



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA
Y RECURSOS HIDRÁULICOS

**DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD Y COEFICIENTES
CINÉTICOS DE AUTO DEPURACIÓN DEL AGUA, EN LA PARTE
ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO, UBICADA EN LOS
DEPARTAMENTOS DE SAN MARCOS Y QUETZALTENANGO.**

ING. JORGE LEONEL RIVERA MÉNDEZ

ASESORADO POR MSc. ING. PEDRO CIPRIANO SARAVIA CELIS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD Y COEFICIENTES
CINÉTICOS DE AUTO DEPURACIÓN DEL AGUA, EN LA PARTE
ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO, UBICADA EN LOS
DEPARTAMENTOS DE SAN MARCOS Y QUETZALTENANGO.**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL
DE INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS

ING. JORGE LEONEL RIVERA MÉNDEZ

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO (*MAGÍSTER SCIENTIFICAE*) EN INGENIERÍA SANITARIA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Milton de León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**DIRECTOR DE LA ESCUELA REGIONAL DE
INGENIERÍA SANITARIA Y RECURSOS HIDRÁULICOS**

MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

TRIBUNAL EXAMINADOR

EXAMINADOR	MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
EXAMINADOR	MSc. Ing. Zenón Much Santos
EXAMINADOR	MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración el trabajo de estudio especial titulado:

DETERMINACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD Y COEFICIENTES CINÉTICOS DE AUTO DEPURACIÓN DEL AGUA, EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO, UBICADA EN LOS DEPARTAMENTOS DE SAN MARCOS Y QUETZALTENANGO.

Tema que fue aprobado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos con fecha febrero de 2008

ING. JORGE LEONEL RIVERA MÉNDEZ



El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Zenón Much Santos, MSc. Ing. Joram Gil Larroj y MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria; MSc. Ing. Julio Guillermo García Ovalle y la revisión de lingüística realizada por la Licenciada en Letras Virsa Valenzuela Morales, Colegiado No. 6237 al trabajo del estudiante Ingeniero Jorge Leonel Rivera Méndez, titulado: **“DETERMINACION DE LOS INDICES DE CALIDAD Y COEFICIENTES CINETICOS DE AUTO DEPURACION DEL AGUA, EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RIO NARANJO, UBICADA EN LOS DEPARTAMENTOS DE SAN MARCOS Y QUETZALTENANGO”**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los veinte días del mes de noviembre de 2,008.

IMPRESIONASE



MSc. Ing. Pedro Saravia Celis
DIRECTOR

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria
y Recursos Hidráulicos-ERIS-

DEDICATORIA

A Dios: por su amor, misericordia, fidelidad y provisión para concluir una nueva etapa de mi vida.

A mis padres: Arnulfo Timoteo Rivera Orozco y Eudocia Josefina Méndez de Rivera por su amor, consejos y aliento.

A mis hermanos: Licda. Ana María e Ings. Israel Timoteo y Nehemías Juan Rivera Méndez. Por su amor y apoyo fraternal.

A mi hijo: Jorge Luis con amor y que sirva de inspiración para el desarrollo de su vida.

A mis sobrinos: Pablo José y Juan José Con mucho aprecio, y que sirva de inspiración para su vida.

A mis familiares en general

AGRADECIMIENTOS

A Dios: con el corazón te agradezco porque me brindaste inteligencia y fortaleza para alcanzar la maestría.

A las instituciones: Fundación Solar, Centro Universitario de Occidente, Servicios para el desarrollo, el proyecto Nuffic de la Embajada de los países Bajos, Holanda, por haber facilitado la beca para los estudios de la maestría de Ingeniería Sanitaria en Guatemala.

A mis padres y hermanos: en reconocimiento a su colaboración

Al Msc. Ing. Pedro Saravia: por su contribución al asesorar el presente estudio especial, así como por su apoyo como director de ERIS.

A la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS.

Al Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina"

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
JUSTIFICACIÓN	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
HIPÓTESIS Y LIMITACIONES	XIX
OBJETIVOS	XXI
1 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO	1
1.1 Ubicación de la cuenca del río Naranjo.	1
1.2 Clima	5
1.3 Régimen de lluvias	5
1.4 Temperatura	6
1.5 Régimen de caudales	7
1.6 Aspectos socioeconómicos	7
1.7 Geología y suelo	10
1.8 Estudios sobre calidad del agua río Naranjo	10
2 MARCO CONCEPTUAL	11
2.1 Calidad del agua.	11
2.1.1 Parámetros físicos	11
2.1.1.1 Temperatura	12
2.1.1.2 Sólidos totales	12
2.1.1.3 Sólidos suspendidos totales	12
2.1.1.4 Turbiedad	12

2.1.1.5	Conductividad eléctrica	13
2.1.2	Parámetros químicos	13
2.1.2.1	Demanda química de oxígeno	13
2.1.2.2	Potencial de hidrógeno	14
2.1.2.3	Oxígeno disuelto	14
2.1.2.4	Fosfatos	14
2.1.2.5	Nitratos	15
2.1.3	Parámetros biológicos	16
2.1.3.1	Demanda bioquímica de oxígeno	16
2.1.3.2	Coliformes totales	16
2.2	Índices de calidad.	17
2.2.1	Índice de calidad del agua WQI	18
2.2.1.1	Parámetros del índice WQI	19
2.2.1.2	Método del índice de calidad WQI	19
2.2.1.3	Interpretación del WQI	23
2.2.2	Índice Simplificado de la calidad del agua (ISCA)	25
2.2.2.1	Método para la determinación del ISCA	26
2.2.2.2	Interpretación del ISQA.	27
2.3	Procesos de auto depuración de ríos	28
2.3.1	Análisis de oxígeno en un cuerpo de agua	31
2.3.1.1	Demanda de oxígeno	32
2.3.1.2	Aporte de oxígeno al río	34
2.3.1.3	Balance de oxígeno	36
2.4	Constante de auto depuración “f” de Fair	40
2.5	Hidrológica.	40
3.	METODOLOGÍA	43
3.1	Recursos	44
3.1.1	Ubicación de estaciones de muestreo	44
3.2	Análisis de muestras	47

3.3	Técnicas y procedimientos	47
3.3.1	Muestreo estadístico	47
3.3.2	Toma de muestras	48
3.3.3	Determinación de los caudales	48
3.3.4	Técnicas de análisis	49
3.3.5	Cálculo del índice de calidad WQA	49
3.3.6	Cálculo del índice simplificado de calidad ISQA	49
3.3.7	Cálculo de los coeficientes cinéticos	50
3.3.8	Calculo de la carga contaminante.	51
4.	RESULTADOS	53
4.1	Análisis de laboratorio y de campo	54
4.2	Índice de calidad del agua WQI	60
4.3	Índice simplificado de la calidad del agua ISQA	63
4.4	Coeficientes cinéticos	66
4.5	Carga contaminante	67
4.6	Comportamiento de parámetros	68
4.7	Relación de variables	75
4.8	Comportamiento de la carga contaminante	79
4.9	Caudal en estaciones	83
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	85
5.1	Análisis de parámetros	85
5.1.1	Oxígeno disuelto	85
5.1.2	Coliformes fecales	86
5.1.3	El pH	90
5.1.4	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	90
5.1.5	Temperatura	91
5.1.6	Fosfatos	94
5.1.7	Nitratos	95
5.1.8	Turbiedad	97

5.1.9	Sólidos totales	98
5.1.10	Demanda química de oxígeno, (DQO)	99
5.1.11	Sólidos suspendidos totales (SST)	99
5.1.12	Conductividad eléctrica.	100
5.2	Índices de calidad	101
5.2.1	Índice de calidad del agua WQI	101
5.2.2	Índice simplificado de la calidad del agua (ISQA)	102
5.2.3	Relación de índices WQI y ISQA	104
5.3	Procesos de auto depuración	105
5.3.1	Relación de parámetros	105
5.3.2	Coefficiente cinético	106
5.3.3	Constante de auto depuración “f” de Fair.	109
5.4	Carga contaminante	110
5.5	Análisis hidrológico	113
CONCLUSIONES		115
RECOMENDACIONES		117
BIBLIOGRAFÍA		119
APÉNDICE		125

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Ubicación del área de estudio	2
2	Ubicación de la parte alta de la cuenca del río Naranjo	4
3	Factor para coliformes fecales	21
4	Factor para oxígeno disuelto	21
5	Factor para pH	21
6	Factor para DBO ₅	21
7	Factor para temperatura	22
8	Factor para fosfatos	22
9	Factor para nitratos	22
10	Factor para turbiedad	22
11	Factor para sólidos totales	23
12	Interpretación del WQI	23
13	Usos del agua según nivel de índice de calidad	25
14	Concentración de oxígeno en agua de ríos	37
15	Ubicación de las estaciones de muestreo	46
16	Porcentaje del índice de calidad del agua (WQI) por estación y fecha de muestreo	62
17	Porcentaje del índice simplificado de la calidad del agua (ISQA) por estación y fecha de muestreo	65
18	Contenido del % O. D. del agua por estación y fecha de muestreo	68
19	Coliformes totales del agua, por estación y fecha de muestreo	68
20	pH del agua, por estación y fecha de muestreo	69
21	DBO ₅ por estación y fecha de muestreo	69

