

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FUNDADA EN 1867



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TOMBAMBA
MEDIANTE EL ÍNDICE ICA DEL INSTITUTO MEXICANO DE
TECNOLOGÍA DEL AGUA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR:

ANA GABRIELA PEÑAFIEL ROMERO

DIRECTOR:

DRA. M. Sc. GLADYS GUILLERMINA PAUTA CALLE

Cuenca-Ecuador
2014



RESUMEN

Los ríos experimentan un deterioro en la calidad del agua debido a su uso como receptor de los vertimientos de todo tipo, a más de existir contaminación de origen natural analizada a través de la hidrogeoquímica del río.

Mediante la aplicación de índices de calidad se puede diagnosticar y garantizar una evaluación del recurso definiendo los usos a los que puede destinarse. El análisis comparativo de la aplicación de los índices ICA y I-NSF en siete puntos del río Tomebamba comprendidos en el tramo Llaviuco-Challuabamba monitoreados en un período de nueve meses, de Marzo a Noviembre del 2013, mostró que el río disminuye su calidad a medida que avanza su recorrido, presentando una calidad aceptable, poco contaminada y contaminada según ICA y una calidad buena y media según I-NSF. La variación de la calidad del agua entre los dos modelos de comparación es relativamente pequeña. Los parámetros físico-químicos críticos más influyentes en los valores de ICA fueron los nitratos, nitrógeno amoniacal, sólidos disueltos, alcalinidad, dureza y demanda bioquímica de oxígeno durante el estiaje y los fosfatos, sólidos suspendidos y turbiedad en época lluviosa. Se plantea la necesidad del control de la contaminación del río, más allá de la PTAR, mediante la construcción de interceptores marginales.

Finalmente, aunque ya estén en funcionamiento los interceptores marginales del río Tomebamba, todavía no se alcanzan en algunas estaciones y para algunos usos específicos de los cuerpos superficiales, los valores establecidos por la Normativa TULSMA, debido a la alta densidad de bacterias coliformes, aspecto de vital importancia en salud pública.

Palabras claves: calidad del agua, contaminación, índices de calidad ICA I-NSF.



ABSTRACT

The rivers are experiencing deterioration in water quality due to its use as a recipient of the different discharges. Moreover, there is natural pollution which is analyzed through the hydro-geochemistry of the river.

Through the application of quality indexes, it is possible to diagnose and ensure a comprehensive assessment of the resource defining the uses to which it can be used. A comparative analysis of applying WQI and WQI-NSF indexes at seven points on the Tomebamba River located in the Llaviuco-Challuabamba section, monitored over a period of nine months, from March to November 2013, showed evidence of growing river deterioration as it moves its route, presenting an acceptable quality, little polluted and contaminated according to WQI and a good quality and average according to WQI-NSF. The variation in the quality of the water between the two compared models is relatively small. The most influential physicochemical parameters in the values of WQI were nitrates, ammonia nitrogen, dissolved solids, alkalinity, hardness and biochemical oxygen demand during the dry season and phosphates, suspended solids and turbidity in the rainy season. There is a need to deepen the control of the pollution of the river in the sector located after the PTAR with the creation of marginal interceptors.

Finally, although the marginal interceptors Tomebamba river are operating, still not achieved in some sectors and for some specific uses of the resource, the values set by the normative TULSMA due to the high density of coliforms bacterium, vital aspect in public health importance.

Keywords: water quality, pollution, water quality index WQI & WQI - NSF



LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1: Descripción de las estaciones de monitoreo..... | 25 |
| Tabla 3.2: Coeficientes de ponderación para el cálculo ICA..... | 44 |
| Tabla 3.3: Rango de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general..... | 46 |
| Tabla 3.4: Escala de clasificación del Índice de Calidad del Agua..... | 47 |
| Tabla 3.5: Ponderación o peso relativo aplicado a cada uno de los parámetros usados en el I-NSF..... | 48 |
| Tabla 3.6: Rangos de clasificación del agua usados en el I-NSF..... | 49 |
| Tabla 4.1: Índice de calidad general ICA..... | 51 |
| Tabla 4.2: Criterio General ICA por muestreo y por estación..... | 51 |
| Tabla 4.3: Caudales medidos en las estaciones de los nueve muestreos..... | 54 |
| Tabla 4.4: Criterios establecidos para los usos del agua en los caudales altos..... | 57 |
| Tabla 4.5: Criterios establecidos para los usos del agua en los caudales bajos..... | 58 |
| Tabla 4.6: Criterios establecidos para los usos del agua en los caudales medios..... | 59 |
| Tabla 4.7: Valores del índice de calidad I-NSF en las estaciones coincidentes con los puntos monitoreados por ETAPA..... | 60 |
| Tabla 4.8: Criterio de clasificación de la calidad del agua..... | 61 |
| Tabla 4.9: Comparación entre la calidad del agua señalada por el ICA y por el I-NSF..... | 62 |
| Tabla 5.1: Análisis químico en la estación del Puente del Vado del 2014..... | 67 |



LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: Ubicación de las estaciones de muestreo..... | 26 |
| Figura 3.2: Mapa Geológico con las estaciones del muestreo..... | 35 |
| Figura 4.1: Variación de ICA en la estación de Llaviuco..... | 52 |
| Figura 4.2: Variación de ICA en la estación de Sayausí..... | 52 |
| Figura 4.3: Variación de ICA en la estación del Puente del Vado..... | 52 |
| Figura 4.4: Variación de ICA en la estación de la Empresa Eléctrica..... | 52 |
| Figura 4.5: Variación de ICA en la estación antes de la junta con la Q. de Milchichig..... | 53 |
| Figura 4.6: Variación de ICA en la estación antes de la PTAR..... | 53 |
| Figura 4.7: Variación de ICA en la estación de Challuabamba..... | 53 |
| Figura 4.8: Variabilidad de los caudales del río Tomebamba en el año 2013..... | 54 |
| Figura 4.9: Comportamiento de los caudales del río Tomebamba en el año 2013..... | 55 |
| Figura 4.10: Comportamiento del ICA en los meses que presentan un caudal alto..... | 56 |
| Figura 4.11: Comportamiento del ICA en los meses que presentan un caudal medio..... | 56 |
| Figura 4.12: Comportamiento del ICA en los meses que presentan un caudal bajo..... | 57 |



ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

ETAPA: Empresa pública municipal de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento de Cuenca.

VLIR: Manejo Integral de la Calidad del Agua.

SENAGUA: Secretaría Nacional del Agua.

ICA: Índice de calidad del agua desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

I-NSF: Índice de calidad del agua desarrollado por la National Sanitation Foundation.

PRECUPA: Proyecto para Recuperar la Cuenca de Paute.

PROMAS: Programa para el Manejo del Agua y del Suelo de la Universidad de Cuenca.

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

TULSMA: Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Medio Ambiente.



| | |
|---|----|
| Contenido | |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| LISTA DE TABLAS..... | 3 |
| LISTA DE FIGURAS | 4 |
| ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA..... | 5 |
| 1. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES..... | 13 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 13 |
| 1.2. OBJETIVOS | 14 |
| 1.2.1 OBJETIVO GENERAL..... | 14 |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN..... | 15 |
| 1.4. ALCANCE | 15 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL..... | 16 |
| 2.1. ASPECTOS GENERALES PARA EL ESTUDIO DE UN RÍO | 16 |
| 2.1.1. SUBCUENCA DEL RÍO..... | 16 |
| 2.1.2. FACTORES CONSTITUTIVOS DEL RÍO..... | 17 |
| 2.1.3. EL AGUA..... | 17 |
| 2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS RÍOS | 18 |
| 2.2.1. PARÁMETROS FÍSICOS..... | 18 |
| 2.2.2. PARÁMETROS QUÍMICOS..... | 20 |
| 2.2.3. PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS | 22 |
| 2.3. INDICES DE CALIDAD RELACIONADOS CON LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS Y BACTERIOLÓGICAS DEL AGUA | 22 |
| 2.4. HIDROGEOQUÍMICA DE UN RÍO | 23 |
| 2.4.1. DISOLUCIÓN DE GASES | 23 |
| 2.4.2. REACCIÓN DE ÁCIDO-BASE | 24 |
| 2.4.3. PROCESOS DE ABSORCIÓN Y CAMBIO IÓNICO..... | 24 |
| 2.4.4. REACCIÓN DE DISOLUCIÓN/PRECIPITACIÓN | 24 |
| 2.4.5. REACCIÓN DE OXI-REDUCCIÓN..... | 24 |



| | | |
|--------|--|----|
| 2.4.6. | INTERACCIÓN AGUA-SUELO-ROCA E INTEMPERISMO QUÍMICO | 24 |
| 3. | MATERIALES Y MÉTODOS | 25 |
| 3.1. | DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | 25 |
| 3.1.1. | UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | 25 |
| 3.1.2. | CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-CUENCA | 27 |
| 3.1.3. | GEOLOGÍA DE LA MICRO-CUENCA..... | 27 |
| 3.2. | TIPO DE ESTUDIO | 36 |
| 3.3. | CAMPAÑAS DE MUESTREO | 36 |
| 3.3.1. | ASPECTOS GENERALES DEL MUESTREO | 36 |
| 3.3.2. | TIPO DE MUESTRAS..... | 36 |
| 3.3.3. | UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO | 36 |
| 3.3.4. | CLASE Y FRECUENCIA DEL MUESTREO | 37 |
| 3.4. | METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL | 39 |
| 3.4.1. | DETERMINACIÓN DEL CAUDAL EN VERTEDEROS | 39 |
| 3.4.2. | DETERMINACIÓN DEL CAUDAL UTILIZANDO MOLINETE | 41 |
| 3.5. | METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ICA | 42 |
| 3.5.1. | ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)..... | 42 |
| 3.5.2. | ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (I-NSF)..... | 47 |
| 4. | RESULTADOS..... | 50 |
| 4.1. | APLICACIÓN DEL ÍNDICE ICA | 50 |
| 4.1.1. | VARIABILIDAD DEL ÍNDICE ICA | 52 |
| 4.2. | VARIACIÓN DEL CAUDAL..... | 53 |
| 4.2.1. | CORRELACIÓN ENTRE LA DIVISIÓN DE CAUDALES Y EL VALOR ICA. 56 | |
| 4.3. | CRITERIOS DE USOS ESTABLECIDOS POR EL ÍNDICE ICA | 57 |
| 4.4. | APLICACIÓN DEL ÍNDICE I-NSF..... | 59 |
| 4.5. | COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES: ICA & I-NSF | 62 |
| 5. | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES..... | 62 |
| 5.1. | DISCUSIÓN..... | 62 |
| 5.1.1. | ÍNDICE ICA..... | 62 |
| 5.1.2. | INTERPRETACIÓN DE LOS USOS DEL AGUA | 64 |



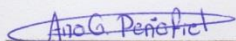
| | | |
|--------|--|----|
| 5.1.3. | ÍNDICE I-NSF | 65 |
| 5.1.4. | COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES..... | 66 |
| 5.1.5. | INTERPRETACIÓN DE LA HIDROGUEQUÍMICA DEL RÍO | 66 |
| 5.2. | CONCLUSIONES..... | 69 |
| 5.3. | RECOMENDACIONES..... | 71 |
| 6. | REFERENCIAS | 72 |
| 7. | ANEXOS | 74 |
| 7.1. | ANEXO 1: Metodología aplicada para determinar los parámetros físico-químicos y bacteriológicos empleada por el Laboratorio de Sanitaria..... | 74 |
| 7.2. | ANEXO 2: Funciones para la determinación del ICA en cada parámetro..... | 76 |
| 7.3. | ANEXO 3: Tabla de para determinar el oxígeno disuelto saturado. | 84 |
| 7.4. | ANEXO 4: Funciones para la determinación del I-NSF en cada parámetro..... | 85 |



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, Ana Gabriela Peñafiel Romero, autor/a de la tesis "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TOMBAMBA MEDIANTE EL ÍNDICE ICA DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a

Cuenca, 24 de Noviembre de 2014



Ana Gabriela Peñafiel Romero

C.I: 0302220645



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, Ana Gabriela Peñafiel Romero, autor/a de la tesis "EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TOMEBAMBA MEDIANTE EL ÍNDICE ICA DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 24 de Noviembre de 2014

Ana Gabriela Peñafiel Romero

C.I: 0302220645



DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a unos amigos especiales:

Dios, mis padres, mi esposo y mi hijo.

A Dios por estar conmigo en todas partes, a mis padres por mostrar insistencia en momentos de decline y cansancio y un apoyo incondicional en cada huella marcada durante el duro caminar de mi carrera, a mi esposo e hijo por ser mi inspiración.

Ana Gabriela Peñafiel Romero



AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Directora y amiga, Dra. Guillermina Pauta Calle, por su apoyo incondicional, al personal del Laboratorio de Sanitaria y del departamento PROMAS de la Universidad de Cuenca. Quienes colaboraron para la culminación del presente estudio.

Ana Gabriela Peñafiel Romero



1. INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

El Río Tomebamba se encuentra dentro de los principales ríos del Cantón Cuenca; nace en la confluencia de varias lagunas del Parque Nacional "El Cajas"; representa un cuerpo receptor crítico de los sistemas de alcantarillado de la ciudad, y en su parte alta constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Cuenca.

La aspiración de toda comunidad es disponer de un suministro de agua seguro; esto significa que el agua sea apta para el consumo humano y que le permita el uso en actividades como las domésticas; sin embargo pocas son las fuentes libres de contaminación, el crecimiento demográfico, como el desarrollo industrial y agrícola, provocan gran alteración de las características del recurso hídrico. (Torres, Cruz, Patiño, Escobar, & Pérez, 2010)

La calidad del río Tomebamba ha sido variante con el paso del tiempo. Inicialmente cuando la ciudad carecía de un sistema de alcantarillado adecuado, las descargas domésticas e industriales se hacían directamente en el río; sin embargo la empresa ETAPA inició los Planes Maestros de Agua Potable y Alcantarillado cambiando significativamente su calidad a través de obras de significativa importancia, como: la ampliación de la cobertura de los sistemas de alcantarillado: combinado y separado; la construcción de interceptores marginales para evitar que las aguas residuales descarguen directamente en el río, la vigilancia en las industrias para que éstas mantengan un control hacia las descargas puntuales que generan, y la creación de la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales). (ETAPA, 1987)

Para evaluar el beneficio en la recuperación de la calidad del río con el desarrollo del plan maestro I y a futuro del plan maestro II, la empresa ETAPA vio necesaria la creación de un plan de control y vigilancia de la calidad.

Actualmente la empresa ETAPA realiza un monitoreo continuo en los ríos de la ciudad para establecer la contaminación de los mismos mediante la aplicación del modelo de calidad NSF (Fundación de Sanidad de los Estados Unidos), en base a



9 parámetros físico-químicos y bacteriológicos. (Fernández de Córdova & González M, 2013)

Los ingenieros civiles tradicionalmente han participado en los trabajos para el abastecimiento de agua y la eliminación del agua residual; esto se debe a que probablemente la ingeniería de salud pública constituye la mayor actividad de la ingeniería civil. Sin embargo la ciencia y la tecnología del agua es un tema interdisciplinario que comprende la aplicación de principios biológicos, químicos y físicos asociados con las técnicas de ingeniería. (Tebbut, 1995)

Esta investigación se realiza dentro del proyecto VLIR “Manejo Integral de la Calidad del Agua”, el cual desarrolla el conocimiento científico de la calidad y el control de la contaminación de los cuerpos receptores integrantes de la cuenca del río Paute.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un Estudio de la Calidad del agua del Río Tomebamba, que permita establecer sus potenciales usos en áreas específicas y conceptualizar las alternativas de control de la contaminación, que necesariamente deberán implementarse.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Obtener los índices de calidad físico-químico ICA, en las estaciones establecidas y definir los usos del recurso en cada una de ellas.
- b. Establecer la variabilidad temporal y espacial de la calidad del agua, aspecto importante para aquellas estaciones en donde el recurso es empleado para abastecimiento humano.
- c. Realizar un análisis comparativo del índice ICA empleado en el presente trabajo, y el índice NSF empleado por ETAPA, dentro del mecanismo de vigilancia de los cuerpos receptores que mantiene la empresa.
- d. Interpretar las características químicas del agua, a la luz de la información dada por la geología de la sub-cuenca.



1.3. JUSTIFICACIÓN

El mantenimiento de una calidad adecuada de las aguas superficiales, a fin de que en la misma se conserve su flora y su fauna naturales y sea apta para los distintos usos a que pueda destinarla el hombre, debe ser el objetivo prioritario a alcanzar en la gestión de una determinada cuenca.

El Proyecto VLIR, “Manejo Integral de la Calidad del Agua”, tiene como objetivo la cuantificación de la Calidad del Agua en forma científica, como una estrategia básica para un manejo sustentable de los recursos hídricos. Dentro de este contexto, se estudia la calidad de los principales cuerpos receptores afluentes del río Paute, en la ciudades de Cuenca y Azogues.

El aporte de la presente tesis, es obtener un estudio actualizado de la calidad del río Tomebamba, efectuado en un período representativo que incluye las distintas condiciones climatológicas, considerando los tiempos de paso entre las estaciones y con un modelo de calidad que emplea 18 parámetros, lo que permite un análisis sobre la hidrogeoquímica del río.

Los resultados permiten detectar las principales fuentes de contaminación, establecer los mecanismos de prevención y control, y finalmente faculta a las empresas encargadas del manejo y control del recurso, establecer objetivos de calidad para fines específicos.

Con estos resultados se entrega a la empresa ETAPA, al Ministerio del Medio Ambiente, y a la SENAGUA (encargadas de la gestión y administración del recurso), una herramienta de gestión útil en su proceso de toma de decisiones.

1.4. ALCANCE

El trabajo de esta tesis consiste en la evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba basándose en un modelo de calidad ICA del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua que emplea 18 parámetros físico-químicos y bacteriológicos.

Para el efecto durante los meses de febrero a noviembre del año 2013, en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, se realizaron 9 campañas de monitoreo en 7 estaciones estratégicamente ubicadas a lo largo del río Tomebamba.



El tramo de análisis del río empieza en la Laguna de Llaviuco del Parque Nacional "El Cajas" y termina en el sector de Challuabamba.

2. MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se mencionan algunas características generales para el estudio de un río, los parámetros físico-químicos y bacteriológicos influyentes en la calidad del agua, los modelos de calidad aplicables para determinar la calidad del agua y la hidrogeoquímica de un río.

2.1. ASPECTOS GENERALES PARA EL ESTUDIO DE UN RÍO

El flujo en un río es altamente variable y se encuentra influenciado por las características del área por donde drena y de los factores climáticos. (Ramírez, 2011)

Para realizar el estudio integral del río se deben evaluar los aspectos más significativos: subcuenca del río, factores constitutivos del río y el agua; que permiten controlar la calidad y la estructura del mismo. (José Catalán LaFuente & José María Catalán Alonso, 1987)

2.1.1. SUBCUENCA DEL RÍO

El paisaje de la cuenca de un río influye directamente en las características que éste posee y se compone por aspectos relevantes como: relieve, clima, temperatura ambiente, geología y vegetación.

a. Relieve

La representación del relieve se forma en base a las curvas de nivel; las cuales indican la pendiente de los terrenos y laderas.

b. Clima

Es una composición de factores meteorológicos: temperatura, presión, lluvia, viento y humedad, que caracterizan a un punto de la superficie de la Tierra.

c. Geología

Es un factor de gran importancia, permite conocer la composición geológica por donde atraviesa el río para relacionarla directamente con la calidad de agua; en



base a la permeabilidad de las rocas analiza la escorrentía e infiltración así como la erosión que son los aspectos más distinguidos para la formación del río.

d. Vegetación

Tiene una gran influencia en la retención del agua lo cual incide en la transpiración; siendo fundamental para el balance hídrico.

2.1.2. FACTORES CONSTITUTIVOS DEL RÍO

Los factores constitutivos de un río son: la pluviometría y la cuenca vertiente. La pluviometría aporta el agua que escurre por el río mientras que la cuenca vertiente recoge el agua de la lluvia y escurre desde la parte más alta hacia la más baja. Las características físicas del río dependerán directamente de la litología que presentan las rocas que componen a la cuenca vertiente por donde escurre el agua. (José Catalán LaFuente & José María Catalán Alonso, 1987)

2.1.3. EL AGUA

Es un elemento primordial para la vida. El agua realiza un modelo dinámico conocido como el "El ciclo Hidrológico", impulsado principalmente por las energías térmicas del Sol o del interior de la Tierra y la fuerza de la Gravedad. Al examinar éste ciclo hidrológico se establece el balance hídrico mediante la aplicación del principio de conservación de masas con respecto al flujo del agua. (Díaz Delgado, Esteller Alberich, & Lopez Vera, 2005).

El recurso hídrico ha sido destinado para: abastecimientos de agua potable, navegación, recreación entre otras actividades; sin embargo éstos usos se han limitado por la contaminación que se presenta en la fuentes de agua. Así con la intervención del hombre y con las actividades propias que genera el agua: erosión, sedimentación y transporte, la calidad de un río se afecta totalmente. (José Catalán LaFuente & José María Catalán Alonso, 1987).

Toda población ha buscado asentamientos cerca de una fuente de agua, pero el crecimiento de tal población ha generado la contaminación de la misma mediante descargas directas de aguas residuales. (Ramírez, 2011)

La contaminación de origen urbano está ligada a la producción de lixiviados, los cuales se infiltran en el suelo y provocan un aumento de la mineralización, aparición de olores desagradables y coloración del agua, demanda bioquímica de



oxígeno DBO, reducción de sulfatos, movilización del hierro e incremento del dióxido de carbono lo cual se encuentra directamente relacionado con el pH. La contaminación ganadera es de carácter orgánico y bacteriológico, muy similar a la de origen urbano. La contaminación por la descarga de aguas residuales en cambio, puede agruparse en 3 tipos de contaminantes: contaminantes químicos: nitrógeno en todas sus formas, fósforo, cationes tóxicos y productos tenso activos; contaminantes físicos: sólidos en suspensión; contaminantes microbiológicos: los organismos patógenos presentes en el agua. (Díaz Delgado, Esteller Alberich, & Lopez Vera, 2005)

2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS RÍOS

La calidad del agua de los ríos se describe por variables físicas, químicas y bacteriológicas usadas en la determinación de un índice. (Ramírez, 2011)

2.2.1. PARÁMETROS FÍSICOS

Dentro de éste grupo tenemos a las sustancias que inciden directamente en la composición estética del agua. Existen ciertos parámetros que pueden ser apreciados a simple vista y se los cataloga como organolépticos, mientras que hay otros parámetros físicos que requieren de algún método para ser medidos.

a. Parámetros Organolépticos:

– Turbiedad

Es la capacidad que presenta el material suspendido en el agua para obstaculizar el paso de la luz, interviniendo en la fotosíntesis de los ecosistemas acuáticos de los ríos. Se expresa en unidades de turbiedad sabiendo que una unidad de éstas corresponde al agregar 1 mg de S_iO_2 a un litro de agua destilada. Requiere de una medición rápida, económica y de fácil interpretación.

