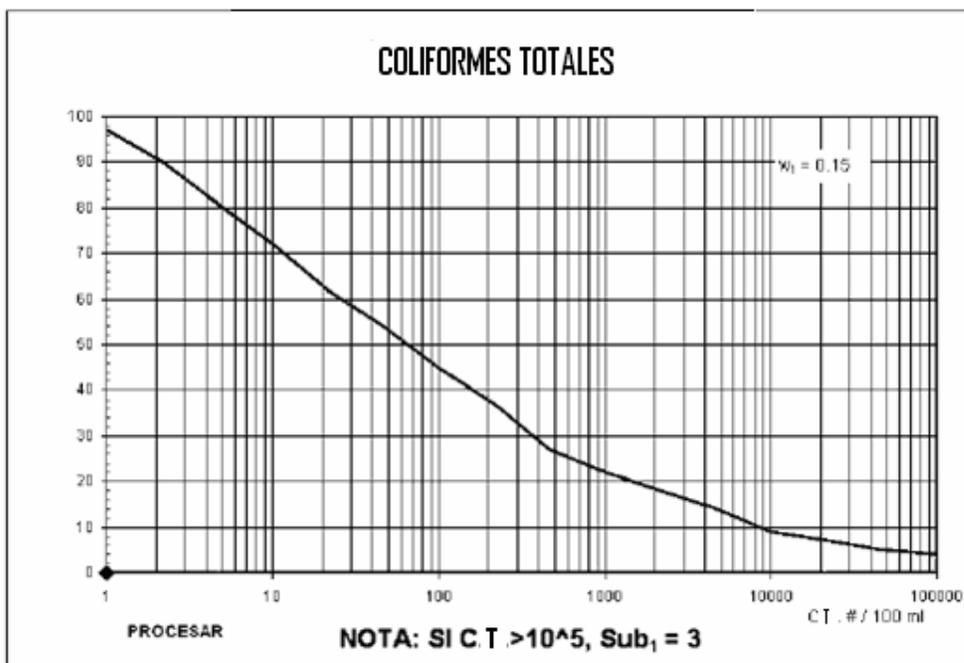


Figura 4.1.2.12. Valoración de la calidad del agua en función de Sólidos Suspendedos

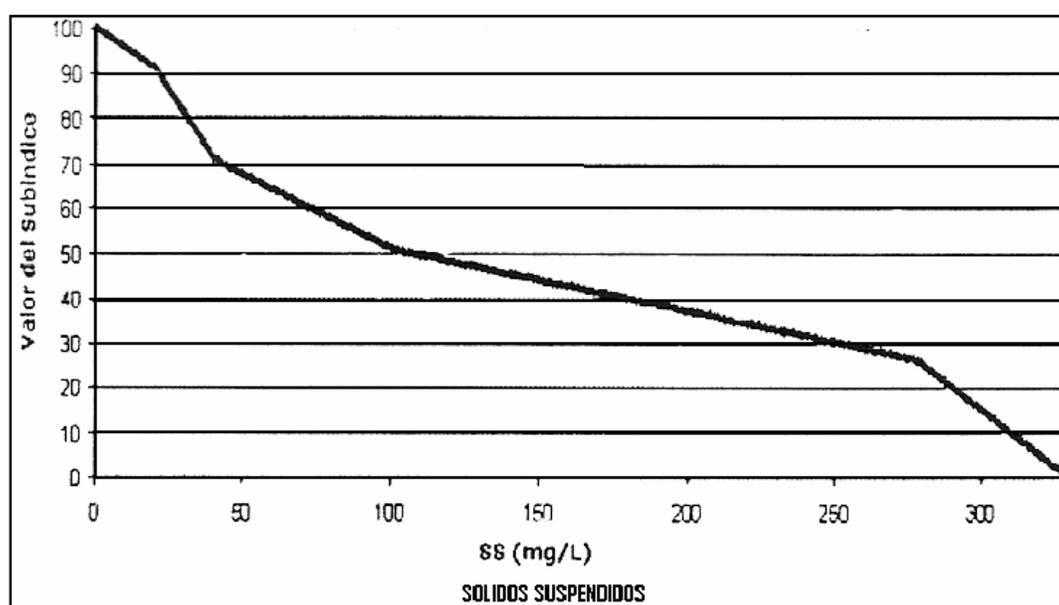


Figura 4.1.2.13. Valoración de la calidad del agua en función de Nitratos más Nitritos