22	Cambio de temperatura entre el ambiente y el agua por estación y fecha de muestreo	70
23	Contenido de fosfatos del agua, por estación y fecha de muestreo	70
24	Temperatura del agua, por estación y fecha de muestreo	71
25	Contenido de nitratos del agua, por estación y fecha de muestreo	71
26	Turbiedad del agua, por estación y fecha de muestreo	72
27	Sólidos totales del agua, por estación y fecha de muestreo	72
28	DQO del agua, por estación y fecha de muestreo	73
29	Sólidos suspendidos del agua, por estación y fecha de muestreo	73
30	Oxígeno disuelto del agua por estación y fecha de Muestreo	74
31	Conductividad eléctrica del agua, por estación y fecha de muestreo	74
32	Relación entre los índices WQI y el ISQA de la estación 001	75
33	Relación entre los índices WQI y el ISQA de la estación 002	75
34	Relación entre los índices WQI y el ISQA de la estación 003	76
35	Relación del % de oxígeno disuelto entre las estaciones 001 y 002	77
36	Relación del contenido de nitratos entre las estaciones 001 y 002	77
37	Relación de SST entre las estaciones 001 y 002	78
38	Relación de la turbiedad entre las estaciones 001 y 002	78
39	Carga de la DBO ₅ del agua por estación y fecha de muestreo	79
40	Carga de DQO del agua del por estación y fecha de muestreo	79
41	Carga de fosfatos del agua por estación y fecha de muestreo	80
42	Carga contaminante de nitratos, por estación y fecha de muestreo	80
43	Carga de ST del agua, por estación y fecha de muestreo	81
44	Carga de SST del agua, por estación y fecha de muestreo	81
45	Carga de SD del agua, por estación y fecha de muestreo	82
46	Relación DBO ₅ /DQO por estación y fecha de muestreo	82
47	Caudal en las estaciones de control	83
48	Lluvia media mensual en base al índice promedio mensual	131
49	Régimen de lluvias con respecto a la orografía del terreno	131

50	Temperatura como función de la orografía	132
51	Descargas de agua residuales	133
52	Regiones geomorfológicas de la cuenca del río Naranjo	134

TABLAS

I.	Parámetros, para el cálculo del índice WQI	19
II.	Interpretación de los valores del índice de WQI	24
III.	Significado de los valores del ISQA	28
IV.	Factores que intervienen en el balance de oxígeno	31
V.	Constante de auto depuración “f” de Fair	40
VI.	Resultados de los parámetros del primer muestreo realizado 26 de marzo de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	55
VII.	Resultados de los parámetros del segundo muestreo realizado 30 de marzo de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	55
VIII.	Resultados de los parámetros del tercer muestreo realizado 02 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	56
IX.	Resultados de los parámetros del cuarto muestreo realizado 06 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	56
X.	Resultados de los parámetros del quinto muestreo realizado 09 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	57
XI.	Resultados de los parámetros del sexto muestreo realizado 13 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	57
XII.	Resultados de los parámetros del séptimo muestreo realizado 16 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	58
XIII.	Resultados de los parámetros del octavo muestreo realizado 20 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	58
XIV.	Resultados de los parámetros del noveno muestreo realizado 23 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	59

XV.	Resultados de los parámetros del décimo muestreo realizado 27 de abril de 2008, parte alta cuenca del río Naranjo	59
XVI.	Parámetros para la determinación del índice general de calidad del agua, parte alta cuenca del río Naranjo	60
XVII.	Resultados del índice general de la calidad del agua, parte alta cuenca del río Naranjo	61
XVIII.	Parámetros para el cálculo del índice simplificado de la calidad de agua, parte alta cuenca del río Naranjo	63
XIX.	Resultados del índice simplificado de la calidad de agua, parte alta cuenca del río Naranjo	64
XX.	Parámetros y resultados de coeficientes cinéticos del agua, parte alta cuenca del río Naranjo	66
XXI.	Resultados de la carga contaminante del agua, parte alta cuenca del río Naranjo	67
XXII.	Porcentaje de área por municipio que integra la cuenca	127
XXIII.	Caudales medios mensuales	127
XXIV.	Tipos de suelos en la cuenca	128
XXV.	Presión barométrica aproximada a diferentes elevaciones	128
XXVI.	Oxígeno disuelto en el agua en condiciones de saturación a diferentes presiones y temperatura	129

LISTA DE SÍMBOLOS

CC	Carga contaminante
R	Coeficiente de correlación
k_1	Coeficiente de descomposición bioquímica de materia orgánica
k_2	Coeficiente de reaireación
$OD_{(T,P)}$	Concentración de saturación de oxígeno
$OD_{(T,P_0)}$	Concentración de saturación de oxígeno al nivel del mar
Lo	Concentración inicial de demanda bioquímica de oxígeno en el río, aguas abajo del punto de descarga del efluente
DO _o	Concentración inicial de oxígeno disuelto en el río, aguas abajo del punto de descarga del efluente
DO _{crit}	Concentración crítica de oxígeno disuelto en el agua
CE	Conductividad eléctrica
f	Constante de auto depuración "f" de Fair
D	Déficit de oxígeno del río
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
ISCA	Índice simplificado de calidad del agua
kg/s	Kilogramos por segundo
m/s	Metros por segundo
m ³ /s	Metros cúbicos por segundo
μS/cm	Microsiemens por centímetro
mg/l	Miligramos por litro
mm	Milímetros
mm Hg	Milímetros de mercurio
OC	Oxígeno consumido

OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
P	Presión
Po	Presión al nivel del mar (760 mm Hg)
SST	Sólidos suspendidos totales
ST	Sólidos totales
SD	Sólidos disueltos
T	Temperatura
t	Tiempo
tcrit	Tiempo crítico de viaje (momento cuando la partícula de agua llega al punto de menor concentración de oxígeno disuelto en la corriente)

GLOSARIO

Aerobia	Lo orgánico que vive únicamente en presencia de oxígeno.
Afluente	Arroyo o río secundario que desemboca o desagua en otro principal.
Anaerobia	Lo orgánico que vive únicamente en ausencia de oxígeno.
Antrópico	De origen humano, humanizado, opuesto a lo natural.
Auto depuración	Proceso por medio del cual un cuerpo de agua (río, lago, agua costera) puede llegar a recuperarse de los efectos o impactos de la contaminación natural o antrópica. Se le conoce también como autopurificación y autooxidación.
Afluente	Agua de subcuenca que llega al cauce principal de la cuenca.
Bifurcación	Lugar donde un camino, río, etc., se divide en dos ramales o brazos.
Biótico	Relativo a la vida y a los organismos. Los factores bióticos constituyen influencias del ambiente que emanan de las actividades de los seres.
Capa béntica	Capa conformada por un conjunto de animales y plantas que viven, fijos o no, en el fondo o paredes laterales del mar y los lagos.
Demanda Bioquímica de oxígeno	Es la medida de la cantidad de oxígeno consumido por un agua residual durante la oxidación POR VÍA BIOLÓGICA de la materia orgánica biodegradable (utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica), bajo condiciones aerobias, en un período de 5 días, en la oscuridad, a presión constante y a 20°C.
Demanda Química de	Es la medida de la cantidad de oxígeno consumido por un agua residual durante la oxidación POR VIA QUIMICA de la

oxígeno	materia orgánica e inorgánica.
Cuenca	
Sub cuenca	Área tributaria de un afluente del cauce principal.
Micro cuenca	Área tributaria de una corriente superficial que drena hacia un afluente principal del río Naranjo.
Efluente	Líquido de desecho de un proceso que fluye y es descargado en los cuerpos de agua o en los alcantarillados.
Fango	Lodo glutinoso que se forma generalmente con los sedimentos térreos en los sitios donde hay agua detenida.
Freático	Relativo a aguas acumuladas en el subsuelo, sobre una capa impermeable y que pueden ser aprovechadas por medio de pozos. Concerniente a la capa del subsuelo impregnada de agua, o manto acuífero.
Ignición	Acción y efecto de iniciarse una combustión.
Morfología	Estudio de la forma, la estructura y origen de los relieves geológicos sin considerar su función.
Replicabilidad	Dicho de un proceso: que puede realizarse de forma similar más de una vez.
Sedimentos	Depósito o capa de materia que se acumula en un sitio, o se ha acumulado en los tiempos geológicos.
Sinusoidal	Onda plana cuya magnitud perturbada sigue la ley del seno de una variable.

RESUMEN

El estudio sobre la determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la parte alta de la cuenca del río Naranjo, ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango, tuvo la finalidad de generar información que describiera la calidad del agua del río y explicar su comportamiento por medio de modelos, fundamentado en la determinación de parámetros físicos, químicos, bacteriológicos y mediciones hidrológicas.

El estudio se realizó sobre el cauce principal del río, en la parte alta de la cuenca. Y se tomó como punto de referencia el área tributaria que define la estación hidrométrica de Corral Grande del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrológica INSIVUMEH (Ver figura No. 2). La parte alta de la cuenca es la que presenta la mayor contaminación por aguas residuales.