La turbiedad posee un origen inorgánico debido a la erosión de la cuenca del río, la cual aporta sedimentos en los cauces; o presenta un origen orgánico cuando es contribuida por las actividades antrópicas. (Ramírez, 2011)

Constituye un parámetro ampliamente aplicado como criterio de calidad de agua en fuentes de abastecimiento desde el punto de vista estético al generar rechazo



en el consumidor y puede incidir en procesos de potabilización. (Montoya, Loaiza, Hernán Cruz, & Escobar, 2011)

– Color

Se genera por sustancias disueltas y por los coloides que contiene el agua. Existe el color aparente y el verdadero. El color aparente se da cuando el material se encuentra suspendido y el verdadero es el color que queda cuando el material es removido.

El color proveniente de la descomposición natural de la materia vegetal de las plantas y de la disolución de ciertos minerales presente en el subsuelo de la cuenca del río, no tiene incidencia en el tratamiento del agua más bien ocasiona rechazo en los consumidores; mientras que el color ocasionado por descargas industriales presenta sustancias tóxicas.

– Sustancias Flotantes

Se percibe apreciativamente, evaluando la estética del agua.

– Olor

Se presenta por la presencia de sustancias indeseables en el agua como: plancton, compuestos orgánicos generados por bacterias y algas, desechos industriales y descomposición de la materia orgánica. (Ramírez, 2011)

No existen instrumentos para determinar el olor del agua por lo que éste se reporta en los análisis de aguas como presente o no presente.

b. Parámetros Físicos:

– pH

Es un término empleado para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o básicas del agua. Origina cambios en la flora y fauna de los cuerpos de agua y posee influencia sobre la toxicidad de compuestos como: amoníaco, metales pesados, hidrógeno sulfurado, entre otros. (Ramírez, 2011)

– Temperatura

Este parámetro tiene influencia en el desarrollo de la fauna y la flora presentes en las corrientes de agua, especialmente cuando existen variaciones; puesto que eleva el potencial tóxico de ciertas sustancias disueltas en el agua y provoca la disminución del oxígeno disuelto. (Ramírez, 2011)



– Conductividad

Se mide en $\mu\text{mhos/cm}$. Evalúa la presencia de sales en forma ionizada. El análisis de éste parámetro permite establecer relaciones con los sólidos disueltos en los cuerpos de agua. (Ramírez, 2011)

– Sólidos

Existen diversas formas de sólidos: suspendidos volátiles, suspendidos, disueltos, disueltos volátiles y sedimentables que indican la presencia de sales disueltas, partículas en suspensión de carácter orgánico e inorgánico. A partir de los cuales se establecen relaciones con la DBO y DQO, color, turbiedad. (Ramírez, 2011)

2.2.2. PARÁMETROS QUÍMICOS

Los parámetros químicos se dividen en dos clases:

a. Indicadores:

– Acidez

En las corrientes de agua generalmente la acidez es inferior a 8.5; pero por la presencia de ácidos fuertes provenientes de las descargas industriales y fábricas y de dióxido de carbono que es un componente propio de los ríos se produce una acidez mineral. (Ramírez, 2011)

– Alcalinidad

Es la capacidad que posee el agua para neutralizar los ácidos. En bajas concentraciones produce un sabor desagradable del agua; en presencia de iones de Ca o Mg forma precipitados que obstruyen el flujo en las tuberías e interfiere en los procesos de tratamiento de agua potable y aguas residuales.

Se mide por titulación y se expresa en mg/l de CaCO_3 .

– Dureza

Es ocasionada por la presencia de cualquier catión bivalente especialmente Ca^{2+} y Mg^{2+} . Se mide por titulación y se expresa en mg/l de CaCO_3 .

Es un parámetro que se origina de manera natural en el agua debido a la disolución de formaciones rocosas presentes en el suelo.



b. Sustancias Químicas:

– Grasas

La presencia de grasas en el agua se debe a las actividades antrópicas.

Compuestos como: hidrocarburos, esterres, aceites, ceras y ácidos grasos de alto peso molecular son considerados como grasa ya que son solubles en hexano. (Ramírez, 2011)

En las aguas superficiales (ríos) ocasiona películas que interfieren en la transferencia de la luz y del oxígeno disuelto. En cantidades excesivas disminuyen la eficiencia de los tratamientos biológicos.

– Detergentes

Consiste en la variedad de materiales empleados en el lavado de la ropa. Pueden ser clasificados en dos grupos: detergentes LAS (Alkyl-benceno Sulfonato Lineal) y detergentes ABS (Alkyl-benceno Sulfonato Ramificados). (Ramírez, 2011)

En el primer grupo la característica más importante es que son biológicamente degradables mientras que en el segundo no lo son.

– Hierro y manganeso

La presencia de estos dos elementos en aguas superficiales se debe al poder disolvente que tiene el dióxido de carbono sobre los estratos del suelo reduciendo los compuestos férricos a hierro soluble. (Ramírez, 2011)

Concentraciones mayores de 0,3 mg/L de Fe y de 0,1 mg/L de Mn crean problemas en cuanto a la calidad de agua en los sistemas de agua potable.

– Nitrógeno

El nitrógeno total está compuesto por el nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003)

El nitrógeno amoniacal presente en el agua puede reducir los niveles de oxígeno disuelto; la presencia de nitritos conjuntamente con aminas secundarias producen las nitroso-aminas que son de carácter cancerígeno y el nitrógeno como nitrato provoca daños en la salud, especialmente en niños. (Ramírez, 2011)

– Fósforo

Es fundamental en el crecimiento de algas y de otros organismos biológicos. Las formas más frecuentes que se presentan son: orto fosfato, poli fosfato y fosfatos



orgánicos. Raramente se presenta en concentraciones elevadas puesto que las plantas lo absorben rápidamente. (Ramírez, 2011)

– Demanda Bioquímica de oxígeno DBO

Es un parámetro muy significativo cuando se trata de determinar la carga contaminante que generan los desechos domésticos e industriales de carácter orgánico al ser descargados en los ríos, en los que persisten condiciones aeróbicas. (Ramírez, 2011)

2.2.3. PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS

a. Coliformes Totales

Son indicadores de la contaminación del agua; tienen un origen fecal de humanos y animales.

b. Coliformes Fecales

Es un indicador directo del riesgo de contaminación debido a la presencia de bacterias patógenas.

Para analizar el estado de contaminación de las aguas de un río se requiere medir éstos parámetros a través de métodos estandarizados con respecto al Laboratorio.

En el anexo 1 se describen los métodos empleados aplicados por el Laboratorio de Sanitaria de la Universidad de Cuenca.

2.3. INDICES DE CALIDAD RELACIONADOS CON LAS CARACTERÍSTICAS FISICO-QUIMICAS Y BACTERIOLÓGICAS DEL AGUA

Para evaluar la variabilidad de la calidad del agua, espacial y temporalmente, se han desarrollado índices de calidad.

Éstos índices tienen como objetivo clasificar el agua en base a un valor calculado mediante parámetros más representativos de la calidad del agua que se encuentran relacionados al uso de la misma. (Díaz Delgado, Esteller Alberich, & Lopez Vera, 2005)



A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA, entre los cuales se destaca el ICA-NSF (Índice de Calidad propuesto por la National Sanitation Foundation). (Torres, Cruz, Patiño, Escobar, & Pérez, 2010)

Según (Torres, Hernán Cruz, & Patiño, Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano, 2009) la aplicación de un índice de calidad del agua trae consigo grandes ventajas como:

- Consiste en un método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados en laboratorio.
- Puede identificar tendencias de la calidad del agua así como definir las áreas problemáticas.
- Permite priorizar para evaluaciones de calidad de agua más detalladas.

No obstante su aplicación tiene ciertas limitaciones: no puede evaluar todos los riesgos presentes en el agua como es el caso de la presencia de sustancias toxicológicas y no son de aplicación universal, pues dependen de las condiciones ambientales que presenta la cuenca de una región.

2.4. HIDROGEOQUÍMICA DE UN RÍO

La hidrogeoquímica es una ciencia multidisciplinaria que establece la relación existente entre la composición química del agua con los procesos y reacciones que se producen en el ambiente subterráneo (suelo). (Berner & Berner, 1987)

Las principales reacciones y procesos que se producen durante la interacción del agua con el suelo por donde escurre son: disolución de gases, reacción de ácido-base, procesos de absorción y cambio iónico, reacción de disolución/precipitación, reacción de oxidación-reducción, interacciones agua-suelo-roca e intemperismo químico. (Mestrinho S, 1994)

2.4.1. DISOLUCIÓN DE GASES

Este proceso es responsable de la transferencia de gases en el suelo y en el agua por lo que tiene influencia en la calidad del agua. Como es el caso de la disolución del gas carbónico que aumenta la alcalinidad y la agresividad del agua. Tanto la



disolución del oxígeno como la del gas carbónico son importantes en la hidrogeoquímica. (Díaz Delgado, Esteller Alberich, & Lopez Vera, 2005)

2.4.2. REACCIÓN DE ÁCIDO-BASE

Son reacciones que tienen efecto sobre los valores del pH. El agua ácida ($\text{pH} < 5,7$) aumenta el ataque químico de los minerales.

2.4.3. PROCESOS DE ABSORCIÓN Y CAMBIO IÓNICO

Muchos minerales y sustancias orgánicas en contacto con el agua son capaces de atraer moléculas de agua o iones por procesos de absorción.

Los materiales que participan de la absorción y del intercambio iónico son los minerales de: arcilla, oxi-hidróxidos de hierro y aluminio, sustancias orgánicas como el humus y coloideos con carga superficial negativa.

2.4.4. REACCIÓN DE DISOLUCIÓN/PRECIPITACIÓN

La capacidad del agua de disolver sustancias aumenta con la presencia de ácidos orgánicos e inorgánicos, temperatura y tiempo de permanencia del agua en el medio.

2.4.5. REACCIÓN DE OXI-REDUCCIÓN

Implican la transferencia de electrones, muchas de estas reacciones son catalizadas por microorganismos especialmente las bacterias.

Deben su importancia en la hidrogeología por los cambios de potencial Eh y pH que afectan a la solubilidad, precipitación y movilidad de muchos metales.

2.4.6. INTERACCIÓN AGUA-SUELO-ROCA E INTEMPERISMO QUÍMICO

Se entiende por intemperismo al conjunto de transformaciones que sufren los minerales de las rocas y en los sedimentos por la acción de procesos físicos, químicos, geológicos y biológicos.



El intemperismo químico determina el tipo y la concentración de los constituyentes de las aguas superficiales; implica interacciones entre las fases sólidas minerales de las rocas y suelo con el agua mediante procesos como: hidratación/hidrólisis, disolución/precipitación, reacciones de oxi-reducción y ácido base.

Como productos de intemperismo se tienen: los minerales secundarios, polímeros orgánicos y minerales primarios residuales e insolubles como el cuarzo.

Las características litológicas del medio influyen considerablemente en la calidad química del agua. Los silicatos de las rocas cristalinas son más resistentes al intemperismo que los de las rocas sedimentarias. Aguas superficiales asociadas a formaciones geológicas similares presentan características diferente por la incidencia del clima y de las descarga de la zona.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El río Tomebamba nace en la confluencia de varias lagunas del Parque Nacional "El Cajas", a su paso aguas abajo intercepta con las quebradas de: Sacay y Milchichig y con los ríos Yanuncay, Tarqui y Machángara en donde conforman el Río Cuenca. (Ver Figura 3.1).

A lo largo del recorrido del río se han establecido 7 estaciones de monitoreo y muestreo; detallada la ubicación de cada una de ellas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Descripción de las estaciones de monitoreo

| ESTACION | ZONA | COORDENADAS | | |
|----------|---|-------------|-----------|--------|
| | | ESTE | NORTE | ALTURA |
| 1 | LLAVIUCO | 708240.68 | 9685560.5 | 3050 |
| 2 | SAYAUSÍ | 712914.55 | 9682678.5 | 2770 |
| 3 | PUENTE DEL VADO | 721145.53 | 9679411.6 | 2541 |
| 4 | PUENTE DE LA EMPRESA ELÉCTRICA | 724152.48 | 9678527.7 | 2479 |
| 5 | ANTES DE LA UNION CON LA QUEBRADA DE MILCHICHIG | 726157.95 | 9679991.5 | 2451 |
| 6 | ANTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 728189.36 | 9681879.8 | 2414 |
| 7 | PUENTE DE CHALLUABAMBA | 732190.09 | 9684953.7 | 2360 |

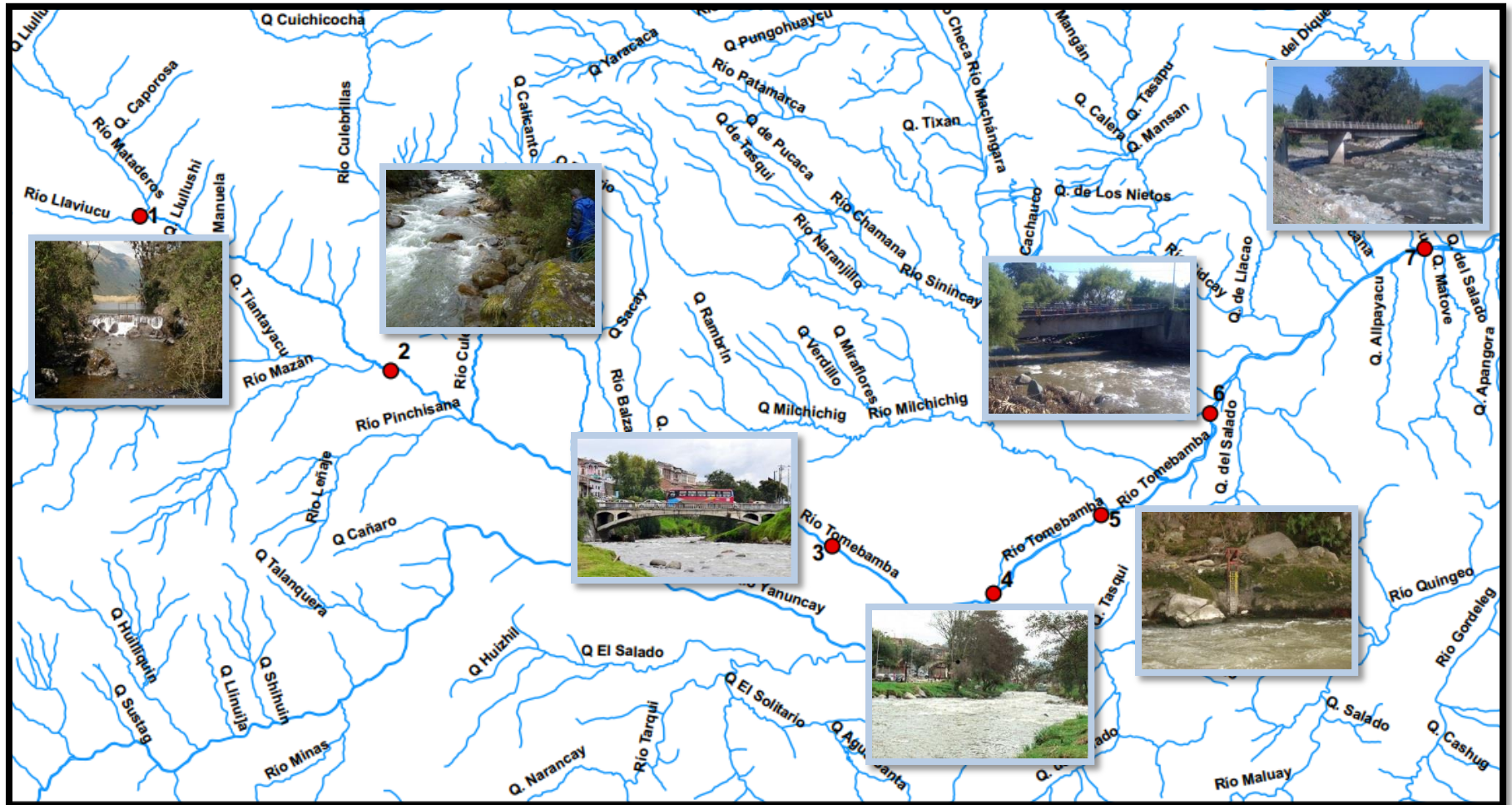


Figura 3.1: Ubicación de las estaciones de muestreo.



3.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA SUB-CUENCA

La subcuenca del río Tomebamba se localiza en la parte occidental de la cuenca del río Paute. Posee una superficie de 38041.8 ha y se encuentra conformada por microcuencas de los ríos: Matadero alto, Llaviuco, Matadero Bajo, Culebrillas, Mazan, Pinchishana y Tomebamba. (CG, 2007)

En la microcuenca del río Tomebamba el área de aporte corresponde a 331 km^2 ; en esta zona: el río posee una longitud aproximada de 38 km, una pendiente promedio de 3.88%, un caudal medio de 8 m^3/seg y una velocidad de 0.96 m/s . (Fernández de Córdova & González M, 2013).

Con respecto al clima que se establece en la zona por la cual atraviesa el curso del río se tiene: bajas presiones, pluviosidad abundante, temperatura media elevada de 25°C y un régimen de lluvias que posee estación seca y estación lluviosa. (Díaz Delgado, Esteller Alberich, & Lopez Vera, 2005)

La cobertura vegetal de la cuenca está conformada por páramo con un gran sistema lacustre en la zona alta, dentro de los límites del Parque Nacional "El Cajas", a más de existir importantes remanentes de bosque nativo propio de los sectores de Llaviuco, Mazán y Culebrillas. (CG, 2007)

3.1.3. GEOLOGÍA DE LA MICRO-CUENCA

La geología de la microcuenca del río Tomebamba en base al Mapa Geológico del Ecuador (escala 1:100000) compuesto por las hojas de Azogues (ÑV – E 73) y Cuenca (NV- F 53), presenta varias formaciones geológicas, depósitos aluviales, coluviales y terrazas que son atravesadas por el río (Ver Figura 3.2). La composición geológica está establecida por la investigación del proyecto PRECUPA. (PRECUPA, 1998)

a. Perfil Geológico:

Al formar el perfil geológico del río Tomebamba ha sido necesario establecer tramos compuestos por la estaciones del muestreo para poder analizar a mejor detalle la geología de la zona. A continuación se presenta la geología compositora de cada uno de ellos.

1. Tramo: Llaviuco - Sayausí.

A lo largo de este tramo el río atraviesa formaciones geológicas como: Kc (Formación Célica), PT (Formación Tarqui), gt (Tilita), m^2 (Terraza 2), m^c



(Depósito Coluvial), m (Depósito Aluvial), mencionadas respectivamente en orden de antigüedad.

Se presencian minas o canteras de Caolín, Travertino y Plata; estando activas las canteras de Caolín y Travertino mientras que la de Plata se encuentra cerrada. La roca andesita es muy común en esta zona.

Travertino: Roca sedimentaria formada por depósitos de carbonato de calcio

Existe una falla inferida cuya dirección es paralela al curso del río (Nor-Oeste). Hay contactos inferidos entre las formaciones existentes.

2. Tramo: Sayausí - Puente del Vado.

Esta zona está compuesta por formaciones pertenecientes al Holoceno Cuaternario: m^3 (Terraza 3), m^2 (Terraza 2), m^c (Depósito Coluvial), m (Depósito Aluvial).

Entre las formaciones presentes existen contactos inferidos; sin embargo no existe alguna falla que atraviese la zona.

3. Tramo: Puente del Vado - Empresa Eléctrica.

En este tramo se presencia formaciones correspondientes a las terrazas 1 y 3 ($m^1 - m^3$), así como al depósito aluvial (m).

Una falla cubierta atraviesa el sector en una dirección Nor-Este. Entre las formaciones existentes hay contactos inferidos.

4. Tramo: Empresa Eléctrica - Antes de la unión con la Quebrada de Milchichig.

Esta zona atraviesa las siguientes formaciones: Formación Azogues perteneciente al grupo Azogues M_{AZ} , Terrazas Glaciares 1 y 2 $m^1 - m^2$ y Depósitos: Coluvial m^c y Aluvial m .

Continúa la falla cubierta con una dirección Nor- Este. Los contactos entre las formaciones corresponden a contactos inferidos.

5. Tramo: Antes de la unión con la Quebrada de Milchichig - Antes de la unión con la PTAR.

Posee una geología similar al tramo 4, diferenciándose al no existir un depósito Coluvial. La falla continúa.



6. Tramo: Antes de la unión con la PTAR - Challuabamba.

La geología de este tramo se compone por las formaciones mencionadas en el tramo 4, adhiriéndose a éstas la formación Loyola que pertenece al Grupo Azogues M_L .

En esta parte continua la falla mencionada de los tramos anteriores.

b. Composición Geológica:

Basándose en las formaciones indicadas existentes en el perfil geológico del río, a continuación se indica la composición respectiva de las mismas:

– FORMACIÓN CÉLICA KC

Descripción geológica

Litología: Un potente paquete de lavas masivas que aflora en la Cordillera Occidental, sobre las márgenes del río Tomebamba (UTM 840 115), entre el río Culebrillas y el río Llaviuco. Consiste de andesitas afaníticas de color verdoso debido a una intensa alteración, localmente se presentan falladas. Estas lavas están intercaladas con tobas riolíticas; también se han descrito riolitas, dacitas y horizontes de sedimentos interdigitados. Esta formación subyace a lutitas y argilitas de la Fm. Yunguilla.

Andesita: Roca volcánica de composición intermedia. En su composición predominan, el SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y CaO

Tobas riolíticas: Roca toba formada por fragmentos eliminados durante una expulsión, “rotos por el fuego”; se enfrían y generan el “aglomerado volcánico” que al endurecer forma la roca toba. Las riolitas en cambio provienen de roca ácida que expulsa lavas ácidas; es una roca vítrea o criptocristalina, contiene cuarzo y feldespato (aluminosilicatos de sodio, potasio y calcio).

Dacitas: Son un tipo de andesitas con cuarzo.

Argilitas: Mineral de lutitas, limolitas y bentonitas

Lutitas: Compuestos de aluminio, potasio y sílice

Limolitas: Cristales microscópicos que se acumulan en forma de láminas con depósitos de arcilla y con débil capacidad cementante, a diferencia de los depósitos de arcilla, por eso el agua fluye con más facilidad en limo que en arcilla.