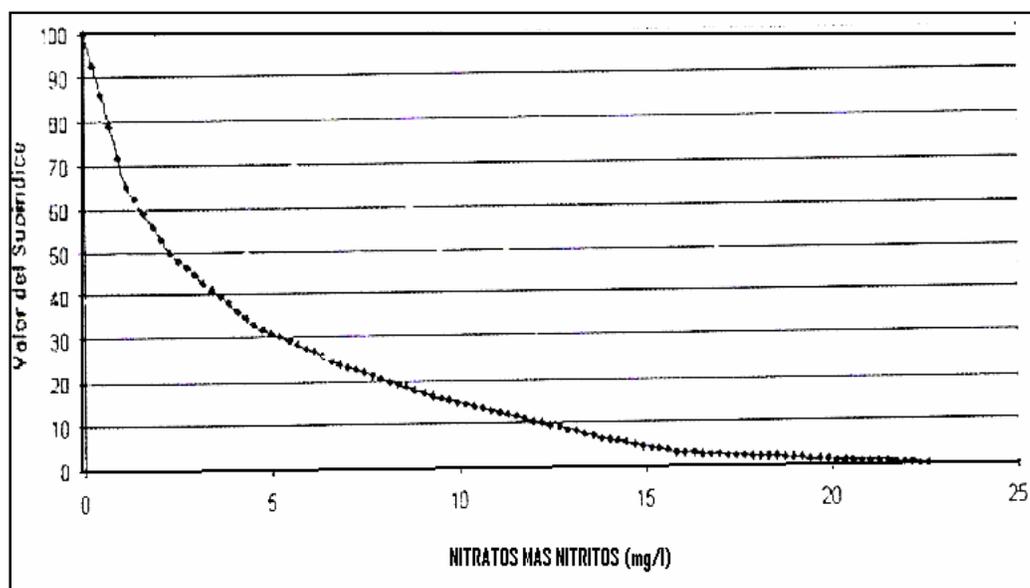


Figura 4.1.2.14. Valoración de la calidad del agua en función de la Alcalinidad

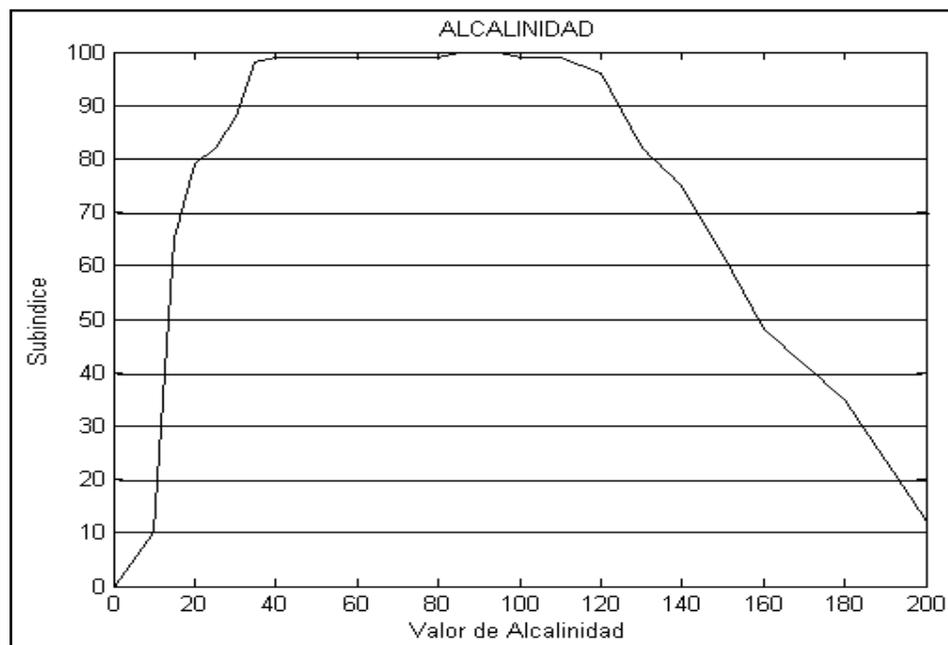
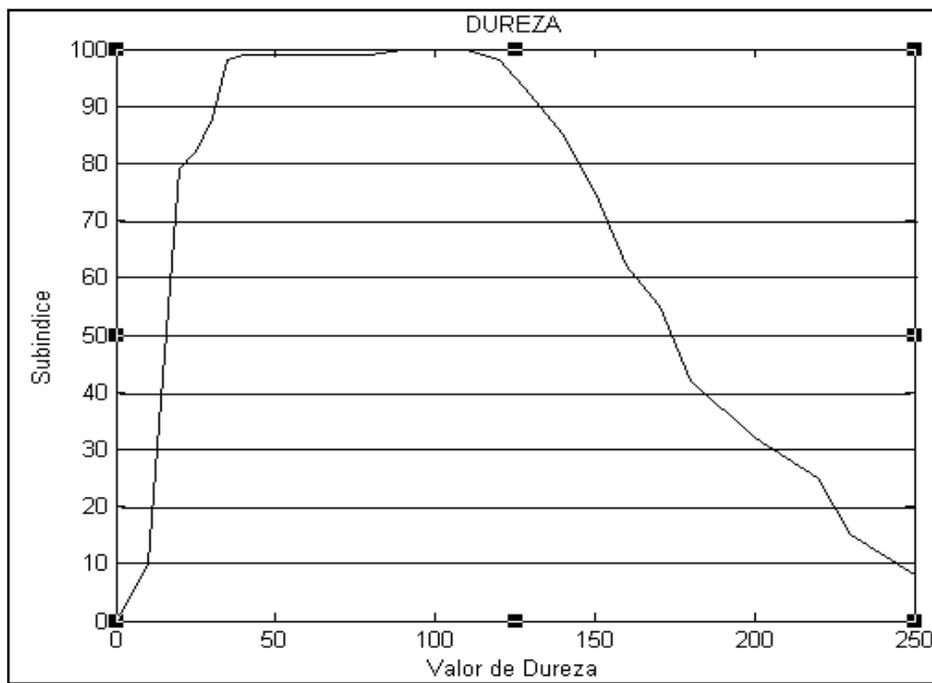