En la parte alta de la cuenca se definieron tres estaciones de control, donde se tomaron muestras de agua, con los métodos normalizados que incluye el análisis de aguas potables y residuales, luego se determinaron dos índices de calidad, (el índice de calidad del agua WQI, desarrollado por la NFS de los EE. UU. y el índice simplificado de la calidad del agua ISQA), y se determinaron los coeficientes cinéticos de auto depuración del agua del río (los coeficientes cinéticos de desoxidación k_1 y de reoxigenación k_2), y la carga contaminante.

Los índices de calidad WQI y el ISQA, indican que las aguas del cauce principal de la cuenca del río Naranjo, en la parte alta, se encuentran contaminadas a niveles en los que no se recomienda la reutilización con fines de consumo humano. Los indicadores también muestran la auto recuperación del río a través de la degradación de la materia orgánica y la dilución por los aportes de los afluentes.

Los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica (desoxigenación k_1) y de reaireación (reoxigenación k_2), determinados experimentalmente entre las estaciones 001 y la 002 son: $k_1 = 6.28 \text{ día}^{-1}$ con una desviación estándar de 2.96 y $k_2 = 19.73 \text{ día}^{-1}$ con desviación estándar de 6.64. Y la constante de (f) Fair de 3.18 y con desviación estándar de 1.59 clasifica la parte alta de la cuenca del río Naranjo como corrientes rápidas, lo que coincide con los valores experimentales determinados por De León (2005) para la parte alta del río Samalá y dentro del rango, dado por diversos autores citados por Metcalf y Heddy (1997), Hernández (1998), Saravia (2008)

La carga contaminante aumenta de la estación 001 a la 003; expresada en los parámetros sólidos totales, fosfatos, nitratos DBO_5 y DQO.

JUSTIFICACIÓN

Las subcuencas de los ríos Nahuala, Túrbala, Palatza, Tacaná y alto Naranjo drenan el agua residual de los municipios: San Pedro Sacatepéquez, San Marcos, San Antonio Sacatepéquez, Esquipulas Palogordo y Palestina de los Altos, sin tratamiento, en la parte alta de la cuenca del río Naranjo. En donde habitan más de 314,000 personas; es el área de la cuenca con la mayor densidad poblacional (217 habitantes/km²), y es la región donde se presenta el mayor grado de contaminación debido a las aguas residuales.

Los usos del agua en la ribera del río son para actividades domésticas y productivas de población dispersa como: agrícolas, forestales, pecuarios, artesanales, industriales y de recreación. En la cuenca del río Naranjo no se cuenta con información sobre la calidad del agua del río que permita describir el nivel de contaminación y su comportamiento que sirva de base para la creación de políticas, planes y programas de desarrollo social, económico y ambiental para la conservación y sostenimiento de la cuenca.

Reportes de los centros de salud indican altos niveles de morbilidad y mortalidad infantil por enfermedades de origen hídrico, para los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango.

Este estudio aportará la descripción de los parámetros físicos, químicos y biológicos que permitirán explicar el comportamiento de la calidad del agua y se desarrollarán índices que permitan establecer una línea base y evaluar en el futuro la calidad del agua en los tres puntos de muestreo durante el período comprendido del 20 de marzo al 28 de abril de 2008.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La parte alta de la cuenca del río Naranjo recibe las aguas residuales de las poblaciones de los municipios del departamento de San Marcos (San Marcos cabecera, San Pedro Sacatepéquez, San Antonio Sacatepéquez, Esquipulas Palogordo y San Cristóbal Cucho), y Quetzaltenango (Palestina de los Altos y San Juan Ostuncalco), constituyéndose en un problema de tipo ambiental. Por otro lado, las aguas del río son reutilizadas directamente por comunidades río abajo. Entre los principales usos se tienen: doméstico, riego de cultivos de hortalizas, agricultura, crianza de animales, actividades artesanales, pequeñas industrias y recreación.

Estadísticas de salud reportan altos niveles de morbilidad y mortalidad infantil por enfermedades de origen hídrico, para los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango.

Actualmente, no se tienen estudios que muestren los niveles de contaminación del río y el comportamiento en su recorrido. Por esas razones, es necesario realizar estudios integrales que permitan conocer la realidad sobre la calidad del agua y su comportamiento en el ecosistema, a través de índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración, con el fin de proponer políticas y programas integrales de conservación de los ecosistemas de la cuenca.

El estudio sobre la Determinación de los índices de calidad y coeficientes cinéticos de auto depuración del agua, en la parte alta de la cuenca del río Naranjo, ubicada en los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango,

permitirá conocer su calidad. Esto lleva a plantearse la siguiente pregunta de investigación: ¿Se podrá clasificar el cuerpo de agua para consumo humano y determinar los coeficientes cinéticos de auto depuración?

HIPÓTESIS

Los índices de calidad del agua, permitirán clasificar el agua del río naranjo en la parte alta y la determinación de los coeficientes cinéticos de desoxigenación k_1 y reoxigenación k_2 , los cuales coinciden con los coeficientes cinéticos determinados experimentalmente en la información especializada sobre el tema.

LIMITACIONES

- 1 El plan de muestreo del estudio, se realizó en época de estiaje, en los meses de marzo y abril del año 2008.
- 2 La parte alta del cauce principal del río Naranjo tiene aportes y sustracciones de agua entre las estaciones seleccionadas; lo cual limita la determinación de los coeficientes cinéticos que requieren un sistema constante de agua (sin aportes y sustracciones), pero el estudio muestra una situación real entre los puntos de muestreo. Todos los parámetros son afectados por los ingresos y salidas de agua del cauce del río.
- 3 El estudio se limita a la parte alta de la cuenca del río Naranjo debido a que es la región con mayor densidad poblacional, es la que más contamina la cuenca con agua residual. También, debido al acceso a las estaciones de control, el transporte y la conservación de las muestras para su análisis de laboratorio.

OBJETIVO GENERAL

Determinar los índices de calidad del agua del río Naranjo de las subcuencas que abarca el área tributaria de la estación hidrométrica de Corral Grande. Formada por los municipios de San Pedro, San Marcos, Esquipulas Palogordo, San Antonio y Palestina de los Altos, durante los meses de marzo y abril de 2008. Así como determinar los coeficientes cinéticos de auto depuración.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Determinar las características hidrológicas y los parámetros físicos, químicos y biológicos en las estaciones definidas en el río Naranjo, de las subcuencas que cubre los municipios de San Pedro, San Marcos, Esquipulas Palogordo, San Antonio, departamento de San Marcos y Palestina de los Altos, departamento de Quetzaltenango.
2. Determinar los índices de calidad del agua en las estaciones definidas en el río Naranjo, de las subcuencas que cubren los municipios de San Pedro, San Marcos, Esquipulas Palogordo, San Antonio y Palestina de los Altos.
3. Relacionar los parámetros de calidad del agua para encontrar los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica y de reaireación, que permitan conocer su comportamiento.

2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO

1.9 Ubicación de la cuenca del río Naranjo.

Estudios del INSIVUMEH¹ indican que Guatemala está dividida en tres vertientes que drenan el agua superficial hacia océanos y mares, el área que drena hacia el océano Pacífico, de 22%; hacia el Mar Caribe, de 31% y hacia el Golfo de México, de 47% del área total del territorio nacional (108,889 km²). La cuenca del río Naranjo se localiza geográficamente entre los meridianos 91°36'56" y 92°12'23" de longitud oeste y paralelos 14°29'49" y 15°01'17". (Figura No. 1, página 2). Esta limitada al Norte por la subcuenca del río Cuilco, al Este por las cuencas de los ríos Samalá y Ocosito, al Sur por el Océano Pacífico y al Oeste por la cuenca del río Suchiate.

El área de la cuenca del río Naranjo es de 1267.7 kilómetros cuadrados, que corresponde al 5.28 % del área total que drena sobre el océano Pacífico y el 0.96 % del área total del territorio nacional. En la tabla XXII del apéndice, se observan los porcentajes de las áreas de los municipios en los departamentos de Quetzaltenango y San Marcos que integran el área de la cuenca del río Naranjo.

¹ INSIVUMEH 2007 (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Metrología e Hidrología). Boletín Hidrológico No. 19, pp. 25-45.

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Ing. Jorge Leonel Rivera Méndez Maestría en Ingeniería Sanitaria
Estudio especial 2008



★ Ciudad de Guatemala

El río Naranjo nace en las montañas del municipio de San Pedro Sacatepéquez, departamento de San Marcos y desemboca en el océano Pacífico. El cauce principal tiene una longitud de 103.75 Km, y lo integran 16 subcuencas (área tributaria de un afluente del cauce principal) y 50 microcuencas (área tributaria de una corriente superficial que drena hacia un afluente principal del río Naranjo).

La cuenca del río Naranjo presenta alturas que van desde 0 a 3650 msnm. Por lo cual adquiere características particulares de clima, topografía, fisiografía y aspectos socioeconómicos. La cuenca se divide en tres regiones geomorfológicas según Orozco, estudio realizado para la fundación Solar^{2,3}

- Parte alta, (tierras altas volcánicas, montano bajo)
- Parte media (monte volcánico, subtrópico húmedo)
- Parte baja (planicie costera del Pacífico, trópico seco húmedo)

Es de interés el área de los municipios de los departamentos de Quetzaltenango y San Marcos que se ubican en la parte alta de la cuenca del río Naranjo, (figura No. 2, página 4).