Bentonita: Tipo de arcilla, contiene un mineral con gran capacidad de absorción de agua dentro de la red cristalina: la montmorillonita, tipo de arcilla expansiva.



Edad y génesis: Según últimas dataciones de trazas de fisión, edad Cretáceo Superior.

Comportamiento geotécnico

Condiciones geodinámicas: Prevalece la condición estructural (fracturamiento debido a fallas), sobre las geológicas y topográficas. Muy pocos eventos geodinámicos y de reducidas dimensiones.

Condiciones estructurales: Presenta mantos descomprimidos en las laderas del valle del río Tomebamba. La fracturación esta principalmente relacionada al fallamiento.

Condiciones hidrogeológicas: Macizo poco permeable (por fracturamiento) a impermeable.

– GRUPO AZOGUES: FORMACIÓN LOYOLA M_L

Descripción geológica

Litología: Formación sedimentaria clástica fino-granular, consiste en una alternancia de lutitas gris oscuro muy fisibles, limolitas que meteorizan a arcillas de color blanco y habano, localmente lentes de areniscas limosas habanas finamente estratificadas con cemento calcáreo, calizas, y mega brechas. En el lado oriental de la cuenca, en la base de la formación ocurren areniscas y conglomerados (básales) en discordancia sobre la Fm. Yunguilla. Abunda yeso, especialmente en las superficies alteradas.

Espesor y tectónica: Contacto concordante o transicional con areniscas de la Fm. Azogues en el techo.

Areniscas: Roca sedimentaria constituida por clastos de tamaño de arena (2-0,02mm) y una matriz (o cemento) que los engloba.

Calizas: Roca sedimentaria compuesta, en forma predominante, por minerales de carbonato, principalmente carbonatos de calcio y de magnesio.

Yeso: Mineral de sulfato de calcio; roca sedimentaria de color blanco o ligeramente coloreada.

Edad y génesis: Según últimas dataciones de trazas de fisión, edad Mioceno Medio.



Comportamiento geotécnico

Facie arenosa de mediana competencia pero es poco representativa. Facie fina, es fisible con desarrollo de alteración residual hasta 3m de espesor de expansividad media-alta, bajas propiedades mecánicas y un comportamiento de suelo respecto a la resistencia al corte; materiales colapsables en condiciones saturadas.

– **GRUPO AZOGUES: FORMACIÓN AZOGUES M_{AZ}**

Descripción geológica

Litología: Secuencia sedimentaria típicamente clástica. Areniscas tobáceas de grano medio a grueso café amarillentas con capas de lutitas, limolitas y pocas intercalaciones de conglomerados. Se encuentra fauna de moluscos y restos de plantas.

Espesor y tectónica: Formación afectada por deformaciones post-sedimentarias, plegada fuertemente, fallas.

Edad y génesis: Recientes dataciones de trazas de fisión determinan edad del Mioceno Medio – Tardío.

Comportamiento geotécnico

Condiciones estructurales: Las areniscas conglomeráticas se presentan medianamente fracturadas y las juntas cerradas a abiertas, rellenas de arena y bordes rugosos deleznable, las tobas y limolitas se presentan muy fracturadas con juntas cerradas a abiertas < 10mm, con relleno limo arenoso y bordes suaves y oxidados. Las estructuras son un principal condicionante en la caída de bloques.

Condiciones hidrogeológicas: Permeabilidad media a alta por fracturación. Macizos poco húmedos a secos.

– **FORMACIÓN TARQUI PT**

Descripción geológica

Litología: Comprende una secuencia volcánica gruesa. Puede ser dividida en tres unidades estratigráficas: flujos oscuros de grano fino de composición andesítica, sobre éstos yace una secuencia de tobas de composición dacítica y riolítica. Estos piroclastos alternan con flujos delgados de composición similar. La unidad superior está compuesta por flujos de riolita homogénea de grano medio que afloran en la



parte alta de los valles.

Edad y génesis: Recientes dataciones de trazas de fisión determinan edad del Pleistoceno.

Comportamiento geotécnico

La mayoría de las rocas presentan alteración que es el resultado de los procesos: meta somáticos e hidrotermales.

– TILITA *gt*

Descripción geológica

Depósitos de origen propiamente glacial mayormente morrenas, se encuentran en la parte oriental de Cuenca y El Cajas, evidenciando los procesos glaciares que existieron en la zona durante el Pleistoceno.

En el sector de la desembocadura del río Llaviuco en el Tomebamba (hoja Sinincay), se pueden contar hasta tres niveles de morrenas laterales, especialmente en la margen derecha. Los depósitos son heterogranulares, constituidos por fragmentos volcánicos inmersos en una matriz arenosa y arcillosa bastante compacta que les confiere una baja permeabilidad.

Tilita: Fracción de material transportado por un glaciar y directamente depositado por éste, sin transporte o acomodación por agua.

Morrenas: Formadas por material proveniente de las rocas de cualquier clase, depositado al cabo de ser transportado de un lugar a otro.

Comportamiento geotécnico y susceptibilidad a terrenos inestables

Baja susceptibilidad. Similar a los depósitos coluviales compactos. Son aún más estables y competentes por los procesos de consolidación y compactación. Los materiales son en general muy poco susceptibles a inestabilidad del terreno; sobre todo si se mantiene las condiciones naturales propias. En los valles glaciales en cambio, las morrenas laterales pueden presentar derrumbes localizados en las laderas de fuerte pendiente.



– **TERRAZAS: $m^1 - m^2 - m^3$**

Descripción geológica

Depósitos de origen mayormente aluvial. En la zona de Cuenca cubren en extensas áreas planas con cinco diferentes niveles de terrazas, compuestas por potentes capas conglomeráticas de matriz areno-arcillosa distribuidas en las márgenes de los ríos Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui, desde Sayausí (UTM 9683000 714000) hasta El Descanso (UTM 9686000 736200).

El área de aporte es el flanco Este de la Cordillera Occidental y el Norte del Nudo en dirección al Portete de Tarqui. La depositación tuvo lugar durante el período Cuaternario, con incidencia glaciario en las zonas altas y medias durante las épocas de glaciación del Pleistoceno. Las relaciones estratigráficas entre los diferentes niveles son poco conocidas.

Las terrazas (m_1 - m_3) están formadas por bloques y boleos sub-angulares a redondeados y sub-esféricos (ocurrencia 40 y 70%) en matriz de grava areno arcillosa (ocurrencia 60 y 30%).

Comportamiento geotécnico

Niveles freáticos poco a medianamente profundos. Terrenos generalmente afectados por flujos de agua. Alta permeabilidad de los depósitos. En la terraza m_1 la permeabilidad es alta y los niveles freáticos cercanos. En las terrazas m_2 , m_3 la permeabilidad es media alta con niveles estáticos superficiales cercanos al pie del talud y hasta mayores de 20 m. de profundidad.

– **DEPÓSITO COLUVIAL m^c**

Descripción geológica

Depósitos de ladera y de pie de talud con materiales que han sufrido poco transporte, son muy heterogéneos dependiendo de la zona y el fenómeno inestable que les dio origen: deslizamientos, derrumbes, flujos, etc. De manera general se componen de mezclas heterogéneas de bloques y fragmentos angulares y sub-angulares en matriz limo arcillosa con micro-fragmentos.

Comportamiento geotécnico

Condiciones geodinámicas: Los depósitos antiguos han sido modelados y suelen estar compactos, sin embargo ante la presencia de escorrentía facilitan la erosión



y drenajes en forma de V, así como reactivaciones del terreno. Los depósitos recientes son zonas potencialmente inestables, sin sistema de drenaje conformado, susceptibles a la erosión hídrica, deslizamientos y flujos.

Condiciones hidrogeológicas: En los depósitos antiguos la permeabilidad es de media a baja en función de la compacidad, los niveles freáticos pueden ser profundos o colgados. En los depósitos recientes la porosidad es de media a alta, pero su transmisibilidad variable. En los dos casos pueden existir zonas húmedas y mal drenadas.

– **DEPÓSITO ALUVIAL *m***

Descripción geológica

Depósitos recientes post-glaciares (Holoceno) hasta nuestros días, material transportado y depositado por los ríos, el cual forma parte de las llanuras de inundación (especialmente en los valles amplios). Está compuesto por bloques, gravas y arenas limosas en diferentes porcentajes y composición, sus formas van de redondeadas a sub-angulares según la dinámica y morfología del curso fluvial.

Comportamiento geotécnico

Condiciones geodinámicas: Erosión hídrica por corrientes superficiales. Intenso lavado de material fino.

Condiciones hidrogeológicas: Niveles freáticos poco profundos. Permeabilidad alta. Los depósitos suelen estar afectados por flujos internos.

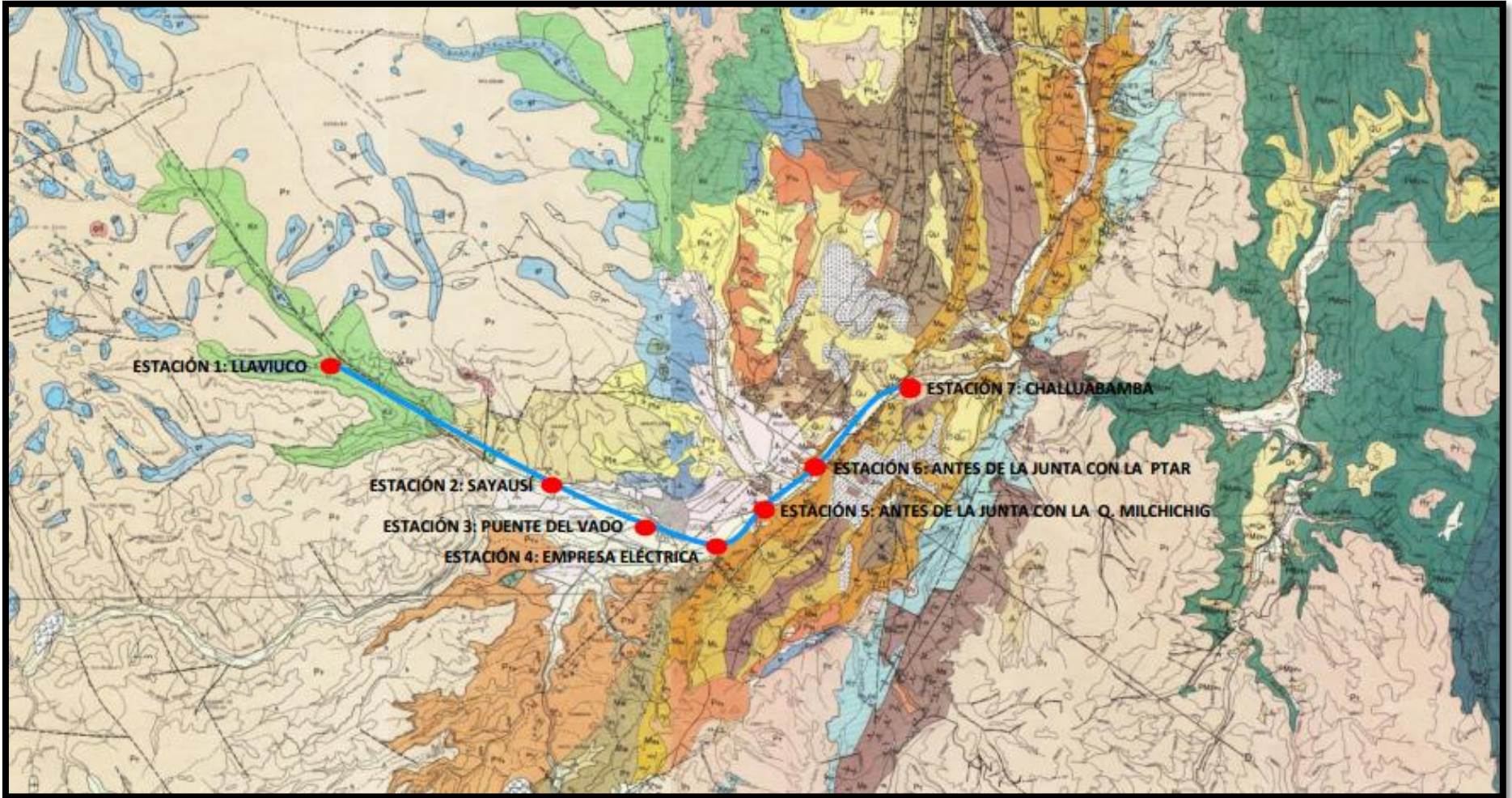


Figura 3.2: Mapa Geológico con las estaciones del muestreo.



3.2. TIPO DE ESTUDIO

El estudio a realizar en la presente tesis comprende: un análisis matemático y estadístico para la evaluación de la calidad del agua mediante la aplicación de los modelos ICA e ICA-NSF; un análisis hidráulico para la medición de caudales y un análisis geológico para correlacionar las características del agua con la geología que el río atraviesa.

3.3. CAMPAÑAS DE MUESTREO

3.3.1. ASPECTOS GENERALES DEL MUESTREO

En base a obtener una representatividad de la muestra se escogió el tramo del río Tomebamba comprendido entre la zona de Llaviuco, sector "El Cajas" y la zona de Challuabamba.

En este tramo se presenta una gran variabilidad de la calidad del agua; en la zona alta no existe gran contaminación ya que pertenece a un área protegida; en la zona central atraviesa la ciudad recibiendo descargas de ciertos sectores que aún no poseen un interceptor (Sectores aledaños a la quebrada de Milchichig) y en la zona baja recibe descargas provenientes de fábricas y de una intensiva explotación de áridos. (Fernández de Córdova & González M, 2013)

Con este análisis de variación de la composición de la muestra de agua, el establecimiento del tramo del río es apropiado para el muestreo.

3.3.2. TIPO DE MUESTRAS

Las muestras realizadas son catalogadas como muestras integradas-compuestas que se forman por la mezcla de muestras puntuales tomadas de diferentes puntos en los que existe una diferencia por la variación del ancho y profundidad del río.

3.3.3. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO

Las estaciones del muestreo ubicadas en la Figura 3.1 y descritas en la Tabla 3.1 han sido colocadas en puntos estratégicos. Generalmente buscando la presencia de estaciones de aforo cercanas, vertederos calibrados y puentes en donde sea posible acceder al lugar para poder extraer las muestras y se facilite la medición de caudales. Así en los sectores de Llaviuco y Sayausí existen estaciones de aforo y vertederos y el resto de estaciones se han ubicado en puentes.

3.3.4. CLASE Y FRECUENCIA DEL MUESTREO

Las muestras tomadas se realizaron manualmente con una frecuencia mensual para poder evidenciar el comportamiento de la calidad del agua con respecto a los caudales bajos y altos que presenta el río a lo largo del año.

A continuación se presentan fotografías del equipo empleado en laboratorio y en las campañas de muestreos:



Fotografía 1: Conductivímetro



Fotografía 2: Espectrofotómetro Génesis 10 U.V.



Fotografía 3: Espectrofotómetro Nova



Fotografía 4: Muestra Compuesta



Fotografía 5: Oxígeno Disuelto In-Situ



Fotografía 6: Oxímetro de mesa



Fotografía 7: Equipo para medir pH



Fotografía 8: Titulaciones



Fotografía 9: Turbidímetro Hach 2100 AN



3.4. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

3.4.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL EN VERTEDEROS

a. Caudales medidos en la estación de Llaviuco:

Para medir el caudal en esta estación en la cual existe un vertedero de cresta ancha se realizaron medidas de las cargas de agua en el vertedero. Basándose en la geometría del vertedero, tipo de vertedero y según (Azevedo N & Acosta A, 1976) y (Sotelo A, 1982):

En vertederos rectangulares con relación e/H mayor a 0.67 y menor que 10 se puede calcular el caudal considerando un vertedero Bazin de cresta delgada afectado por coeficientes de reducción ε_1 y ε_2 . Ec. 1:

$$Q = 0.623 * \varepsilon_1 * \varepsilon_2 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde:

Q : Caudal (m^3/seg)

ε_1 : Coeficiente de reducción

ε_2 : Coeficiente de reducción

L : Longitud de la cresta del vertedero (m)

e : Ancho de la cresta del vertedero (m)

H : Carga de agua sobre el vertedero (m)

Los coeficientes de reducción ε_1 para la relación $0.67 < e/H < 3$ y $3 < e/H < 10$ se presentan en las Ec. 2 y Ec. 3 respectivamente:

$$\varepsilon_1 = 0.7 + \frac{0.185}{\frac{e}{H}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\varepsilon_1 = 0.7 + \frac{0.1}{\frac{e}{H}} \quad \text{Ec. 3}$$

El coeficiente de reducción ε_2 depende si la descarga es libre o sumergida en el vertedero. Para el vertedero en análisis las descargas siempre son libres por lo tanto $\varepsilon_2 = 1$.



Cuando la relación e/H es mayor a 10, el caudal se calcula como si se tratara de un canal. Aplicando Manning:

$$Q = A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} / n \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

Q : Caudal (m^3/seg)

A : Área mojada (m^2)

R : Radio hidráulico (m)

S : Pendiente del canal

n : Rugosidad de Manning

Al no conocer la pendiente se considera que el flujo que atraviesa el vertedero es un flujo crítico, muy común en los ríos, así la pendiente crítica en canales rectangulares se calcula según (Marbello Perez & Álvarez Láinez):

$$S_{cr} = \frac{8}{3} * \frac{g}{\alpha} * \left(\frac{n}{\varphi}\right)^2 * \cos(\tan^{-1} S_{cr})^2 / B^{1/3} \quad \text{Ec. 5}$$

Dónde:

S_{cr} : Pendiente crítica

g : Gravedad $9.81 m/s^2$

α : Coeficiente de corrección de velocidad igual a 1

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

$\varphi = 1 m^{(\frac{1}{3})} / seg$ Coeficiente empírico

B : Longitud de la cresta de vertedero equivalente al ancho del canal.

b. Caudales medidos en la estación de Sayausí:

En el sector de Mataderos-Sayausí existe un vertedero el cual se encuentra monitoreado periódicamente por el departamento de investigación PROMAS de la Universidad de Cuenca.



Para estimar el caudal en este sector se realizaron las medidas de la altura de agua, las cuales se aplicaron a la curva de descarga proporcionada por el departamento.

3.4.2. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL UTILIZANDO MOLINETE

a. Equipo:

Para el aforo realizado en las estaciones ubicadas en puentes se emplea la metodología propuesta por (Meteorología, 1994) para medir el caudal utilizando molinete, el cual consta de un equipo con las siguientes partes: grúa de sostenimiento, molinete tipo cazoletas y estabilizador, pesa de plomo de 25 y 50 lb, carrete de cable y reloj para la medición de la profundidad y contador digital para la medición de velocidad.

b. Selección del sitio de aforo:

La ubicación en puentes ha sido selecta puesto que el sitio de aforo debe poseer una estructura en donde suspender el equipo y en la cual el acceso sea fácil tanto en estiaje como en crecidas, debe existir un tramo recto del cauce, tener márgenes y fondo preferentemente estables y las velocidades de la corriente suficientes como para ser detectadas por la sensibilidad el equipo empleado.

c. Determinación de la sección transversal:

En primer lugar es necesario establecer un punto fijo de referencia, preferente la margen del río; desde este punto se medirá el ancho de la corriente y la distancia entre las verticales que se emplearán para la medición de velocidad. Para lo cual se llevará un registro en un formato correspondiente al aforo y un flexómetro.

Una vez que se hayan establecido los puntos en donde se medirán las velocidades, utilizando el sistema de cable con pesa de plomo y tambor de medición, se hace descender al equipo hasta que la pesa roce la superficie del agua y se coloca la aguja de medición encerada; luego se sumerge la pesa hasta que llegue al fondo del cauce y se toma lectura de la profundidad leída por la aguja.

d. Determinación de la velocidad:

La velocidad se establece en uno o más puntos de cada vertical mediante el conteo del número de revoluciones del rotor en un tiempo determinado; al emplear el molinete de cazoletas la velocidad se registra automáticamente ya que posee un contador digital que determina el número de revoluciones en 40 segundos.



La velocidad media se determinará en base a la profundidad de la corriente.

e. Cálculo del caudal:

Se realiza a través del método aritmético de la semi-sección en donde el caudal en cada segmento se calcula multiplicando la velocidad media por la profundidad en cada vertical y por el ancho de cada semi-sección que corresponde a la suma de la mitad de las distancias entre verticales adyacentes. El caudal total es la suma de los caudales de cada segmento. Expresado en las ecuaciones 6 y 7:

$$Q_i = V_i * d_i * \left[\frac{b_{i+1} - b_{i-1}}{2} \right] \quad \text{Ec. 6}$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{Ec.7}$$

Dónde:

Q_i : Caudal en la semi-sección i

V_i : Velocidad en la vertical i

d_i : Profundidad total en la vertical i

b_{i+1} : Distancia desde el punto inicial a la vertical i+1

b_{i-1} : Distancia desde el punto inicial a la vertical i-1

Q_t : Caudal total

3.5. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE ICA

3.5.1. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)

Es un índice de calidad propuesto por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Permite establecer la calidad del agua mediante el análisis de parámetros físico-químicos y bacteriológicos. Estableciendo el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo expresado como porcentaje de agua pura. Este tipo de índice considera a los siguientes 18 parámetros:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Oxígeno Disuelto
- Coliformes Fecales
- Coliformes Totales
- Potencial de Hidrógeno
- Dureza Total



- Sólidos Disueltos
- Sólidos Suspendidos
- Cloruros
- Conductividad Eléctrica
- Alcalinidad
- Grasas y Aceites
- Nitrógeno de nitratos
- Nitrógeno Amoniacal
- Fosfatos Totales
- SAAM
- Color
- Turbiedad

Para el cálculo del índice de calidad del agua general se emplea la Ec. 8:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{Ec.8}$$

Dónde:

ICA: Índice de calidad del agua global

I_i : Índice de calidad para el parámetro i

W_i : Coeficiente de ponderación del parámetro i

n : Número total de parámetros

Cuando el agua presenta una fuerte contaminación el valor del ICA es cercano o igual a 0%; mientras que en aguas limpias con excelentes condiciones es de 100%.

En el anexo 2, se presentan los índices de calidad para cada parámetro citado con sus correspondientes ecuaciones de cálculo.