Figura 4.1.2.15. Valoración de la calidad del agua en función de la Dureza



TABLAS

4.1.2.4.2 Salida arrojada por el primer Modelo Difuso para el Rió Montalbán

Mes	ICA1	ICA2	ICA3	ICAG Matlab	ICAG Unfuzzy
Enero	75,03	78,14	57,86	90	79.90
Febrero	78,25	76,39	63,32	90	79.09
Marzo	76,9	77,09	64,35	90	79.17
Abril	78,29	83,17	60,25	90	79.78
Mayo	74,46	65,61	65,82	70	67.66
Junio	82,33	81,36	68,57	90	80
Julio	75,69	74,65	63,15	90	79.25
Agosto	74,54	72,59	58,08	90	79.74
Septiembre	72,48	67,24	55,63	70	67.23
Octubre	80,11	82,45	68,59	90	80
Noviembre	80,37	79,93	69,49	90	79.92
Diciembre	71,99	68,23	55,09	71.22	68.48

4.1.2.4.3 Salida arrojada por el primer Modelo Difuso para el Rió La Fría

Mes	ICA1	ICA2	ICA3	ICAG_Matlab	ICAG_Unfuzzy
Enero	85,80	87,24	77,49	90	80.13
Febrero	83,54	87,98	72,49	90	80
Marzo	86,79	87,98	79,36	90	80.15
Abril	84,70	88,73	70,64	90	80
Mayo	82,04	81,72	69,58	90	80
Junio	81,36	83,54	65,03	90	80
Julio	84,47	89,11	73,60	90	80.01
Agosto	90,67	90,63	82,34	100	92.32
Septiembre	81,98	88,36	65,37	90	80
Octubre	85,99	90,63	74,44	90	83.41
Noviembre	85,18	88,36	72,87	90.75	80.11
Diciembre	82,71	87,61	68,58	90	80