² FUNSOLAR / CADISNA / MANCUERNA/ EMBAJADA DE LOS PAÍSES BAJOS, HOLANDA, "Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo, versión electrónica 2007.

³ INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología é Hidrología, GT); MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2005. Atlas hidrológico. Escala 1:250,000.

1.2 Clima

Estudio realizado por Orozco para la Fundación FUNSOLAR⁴. De acuerdo con la clasificación Holdridge, la parte alta de la cuenca del río Naranjo, pertenece principalmente a la zona de bosque muy húmedo montano bajo subtropical y la parte baja se clasifica como zona de bosque muy húmedo subtropical cálido. Según la clasificación climática de Thornthwaite, en la cuenca del río Naranjo se presentan cuatro tipos: i) en la parte baja de la cuenca y en la zona baja de la parte media, el clima es húmedo y mega térmico -BsA'a'-; ii) en la parte media el clima es Per húmedo y mega térmico -ArA'a'-; iii) en la zona alta de la parte media y en la zona baja de la parte alta de la cuenca, el clima es Per húmedo y mesotérmico -Arb'a'-, y iv) en la zona alta de la parte alta de la cuenca el clima es húmedo y mesotérmico -BsB'b'-.

1.3 Régimen de lluvias

La distribución de la lluvia durante el año está caracterizada por una época seca que inicia en el mes de noviembre y termina en el mes de abril o mayo. La temporada de lluvias se inicia, en promedio en abril o mayo y concluye en noviembre.

Durante la época de lluvias, según Orozco estudio realizado para FUNSOLAR,⁵ se registran dos picos de lluvia máxima, en junio y septiembre, (figura 48 del apéndice). El primer pico de lluvia máxima, se debe al desplazamiento de la zona de convergencia intertropical. Este pico de precipitación, es en promedio el máximo durante el año. El segundo pico, se

⁴ Ibidem FUNSOLAR pp.34

⁵ Ibidem FUNSOLAR PP 35

registra durante septiembre, se debe al paso de bajas presiones, tormentas y ciclones tropicales por el país o sus alrededores; dependiendo de la intensidad de la actividad ciclónica en los alrededores del istmo centroamericano. La prominencia del segundo pico de lluvias es importante, porque constituye la principal fuente de alimentación de los caudales durante la época de estiaje.

La información sobre el régimen de lluvias es poca en la cuenca del río Naranjo, debido a las pocas estaciones de control. Según Orozco, estudio para FUNSOLAR (2007)⁶, se indica que el régimen de lluvias para la parte alta del río Naranjo va desde 1000 a 2000 mm/año, (figura 49 del apéndice). Esta agua es filtrada, evaporada y drenada por escorrentía por el cauce principal del río Naranjo.

1.4 Temperatura

Según Orozco, estudio realizado para la Fundación SOLAR⁷, la temperatura es una función de la elevación, (figura 50 del apéndice). Aunque la información de temperatura es limitada, algunas estaciones permiten observar que la temperatura alcanza sus valores mínimos durante el mes de enero y se incrementa continuamente entre febrero y mayo, cuando en promedio se inicia formalmente la época de lluvias. La temperatura máxima ocurre durante los meses de marzo y abril y registra ligeros descensos durante mayo hasta octubre. Después de octubre la temperatura desciende hasta alcanzar el mínimo durante enero para cerrar el ciclo anual.

⁶ Ibidem FUNSOLAR pp. 54

⁷ Ibidem FUNSOLAR PP 45

1.5 Régimen de caudales

El régimen de caudales está relacionado con el régimen de lluvias, (en la tabla XXIII del apéndice) se presentan caudales medios anuales para la estación hidrométrica de corral grande con valores de 1.24 m³/seg, en época de estiaje, y de 3.55 m³/seg en época de lluvia.

De acuerdo con los datos, la época de estiaje en promedio se extiende desde noviembre hasta abril. En mayo los caudales comienzan a incrementarse con las primeras lluvias y alcanzan el primer pico de caudales máximos en junio. Durante julio los caudales disminuyen debido al descenso de la lluvia y luego se incrementan alcanzando el pico mayor en septiembre, que coincide con el segundo pico de las lluvias. El río Naranjo, que drena la parte de la cuenca en el altiplano, presenta menores caudales específicos como corresponde al área que recibe menos precipitación. Los caudales específicos se incrementan hacia el sur de la cuenca donde las precipitaciones son mayores y se drena un área mayor.

1.6 Aspectos socioeconómicos

Según el censo de 2002⁸, la población total del área de la cuenca es de 343,205 habitantes, que se asienta política y administrativamente sobre diecinueve municipios (cuatro de Quetzaltenango y quince de San Marcos). Tomando en cuenta que la tasa de crecimiento es de 2.9 y 3.5 % en los departamentos de Quetzaltenango y San Marcos, respectivamente, se estima que la población se duplicará en 25 años.

⁸ INE. Instituto Nacional de Estadística, 2002. "Onceavo censo poblacional y habitacional Guatemala.

La estructura de la población es de 49.6% masculina y 50.4% femenina; y la población económicamente activa (PEA), que comprende el rango etareo comprendido entre los 15 a 59 años, asciende al 53.5%. Respecto de la distribución étnica, la minoría de la población es indígena (26.2%) y el porcentaje restante reporta ser mestizo. La densidad poblacional es de 217 habitantes por kilómetro cuadrado.

Estadísticas del censo 2006, reportan la cobertura en salud del área de la cuenca por dos hospitales nacionales, catorce centros de salud y de sesenta y cinco puestos de salud; los centros de salud disponen de mayor capacidad de atención. Las principales enfermedades se refieren a las respiratorias; otras enfermedades importantes son las infecciones intestinales y diarreas a partir del parasitismo, cuya principal causa es la falta de tratamiento del agua para consumo humano. La desnutrición ocupa índices secundarios, aunque no menos importantes de atender, con orígenes de tipo económico-social. Entre otros indicadores de salud se tiene que la región presenta una tasa de enfermedades gastrointestinales superiores a la media nacional.

En relación al tipo de vivienda se reporta que el 90% es de tipo formal (están construidas de block, adobe y madera), con techos de lámina y pisos de tierra o concreto. El acceso al suministro de agua entubada es de 55 % en el área rural y 90 % en el área urbana. En cuanto a la infraestructura de saneamiento, el área rural está cubierta en un 50 % y el área urbana en un 80 %. Los drenajes de las aguas residuales domésticas llegan a los cuerpos de agua sin tratamiento.

En la tenencia de la tierra, se diferencian el régimen de tenencia particular con pequeñas unidades y algunas propiedades colectivas de tipo

municipal y/o comunal (astilleros). Los tamaños de parcela identificados se encuentran dentro de un rango de 0.4 ha a más de 1,700 ha, donde la principal actividad para la parte alta la constituye la agricultura de granos básicos verduras y hortalizas; en la media, la caficultura y en la parte baja, cultivos diversificados.

En cuanto a mano de obra, es sobre todo, familiar y/o contratada con bajo nivel tecnológico en la producción y escasa asistencia técnica y crediticia. Otro sistema productivo de relativa importancia lo constituye el pecuario, orientado, principalmente, a la producción de doble propósito y procesamiento de los derivados. Éste se realiza en fincas medianas y grandes de la parte media y baja. En el aprovechamiento de los recursos naturales, participan tanto pobladores urbanos como rurales. En el área rural se diferencian los minifundistas, los productores de tamaño mediano que utilizan sistemas de riego y los grandes productores de café, hule, palma africana y ganadería.

En cuanto a la actividad forestal, algunas de las fincas poseen planes de manejo y proyectos de reforestación por incentivos. Respecto de actividades artesanales y agroindustriales, la presencia de las mismas es débil, y por lo general, se realiza en los centros urbanos principales, realizándose, generalmente, trabajo manual y artesanal para producir artículos de escaso valor agregado.

De acuerdo con el balance hídrico sobre oferta y demanda, se ha determinado que existe oferta de agua en el área de la cuenca, presentándose escasez de agua potable debido al alto grado de contaminación de los cuerpos de agua debido al mal manejo de la cuenca del río Naranjo.

1.7 Geología y suelo

Estudios realizados por el INSIVUMEH⁹, indican que la parte alta de la cuenca del río Naranjo, se encuentra con formaciones geológicas provenientes de la actividad volcánica; coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos; rocas ígneas y metamórficas del cuaternario y terciario, (figura 52 y tabla XXIV del apéndice). Se describen los principales tipos de geología de la cuenca, predominando suelos de ceniza volcánica, con textura de media a gruesa, por el tipo y textura del suelo el drenaje superficial es de bueno a muy bueno.

1.8 Calidad del agua en la cuenca del río Naranjo

El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales¹⁰ en el proyecto sobre cambio climático ha realizado varios estudios sobre la cuenca del río Naranjo. Entre ellos sobre la calidad del agua para el modelo de evaluación del recurso hídrico. Con resultados similares a los presentados en este estudio, para los parámetros: temperatura, potencial de hidrógeno (pH), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), nitratos, fosfatos, coliformes fecales, sólidos suspendidos totales (SST) y oxígeno disuelto (OD).