Los coeficientes de ponderación corresponden a la importancia relativa que tiene cada parámetro (Ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Coeficientes de ponderación para el cálculo ICA

| Parámetro | Importancia | Parámetro | Importancia |
|-------------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| pH | 1.0 | Nitrógeno de Nitratos | 2.0 |
| Color | 1.0 | Nitrógeno Amoniacal | 2.0 |
| Turbiedad | 0.5 | Fosfatos Totales | 2.0 |
| Grasas y Aceites | 2.0 | Cloruros | 0.5 |
| Sólidos Suspendidos | 1.0 | Oxígeno Disuelto | 5.0 |
| Sólidos Disueltos | 0.5 | DBO | 5.0 |
| Conductividad Eléctrica | 2.0 | Coliformes Totales | 3.0 |
| Alcalinidad | 1.0 | Coliformes Fecales | 4.0 |
| Dureza Total | 1.0 | SAAM | 3.0 |

Para la aplicación del método en la presente investigación no se considera a dos parámetros: grasas - aceites y SAAM; por lo que el coeficiente de ponderación para estos parámetros es nulo.

La aplicación de las ecuaciones para los índices de calidad individuales puede generar valores negativos o superiores a 100 por lo que es necesario establecer ciertos criterios basados en el comportamiento matemático de las ecuaciones (anexo 2). En cada parámetro se tiene:

- 1. Potencial de hidrógeno:** Para valores de pH menores a 6.7 se usará la ecuación 1.1; en el caso de que el pH sea mayor o igual a 6.7 y menor que 7.58 se aplicará la ecuación 1.2. Cuando el pH sea mayor o igual a 7.58 se usará la ecuación 1.3.
- 2. Color:** Los datos de las concentraciones de color que se utilizarán en el cálculo serán de color verdadero. Para concentraciones menores a 2.018 unidades de Pt-Co se asignará el valor de ICA igual a 100.
- 3. Turbiedad:** Para concentraciones menores a 1.54 UTJ se asignará un valor de ICA de 100.
- 4. Sólidos suspendidos:** Para concentraciones menores de 14.144 mg/l se asigna un valor de ICA de 100.
- 5. Sólidos disueltos:** Para concentraciones menores a 520 mg/l se asigna un valor de ICA de 100, y para concentraciones mayores a 6234 mg/l se debe asignar un valor de cero.
- 6. Conductividad eléctrica:** Cuando se tienen concentraciones menores a 85.60 μ mhos/cm, se debe asignar un ICA de 100 %.



- 7. Alcalinidad:** Para concentraciones menores de 1.3 se asigna un ICA de 100.
- 8. Dureza total:** Para concentraciones mayores a 2500 mg/l se asignará un ICA de cero.
- 9. Nitrógeno de nitratos:** Se asigna un valor de ICA de 100 para concentraciones menores a 4.097 mg/l.
- 10. Nitrógeno amoniacal:** Para concentraciones menores de 0.11 mg/l se asigna un ICA de 100.
- 11. Fosfatos totales:** Se asigna un valor de ICA de 100 para concentraciones menores o iguales a 0.0971 mg/l.
- 12. Cloruros:** Para concentraciones menores a 2.351 se asignará un ICA de 100.
- 13. Oxígeno disuelto:** El oxígeno se disuelve en el agua por el contacto del aire con la superficie del agua, hasta alcanzar el punto de saturación a una temperatura determinada. A la temperatura de 0°C el punto de saturación del oxígeno disuelto es de 14.6 ppm. Esta concentración disminuye al aumentar la temperatura del agua, de manera que a 15°C la concentración de saturación del oxígeno disuelto es de 10 ppm. Es por este motivo que, cuando no se cuente con el dato de la temperatura ambiente, no se podrá realizar el cálculo del oxígeno disuelto y se considerará inexistente. Para calcular la concentración de OD en equilibrio con aire saturado en agua, se usará la tabla presentada en el anexo 3.
- 14. Demanda bioquímica de oxígeno:** Se asigna un ICA de 100 para concentraciones menores o iguales a 1.311 mg/l.
- 15. Coliformes totales:** Cuando se tiene un valor de coliformes totales de 0 NMP/100 ml, se asigna un índice de 100.
- 16. Coliformes fecales:** Cuando se tiene un valor de coliformes fecales de 0 NMP/100 ml, se asigna un índice de 100.

Una vez calculado el ICA general, aplicando los criterios expuestos; se clasifica la calidad de agua en base al criterio general. En la Tabla 3.3 se presentan los rangos de clasificación conjuntamente con la calidad del agua y el color asignado.



Tabla 3.3: Rango de clasificación del ICA de acuerdo al criterio general

| ICA | CRITERIO GENERAL |
|---------|-----------------------|
| 85 –100 | No Contaminado |
| 70 - 84 | Aceptable |
| 50 – 69 | Poco Contaminado |
| 30 - 49 | Contaminado |
| 0 - 29 | Altamente Contaminado |

En la Tabla 3.4 se presentan los usos comunes de las aguas de los ríos. A partir del índice de calidad se restringen o permiten estos usos en cierto estado del agua.



Tabla 3.4: Escala de clasificación del Índice de Calidad del Agua.

| ICA | CRITERIO GENERAL | ABASTECIMIENTO PÚBLICO | RECREACIÓN | PESCA Y VIDA ACUÁTICA | INDUSTRIAL Y AGRÍCOLA |
|-----|-----------------------|--------------------------------|---|---|---|
| 100 | NO CONTAMINADO | NO REQUIERE PURIFICACIÓN | ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUÁTICO | ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS | NO REQUIERE PURIFICACIÓN |
| 95 | | | | | |
| 90 | | | | | |
| 85 | ACEPTABLE | LIGERA PURIFICACIÓN | ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUÁTICO | ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS | LIGERA PURIFICACIÓN PARA ALGUNOS PROCESOS |
| 80 | | | | | |
| 75 | | | | | |
| 70 | POCO CONTAMINADO | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 65 | | | | | |
| 60 | | | | | |
| 55 | CONTAMINADO | DUDOSO | DUDOSO PARA EL CONTACTO DIRECTO | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 50 | | | | | |
| 45 | | | | | |
| 40 | CONTAMINADO | DUDOSO | SIN CONTACTO CON EL AGUA | SOLO ORGANISMOS RESISTENTES | TRATAMIENTO EN LA MAYOR PARTE DE LA INDUSTRIA |
| 35 | | | | | |
| 30 | | | | | |
| 25 | ALTAMENTE CONTAMINADO | NO ACEPTABLE | SEÑAL DE CONTAMINACIÓN | NO ACEPTABLE | USO RESTRINGIDO |
| 20 | | | | | |
| 15 | | | | | |
| 10 | ALTAMENTE CONTAMINADO | NO ACEPTABLE | NO ACEPTABLE | NO ACEPTABLE | NO ACEPTABLE |
| 5 | | | | | |
| 0 | | | | | |

3.5.2. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (I-NSF)

El índice de calidad del agua I-NSF fue desarrollado en 1970 por la National Sanitation Foundation (NSF) de Estados Unidos. ETAPA aplica este índice para la evaluación de la calidad del agua de los ríos.

Tiene la característica de ser un índice multiparámetro y se basó en tres estudios. Según (Pamplona):

En el primer estudio se realizó el análisis con 35 variables, en donde expertos determinaron que variables si debían ser incluidas y a las que se les asignó un factor de importancia de 1-5.



En el segundo se identificaron las variables de mayor importancia resultando 9: Oxígeno Disuelto, Coliformes Fecales, pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅, Nitratos, Fósforo Total, Desviación de la Temperatura, Turbiedad y Sólidos Totales Suspendidos.

Finalmente en el tercer estudio se establecieron las curvas de función para cada variable. Posteriormente los expertos determinaron el peso relativo (W_i) o ponderación según la importancia de cada variable o parámetro en la calidad del agua. Estos pesos se aplican a los subíndices correspondientes a cada parámetro para generar la media ponderada que constituye el I-NSF. (Ramírez Callejas, y otros, 2004) Las ponderaciones aplicadas a cada uno de los parámetros se presentan en la Tabla 3.51.

Tabla 3.5: Ponderación o peso relativo aplicado a cada uno de los parámetros usados en el I-NSF

| Parámetro | Peso Relativo |
|-----------------------------|---------------|
| Oxígeno Disuelto | 0.17 |
| Coliformes Fecales | 0.15 |
| pH | 0.12 |
| DBO5 | 0.10 |
| Fósforo Total | 0.10 |
| Nitratos | 0.10 |
| Temperatura | 0.10 |
| Sólidos Totales Suspendidos | 0.08 |
| Turbiedad | 0.08 |

Resultando el cálculo de índice:

$$I - NSF = \sum_{i=1}^9 I_i W_i \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

I – NSF: Índice de calidad del agua global

I_i : Índice de calidad para el parámetro i

W_i : Coeficiente de ponderación del parámetro i

En el anexo 4 se presentan las curvas para los 9 parámetros y las ecuaciones respectivas propuestas (para obtener I_i) que son el resultado de un ajuste de la curva. Todas las ecuaciones son de certera aplicabilidad pues el coeficiente de correlación es de 1 en ciertos casos y 0.99 en otros.

En cada parámetro se han adoptado criterios en base al comportamiento de las curvas funcionales así:



- 1. Demanda Bioquímica de Oxígeno:** En concentraciones mayores a 30 mg/L, el I-NSF es igual a 2.
- 2. Potencial de Hidrógeno:** Para valores de pH menores a 2 y superiores a 12 el valor de I-NSF corresponde a cero.
- 3. Oxígeno Disuelto:** Para porcentajes de oxígeno disuelto con respecto al oxígeno disuelto saturado mayores a 140 el índice I-NSF adopta un valor de 50.
- 4. Turbiedad:** Cuando se presentan valores de turbiedad mayores a 100 UNT el I-NSF es igual a 5.
- 5. Fósforo Total:** Para concentraciones de fósforo mayores a 10 mg/L el I-NSF es de 2.
- 6. Nitratos:** Cuando los valores de nitratos superan a 100 mg/L, el índice I-NSF es de 1.
- 7. Temperatura:** Para temperaturas mayores a 30°C el índice I-NSF adopta un valor de 5.
- 8. Coliformes Fecales:** Cuando al agua presente valores superiores a 100000 NMP/100ml el índice es igual a 2.
- 9. Sólidos Totales Suspendidos:** Para concentraciones mayores a 500 mg/L, I-NSF es de 20.

La clasificación de la calidad de agua se realiza de acuerdo a los siguientes rangos numéricos:

Tabla 3.6: Rangos de clasificación del agua usados en el I-NSF

| Clase | Calidad | Índice de Calidad | Significado |
|-------|-----------|-------------------|----------------------------------|
| I | Excelente | 91-100 | Aguas muy limpias |
| II | Buena | 71-90 | Aguas ligeramente contaminadas |
| III | Media | 51-70 | Aguas moderadamente contaminadas |
| IV | Mala | 26-50 | Aguas muy contaminadas |
| V | Muy Mala | 0-25 | Aguas fuertemente contaminadas |



4. RESULTADOS

4.1. APLICACIÓN DEL ÍNDICE ICA

Con los datos de los 16 parámetros medidos a lo largo de las 7 estaciones de monitoreo y durante las nueve campañas, se obtuvieron los índices de calidad respectivos para calcular luego el índice de calidad ICA general (Ver Tabla 4.1).

Basándose en la clasificación que asigna el ICA y establecer el grado de contaminación de agua; en la Tabla 4.2 se presenta la calidad del agua en cada estación de monitoreo.



Tabla 4.1: Índice de calidad general ICA

| PUNTO DE MONITOREO | | MUESTREOS | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ESTACION | ZONA | 06-mar-13 | 10-abr-13 | 02-may-13 | 04-jun-13 | 20-jun-13 | 04-jul-13 | 12-sep-13 | 03-oct-13 | 24-oct-13 |
| | | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
| 1 | LLAVIUCO | 71.74 | 75.43 | 66.02 | 72.14 | 74.59 | 71.72 | 73.63 | 70.71 | 69.36 |
| 2 | SAYAUSI | 75.07 | 73.79 | 66.67 | 71.37 | 71.78 | 70.72 | 70.67 | 70.55 | 71.00 |
| 3 | PUENTE DEL VADO | 61.64 | 67.78 | 61.81 | 66.04 | 64.47 | 58.19 | 66.04 | 59.20 | 58.96 |
| 4 | EMPRESA ELECTRICA | 61.33 | 61.72 | 53.18 | 65.49 | 55.99 | 51.89 | 63.62 | 57.16 | 57.03 |
| 5 | ANTES DE LA J. CON LA Q. MILCHICHIG | 57.92 | 56.50 | 50.26 | 61.48 | 50.82 | 49.41 | 56.28 | 53.95 | 56.85 |
| 6 | ANTES DE LA PTAR | 55.55 | 51.22 | 48.26 | 59.33 | 54.37 | 47.36 | 53.28 | 55.00 | 54.27 |
| 7 | CHALLUABAMBA | 52.31 | 49.69 | 41.85 | 49.77 | 46.76 | 44.55 | 47.28 | 48.88 | 49.78 |

Tabla 4.2: Criterio General ICA por muestreo y por estación

| ESTACIÓN | 06-mar-13 | 10-abr-13 | 02-may-13 | 04-jun-13 | 20-jun-13 | 04-jul-13 | 12-sep-13 | 03-oct-13 | 24-oct-13 |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
| 1 | Aceptable | Aceptable | Poco contaminado | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Poco contaminado |
| 2 | Aceptable | Aceptable | Poco contaminado | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable | Aceptable |
| 3 | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado |
| 4 | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado |
| 5 | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado |
| 6 | Poco contaminado | Poco contaminado | Contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado | Poco contaminado |
| 7 | Poco contaminado | Contaminado | Contaminado | Contaminado | Contaminado | Contaminado | Contaminado | Contaminado | Contaminado |

4.1.1. VARIABILIDAD DEL ÍNDICE ICA

Los índices ICA calculados en cada estación del río, presentan una variación espacial y temporal. La variación espacial se puede evidenciar en la Tabla 4.2, donde la calidad del agua disminuye conforme avanza el curso del río mientras que en las figuras 4.1 – 4.7 se demuestra la variación temporal a lo largo de los nueve meses de muestreo. Posteriormente se profundizará el análisis.

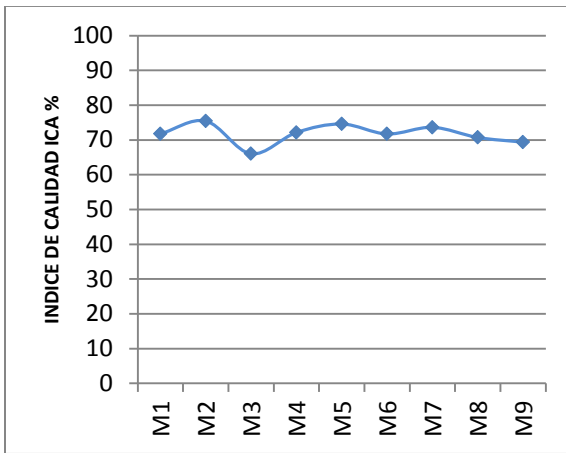


Figura 4.1: Variación del ICA en la estación de Llaviuco

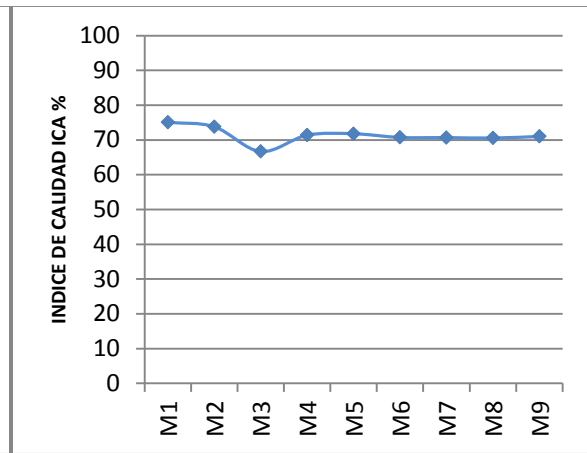


Figura 4.2: Variación del ICA en la estación de Sayausí

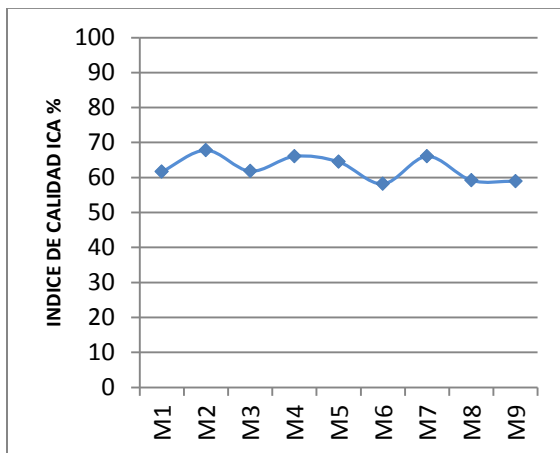


Figura 4.3: Variación del ICA en la estación del Puesto del Vado

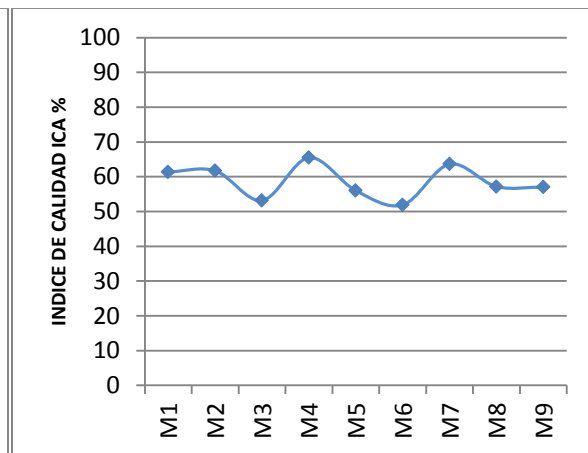


Figura 4.4: Variación del ICA en la estación de la Empresa Eléctrica

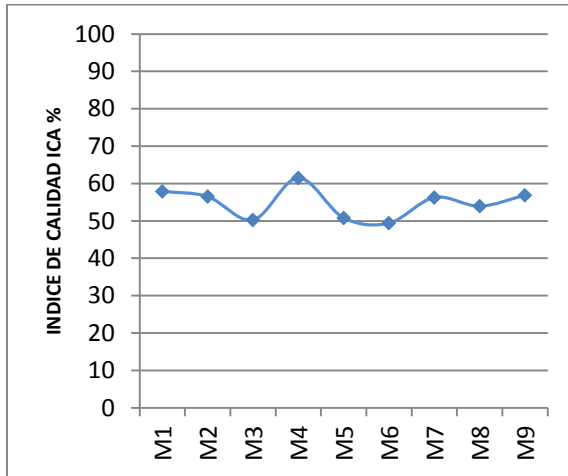


Figura 4.5: Variación del ICA en la estación antes de la junta con la Q. de Milchichig.

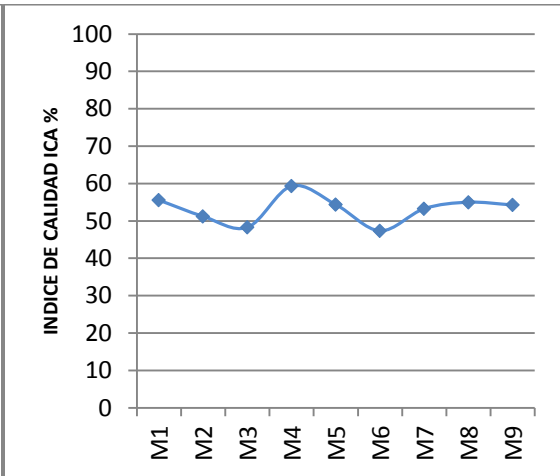


Figura 4.6: Variación del ICA en la estación antes de la PTAR.

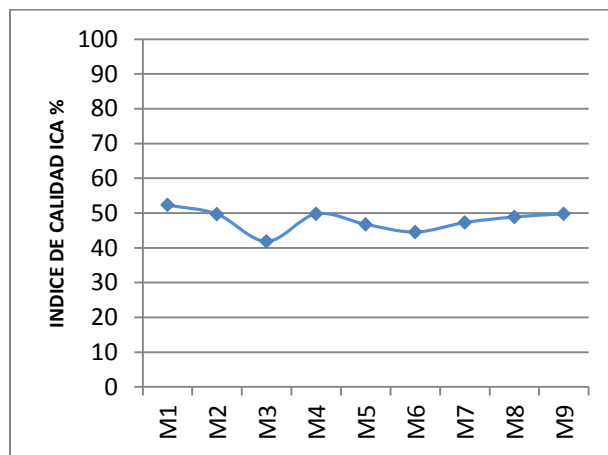


Figura 4.7: Variación del ICA en la estación de Challuabamba

4.2. VARIACIÓN DEL CAUDAL

A continuación se presentan los valores de los caudales medidos en cada estación de muestreo. (Ver Tabla 4.3)

Tabla 4.3: Caudales medidos en las estaciones de los nueve muestreos

| ESTACIÓN | 06-mar-13 | 10-abr-13 | 02-may-13 | 04-jun-13 | 20-jun-13 | 04-jul-13 | 12-sep-13 | 03-oct-13 | 24-oct-13 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
| 1 | 1.15 | 0.81 | 0.44 | 1.32 | 0.97 | 0.66 | 0.81 | 0.48 | 1.02 |
| 2 | 2.28 | 1.51 | 0.55 | 4.73 | 2.47 | 1.23 | 2.68 | 0.88 | 3.36 |
| 3 | 12.40 | 9.11 | 6.75 | 18.57 | 9.59 | 8.43 | 7.14 | 2.15 | 13.75 |
| 4 | 27.67 | 16.58 | 9.51 | 30.55 | 24.18 | 57.34 | 11.56 | 7.85 | 33.57 |
| 5 | 29.05 | 17.41 | 9.99 | 32.08 | 25.39 | 60.21 | 12.14 | 8.24 | 35.25 |
| 6 | 34.53 | 23.39 | 11.57 | 34.74 | 30.11 | 65.49 | 19.04 | 11.10 | 37.05 |
| 7 | 34.93 | 17.30 | 10.19 | 38.69 | 37.02 | 68.89 | 20.25 | 12.22 | 42.90 |

A través de un análisis estadístico, en el siguiente diagrama de cajas es notoria la variación que presentan los caudales a lo largo de los meses en que fueron medidos. (Ver figuras: 4.8 y 4.9).