4.1.2.4.5 Salida arrojada por el segundo Modelo Difuso para el Río Montalbán

	%OD	CF	pH	Fosf	Nitrato	Turb	N+Ni	N_Amo	Alc	CT	Dur	ICAG Matlab	ICAG Unfuzzy
Enero	83	584	8,3	0,005	1,25	4,5	0,055	0,0007	30	625	34	70	60.49
Febrero	78	238	7,9	0,002	1,012	5,2	0,272	0,0003	28	325	32	90	68.52
Marzo	77	155	8,2	0,001	0,152	3,5	0,077	0,0002	26	190	26	86.02	79.43
Abril	89	235	7,4	0,006	1,04	4,6	0,187	0,0005	26	280	30	90	60.58
Mayo	76	80	8,9	0,003	0,517	6,2	0,102	0,0001	22	90	24	100	9.
Junio	84	110	7,2	0,003	0,904	6,7	0,248	0,0004	26	180	32	98.07	92.99
Julio	80	160	8,6	0,007	0,803	3,2	0,016	0,0006	25	220	28	70	69.76
Agosto	94	444	8,7	0,008	0,485	4,7	0,172	0,0006	28	480	32	70	66.90
Septiembre	86	560	8,0	0,006	1,42	4,9	0,261	0,0002	26	577	30	79	60.58
Octubre	79	125	7,8	0,002	0,161	5,1	0,022	0,0003	28	135	30	95	90.80
Noviembre	90	95	8,2	0,001	0,719	5,3	0,012	0,0001	26	95	28	100	93
Diciembre	93	518	9,2	0,005	0,843	3,4	0,192	0,0004	30	540	26	70	62.15

4.1.2.4.6 Salida arrojada por el segundo Modelo Difuso para el Río La Fría

	%OD	CF	pH	Fosf	Nitrato	Turb	N+Ni	N_amo	Alc	CT	Dur	ICAG_Matlab	ICAG_Unfuzzy
Enero	83	23	7,8	0,004	1,02	0,30	0,102	0,0001	34	43	40	100	93
Febrero	80	43	7,7	0,006	1,4	0,22	0,063	0,0007	27	54	24	100	93
Marzo	80	16	7,4	0,005	0,625	0,03	0,055	0,0005	30	26	34	100	96
Abril	94	93	7,3	0,007	0,433	0,20	0,175	0,0002	25	93	23	100	93
Mayo	79	92	7,2	0,0006	0,978	1,4	0,240	00001	26	101	29	100	93
Junio	84	180	7,1	0,003	0,795	1,2	0,235	0,0006	33	292	28	70	68.53
Julio	82	60	7,2	0,005	0,396	0,05	0,010	0,0002	30	78	32	100	92.1
Agosto	98	10	8	0,002	1,025	015	0,141	0,0005	28	25	34	100	97
Septiembre	87	180	7,4	0,003	0,127	0,30	0,148	0,0008	30	260	26	70	68.69
Octubre	87	34	7,6	0,001	0,928	0,12	0,021	0,0006	22	43	24	100	93.3
Noviembre	90	65	8	0,004	0,354	0,13	0,005	0,0003	28	82	25	100	92.18
Diciembre	84	120	7,8	0,002	1,21	0,18	0,127	0,0002	31	160	27	95	90.83

4.1.4.1.1 Comparación de las formulaciones establecidas en la Tabla 2.8.1, basándose en las variables físico-químicas y bacteriológicas del agua

Índices	Variables en Estudio																		
	NI_AMO	NI+N	DBO	DQO	%OD	Nitratos	Ph	T°	Am	Fos	Turb	Dur	SolS	ST	CT	CF	Alc	Fe	Cl
Promedio Aritmético Ponderado $ICA = \sum_{i=1}^n qiWi$			X		X	X	X	X		X	X			X		X			
Promedio No Ponderado Modificado $ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi \right)^2$	X	X	X		X		X				X		X						
Promedio Geométrico Ponderado $ICA = \prod_{i=1}^n qi^{wi}$			X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X
Promedio Ponderado $ICA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi$			X		X		X					X	X			X			
Promedio Geométrico no Ponderado	X		X		X			X					X	X					

$ICA = \left(\prod_{i=1}^n qi\right)^{1/n}$																			
Promedio Armónico Cuadrado no Ponderado $ICA = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI_i^2}}}$			X		X		X				X		X						
Subíndice Mínimo $ICA = \min(q1, q2..qn)$																			
Subíndice Máximo $ICA = \max(q1, q2..qn)$																			

Resumen de Índices que entrarán al modelo difuso

Variables en Estudio																			
Índices	NI_AMO	NI+N	DBO	DQO	%OD	Nitratos	Ph	T°	Am	Fos	Turb	Dur	SolS	ST	CT	CF	Alc	Fe	Cl
Promedio Aritmético Ponderado $ICA = \sum_{i=1}^n qiWi$			X		X	X	X	X		X	X			X		X			
Promedio No Ponderado Modificado $ICA = \frac{1}{100} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n qi \right)^2$	X	X	X		X		X				X		X						
Promedio Geométrico Ponderado $ICA = \prod_{i=1}^n qi^{wi}$			X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X

APENDICES

GACETA OFICIAL

Decreto N° 833, mediante el cual se dictan las:

**NORMAS PARA LA CLASIFICACION Y EL CONTROL DE LA CALIDAD DE
LOS CUERPOS DE AGUA Y VERTIDOS O EFLUENTES LIQUIDOS**

**CAPITULO II
De la clasificación de las aguas**

ARTÍCULO 3°.- Las aguas se clasifican en:

Tipo 1 Aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él. Las aguas del tipo 1 se desagregan en los siguientes sub-tipos:

Sub Tipo 1A: Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden ser acondicionadas con la sola adición de desinfectantes.