⁹ INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología); MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación). 2005, Atlas hidrogeológico escala 1:250,000

¹⁰ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN. “Proyecto estudios de cambio climático con énfasis en adaptación”. Programa Nacional del Cambio Climático, Guatemala Centroamérica, compilación y síntesis. Guatemala, noviembre de 2007. versión electrónica.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Calidad del agua

La calidad en este caso se refiere a las cualidades del agua, como las características, circunstancias naturales o adquiridas que la distinguen en el estado en que se encuentren para usarlas. El agua es un líquido incoloro, e insípido, compuesto de dos volúmenes de hidrógeno y una de oxígeno. El término calidad del agua es relativo, referido a la composición del agua, en la medida en que ésta, es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y actividades humanas. Como tal, es un término neutral que no puede ser clasificado como bueno o malo, sin hacer referencia al uso para el cual el agua es destinada. Se interpretara, como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas y su calidad de uso. Para el estudio se interpretara como el conjunto de características que presenta el agua del río naranjo, en los puntos de control durante el período de análisis. La determinación de la calidad del agua, se realiza a través de parámetros físicos, químicos y biológicos.

2.1.1 Parámetros físicos¹¹. Son las características del agua que se perciben por los sentidos y no involucran reacciones químicas o biológicas. Entre los parámetros físicos están: la temperatura, los sólidos totales, suspendidos y disueltos, la conductividad eléctrica y la turbiedad.

¹¹ CEPIS/OMS/OPS, Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida- Manual 1 tomó 1, capítulo 1 Versión electrónica, Lima, Perú 2004.

2.5.1.1 Temperatura. Parámetro que mide el calor en el agua; es importante porque incide en las propiedades, procesos e interacciones físicas, químicas y biológicas de los elementos presentes en el agua. Como la solubilidad de sustancias químicas, las velocidades de reacción, la solubilidad de los gases en el agua y la actividad biológica. La temperatura del agua se mide en grados centígrados.

2.5.1.2 Sólidos totales. Son las partículas que incluyen a los sólidos disueltos, suspendidos y sedimentables en el agua. Los ST pueden ser, tanto las sustancias orgánicas como inorgánicas, los microorganismos y partículas más grandes como la arena y arcilla. Altas concentraciones impiden la penetración de la luz, disminuyen el oxígeno disuelto, limitan el desarrollo de la vida acuática. Los sólidos disueltos afectan negativamente la calidad del agua para consumo humano, altas concentraciones pueden ocasionar reacciones fisiológicas desfavorables en los consumidores. Los ST son los residuos de materia sólida, orgánica e inorgánica, contenida en el agua que quedan en un recipiente después de la evaporación de una muestra y su posterior secado en estufa a temperatura definida (103-105 °C).

2.5.1.3 Sólidos suspendidos totales. Fracción de sólidos totales retenida sobre un filtro con un tamaño de poro específico medido después de que ha sido secado a una temperatura específica (103-105 °C).

2.5.1.4 Turbiedad. Se define como la dificultad del agua para transmitir la luz, debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos e incluso microorganismos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. El aporte al agua de vertimientos con altas concentraciones de sólidos en suspensión, coloidales o finos, aumenta la turbiedad, se disminuye la

transparencia, impidiendo la penetración de la luz, disminuyendo la incorporación del oxígeno disuelto por la fotosíntesis, afectando la calidad y productividad de los ecosistemas. La medición de la turbiedad se realiza mediante un turbidímetro nefelómetro. Los resultados se expresan en unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).

2.5.1.5 Conductividad eléctrica. Es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la presencia de iones que provienen de una base, un ácido o una sal, disociadas en iones. La conductividad y la dureza son dos parámetros cuyos valores están relacionados y reflejan el grado de mineralización de las aguas y su productividad potencial. Un aumento en la conductividad de las aguas naturales afecta la productividad de los ecosistemas. La unidad de medida es micro siemens por centímetro. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

2.5.2 Parámetros químicos¹². El agua, como solvente natural, tiene sustancias químicas disueltas que le proveen ciertas características. Las sustancias disueltas participan en una serie de reacciones químicas que le dan propiedades químicas y biológicas particulares al agua. Para efectos del estudio se determinarán las siguientes características químicas.

2.5.2.1 Demanda Química de Oxígeno (DQO). Es la medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente en una muestra de agua susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. El vertimiento de aguas residuales domésticas o industriales incrementa el contenido de materia orgánica en el agua, aumentando la DQO con la consecuente disminución del oxígeno disuelto. Las aguas residuales

¹² Metcalf y Heddy (1997) "Ingeniería de las Aguas Residuales" tratamiento vertido y reutilización, tercera edición volumen I, Capítulo 3, Editorial McGraw-Hill.

domésticas suelen contener entre 250 y 600 mg/l de DQO. Las aguas no contaminadas tienen valores de 1 a 5 mg/l.

2.5.2.2 Potencial de hidrógeno (pH). Expresa la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución. El pH del agua natural depende de la concentración de CO₂. Se debe a la composición de los terrenos donde pasa el agua. El pH alcalino indica que los suelos son calizos y el ácido que son silicios. Vertimientos ácidos, pH<6 en corrientes de agua con baja alcalinidad ocasionan disminuciones del pH del agua natural por debajo de los valores de tolerancia de las especies acuáticas (pH entre 5 y 9), lo mismo sucede con vertimientos alcalinos pH > 9. El vertido de pH ácido, disuelve los metales pesados y el pH alcalino los precipita. El pH se mide como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno.

2.5.2.3 Oxígeno disuelto: Se define con la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, expresado en mg de oxígeno por litro de agua. Los niveles de oxígeno disuelto en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. Además, es función de la temperatura, la presión y la altura sobre el nivel del mar, (tablas XXV y XXVI del apéndice), se presentan valores de oxígeno disuelto a diferentes temperaturas, presión y altura sobre el nivel del mar.

2.5.2.4 Fosfatos. Las especies químicas de fósforo más comunes en el agua son los ortofosfatos, los fosfatos condensados (piro-, meta- y polifosfatos) y los fosfatos orgánicos. Estos fosfatos pueden estar solubles como partículas de detritus o en los cuerpos de los organismos acuáticos. Es común encontrar fosfatos en el agua. Son nutrientes de las vidas acuáticas y limitantes del crecimiento de las plantas. Sin embargo, su presencia está asociada con la

eutrofización de las aguas, con problemas de crecimiento de algas indeseables en embalses y lagos, con acumulación de sedimentos, etcétera. Para una buena interpretación de la presencia de fosfatos en las fuentes de aguas crudas, es recomendable la diferenciación analítica de las especies químicas existentes en ellas. La fuente principal de los fosfatos orgánicos son los procesos biológicos. Éstos pueden generarse a partir de los ortofosfatos en procesos de tratamiento biológico o por los organismos acuáticos del cuerpo hídrico. Otra fuente importante de fosfatos en las aguas superficiales son las descargas de aguas que contienen como residuo detergentes comerciales. Concentraciones relativamente bajas de complejos fosforados afectan el proceso de coagulación durante el tratamiento del agua. Las normas de calidad de agua no han establecido un límite definitivo. Sin embargo, es necesario estudiar la concentración de fosfatos en el agua y su relación; aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua con la productividad biológica y los problemas que éstos pueden generar en el proceso de filtración y en la producción de olores.

2.5.2.5 Nitratos. Pueden provenir de las rocas que los contengan (poco común), o bien por oxidación bacteriana de la materia orgánica, principalmente, de las eliminadas por los animales. La concentración aumenta en las aguas superficiales por el uso de fertilizantes y el aumento de la población (vertimientos de aguas residuales domésticas). El aumento en la concentración de nitratos limita el uso del agua para consumo humano. Desde el punto de vista de potabilidad, las normas actuales admiten hasta 50 mg/l de nitratos, concentraciones superiores son perjudiciales para la salud.

2.5.3 Parámetros biológicos¹³. El agua contaminada con materia orgánica e inorgánica desarrolla actividad biológica. Los microorganismos degradan la materia orgánica en materia celular y componentes más simples. Para efectos del estudio se realizaran los siguientes análisis biológicos.

2.5.3.1 Demanda bioquímica de oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica por acción bioquímica aerobia. Se expresa en mg/l. Esta demanda es ejercida por las sustancias carbonadas, las nitrogenadas y ciertos compuestos químicos reductores. Es una prueba que reduce a números un fenómeno natural, muy sencillo en teoría, pero en esencia muy complejo. El cálculo se efectúa mediante la determinación del contenido inicial de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días en otra muestra semejante, conservada en un frasco cerrado a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos corresponde a la DBO₅.

2.5.3.2 Coliformes totales¹⁴. Los coliformes son bacterias que habitan en el intestino de los mamíferos y también se presentan como saprofitos en el ambiente, excepto la *Escherichia*, que tiene origen intestinal. Los coliformes tienen todas las características requeridas para ser un buen indicador de contaminación. Este grupo de microorganismos pertenece a la familia de las entero bacteriáceas. Se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa a 35-37 °C en un lapso de 24-48 horas y producir ácido y gas. Los siguientes géneros conforman el grupo coliforme: *Klebsiella*, *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Serratia*. De este grupo, la *Escherichia* y ocasionalmente la *Klebsiella* tienen la capacidad de fermentar la lactosa no solo a las temperaturas indicadas, sino

¹³ Pelczar y otros; Fundamentos de microbiología, cuarta edición, México: McGraw-Hill, 1982, pp 220.