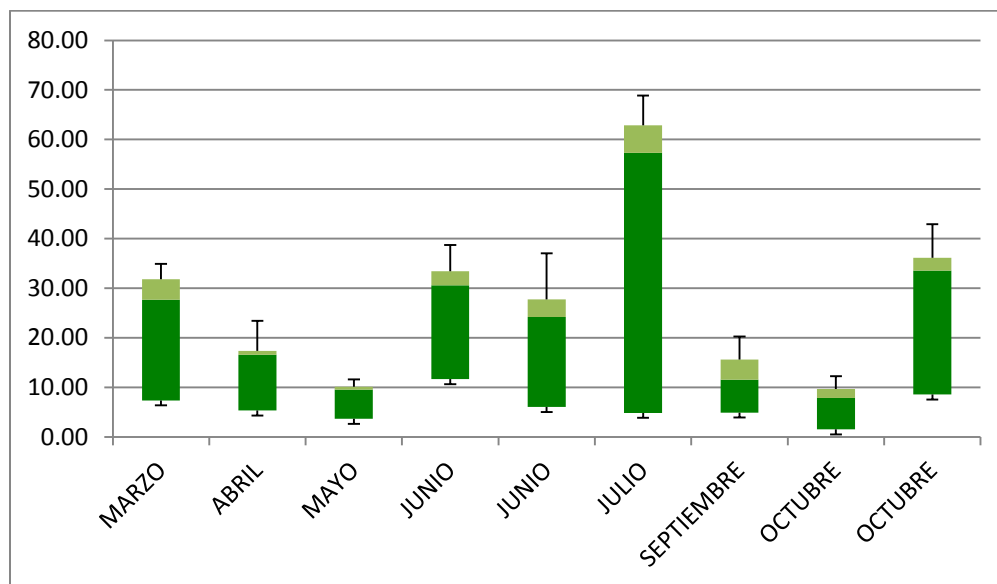


Figura 4.8: Variabilidad de los caudales del río Tomebamba en el año 2013.

Demostrando así la existencia de caudales altos: Marzo, Junio (primeros días), Junio (fin del mes), Julio y Octubre (últimos días). Caudales medios: Abril y Septiembre y caudales bajos en los meses de Mayo y Octubre (primeros días).

La categorización de caudales se estipula con respecto a los percentiles 25 y 75. Para caudales altos, su valor es superior al percentil 75; para caudales medios, está comprendido entre los percentiles 25 y 75 y para caudales bajos se encuentra por debajo del percentil 25.

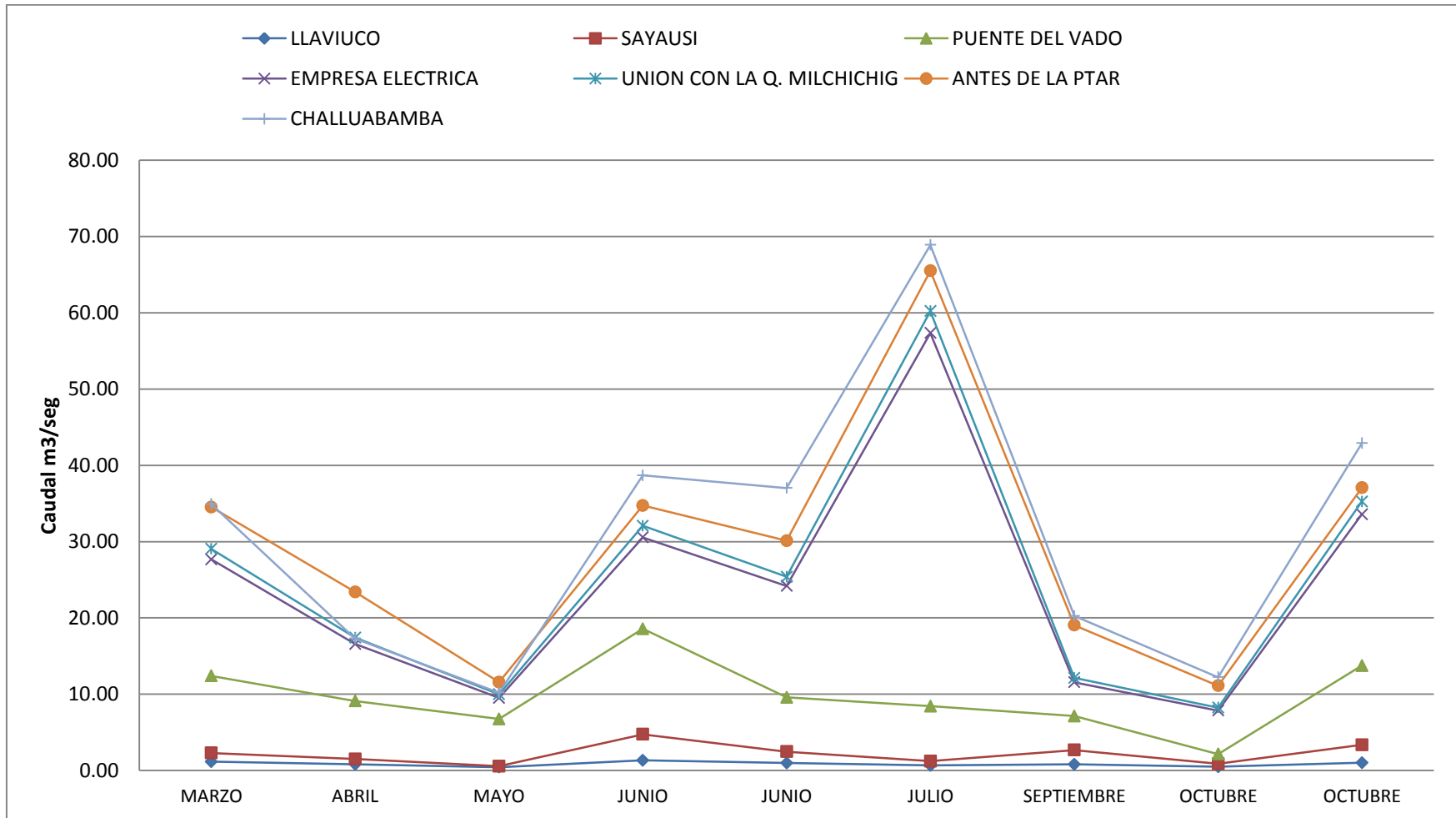


Figura 4.9: Comportamiento de los caudales del río Tomebamba en el año 2013.

4.2.1. CORRELACIÓN ENTRE LA DIVISIÓN DE CAUDALES Y EL VALOR ICA

Existe una relación entre los índices de calidad y la cantidad de agua que escurre en el río. En la figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se establece el comportamiento del ICA en caudales altos, medios y bajos respectivamente.

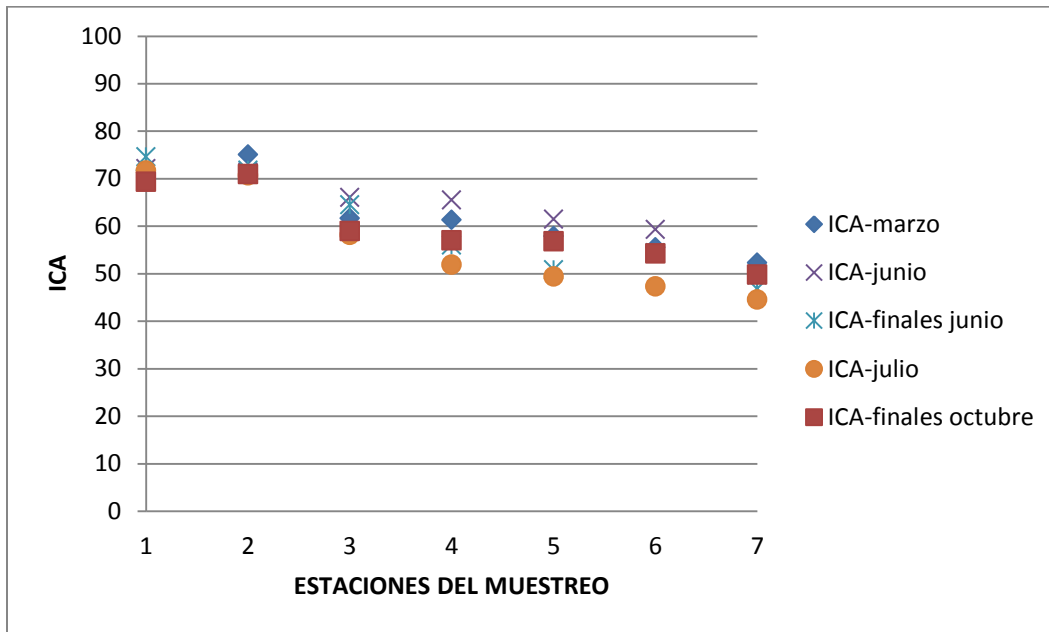


Figura 4.10: Comportamiento del ICA en los meses que presentan un caudal alto.

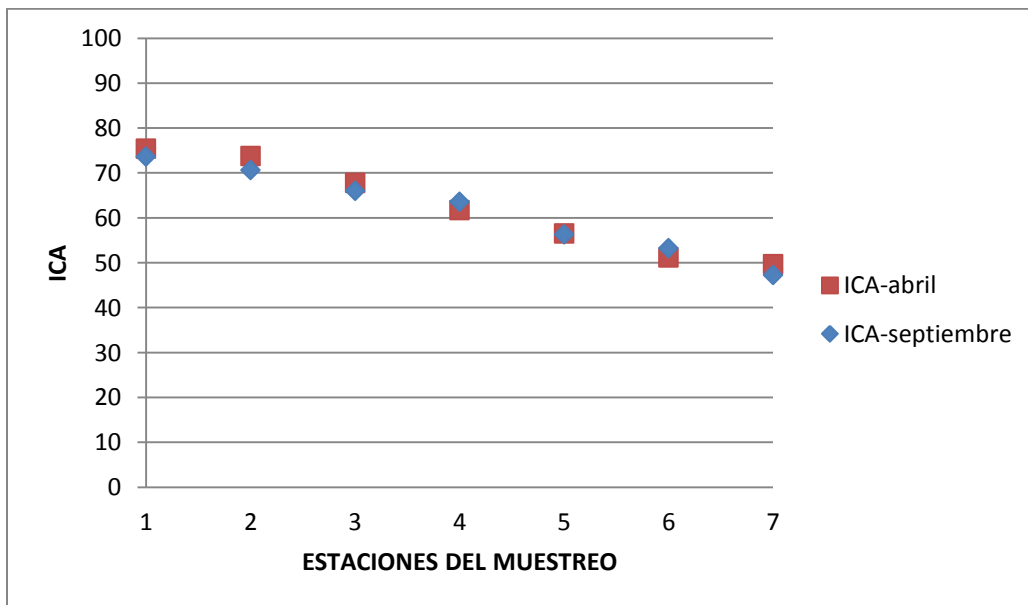


Figura 4.11: Comportamiento del ICA en los meses que presentan un caudal medio.

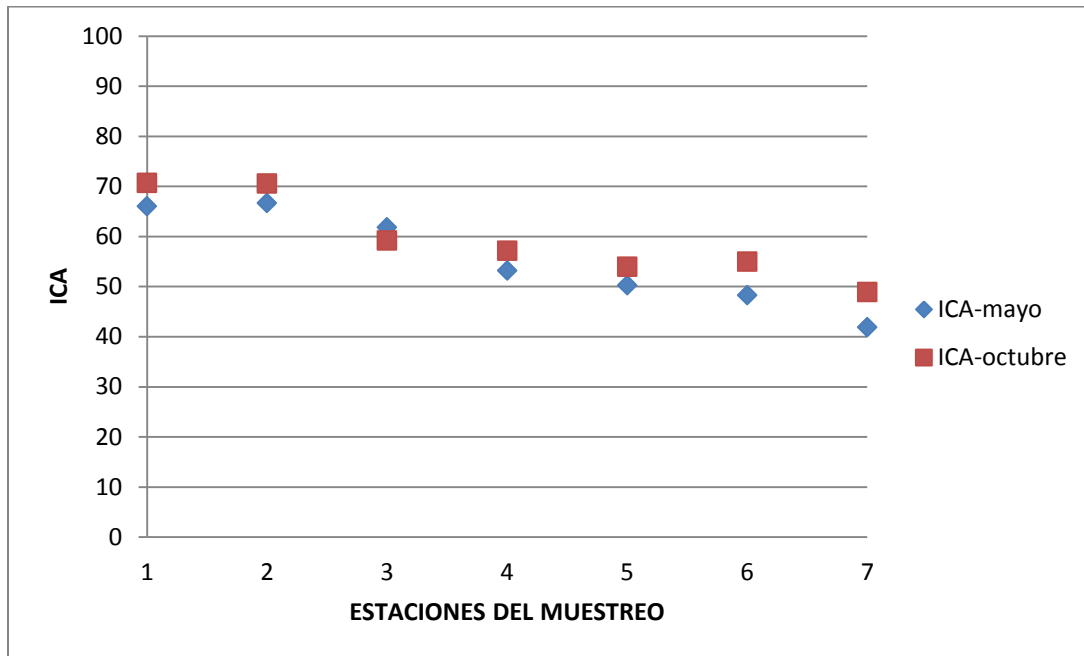


Figura 4.12: Comportamiento del ICA en los meses que presentan un caudal bajo.

4.3. CRITERIOS DE USOS ESTABLECIDOS POR EL ÍNDICE ICA

Conforme se ha señalado la relación entre caudales: altos, medios y bajos con los índices de calidad, es posible definir los usos del agua en cada estación de monitoreo, empleando el valor promedio ICA. Ver tablas 4.4, 4.5 y 4.6

Tabla 4.4: Criterios establecidos para los usos del agua en los caudales altos

| ESTACIÓN | ICA PROMEDIO | ABASTECIMIENTO PÚBLICO | RECREACIÓN | PESCA Y VIDA ACUÁTICA | INDUSTRIAL Y AGRÍCOLA |
|----------|--------------|--------------------------------|---|---|---|
| 1 | 71.91 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUÁTICO | ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS | LIGERA PURIFICACIÓN PARA ALGUNOS PROCESOS |
| 2 | 71.99 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUÁTICO | ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS | LIGERA PURIFICACIÓN PARA ALGUNOS PROCESOS |
| 3 | 61.86 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |



| | | | | | |
|---|-------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---|
| 4 | 58.34 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 5 | 55.30 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 6 | 54.18 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 7 | 48.64 | DUDOSO | DUDOSO PARA EL CONTACTO DIRECTO | SOLO ORGANISMOS RESISTENTES | TRATAMIENTO EN LA MAYOR PARTE DE LA INDUSTRIA |

Tabla 4.5: Criterios establecidos para los usos del agua en los caudales bajos

| ESTACIÓN | ICA PROMEDIO | ABASTECIMIENTO PÚBLICO | RECREACIÓN | PESCA Y VIDA ACUÁTICA | INDUSTRIAL Y AGRÍCOLA |
|----------|--------------|--------------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | 68.36 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 2 | 68.61 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 3 | 60.50 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 4 | 55.17 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 5 | 52.11 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 6 | 51.63 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 7 | 45.37 | DUDOSO | DUDOSO PARA EL CONTACTO DIRECTO | SOLO ORGANISMOS RESISTENTES | TRATAMIENTO EN LA MAYOR PARTE DE LA INDUSTRIA |

Tabla 4.6: Criterios establecidos para los usos del agua en los caudales medios

| ESTACIÓN | ICA PROMEDIO | ABASTECIMIENTO PÚBLICO | RECREACIÓN | PESCA Y VIDA ACUÁTICA | INDUSTRIAL Y AGRÍCOLA |
|----------|--------------|--------------------------------|---|---|---|
| 1 | 74.53 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUÁTICO | ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS | LIGERA PURIFICACIÓN PARA ALGUNOS PROCESOS |
| 2 | 72.23 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PARA CUALQUIER DEPORTE ACUÁTICO | ACEPTABLE PARA TODOS LOS ORGANISMOS | LIGERA PURIFICACIÓN PARA ALGUNOS PROCESOS |
| 3 | 66.91 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 4 | 62.67 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | ACEPTABLE EXCEPTO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 5 | 56.39 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 6 | 52.25 | MAYOR NECESIDAD DE TRATAMIENTO | ACEPTABLE PERO NO RECOMENDABLE | DUDOSO PARA ESPECIES SENSIBLES | SIN TRATAMIENTO PARA LA INDUSTRIA NORMAL |
| 7 | 48.49 | DUDOSO | DUDOSO PARA EL CONTACTO DIRECTO | SOLO ORGANISMOS RESISTENTES | TRATAMIENTO EN LA MAYOR PARTE DE LA INDUSTRIA |

4.4. APLICACIÓN DEL ÍNDICE I-NSF

El modelo I-NSF se aplicó únicamente con los datos de las estaciones coincidentes o cercanas a los puntos de monitoreo que mantiene ETAPA en los ríos de Cuenca. (Ver tabla 4.7). El resultado del análisis que aplica este modelo para la clasificación de la calidad del agua en cada estación, se estipula en la tabla 4.8.



Tabla 4.7: Valores del índice de calidad I-NSF en las estaciones coincidentes con los puntos monitoreados por ETAPA

| ZONA | 06-mar-13 | 10-abr-13 | 02-may-13 | 04-jun-13 | 20-jun-13 | 04-jul-13 | 12-sep-13 | 03-oct-13 | 24-oct-13 |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
| LLAVIUCO | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| SAYAUSI | 78.39 | 82.58 | 71.36 | 75.20 | 73.66 | 72.07 | 72.96 | 73.28 | 73.81 |
| PUENTE DEL VADO | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| EMPRESA ELECTRICA | 68.57 | 60.66 | 61.52 | 63.19 | 62.51 | 57.10 | 64.97 | 60.84 | 61.31 |
| ANTES DE LA J. CON LA Q. MILCHICHIG | 64.04 | 62.18 | 60.17 | 62.02 | 57.56 | 53.70 | 62.64 | 60.03 | 59.58 |
| ANTES DE LA PTAR | 63.07 | 57.49 | 55.96 | 58.44 | 59.34 | 55.85 | 58.52 | 59.59 | 58.82 |
| CHALLUABAMBA | 61.44 | 59.59 | 52.15 | 54.65 | 55.33 | 53.19 | 51.94 | 58.80 | 57.26 |



Tabla 4.8: Criterio de clasificación de la calidad del agua

| ESTACION | 06-mar-13 | 10-abr-13 | 02-may-13 | 04-jun-13 | 20-jun-13 | 04-jul-13 | 12-sep-13 | 03-oct-13 | 24-oct-13 |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 |
| 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS LIGERAMENTE CONTAMINADAS |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS |
| 5 | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS |
| 6 | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS |
| 7 | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS | AGUAS MODERADAMENTE CONTAMINADAS |

4.5. COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES: ICA & I-NSF

Una vez establecidos los índices de calidad ICA e I-NSF (Ver tablas: 4.1 y 4.7), se calculan los rangos de variación mediante los valores mínimos y máximos; y se estima el promedio para poder establecer un análisis comparativo de los modelos.

Tabla 4.9: Comparación entre la calidad del agua señalada por el ICA y por el I-NSF

| ESTACION | VALORES DEL ICA | | | VALORES DEL I-NSF | | |
|----------|-----------------|-------|----------|-------------------|-------|----------|
| | MIN | MAX | PROMEDIO | MIN | MAX | PROMEDIO |
| 1 | 66.02 | 75.43 | 71.70 | - | - | - |
| 2 | 66.67 | 75.07 | 71.29 | 71.36 | 82.58 | 74.81 |
| 3 | 58.19 | 67.78 | 62.68 | - | - | - |
| 4 | 51.89 | 65.49 | 58.60 | 57.10 | 68.57 | 62.30 |
| 5 | 49.41 | 61.48 | 54.83 | 53.70 | 64.04 | 60.21 |
| 6 | 47.36 | 59.33 | 53.18 | 55.85 | 63.07 | 58.57 |
| 7 | 41.85 | 52.31 | 47.88 | 51.94 | 61.44 | 56.04 |

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. DISCUSIÓN

5.1.1. ÍNDICE ICA

Los valores del índice de calidad (tabla 4.1), muestran una tendencia decreciente conforme avanza el curso del río. Lo cual afirma que existe una variación espacial de la calidad del agua.

En su totalidad la calidad del agua empieza en un rango aceptable y termina en contaminado excepto el mes de mayo, mes de caudal bajo, donde el ICA va desde poco contaminado a contaminado. En el sector de Llaviuco, sector ubicado en zona protegida, la calidad es aceptable; la presencia de coliformes es el factor que más incide en la calidad, a pesar de que los valores detectados son bajos. (Mínimo 13 NMP/100ml). En la zona de Challuabamba la contaminación del agua es permanente. (Ver tabla 4.2)

En todas las estaciones hay una variabilidad temporal de los ICAs (Ver figuras: 4.1 - 4.7), ligada a la cantidad de agua que circula por el río (caudal); no obstante la



mayor variación se da en la estación 4 (Empresa Eléctrica), con 13,6 puntos de diferencia en el ICA; aspecto importante cuando el recurso es usado como fuente de abastecimiento y especialmente crítico en estiaje; pues habrá que considerar cuestiones como: dosis de coagulante, dosis de desinfectante, tiempos de retención, etc., para conseguir una potabilización satisfactoria.

Analizando la base de datos de los parámetros empleados en el cálculo del índice general, se establecen relaciones entre las concentraciones de los parámetros y el caudal.

El valor máximo encontrado de fosfatos es de 21.24 mg/L (PO_4) en el caudal más alto (Julio) mientras que un mínimo de 0.34 mg/L se presenta en un caudal medio. En los caudales altos es mayor el arrastre debido a que la corriente de agua lo es.

Los valores más altos de nitratos (0.26 y 0.33 mg/L) se encuentran en caudales bajos, en estos caudales es en donde mayor concentración presentan.

El nitrógeno amoniacal es elevado en caudales bajos (3.1 mg/L). Existe mayor descomposición de la materia orgánica que genera reacciones de desaminación.

Los sólidos suspendidos y la turbiedad presentan valores superiores en caudales altos (196 mg/L y 104 UNT), en donde es mayor el arrastre de partículas.

Los parámetros: sólidos disueltos, alcalinidad y dureza se concentran en los caudales bajos y se diluyen en altos. (Sólidos Disueltos: 186 mg/L, Alcalinidad 86 mg/l CaCO_3 y Dureza: 94 mg/l CaCO_3) corresponden a los valores máximos encontrados en caudales bajos.

La elevación del potencial de hidrógeno se debe a la presencia de lutitas y argilitas propias de la geología que atraviesa el río, las cuales provocan sustancias alcalinas. El valor más alto de pH registrado es de 7.92.

El oxígeno disuelto generalmente decrece mientras el flujo de la corriente avanza hacia las zonas bajas. Existiendo un valor mínimo de 4.41 mg/L que aún es apropiado para la supervivencia de ecosistemas acuáticos; no obstante ya representa un deterioro significativo en la calidad del cuerpo receptor.

La demanda bioquímica de oxígeno es mayor en caudales bajos. (10.12 mg/L), ya que a mayor temperatura aumenta la velocidad de biodegradación de la materia orgánica.