Sub Tipo 1B: Aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.

Sub Tipo 1C: Aguas que pueden ser acondicionadas por proceso de potabilización no convencional.

Tipo 2 Aguas destinadas a usos agropecuarios. Las aguas del Tipo 2 se desagregan en los siguientes sub-tipos:

Sub Tipo 2A: Aguas para riego de vegetales destinados al consumo humano.

Sub Tipo 2B: Aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.

Tipo 3 Aguas marinas o de medios costeros destinadas a la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo.

Tipo 4 Aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Las aguas del Tipo 4 se desagregan en los siguientes subtipos:

Sub Tipo 4A: Aguas para el contacto humano total.

Sub Tipo 4B: Aguas para el contacto humano parcial.

Tipo 5 Aguas destinadas para usos industriales que no requieren de agua potable.

Tipo 6 Aguas destinadas a la navegación y generación de energía.

Tipo 7 Aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de poluentes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente adyacente.

ARTÍCULO 4°.- A los efectos de esta Norma, se establecen los siguientes criterios para la clasificación de las aguas, así como los niveles de calidad exigibles de acuerdo con los usos a que se destinen:

Las aguas del sub-tipo 1A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D)	mayor de 4,0 mg/l . (*)
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 50, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 25, UNT.
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes Totales	promedio mensual menor a 2000 NMP por cada 100 ml.

*** Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%**

Las aguas del sub-tipo 1B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D.)	mayor de 4,0 mg/l. (*)
pH	mínimo 6,0 y máximo 8,5.
Color real	menor de 150, U Pt-Co.
Turbiedad	menor de 250, UNT.
Fluoruros	menor de 1,7 mg/l.
Organismos coliformes Totales	Promedio mensual menor a 10000 NMP por cada 100 ml.

*** Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 50%**

Las aguas de los sub-tipo 1A y 1B no deberán exceder, además, los siguientes límites:

Elementos o compuestos	Límites
Aceites minerales	0,3 mg/l
Aluminio	0,2 mg/l
Arsénico total	0,05 mg/l
Bario total	1,0 mg/l
Cadmio total	0,01 mg/l
Cianuro total	0,1 mg/l
Cloruros	600 mg/l
Cobre total	1,0 mg

Elementos o compuestos	Límites
Cromo Total	0,05 mg/l
Detergentes	1,0 mg/l
Dispersantes	1,0 mg/l
Dureza, expresada como	CaCO ₃ 500 mg/l
Extracto de carbono al cloroformo	0,15 mg/l
Fenoles	0,002 mg/l
Hierro total	1,0 mg/l
Manganeso total	0,1 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Nitritos + Nitratos (N)	10,0 mg/l
Plata total	0,05 mg/l
Plomo total	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sodio	200 mg/l
Sólidos disueltos totales	1500 mg/l
Sulfatos	400 mg/l
Zinc	5,0 mg/l

Biocidas

Organofosforados y Carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l

Radiactividad

Actividad	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l)
Actividad	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l)

4. Las aguas del Sub-Tipo 1C son aquellas en las cuales el pH debe estar comprendido entre 3,8 y 10,5.

5. Las aguas del Sub-Tipo 2A son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	promedio mensual menor a 1000 NMP por cada 100 ml
Organismos coliformes fecales	menor a 100 NMP por cada 100 ml.

6. Las aguas del Sub-Tipo 2B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos conformes totales	promedio mensual menor a 5000 NMP por cada 100 ml.
Organismos conformes fecales	menor a 1000 NMP por cada 100 ml.