¹⁴ Wachsman, M. otros, Aplicación de diferentes técnicas de recuento para bacterias de importancia sanitaria. Abril de 2006. Área de microbiología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, Argentina.

también a 44,5 °C. A los miembros de este grupo se les denomina coliformes termo tolerantes (fecales).

Se denomina coliformes termo tolerante a ciertos miembros del grupo de bacterias coliformes totales que están estrechamente relacionados con la contaminación fecal. Por este motivo, antes recibían la denominación de coliformes fecales. Estos coliformes, generalmente, no se multiplican en los ambientes acuáticos.

2.6 Índices de calidad

El aumento en los niveles de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas ha generado la necesidad de cuantificar y evaluar la calidad de los cuerpos de agua. Por otra parte, debido a las diferencias de interpretación entre los encargados de tomar decisiones, los expertos en el tema y del público en general, existe un esfuerzo creciente para desarrollar un sistema indicador que agrupe los parámetros contaminantes más representativos dentro de un marco de referencia unificado.

El índice de calidad, como forma de agrupación simplificada de algunos parámetros, indicadores de un deterioro en la calidad del agua, es una manera de comunicar y evaluar la calidad de los cuerpos de agua. Sin embargo, para que dicho índice sea práctico debe reducir la enorme cantidad de parámetros a una forma más simple, y durante el proceso de simplificación algo de información se sacrifica. Por otro lado, si el diseño del índice es adecuado, el valor arrojado puede ser representativo e indicativo del nivel de contaminación y comparable con otros para enmarcar rangos y detectar tendencias.

Los índices son expresiones simplificadas de un conjunto de variables y han resultado ser eficaces para transmitir información sobre calidad del agua a quienes toman decisiones y al público. Existen diferentes índices de calidad del agua, entre los más conocidos se encuentran los índices biológicos, como el índice Saprobic y los físico-químicos. Los más conocidos son el Índice de Calidad del Agua WQI, y el Índice Simplificado de la Calidad del Agua ISCA. Los que se usaran en este estudio.

2.6.1 **Índice de Calidad del Agua WQI¹⁵**. Este índice puede generarse utilizando ciertos elementos básicos en función de los usos del agua, el “WQI”, define la aptitud del cuerpo de agua respecto de los usos prioritarios que éste pueda tener. Estos Índices son llamados de “Usos Específicos”.

El WQI fue desarrollado por la fundación de Sanidad Nacional¹⁶ de los Estados Unidos (NSF), para comparar la calidad del agua de los ríos en varios estados de los Estados Unidos, el índice estándar llamado WQI (*Water Quality Index*) que en español se conoce como: índice de calidad del agua.

Este índice es ampliamente utilizado entre todos los índices de calidad de agua existentes, fue diseñado en 1970, y puede ser utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo, comparando la calidad del agua de diferentes tramos del mismo río, además de compararlos con la calidad de agua de diferentes ríos alrededor del mundo. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo en

¹⁵ Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

¹⁶ CANTER, L.W.(1998). Manual de Evaluación del Impacto Ambiental. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto. 2da. Edición. Editorial McGraw - Hill Interamericana de España.

particular de dicho río, es adecuado o no para el aprovechamiento del agua para consumo humano.

2.6.1.1 **Parámetros del Índice WQI** En el diseño para la determinación del “WQI” interviene nueve parámetros físicos, químicos y biológicos los cuales se presentan en la tabla I.

Tabla I. Parámetros para el cálculo del índice WQI

Parámetro	Factor peso.
Oxígeno disuelto	0.17
Coliformes fecales	0.15
pH	0.12
Demanda bioquímica de oxígeno	0.10
Cambio de temperatura	0.10
Fosfatos	0.10
Nitratos	0.10
Turbiedad	0.08
Sólidos totales	0.08

Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

2.6.1.2 **Método para la estimación del índice de calidad WQI.** Existen dos modelos matemáticos propuestos para determinar el índice. El de técnicas multiplicativas ponderadas y el de la suma lineal ponderada. En este caso se usará la técnica multiplicativa ponderada con la asignación de pesos específicos, obteniéndose a partir de una media geométrica:

$$WQI = \sum_{i=1}^9 Q_i^{w_i} \quad (1)$$

Donde:

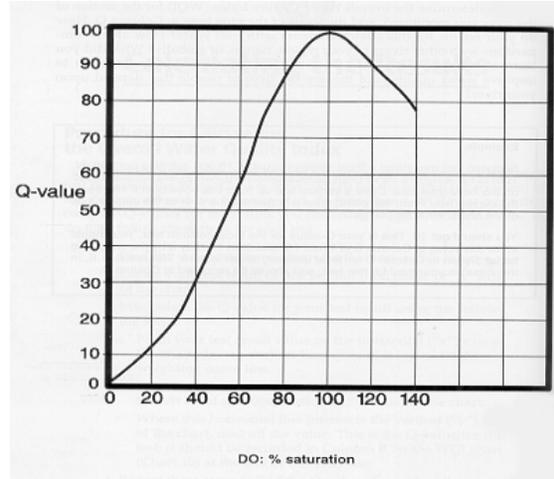
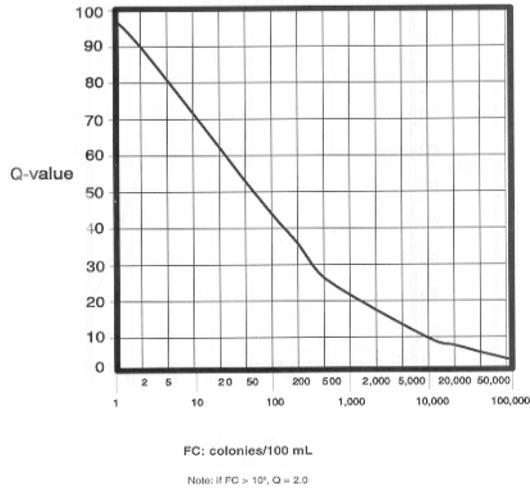
W_i = son los pesos específicos asignados a cada parámetro (i), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno, los valores se presentan en la tabla I.

Q_i = es la calidad del parámetro (i), determinada en función de su concentración, cuya calificación oscila entre 0 y 100, Los valores se obtienen de la figuras 3 a la 11.

= representa la operación multiplicativa de la variable Q elevadas al factor w_i .

El valor de WQI de la ecuación (1) es un número entre 0 y 100 que califica la calidad, a partir del cual y en función del uso del agua, permite estimar el estado del agua del río con relación a su calidad.

Figura 3. Factor para coliformes fecales. Figura 4. Factor para oxígeno disuelto



Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

Figura 5. Factor para pH

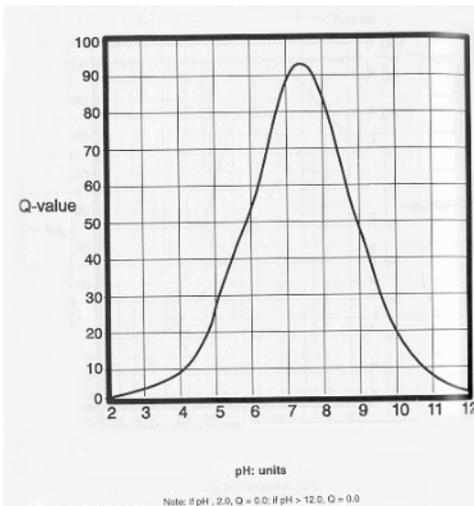
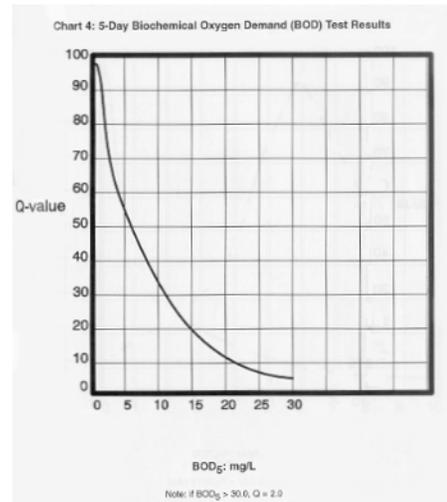


Figura 6. Factor para DBO₅



Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

Figura 7. Factor para temperatura

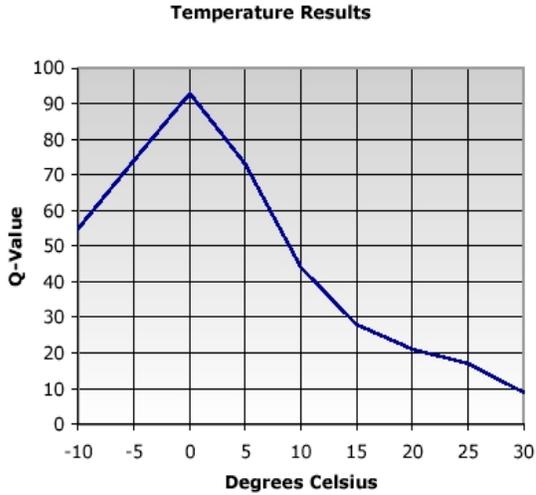
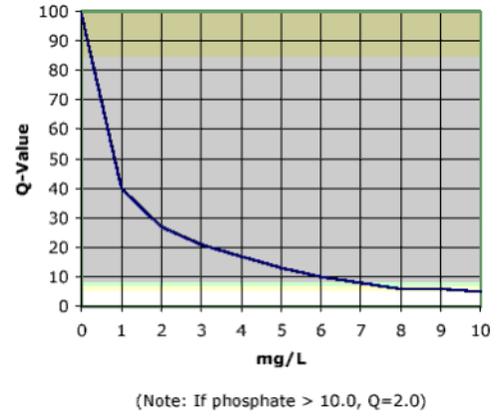