La presencia de coliformes, representa un aspecto crítico entorno a la salud humana; se registran valores elevados de coliformes totales y fecales ($3,5 \text{ E}+07$, y $1,1 \text{ E}+07$ NMP/100ml respectivamente).



Mediante este análisis se evidencia que la mayor parte de parámetros que presentan altos valores están ligados a caudales bajos influyendo directamente en la disminución del índice de calidad ICA. No obstante pocos parámetros con concentraciones altas se presentan en caudales altos disminuyendo el valor del ICA (Figura 4.10). Se demuestra con las figuras 4.11 y 4.12, que los índices de calidad son menores en caudales bajos y son mayores en caudales medios.

5.1.2. INTERPRETACIÓN DE LOS USOS DEL AGUA

Los criterios de uso expuestos en las tablas: 4.4, 4.5 y 4.6 indican que para el abastecimiento de agua potable en caudales altos, medios y bajos se requiere de mayor tratamiento en las 6 estaciones. Mientras que en la estación 7 se torna dudosa esta actividad.

Referente a las actividades de recreación que puedan existir: en caudales altos y medios, la zona de Llaviuco y Sayausí es propia para cualquier deporte acuático. En las zonas restantes es aceptable pero no recomendable, excepto en el sector de Challuabamba en donde es dudoso practicar una actividad de este tipo por tener contacto directo. En caudales bajos en todos los sectores es aceptable la práctica pero no recomendada, salvo el sector de Challuabamba.

En las zonas de Llaviuco y Sayausí el entorno es apto para el desarrollo de los ecosistemas acuáticos tanto en caudales altos como en medios. En el Puente del Vado el entorno es nocivo sólo para especies sensibles en cualquier régimen de caudal. En el sector de Challuabamba, es apto sólo para organismos resistentes tanto en estiaje como en época lluviosa.

Con respecto a las actividades agrícolas e industriales en condiciones de caudal alto y medio en los sectores de Llaviuco y Sayausí se necesita de una ligera purificación. En los sectores restantes no se requiere tratamiento para la industria normal, salvo en Challuabamba en donde exige un tratamiento en la mayor parte de la industria. Este último criterio es también aplicable a caudales bajos.



5.1.3. ÍNDICE I-NSF

El índice I-NSF fue calculado únicamente en las estaciones que coinciden o están muy cercanas a los puntos de monitoreo que mantiene ETAPA (Fernández de Córdova & González M, 2013). La estación 2 coincide con la Tb2, la estación 4 con Tb4, la estación 5 con Mi1, la estación 6 con C1 y la 7 está cercana a C2.

El propósito de ésta selección fue para establecer relaciones en base a la calidad que presenta ETAPA. Sin embargo hasta la fecha no existe el análisis de la calidad de los ríos correspondiente al año 2013. Solo la calidad del año 2012.

En las tablas 4.7 y 4.8 se muestran los valores de los índices y la clasificación correspondiente. Este método encuentra a las aguas del río como: ligeramente y moderadamente contaminadas, correspondientes a una calidad buena y media.

En la zona de Sayausí la calidad del agua se mantiene constante. Según el análisis del 2012 realizado por ETAPA el índice I-NSF promedio es de 74 puntos mientras que en el año 2013 es de 74.81. (Ver tabla 4.9)

En el sector de la Empresa Eléctrica existe una disminución de la calidad del agua entre el año 2012 (70 puntos) a 2013 (62.30 (Tabla 4.9)). Pero se mantiene dentro del rango de calidad media.

La zona antes de la junta con la quebrada de Milchichig en el 2012 se encontraba en condiciones deficientes con un índice de 47 puntos y en el 2013 se recupera a un índice de 60.21 puntos. A partir del año 2010 la calidad de este sector ha venido recuperándose en gran parte por el funcionamiento del interceptor IX construido en el plan maestro II. Sin embargo no hay una recuperación total debido a que existen sectores aledaños como: Llactahuasi y el Barrio de las Peñas que todavía siguen emitiendo descargas directas al río.

El sector antes de la planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en Ucubamba, en el 2012 presentó un índice de 63 puntos y en el 2013 de 58.57 puntos. En el sector de Challuabamba el índice del 2012 fue de 60 puntos y del 2013 de 56.04 puntos. Esta disminución del índice de calidad en estos dos tramos se da puesto que no poseen interceptores marginales; por lo que urbanizaciones asentadas a lo largo de su trayectoria descargan directa o indirectamente aguas domésticas y existe una intensiva explotación de áridos que provoca un incremento de turbiedad.



5.1.4. COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES

El índice ICA trabaja con 18 parámetros mientras que el I-NSF con 9. La tabla 4.9 presenta los valores respectivos de los índices y demuestra que existe una variación del 3% al 8% siendo mayor el I-NSF.

Al ser pequeña la diferencia existente entre los índices, por simplicidad y mejor manejo de los datos se puede trabajar exclusivamente con el I-NSF; sin embargo tienen peso ciertos parámetros que influyen directamente en la disminución del índice de calidad como: alcalinidad, dureza, sólidos disueltos, conductividad y nitrógeno amoniacal (parámetros que no considera el modelo I-NSF) especialmente en los sectores de Ucubamba y Challuabamba donde es notorio debido a que el ICA cataloga a la calidad del agua como contaminada mientras que I-NSF la atribuye como medianamente contaminada.

5.1.5. INTERPRETACIÓN DE LA HIDROGUEQUÍMICA DEL RÍO

La calidad del agua tal como se encuentra en la naturaleza, depende de las características de la cuenca hidrográfica, especialmente de sus suelos y geología; así, la litología de la subcuenca muestra un escenario de la corriente, es decir la composición química que se podría esperar de ella.

A fin de vincular la composición química del agua, con las características geoquímicas de la subcuenca del Tomebamba, se realizó un muestreo puntual en la estación El Vado (noviembre, 2014), en el cual se midieron los parámetros físicos-químicos y bacteriológicos que permiten calcular el ICA, y además un análisis completo de la composición química del agua. (Ver tabla 5.1).

El índice de calidad obtenido fue de 58.52% (Poco contaminado). Este índice es cercano a los ICAs del año 2013 del mismo sector: 58.96 % a fines de octubre y 58.19 % en julio; su similitud refleja que la calidad del río no ha mejorado, a pesar de las obras de saneamiento instaladas; aunque se necesita un mayor número de muestras para expresar esta aseveración como conclusión.



| LABORATORIO DE SANITARIA | | | |
|--|---|-----------------|------------------|
| RESULTADOS DE ANALISIS FISICO-QUIMICO Y BACTERIOLOGICO DE AGUA | | | |
| Muestra procedencia: | Río Tomebamba.- Estación Puente El Vado | | |
| Condiciones climatológicas: | Ligeramente lluvioso | | |
| Fecha de Análisis: | 16 de Noviembre del 2014 | | |
| Análisis solicitado por: | Ana Peñafiel Romero | | |
| PARAMETRO | VALOR | UNIDAD | OBSERVACIONES |
| TEMPERATURA | 14,3 | °C. | in situ |
| TURBIEDAD | 13,2 | NTU, FTU | |
| COLOR APARENTE | 86,0 | UC, Pt Co | |
| COLOR REAL | 22,0 | UC, Pt Co | |
| CONDUCTIVIDAD | 111,3 | microsiemens/cm | |
| SOLIDOS TOTALES | 81,0 | mg/l | por cálculo |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES | 12,0 | mg/l | |
| SOLIDOS DISUELTOS TOTALES | 69,0 | mg/l | |
| SOLIDOS TOTALES FIJOS | 56,0 | mg/l | |
| SOLIDOS TOTALES VOLATILES | 25,0 | mg/l | por cálculo |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS | 9,0 | mg/l | |
| SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES | 3,0 | mg/l | por cálculo |
| SOLIDOS DISUELTOS FIJOS | 14,0 | mg/l | |
| SOLIDOS DISUELTOS VOLATILES | 55,0 | mg/l | por cálculo |
| PH | 7,88 | | |
| OXIGENO DISUELTO | 6,80 | mg/l | in situ |
| ALCALINIDAD TOTAL | 50,0 | mg/l, CaCO3 | |
| ALCALINIDAD F. | 0,0 | mg/l, CaCO3 | |
| DUREZA TOTAL | 47,6 | mg/l, CaCO3 | |
| Ca++ | 16,7 | mg/l | |
| Mg++ | 6,1 | mg/l | por cálculo |
| Na+ | 3,6 | mg/l | |
| K+ | 2,1 | mg/l | |
| HIERRO TOTAL | 0,05 | mg/l | |
| MANGANESO | 0,0 | mg/l | |
| COBRE | 0,0 | mg/l | |
| ALUMINIO | 0,035 | mg/l | |
| FLUORURO | 0,11 | mg/l | |
| SILICIO | 3,90 | mg/l | |
| FOSFATOS DISUELTOS | 0,10 | mg/l | como Ortofosfato |
| FOSFATOS TOTALES | 0,12 | mg/l | como Ortofosfato |
| CLORUROS | 5,8 | mg/l | |
| SULFATOS | 2,05 | mg/l | |
| N. AMONIACAL | 0,25 | mg/l | como Nitrógeno |
| N. NTIRITOS | 13,8 | ug/l | como Nitrógeno |
| N. NITRATOS | 0,205 | mg/l | como Nitrógeno |
| TANINOS Y LIGNINAS | 0,9 | mg/l | |
| DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO | 39,84 | mg/l | |
| DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO | 3,7 | mg/l | |
| COLIFORMES TOTALES | 1,6E+06 | NMP/100 ML | 37°C. 24 H |
| E. COLI | 9,2E+05 | NMP/100 ML | 37°C. 24 H |

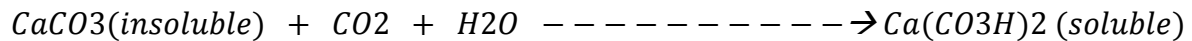
Tabla 5.1: Análisis químico en la estación del Puente del Vado del 2014.



La tabla 5.1, permite el siguiente balance iónico:

| BALANCE IONICO | | | |
|--------------------|-------------|-------------------|-------------|
| ANIONES | meq/l | CATIONES | meq/l |
| CO ₃ H- | 1 | Ca ⁺⁺ | 0,848 |
| Cl- | 0,16 | Mg ⁺⁺ | 0,103 |
| SO ₄ = | 0,042 | Na ⁺ | 0,16 |
| NO ₂ - | 9,92E-04 | K ⁺ | 0,053 |
| NO ₃ - | 0,014 | Fe ⁺⁺ | 1,80E-03 |
| F- | 5,78E-03 | Al ⁺⁺⁺ | 3,88E-03 |
| TOTAL: | 1,22 | | 1,17 |

El compuesto químico que predomina es el bicarbonato de calcio (0,8 meq/l); y proviene del contacto del agua con un mineral de Travertino (roca sedimentaria precipitada que contiene CaCO₃) y del carbonato de calcio presente en el relleno de las diaclasas que presentan las rocas. Bajo la acción de la atmósfera, se produce la siguiente reacción:



El travertino está presente en la zona alta del río, y se ha formado por el efecto depositante del agua en gran pendiente al eliminar el CO₂ (efecto cascada) facilitando la precipitación del carbonato de calcio. En reacción semejante se produce el bicarbonato de magnesio pero en menor cuantía: 0,103 meq/l.

Los otros iones presentes como el hierro, el aluminio, la sílica (SiO₂), derivan de la composición química de las formaciones con las que el agua tiene contacto y favorecidas por las condiciones meteorológicas: andesitas, dacitas, bentonitas y argilitas, pero sus concentraciones son mucho más bajas. El poco aporte de potasio, es debido a la presencia de las lutitas; los sulfatos ingresan a la solución por contacto con formaciones de yeso, igualmente en baja concentración.

En la parte alta del río, están presentes las riolitas, de carácter ácido, que comunican al agua un pH bajo y paulatinamente este se incrementa por entrar en contacto con minerales de carácter básico.

Por lo tanto, el agua del río Tomebamba puede catalogarse como una solución de baja mineralización, de poca capacidad de amortiguamiento, blanda, y ligeramente



ácida; pero esto significa también su alta vulnerabilidad en la calidad, puede colorearse y enturbiarse con pequeñas acciones naturales o antropogénicas.

Un análisis más detenido de la tabla 5.1, permite las siguientes aseveraciones:

El fósforo y todas las formas de nitrógeno, estarán presentes como resultado de la contaminación orgánica, y constituyen buenos indicadores de polución; el 85% de los sólidos son disueltos, de los cuales el 80% son de naturaleza orgánica y procedente de la contaminación, valor que se relaciona con una demanda química alta de 39,84 mg/l. Es muy pequeña la fracción de materia orgánica que se biodegrada. ($DBO_5 = 3,7$ mg/l).

El elevado nivel de coliformes, limita considerablemente los usos del agua.

5.2. CONCLUSIONES

En el presente estudio se evaluó la calidad del agua del Río Tomebamba mediante la aplicación de dos modelos de índices de calidad (ICA & I-NSF). Las conclusiones más destacadas del estudio son las siguientes:

La evaluación de la calidad del agua del río a lo largo de los tramos de estudio muestra un deterioro a medida que avanza su recorrido. Tanto los valores del ICA y del I-NSF lo demuestran.

El índice de calidad ICA establece que en los tramos de Llaviuco y Sayausí el río presenta una calidad aceptable. Para los tramos comprendidos entre el sector del Vado y antes de la junta con la quebrada de Milchichig la calidad es poco contaminada. En el sector ubicado antes de la PTAR en estiaje y época lluviosa el agua se encuentra contaminada. Finalmente en el sector de Challuabamba existe una contaminación continua.

Se establece una relación entre la calidad del agua y el caudal correspondiente a las épocas de estiaje y lluviosas. Los parámetros empleados en el cálculo del ICA como: nitratos, nitrógeno amoniacal, sólidos disueltos, alcalinidad, dureza y DBO_5 se concentran en la época de estiaje (caudales bajos) y se diluyen en la época lluviosa (caudales altos). Pero fosfatos, sólidos suspendidos y turbiedad presentan mayores valores en caudales altos, debido al mayor arrastre que genera la corriente del agua. Afectando de ésta manera a la calidad del agua siendo menor la calidad en estiaje. Por tanto en la época de transición de invierno a estiaje (caudales medios) el río presenta una mejor calidad.



Según los criterios de usos del agua del río relacionados con los valores del ICA, muestran que para el abastecimiento de agua en estiaje e invierno se requiere de un mayor tratamiento excepto en el sector de Challuabamba en donde se torna dudosa esta actividad. Las actividades recreativas pueden darse sin ningún problema en la época lluviosa, mientras que en estiaje son aceptables pero no recomendables para todos los tramos limitándose su aplicación en Challuabamba. En cuanto a los ecosistemas acuáticos, no se ven afectados en las zonas altas en época de lluvias. En el tramo central es inapropiado para especies sensibles y En el tramo final es apto solo para organismos resistentes en cualquier régimen de caudal. Con respecto a las actividades agrícolas e industriales en condiciones de caudal alto y medio en los sectores de Llaviuco y Sayausí se necesita de una ligera purificación. En los sectores restantes no se aplica tratamiento en la industria normal, salvo en Challuabamba en donde exige un tratamiento en la mayor parte de la industria. Este último criterio es también aplicable a caudales bajos

De acuerdo a los valores del índice I-NSF, el sector de Sayausí presenta una calidad buena. Los sectores comprendidos entre las estaciones 4 y 7 presentan una calidad media.

La calidad según los valores del ICA como por los del I-NSF es semejante. Existe una máxima variación del 8%. Por efectos de simplicidad y si lo que se quiere medir es solamente el efecto de la contaminación, se puede decir que el modelo I-NSF es de mejor aplicación. Mientras que el modelo ICA es más sensible y garantiza una evaluación más integral de la calidad.

La calidad del agua del río Tomebamba en general durante el año 2013 se ha recuperado, siendo notorio el funcionamiento apropiado de los interceptores marginales que generaron los planes maestros II de ETAPA; no obstante no se cumplen los requisitos de calidad establecidos por el TULSMA, para ciertas estaciones, y para ciertos usos, debido a la alta densidad de coliformes. Esto en parte debido a que los interceptores construidos en las quebradas de Balzay, Sacay, El Cebollar, y la del río Culebrillas, afluentes del río Tomebamba en la parte alta, todavía no entran en funcionamiento.

Según la composición hidrogeoquímica el agua del río Tomebamba puede catalogarse como un agua carbonatada; de baja mineralización, de poca capacidad de amortiguamiento, blanda, y ligeramente ácida. La turbiedad y el color se afectan por la erosión de la corriente o por actividades antropogénicas, pero otros parámetros químicos presentes en ella como: el fósforo y todas las formas de nitrógeno, estarán presentes como resultado de la contaminación



orgánica, y constituyen buenos indicadores de polución. El elevado nivel de coliformes, limita considerablemente los usos del agua.

Finalmente, por las características antes citadas, se trata de una fuente muy vulnerable, sobre todo en la zona alta, lo que exige la mayor protección posible, para preservar los usos más delicados de la fuente: el mantenimiento de un ecosistema en equilibrio y el abastecimiento para consumo humano.

5.3. RECOMENDACIONES

Se plantea el control de la contaminación del río Tomebamba en el sector ubicado después de la PTAR mediante la construcción de interceptores marginales que eviten las descargas de las urbanizaciones cercanas al sector y con un control riguroso de las descargas puntuales que emite la Fábrica de Cerámicas "Rialto". Pues es en este sector en donde la calidad del agua es contaminada y va decreciendo.

Se recomienda monitorear continuamente la DBO_5 , parámetro más influyente en los índices de calidad ICA & I-NSF, debido a que en el año 2013 se presentaron concentraciones superiores a 10 mg/L. A pesar que este último valor fue establecido como máximo para el río Tomebamba según la meta del plan maestro II.

Es necesaria la búsqueda de sustancias tóxicas como hidrocarburos, plaguicidas, y otros, que ponen en riesgo la estabilidad de la fuente como ecosistema y el abastecimiento humano; los índices de calidad usados en el presente diagnóstico, no revelan la verdadera calidad del cuerpo receptor, no obstante constituyen una valiosa herramienta para detectar tendencias en la calidad del agua, aspecto muy importante para las empresas y organismos que tienen a su cargo el manejo y la administración del recurso.

Es importante mantener el estado actual de las orillas del río, muy atractivo a la vista y al paisaje, y que seguramente contribuyen a la calidad del agua; en épocas pasadas las orillas presentaban un aspecto muy deplorable, sobre todo después de las crecidas.



6. REFERENCIAS

- Azevedo N, J. M., & Acosta A, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. México: S.A de C.V.
- Berner, E. K., & Berner, R. A. (1987). *The Global Water Cycle-Geochemistry and Environment*. New Jersey: Englewood Cliffs Prentice Hall.
- CG, P. (2007). *Caracterización territorial de la cuenca hidrográfica fase II*. Cuenca: UDA.
- Coello, J. R., Ormaza, R. M., Deley, A. R., Recalde, C. G., & Rios, A. C. (Riobamba). Aplicación del ICA-NSF para determinar la calidad del agua de los Ríos Ozogoché, Pichahuiña y Pomacocho - Parque Nacional Sangay-Ecuador . *Instituto de Ciencia, Innovación, Tecnología y Saberes*.
- Díaz Delgado, C., Esteller Alberich, M. V., & Lopez Vera, F. (2005). *Recursos Hídricos. Conceptos Básicos y Estudios de Casos en Iberoamérica*. Montevideo/Toluca: CIRA-UAEM.
- ETAPA. (1987). *Planes Maestros de Agua Potable y Alcantarillado del Área Metropolitana de la Ciudad de Cuenca*. Cuenca: Grupo Esquina S.A.
- Fernández de Córdova, J., & González M, H. (2013). *EVOLUCION DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS TRAMOS BAJOS DE LOS RIOS DE LA CIUDAD DE CUENCA 2012*. Cuenca: Sub-Gerencia de Gestión Ambiental.
- José Catalán LaFuente & José María Catalán Alonso. (1987). *Ríos: Caracterización y calidad de sus aguas*. Madrid: DIHIDROX.
- Marbello Perez, R. V., & Álvarez Láinez, A. M. (s.f.). Ecuaciones General y Particulares para el Cálculo de la Pendiente Crítica Límite de Canales Abiertos. *XVII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA: APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HÍDRICOS*, (págs. 452-461). Medellín.
- Mestrinho S, S. P. (1994). "Fundamentos de la Hidrogeoquímica", en *Congreso Latino Americano de Hidrología Subterránea*. Santiago: ALHSUD.
- Meteorología, O. M. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas: Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*. OMM-N 168.
- Montoya, C., Loaiza, D., Hernán Cruz, C., & Escobar, J. C. (2011). EFECTO DEL INCREMENTO EN LA TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN. *Revista EIA*, 137-148.
- Pacheco Ávila, J., & Cabrera Sansores, A. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos . *Ingeniería*, 47-54.



- Pamplona, U. d. (s.f.). *Índices de Calidad (ICAs) y de Contaminación (ICOs) del Agua de Importancia Mundial*. Pamplona.
- PRECUPA. (1998). *Programa de Recuperación de la Cuenca de Paute*.
- Putz, P. (2008). *Analítica de Laboratorio y Sistema de Control de Proceso: Nutrientes-Fosfatos*. HACH LANGE.
- Ramírez Callejas, C. A., García Velez, J. L., Cruz Velez, C. H., Barba Ho, L. E., Holguín, J. E., Patiño Triana, P. J., & Ballesteros, Y. (2004). *ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RIO CAUCA Y SUS PRINCIPALES TRIBUTARIOS MEDIANTE LA APLICACION DE INDICES DE CALIDAD Y CONTAMINACION*. Santiago de Cali.
- Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del Agua: Evaluación y diagnóstico*. Medellín: EDICIONES DE LA U.
- Sotelo A, G. (1982). *Hidráulica General*. México: LIMUSA S.A.
- Tebbut, T. (1995). *Fundamentos del control de la calidad del agua*. Birmingham-Inglaterra: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Birmingham.
- Torres, P., Cruz, C. H., Patiño, P., Escobar, J. C., & Pérez, A. (2010). Aplicación de índices de calidad de agua- ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación*, 86-95.
- Torres, P., Hernán Cruz, C., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 79-94.