7. Las aguas de los Sub-Tipo 2A y 2B no deberán exceder, además, los siguientes límites:

Elementos o compuestos	Límites
Aluminio	1,0 mg/l
Arsénico	0,05 mg/l
Bario	1,0 mg/l
Boro	0,75 mg/l
Cadmio	0,005 mg/l
Cianuro	0,2 mg/l
Cobre	0,20 mg/l
Cromo Total	0,05 mg/l
Hierro Total	1,0 mg/l
Litio	5,0 mg/l
Manganeso Total	0,5 mg/l
Mercurio	0,01 mg/l
Molibdeno	0,005 mg/l
Níquel	0,5 mg/l
Plata	0,05 mg/l
Plomo	0,05 mg/l
Selenio	0,01 mg/l
Sólidos disueltos totales	3000 mg/l
Sólidos flotante	Ausentes
Vanadio	10,0 mg/l
Zinc	5,0 mg/l

Biocidas

Organofosforados y carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l

Radiactividad

Actividad	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l)
Actividad	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l)

8. Las aguas del Tipo 3 son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (O.D)	mayor de 5,0 mg/l. (*)
pH mínimo	6,5 y máximo 8,5.
Aceites minerales	0,3 mg/l
Detergentes no biodegradables	menor de 1 mg/l.
Detergentes biodegradables	menor de 0,2 mg/l.
Residuos de petróleo, sólidos	
Sedimentables y flotantes	ausentes
Metales y otras sustancias tóxicas	no detectable (***)
Fenoles y sus derivados	0,002 mg/l

Parámetro	Límite o rango máximo
Biocidas	
Organofosforados y Carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l
Organismos coliformes totales (**)	a) promedio mensual menor a 70 NMP por cada 100 ml.
	b) el 10% de las muestras puede exceder de 200 NMP por cada 100 ml
Radiactividad	
Actividad	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l).
Actividad	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l).

* Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 60%

** Las muestras deben ser representativas de la calidad del cuerpo de agua a ser aprovechado. De existir fuentes de contaminación las muestras deberán ser tomadas en las zonas afectadas. En ambos casos se muestreará bajo las condiciones hidrográficas más desfavorables, a juicio del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

*** Según los métodos aprobados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

9. Las aguas del Sub-Tipo 4A son aquellas cuyas características corresponden con límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	a) menor a 1000 NMP por cada 100 ml en el 90% de una serie de muestras consecutivas. b) menor a 5000 NMP en el 10% restante.
Organismos coliformes fecales	a) menor a 200 NMP por cada 100 ml en el 90% de una serie de muestras consecutivas. b) menor a 400 NMP en el 10% restante.
Moluscos infectados con S. Mansoni	Ausentes.

10. Las aguas del Sub-Tipo 4B son aquellas cuyas características corresponden con los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Organismos coliformes totales	a) menor a 5000 NMP por cada 100 ml en el 80% de una serie de muestras consecutivas. b) menor a 10000 NMP en el 20% restante.
Organismos coliformes fecales	menor a 1000 NMP por cada 100 ml en la totalidad de las muestras.
Moluscos infectados con S. mansonii	Ausentes.

11. Las aguas del Tipo 4 deberán cumplir, además, con las siguientes condiciones:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (OD)	mayor de 5,0 mg/l (*)
pH mínimo	6,5 y máximo 8,5.
Aceites minerales	0,3 mg/l
Detergentes	menor de 1 mg/l.
Sólidos disueltos desviación	menor de 33% de la condición natural
Residuos de petróleo, sólidos sedimentables y flotantes	Ausentes
Metales y otras sustancias tóxicas	no detectable (**)
Fenoles y sus derivados	0,002 mg/l
Biocidas	
Organofosforados y Carbamatos	0,1 mg/l
Organoclorados	0,2 mg/l
Radiactividad	
Actividad	máximo 0,1 Becquerelio por litro (Bq/l).
Actividad	máximo 1,0 Becquerelio por litro (Bq/l).

- Este valor también se podrá expresar como porcentaje de saturación, el cual debe ser mayor de 60%

**** Según los métodos aprobados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.**

12. Las aguas del tipo 5 son aquellas cuyas características corresponden a los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Fenoles	menor de 0,002 mg/l.
Aceites y espumas	Ausente.
Sustancias que originen sedimentación de sólidos y formación de lodos	Ausente.

13. Las aguas del Tipo 6 son aquellas cuyas características corresponden a los límites y rangos siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (OD)	mayor de 4 mg/l.
Sólidos flotantes y sedimentables o depósitos de lodo.	Concentraciones que no interfieran la navegación o la generación de energía

14. Las aguas del Tipo 7 son aquellas cuyas características correspondan a los límites siguientes:

Parámetro	Límite o rango máximo
Oxígeno disuelto (OD)	mayor de 3 mg/l.