Figura 8. Factor para fosfatos



Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

Figura 9. Factor para nitratos

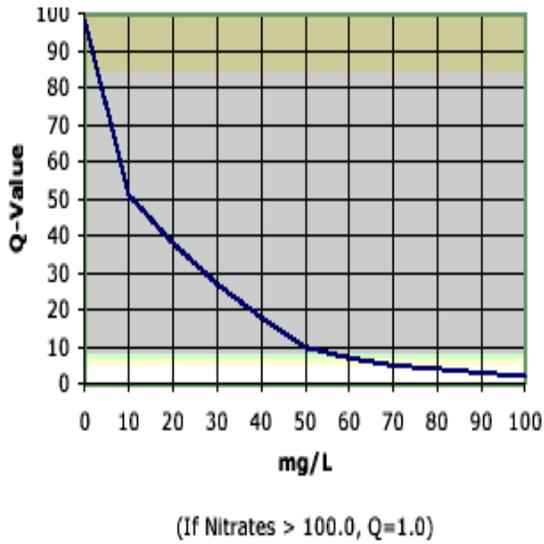
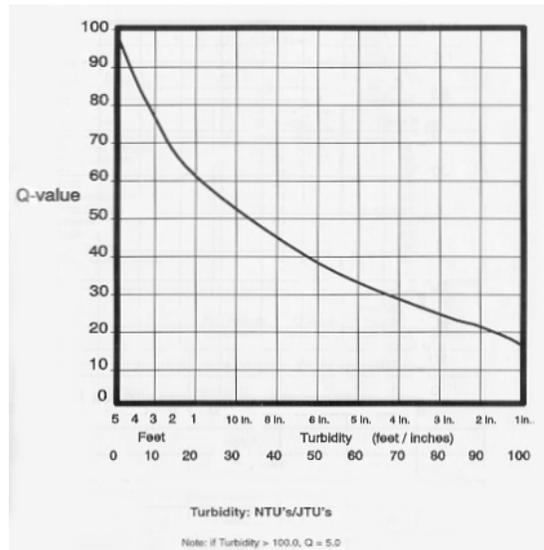
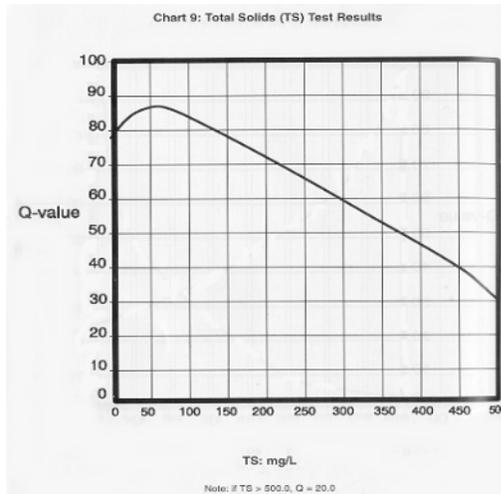


Figura 10. Factor para turbiedad



Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

Figura 11 Factor para solidos totales



Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

2.6.1.3 **Interpretación del WQI.** El índice se basa en el resumen de nueve parámetros físicos, químicos y biológicos en una escala de 0 a 100 puntos, con las características descritas en la figura 12. La interpretación de los resultados son:

Figura: 12 Rangos de calificación del WQI en función del consumo humano del agua

CALIDAD DE AGUA	COLOR	RANGO VALOR
EXCELENTE		91 A 100
BUENA		71 A 90
REGULAR		51 A 70
MALA		26 A 50
PÉSIMA		0 A 25

Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

Tabla II. Interpretación de los valores del índice WQI.

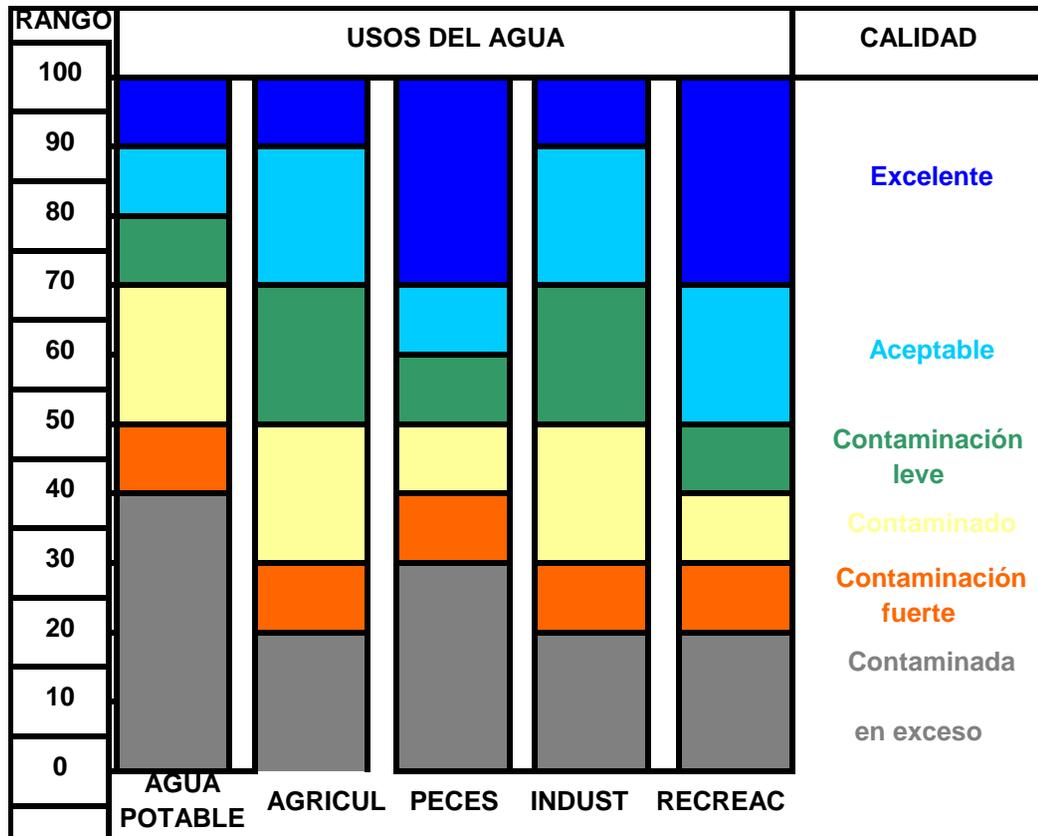
WQI	CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
90- 100	EXCELENTE	El agua, es capaz de poseer una alta diversidad de vida acuática. Además, también sería conveniente para todas las formas de contacto directo con ella.
70-90	BUENA	La calidad del agua ha disminuido la diversidad de la vida acuática. Presenta una leve contaminación
50-70	REGULAR	Las aguas tienen, generalmente, menos diversidad de organismos acuáticos y han aumentado con frecuencia el crecimiento de las algas.
25-50	MALA	Las aguas pueden solamente apoyar una diversidad baja de la vida acuática y están experimentando, probablemente, problemas con la contaminación.
0-25	PÉSIMA	Las aguas pueden solamente poder apoyar un número limitado de las formas acuáticas de la vida, presentan problemas abundantes y, normalmente, no sería considerado aceptable para las actividades que implican el contacto directo con ella, tal como natación.

Fuente: Cálculo de NSF Índice de Calidad del Agua, http://www_water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.

De acuerdo con las características físicas, químicas y biológicas del agua, resumidas en el índice de calidad. Dinius¹⁷ presenta los resultados del índice, según el uso que puede darse al agua. Como se observa en la figura 13.

¹⁷ Dinius, S. H. (1987) "Disign of a Water Quality Index" W:R: V23 #5 833-843

Figura 13. Usos del agua según nivel de índice de calidad



Fuente: Dinius, S. H. (1987) "Disign of a Water Quality Index" W:R: V23 #5 833-843

2.6.2 Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISCA)¹⁸, Este índice permite asignar un valor a la calidad a la calidad del agua utilizando un número limitado de parámetros. Tienen la ventaja de ser fáciles de usar y proporcionan una idea rápida e intuitiva de la calidad, pero son arbitrarios y pueden inducir a error debido a su reduccionismo. Si se utilizan otros índices complementarios se tiene una idea más adecuada y completa de la calidad.