7. ANEXOS

7.1. ANEXO 1: Metodología aplicada para determinar los parámetros físico-químicos y bacteriológicos empleada por el Laboratorio de Sanitaria.

| PARAMETRO | TECNICA | REFERENCIA |
|------------------------------------|--|---|
| Color Real | Método Espectofotométrico | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2120 C. |
| Turbiedad | Método Nefelométrico | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2130 B. |
| Conductividad | Método de Laboratorio | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2510 B. |
| Sólidos Suspendidos Totales | Sólidos suspendidos totales desecados a 103°C – 105°C. | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2540 D. |
| Sólidos Disueltos Totales | Sólidos disueltos desecados a 103°C – 105°C. | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2540 B. |
| pH | Método Electrométrico | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 4500 B. |
| Alcalinidad Total | Método volumétrico de titulación. | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2320 B. |
| Dureza Total | Método Titrimétrico de EDTA | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 2340 C. |
| Fosforo de | Método del ácido ascórbico | Standard Métodos para Análisis de |



| | | |
|--------------------------------------|--|--|
| Ortofosfatos Totales | | Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 4500-P E. |
| Cloruros | Método Argentométrico | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 4500 B. |
| Nitrógeno de Nitratos | Método del Salisilato sódico | Análisis de las aguas. Aguas naturales, Aguas residuales, Agua de mar.- J. RODIER |
| Nitrógeno Amoniacal | Método de Destilación | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005. Sección 4500 B. |
| Oxígeno Disuelto | a) Método Winkler (modificación de azida) b) Método del electrodo de membrana | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005. Sección 4500 C. y Sección 4500 G |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | Test de la DBO cinco días, por dilución | Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005. Sección 5210 B. |
| Coliformes Totales | Método de la estimación de la densidad bacteriana: a) Técnica de los tubos múltiples NMP b) Técnica por filtración de membrana UFC | a) Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 9221C b) Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 9222 B. |
| Coliformes Fecales (E. coli) | Método de la estimación de la densidad bacteriana: a) Técnica de los tubos múltiples NMP b) Técnica por filtración de membrana UFC | a) Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 9221F b) Standard Métodos para Análisis de Aguas y Aguas Residuales, edición 21°, 2005 Sección 9222 D. |

7.2. ANEXO 2: Funciones para la determinación del ICA en cada parámetro.

Las ecuaciones definidas para el índice de calidad individual de cada uno de los 16 parámetros seleccionados por ICA para conformar el índice general son:

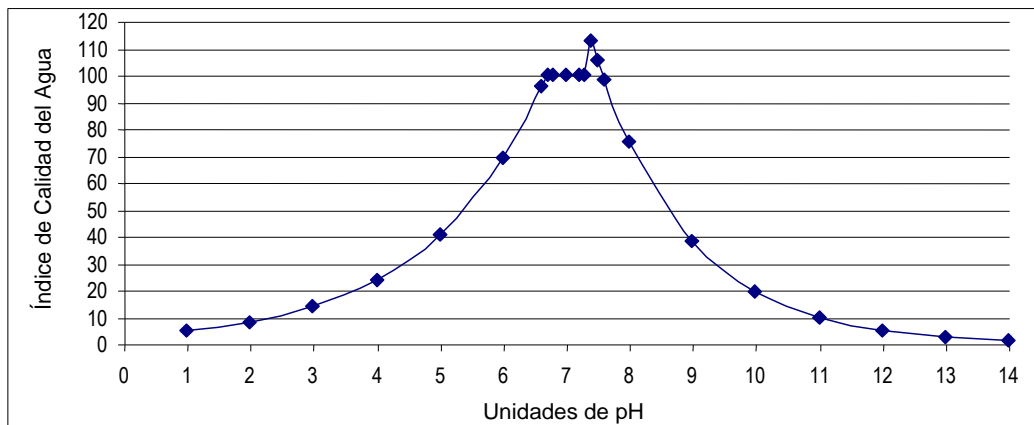
pH:

$$I_{\text{pH}} = 10^{0.2335 \text{ pH} + 0.44} \quad \text{Si el pH es menor que 6.7} \quad (1.1)$$

$$I_{\text{pH}} = 100 \quad \text{Si el pH está entre 6.7 y 7.3} \quad (1.2)$$

$$I_{\text{pH}} = 10^{4.22 - 0.293 \text{ pH}} \quad \text{Si el pH es mayor que 7.3} \quad (1.3)$$

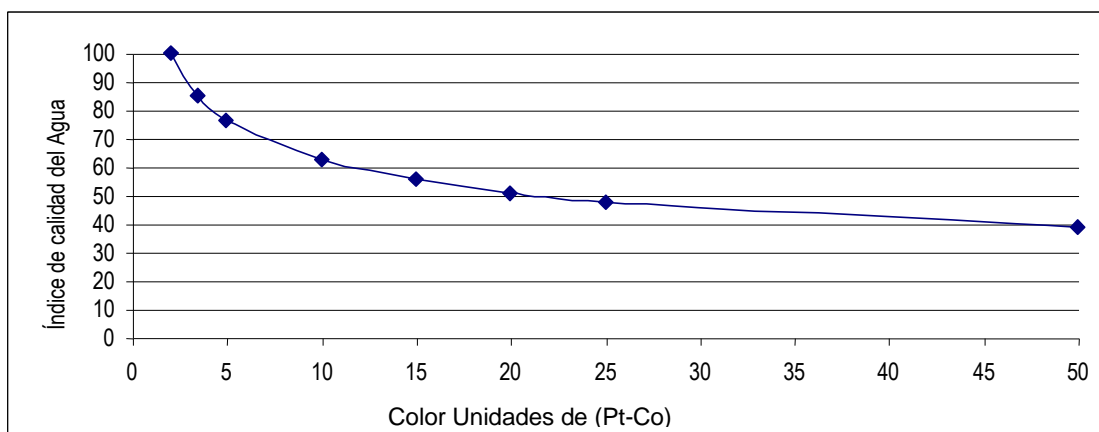
Gráfica 1: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua del pH



Color:

$$I_C = 123 (C)^{-0.295} \quad (2)$$

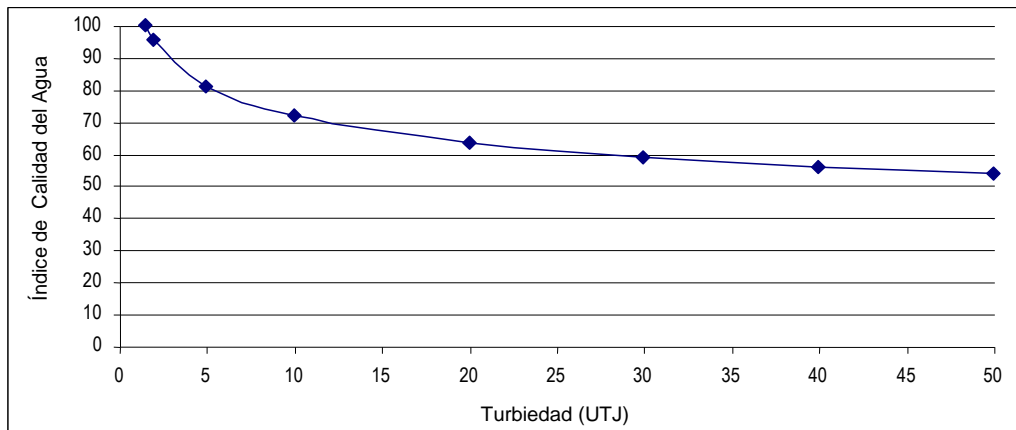
Gráfica 2: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua del color



Turbiedad:

$$I_T = 108 (T)^{-0.178} \quad (3)$$

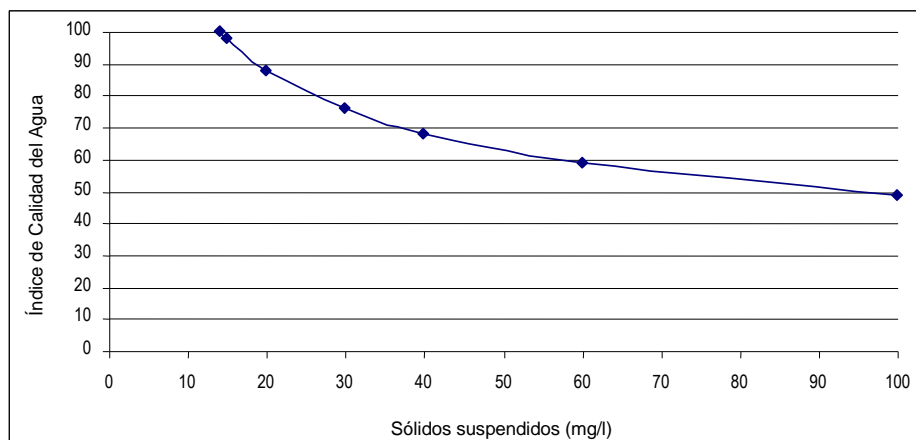
Gráfica 3: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de turbiedad



Sólidos Suspendedos:

$$I_{SS} = 266.5 (SS)^{-0.37} \quad (4)$$

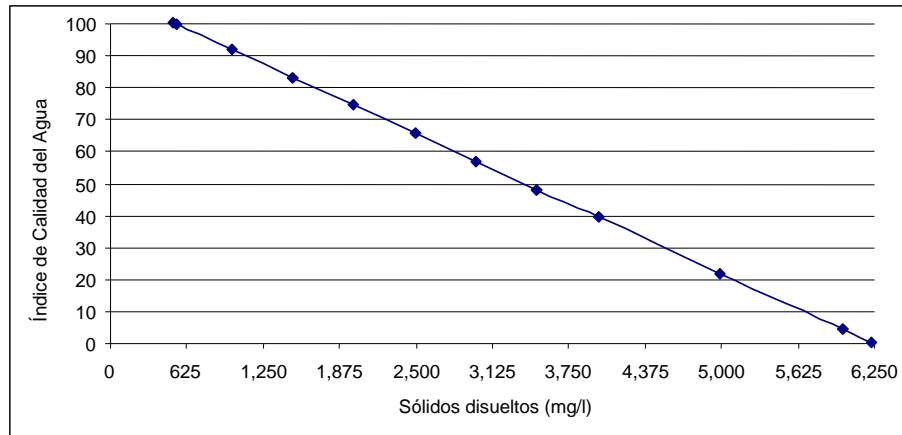
Gráfica 4: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de sólidos suspendidos



Sólidos Disueltos:

$$I_{SD} = 109.1 - 0.0175 (SD) \quad (5)$$

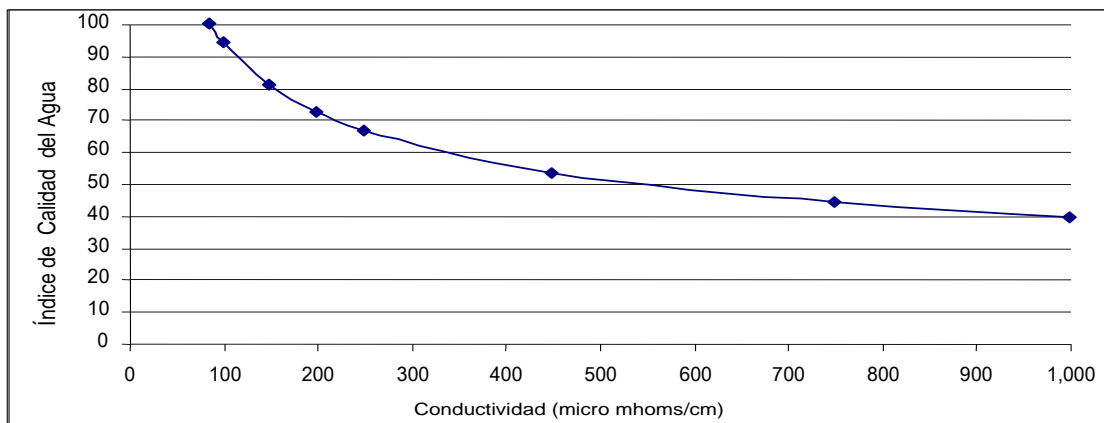
Gráfica 5: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de sólidos disueltos



Conductividad Eléctrica:

$$I_{CE} = 540 (CE)^{-0.379} \quad (6)$$

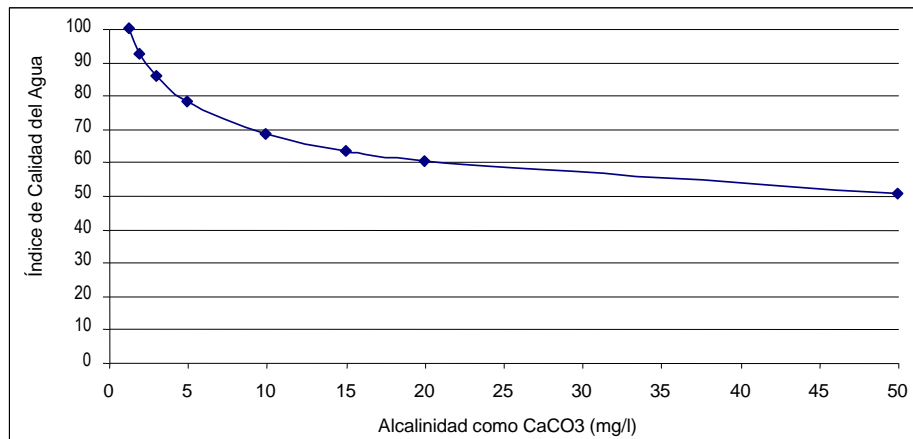
Gráfica 6: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de conductividad eléctrica



Alcalinidad:

$$I_A = 105 (A)^{-0.186} \quad (7)$$

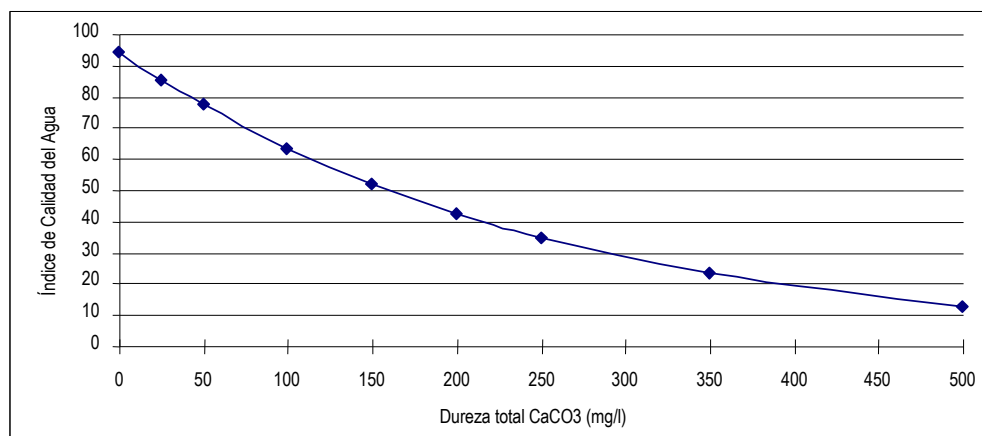
Gráfica 7: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de alcalinidad



Dureza Total:

$$I_{DT} = 10^{1.974 - 0.00174 (DT)} \quad (8)$$

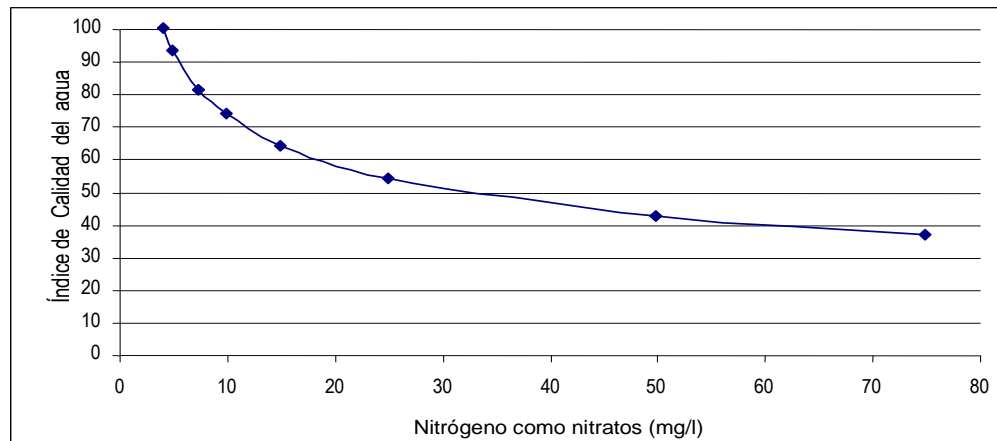
Gráfica 8: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de la dureza total.



Nitrógeno de Nitratos:

$$I_{N-NO_3} = 162.2 (N-NO_3)^{-0.343} \quad (9)$$

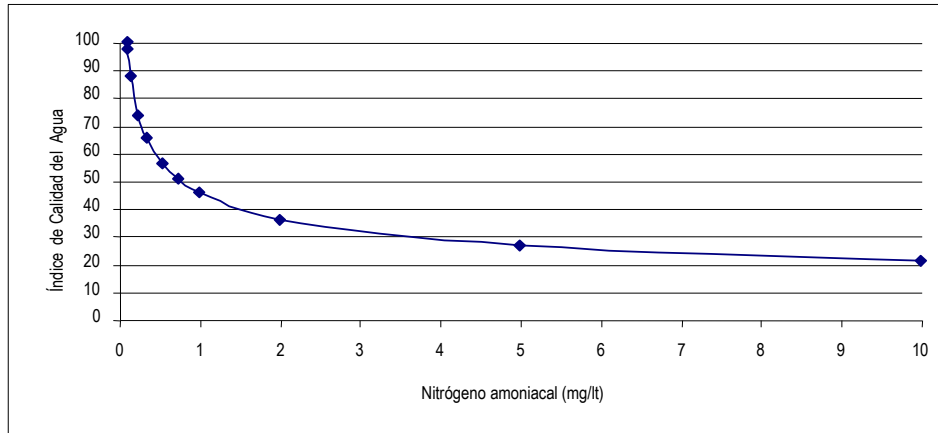
Gráfica 9: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de nitratos



Nitrógeno Amoniacal:

$$I_{NH_3} = 45.8 (N-NH_3)^{-0.343} \quad (10)$$

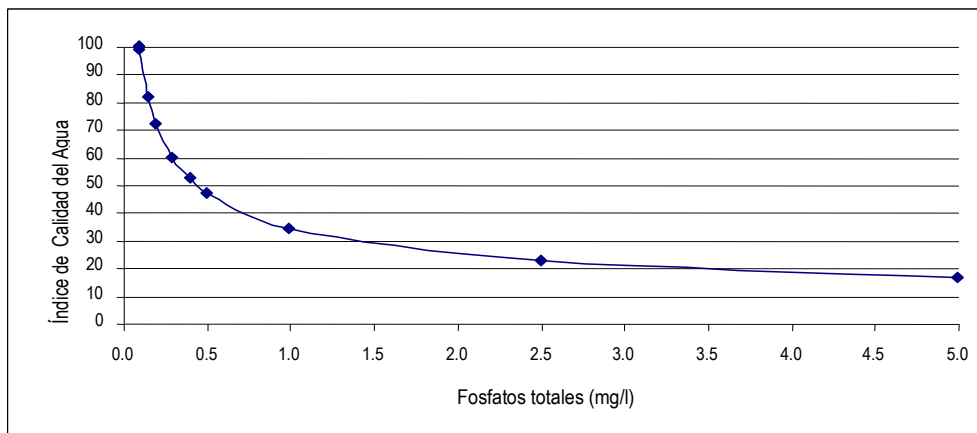
Gráfica 10: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de nitrógeno amoniacal



Fosfatos Totales:

$$I_{PO_4} = 34.215 (PO_4)^{-0.46} \quad (11)$$

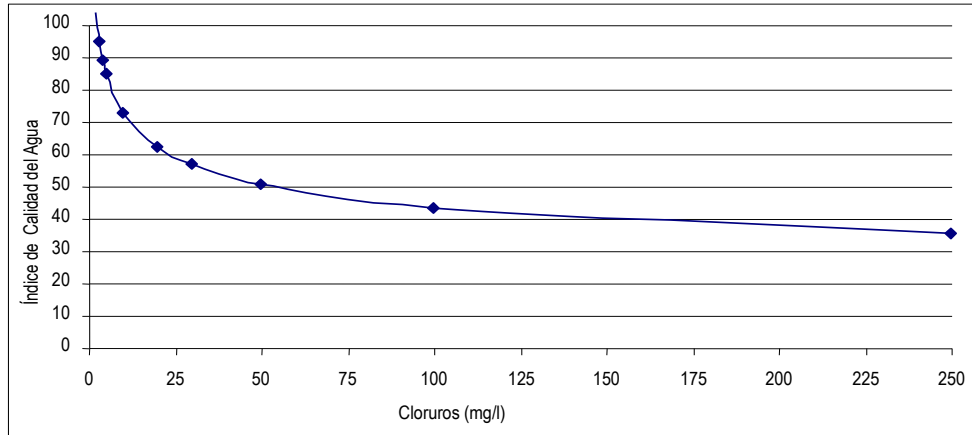
Gráfica 11: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de fosfatos totales



Cloruros:

$$I_{Cl^-} = 121 (Cl)^{-0.223} \quad (12)$$

Gráfica 12: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de cloruros



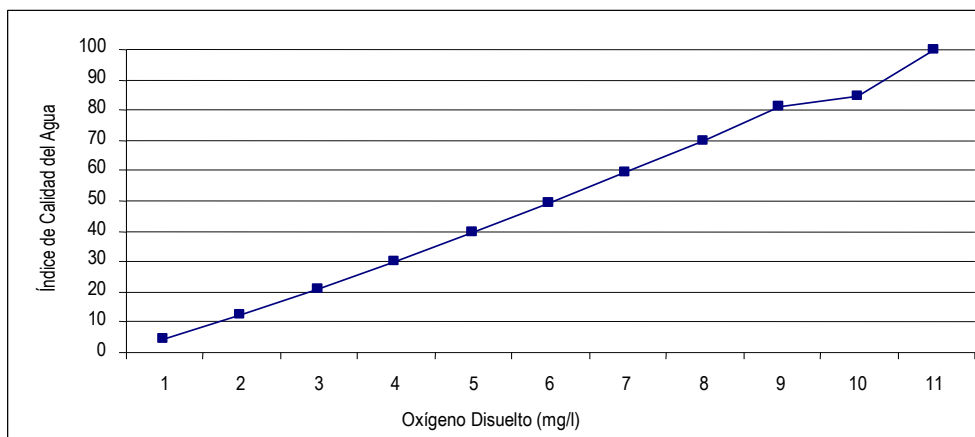
Oxígeno Disuelto:

$$I_{OD} = \frac{OD}{OD_{Sat}} \times 100 \quad (13)$$

(OD) Oxígeno Disuelto en mg/l y a T. de campo (T_c)

(Oxígeno Disuelto) saturado mg/l de saturación $T_{saturación} = T_c$

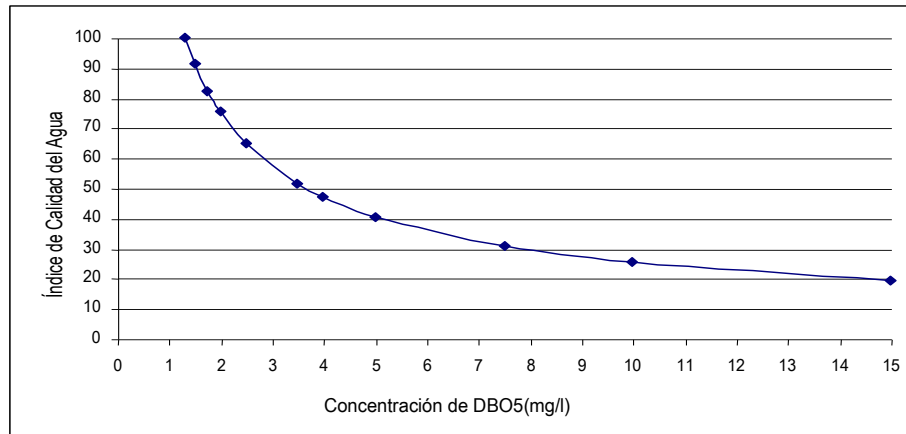
Gráfica 13: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua del oxígeno disuelto



Demanda Bioquímica de Oxígeno:

$$I_{DBO} = 120 (DBO)^{-0.673} \quad (14)$$

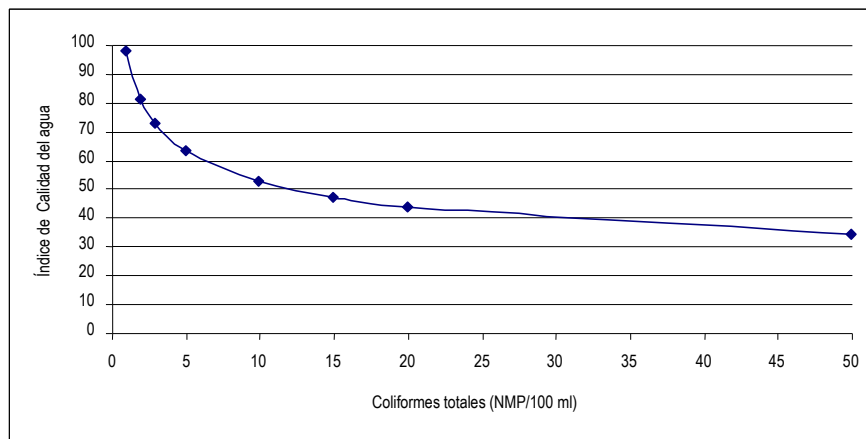
Gráfica 14: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de DBO₅



Coliformes Totales:

$$I_{CT} = 97.5 (CT)^{-0.27} \quad (15)$$

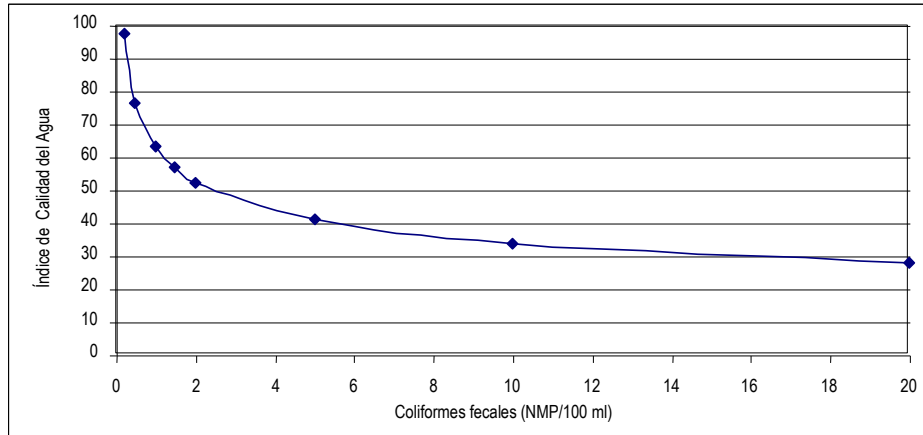
Gráfica 15: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de coliformes totales



Coliformes Fecales:

$$I_{EC} = 97.5 [5 (CF)]^{-0.27} \quad (16)$$

Gráfica 16: Comportamiento del Índice de Calidad del Agua de coliformes fecales



7.3. ANEXO 3: Tabla de para determinar el oxígeno disuelto saturado.

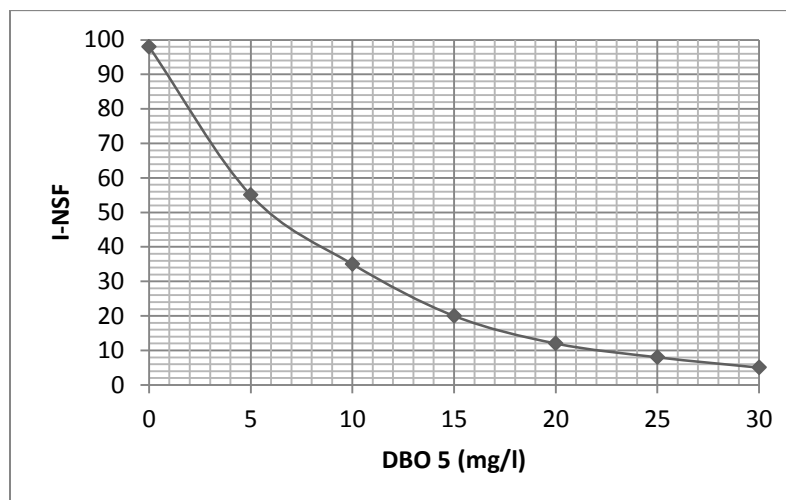
| VALORES DE OXÍGENO DISUELTO SATURADO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA Y TEMPERATURA | | | | | | | | | | | |
|--|-------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | TEMPERATURA °C | | | | | | | | | |
| ALTURA (m) | 6 | 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| 1900 | 10.34 | 9.80 | 9.31 | 8.86 | 8.44 | 8.06 | 7.70 | 7.38 | 7.07 | 6.79 | 6.52 |
| 2000 | 10.21 | 9.68 | 9.20 | 8.75 | 8.34 | 7.96 | 7.61 | 7.28 | 6.98 | 6.70 | 6.44 |
| 2100 | 10.08 | 9.56 | 9.08 | 8.64 | 8.23 | 7.86 | 7.51 | 7.19 | 6.89 | 6.61 | 6.35 |
| 2200 | 9.95 | 9.44 | 8.97 | 8.53 | 8.13 | 7.76 | 7.41 | 7.10 | 6.80 | 6.53 | 6.27 |
| 2300 | 9.83 | 9.32 | 8.85 | 8.42 | 8.02 | 7.66 | 7.32 | 7.01 | 6.72 | 6.44 | 6.19 |
| 2400 | 9.70 | 9.20 | 8.74 | 8.32 | 7.92 | 7.56 | 7.23 | 6.92 | 6.63 | 6.36 | 6.11 |
| 2500 | 9.58 | 9.09 | 8.63 | 8.21 | 7.82 | 7.47 | 7.13 | 6.83 | 6.54 | 6.28 | 6.03 |
| 2600 | 9.46 | 8.97 | 8.52 | 8.11 | 7.72 | 7.37 | 7.04 | 6.74 | 6.46 | 6.20 | 5.95 |
| 2700 | 9.34 | 8.86 | 8.42 | 8.00 | 7.63 | 7.28 | 6.95 | 6.66 | 6.38 | 6.12 | 5.88 |
| 2800 | 9.23 | 8.75 | 8.31 | 7.90 | 7.53 | 7.18 | 6.87 | 6.57 | 6.30 | 6.04 | 5.80 |
| 2900 | 9.11 | 8.64 | 8.20 | 7.80 | 7.43 | 7.09 | 6.78 | 6.49 | 6.22 | 5.96 | 5.72 |
| 3000 | 9.00 | 8.53 | 8.10 | 7.71 | 7.34 | 7.00 | 6.69 | 6.40 | 6.14 | 5.89 | 5.65 |
| 3100 | 8.88 | 8.42 | 8.00 | 7.61 | 7.25 | 6.91 | 6.61 | 6.32 | 6.06 | 5.81 | 5.58 |
| 3200 | 8.76 | 8.31 | 7.90 | 7.51 | 7.16 | 6.82 | 6.53 | 6.24 | 5.98 | 5.73 | 5.51 |

7.4. ANEXO 4: Funciones para la determinación del I-NSF en cada parámetro.

Las ecuaciones definidas para el índice de calidad individual de cada uno de los 9 parámetros seleccionados por ICA-NSF para conformar el índice general son:

Demanda Bioquímica de Oxígeno:

$$I_{\text{DBO}} = -3E - 05 \text{ DBO}^5 + 0.0022 \text{ DBO}^4 - 0.0701 \text{ DBO}^3 + 1.1556 \text{ DBO}^2 - 12.841 \text{ DBO} + 97.968 \quad (1)$$



Gráfica 1: Comportamiento del índice de calidad NSF de la DBO_5 .

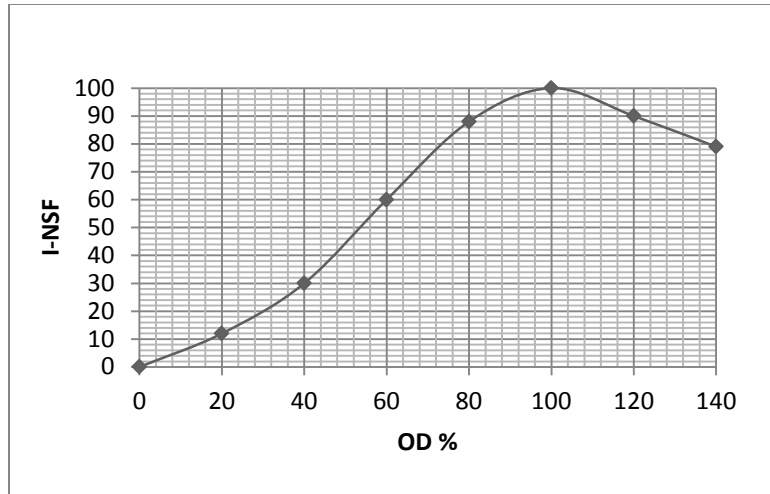
Oxígeno Disuelto:

Para:

$$0 \leq OD (\%) \leq 60 \quad I_{OD} = 0.01130D^2 + 0.315 OD + 0.3 \quad (2.1)$$

$$60 < OD (\%) \leq 100 \quad I_{OD} = -0.02 OD^2 + 4.2 OD - 120 \quad (2.2)$$

$$100 < OD (\%) \leq 140 \quad I_{OD} = -62.18 \ln(OD) + 386.79 \quad (2.3)$$



Gráfica 2: Comportamiento del índice de calidad NSF del Oxígeno Disuelto.

Potencial de Hidrógeno pH:

Para:

$$2 \leq pH \leq 5$$

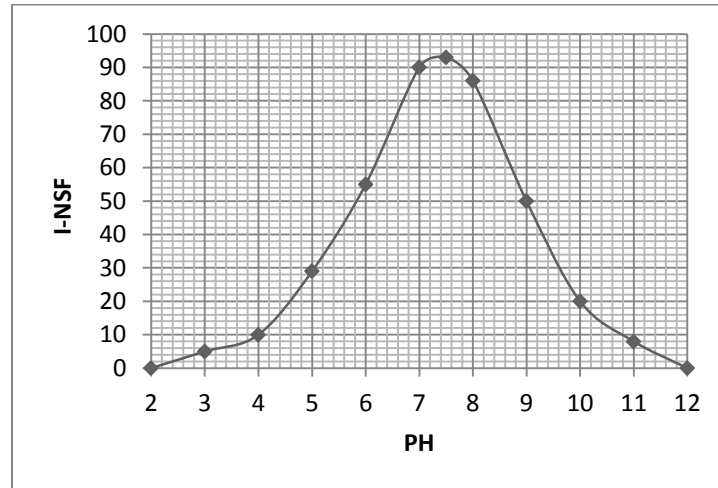
$$I_{pH} = 2.3333 pH^3 - 21 pH^2 + 65.667 pH - 66 \quad (3.1)$$

$$5 < pH \leq 10$$

$$I_{pH} = \frac{-0.2 pH^5 + 9.2756 pH^4 - 164.1 pH^3 + 1383.4 pH^2 - 5552.1 pH + 8544.3}{8544.3} \quad (3.2)$$

$$10 < pH \leq 12$$

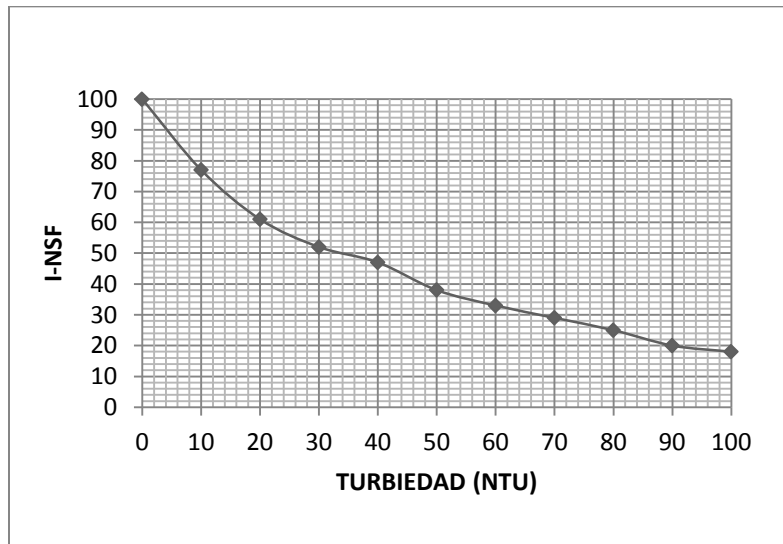
$$I_{pH} = 2 pH^2 - 54 pH + 360 \quad (3.3)$$



Gráfica 3: Comportamiento del índice de calidad NSF del pH.

Turbiedad:

$$I_T = 3E - 08 T^5 + 9E - 06 T^4 - 0.0011 T^3 + 0.0734 T^2 - 2.9951 T + 100.1 \quad (4)$$



Gráfica 4: Comportamiento del índice de calidad NSF de la Turbiedad.

Fósforo Total:

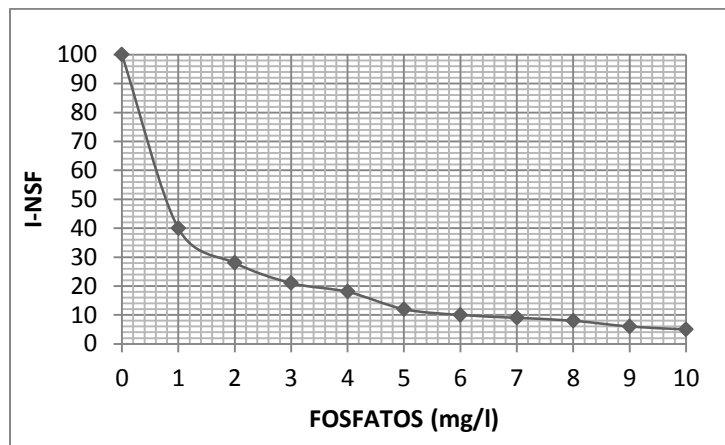
Para:

$$0 \leq PO_4 \leq 7$$

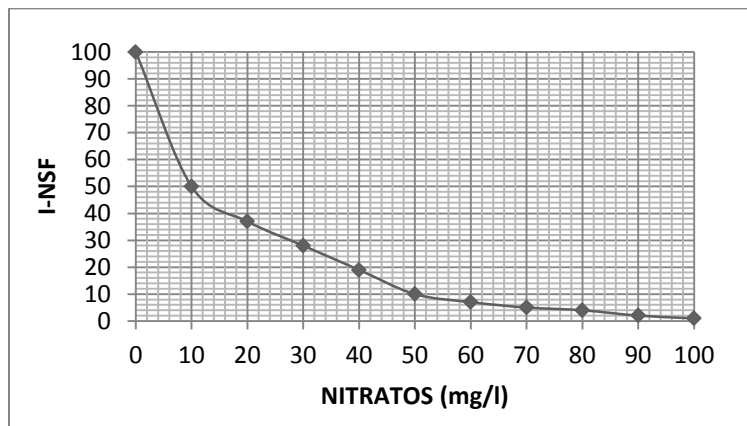
$$I_{PO_4} = 0.0167(PO_4)^6 - 0.4346(PO_4)^5 + 4.5641(PO_4)^4 - 24.533(PO_4)^3 + 71.066(PO_4)^2 - 110.42(PO_4) + 99.967 \quad (5.1)$$

$$7 < PO_4 \leq 10$$

$$I_{PO_4} = 0.3333x^3 - 8.5x^2 + 70.167x - 180 \quad (5.2)$$

**Gráfica 5: Comportamiento del índice de calidad NSF de los Fosfatos.****Nitratos:**

$$I_{N-NO_3} = 6E - 09(N - NO_3)^6 - 2E - 06(N - NO_3)^5 + 0.0002(N - NO_3)^4 - 0.0151(N - NO_3)^3 + 0.4873(N - NO_3)^2 - 8.529(N - NO_3) + 99.9 \quad (6)$$

**Gráfica 6: Comportamiento del índice de calidad NSF de los Nitratos.**



Temperatura:

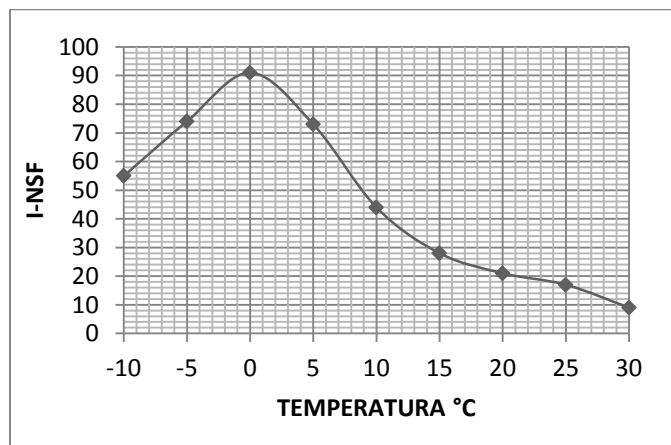
Para:

$$-10 \leq \Delta T \leq 5$$

$$I_{\Delta T} = -0.044 \Delta T^3 - 0.7 \Delta T^2 + 1 \Delta T + 91 \quad (7.1)$$

$$5 < \Delta T \leq 30$$

$$I_{\Delta T} = 3E - 06 \Delta T^5 - 0.0003 \Delta T^4 + 0.007 \Delta T^3 + 0.2283 \Delta T^2 - 9.8767 \Delta T + 116 \quad (7.2)$$



Gráfica 7: Comportamiento del índice de calidad NSF de la Temperatura.

Coliformes Fecales:

Para:

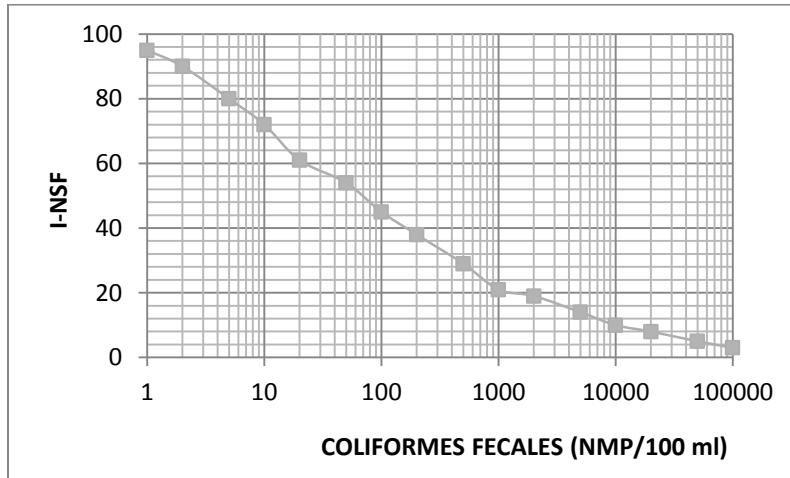
$$1 \leq CF \leq 10 \quad I_{CF} = -10.12 \ln(CF) + 95.896 \quad (8.1)$$

$$10 < CF \leq 100 \quad I_{CF} = 111.86 CF^{-0.194} \quad (8.2)$$

$$100 < CF \leq 1000 \quad I_{CF} = -10.34 \ln(CF) + 92.777 \quad (8.3)$$

$$1000 < CF \leq 10000 \quad I_{CF} = 1E - 07 CF^2 - 0.0024 CF + 23.308 \quad (8.4)$$

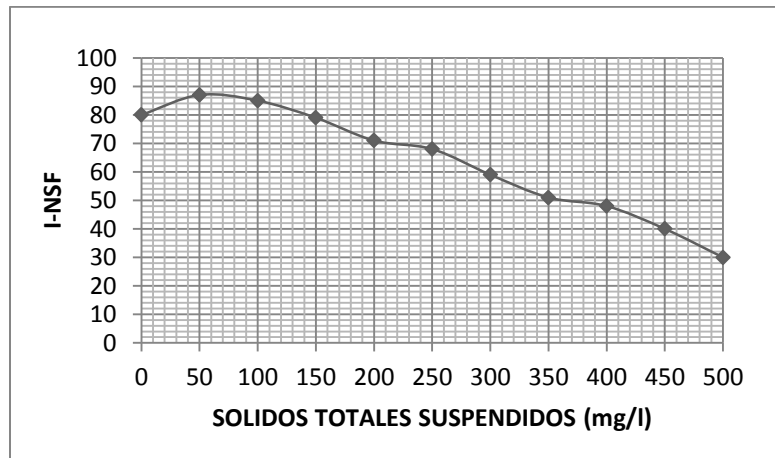
$$10000 < CF \leq 100000 \quad I_{CF} = -3.072 \ln(CF) + 38.331 \quad (8.5)$$



Gráfica 8: Comportamiento del índice de calidad NSF de los Coliformes Fecales.

Sólidos Totales Suspendidos:

$$I_{SS} = -1E - 13 SS^6 + 2E - 10 SS^5 - 9E - 08 SS^4 + 3E - 05 SS^3 - 0.0051 SS^2 + 0.3382 SS + 79.945 \quad (9)$$



Gráfica 9: Comportamiento del índice de calidad NSF de los Sólidos Totales Suspendidos.