¹⁸ Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISQA)
http://mediambient.gencat.net/aca/es//aiguamediri/rius/indexs_qualitat.jsp

2.2.2.1 Método para la determinación del ISCA¹⁹. Este método utiliza cinco parámetros físicos y químicos de tipo general, como son la temperatura, DQO, los sólidos suspendidos totales, el oxígeno disuelto y la conductividad eléctrica, según la fórmula:

$$\text{ISQA} = T * (\text{A} + \text{B} + \text{C} + \text{D}) \quad (2)$$

T se deduce de la temperatura (t) en °C del agua del río.
Puede adquirir valores de 1 a 0,8.

$$\text{Si } t \leq 20^{\circ}\text{C} \text{ entonces } T = 1 \quad (3)$$

$$\text{Si } t > 20^{\circ}\text{C} \text{ entonces } T = 1 - (t - 20) * 0,0125 \quad (4)$$

A se deduce de la oxidabilidad al permanganato (DQO), (a) expresada en mg/l.
Puede adquirir valores de 0 a 30.

$$\text{Si } a \leq 10 \text{ entonces } A = 30 - a \quad (5)$$

$$\text{Si } 60 > a > 10 \text{ entonces } A = 21 - (0,35 * a) \quad (6)$$

$$\text{Si } a > 60 \text{ entonces } A = 0 \quad (7)$$

B se deduce a partir de los sólidos suspendidos totales (SST) en mg/l.
Puede adquirir valores de 0 a 25.

¹⁹ Hernández. M. A. (1988) Depuración de Aguas Residuales. 4ta edición. Madrid: Paraninfo S.A. España pp. 99-171.

$$\text{Si SST} \leq 100 \text{ entonces } B = 25 - (0,15 * \text{SST}) \quad (8)$$

$$\text{Si } 250 > \text{SST} > 100 \text{ entonces } B = 17 - (0,07 * \text{SST}) \quad (9)$$

$$\text{Si SST} > 250 \text{ entonces } B = 0 \quad (10)$$

C se deduce a partir del oxígeno disuelto (O_2) en mg/l.

Puede adquirir valores de 0 a 25.

$$C = 2,5 * O_2 \text{ disuelto} \quad (11)$$

$$\text{Si } O_2 \text{ disuelto} \leq 10 \text{ entonces } C = 25 \quad (12)$$

D se deduce de la conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{S/cm}$ (c) a 18°C . Si la conductividad se ha medido a 25°C , para convertirla a 18°C se debe multiplicar por 0,86 los valores de D pueden adquirir valores de 0 a 20.

$$\text{Si conductividad} \leq 4000 \text{ entonces } D = (3,6 - \log c) * 15,4 \quad (13)$$

$$\text{Si es } > 4000 \text{ entonces } D = 0 \quad (14)$$

2.2.2.2 Interpretación del ISQA. El índice se basa en el resumen de cinco parámetros físicos y químicos en una escala de 0 a 100 puntos, con las características descritas en la tabla III.

Tabla III. Significado de los valores del ISQA

ISCA	Categoría	Descripción
90 – 100	Excelente	La calidad del agua está protegida, se da por sentado una ausencia total de amenazas; las condiciones son cercanas a los niveles naturales.
80 – 90	Buena	La calidad del agua está protegida contra un menor grado de amenazas; las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseados.
70 – 80	Intermedia	La calidad del agua es ocasionalmente afectada; las condiciones a veces no cumplen con los niveles deseados.
60 – 70	Admisible	La calidad del agua es frecuentemente afectada; las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados.
0 – 60	Inadmisible	La calidad del agua es continuamente afectada; las condiciones no cumplen con los niveles deseados.

Fuente: Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISQA)
http://mediambient.gencat.net/aca/es//aiguamedi/rius/indexs_qualitat.jsp

2.3 Procesos de auto depuración de ríos

Los ríos son las corrientes de agua continua que drena el agua superficial de una cuenca, subcuenca o micro cuenca, a través de los cauces formados naturalmente en la topografía del suelo, hacia otros cuerpos similares, lagos o bien océanos, denominados cuerpos receptores.

Las aguas residuales de los centros urbanos, de actividades agrícolas, pecuarias, forestal o industrial son drenadas a los ríos. Contaminando los

cuerpos de agua con materia orgánica e inorgánica. En un proceso natural de auto depuración se dan procesos físicos, químicos y biológicos, oxidando la materia orgánica por microorganismos aeróbicos, anaerobios y facultativos, transformando la materia orgánica biodegradable en compuestos más simples.

Existen varias teorías que explican los procesos de auto-purificación natural de las aguas en los ríos. Según Hernández 1998²⁰, el proceso de auto depuración en los ríos puede analizarse a través de la vida acuática, evaluando parámetros como el oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno. Porque la diversidad de los seres que viven en el agua, toman el oxígeno disuelto en el agua para desarrollar sus procesos biológicos.

Según Thomann (1972) citado por Hernández²¹, los modelos de oxígeno disuelto (OD) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) han sido ampliamente utilizados para predecir la calidad del agua para la formulación de planes de manejo de los recursos hídricos.

La teoría de la oxidabilidad de la materia orgánica, en corrientes de agua, para su auto purificación fue desarrollada por Streeter y Phelps²² 1925, En el estudio sobre la contaminación y purificación natural del río Ohio. Ésta teoría servirá de base para el estudio de la calidad del agua en ríos y su auto purificación.

²⁰ Hernández M. A. (1998) "Depuración de aguas residuales" Madrid: Editorial Paraninfo S. A. España, 4ta edición, pp 99-171, 197

²¹ Ibidem Hernández. Pp. 105

²² Streeter y Phelps "A Study Of The Pollution And Natural Purification Of The Ohio River. Factors Concerned in the Phenomena of Oxidation and Reaeration, United States Public Health Service - Public Health Bulletin No. 146 February, 1925, 69 pp, version electronica.

Las aguas contaminadas de los ríos llevan materia orgánica, inorgánica y microorganismos. Entre los principales procesos naturales que se desarrollan están la actividad biológica en la cual se da el proceso químico de la degradación de la materia orgánica e inorgánica en compuestos simples, como se explica a través de los ciclos del carbono, azufre, fósforo y nitrógeno. También se desarrollan procesos físicos como la solubilidad del oxígeno en el agua, que es influida por fenómenos de transporte de gas líquido y de temperatura.

En este sentido, la capacidad de las corrientes de agua para recibir y oxidar la materia orgánica de las aguas residuales, depende de sus fuentes de oxígeno, las condiciones climáticas, el tipo de materia orgánica e inorgánica y del tipo y cantidad de microorganismos y de las condiciones hidrológicas.

Para el análisis del fenómeno de auto purificación de las corrientes de agua se establecen los siguientes principios.²³

- La capacidad de un río para recibir y oxidar las aguas residuales depende de sus recursos de oxígeno.
- El fenómeno de la purificación natural de los ríos se da en condiciones ideales.
- Las condiciones de análisis del fenómeno purificación natural del río se establecen en condiciones estables de flujo permanente.
- El estado de equilibrio que determina la condición momentánea de la corriente cambia constantemente, es decir, se plantean dos momentos: la real y la condición momentánea.

²³ Ibidem. Streter y Phelps.

- La condición de un río contaminado en cualquier momento, es el resultado de un equilibrio entre los contaminantes transportados por el río y los procesos de degradación.
- La oxidabilidad de la materia orgánica se fundamenta en la ley de la reacción química de primer orden que indica que “la tasa de oxidación bioquímica de la materia orgánica es proporcional a la concentración de la sustancia no oxidada, medido en términos de oxidabilidad”.

2.3.1 Análisis de oxígeno en un cuerpo de agua. En una corriente de agua el oxígeno es el factor energético esencial para los seres vivos.

Los procesos que incrementan y consumen oxígeno en los ríos se presentan en la tabla IV. Los cambios del contenido de oxígeno en el río están relacionados con los cambios bioquímicos, debido a la oxidación de la materia orgánica procedente de aguas residuales y otras fuentes.

Tabla IV. Factores que intervienen en el balance de oxígeno

INCREMENTAN OXÍGENO	CONSUMEN OXÍGENO
Aportación de cauce	Materia orgánica en suspensión
Aportación del vertido	Lodos depositados en fondo
Reaireación superficial	Respiración de organismos vivos
Acción Fotosintética	Respiración de algas
Descenso de la temperatura	Elevación de la temperatura
Dilución por corrientes no contaminadas	Contaminación añadida
	Incremento de salinidad.

Fuente: Hernández M. A. (1998) Depuración de aguas Residuales. Madrid: Editorial Paraninfo S. A. 4ta edición, pp 99

Los aportes de oxígeno a la corriente de agua se dan por varios fenómenos, como el vertido de caudales al cauce del río y por reaeración superficial.

- El aporte por el vertido de caudales al cauce. Este aporte provoca una dilución o bien una mayor concentración del contenido de oxígeno en el río y se determina la nueva concentración por la suma de la multiplicación del caudal por la concentración del aporte y del cauce y todo se divide por la suma de caudales.
- La reaeración superficial. Este proceso es el más importante debido al fenómeno de transporte del oxígeno presente en el aire en contacto con el agua y la solubilidad del gas oxígeno en el agua. Este proceso es condicionado por la temperatura, la presión atmosférica, la materia soluble o suspendida en el agua y al área de contacto agua aire.

2.3.1.1 Demanda de oxígeno. Según Streeter y Phelps 1925.²⁴ La tasa de oxidación bioquímica de la materia orgánica es proporcional a la concentración de la sustancia no oxidada. La ley planteada en forma de modelo matemático.

$$-dL/dt = k_1 L \quad (15)$$

Integrando la ecuación diferencial

$$L = L_0 * e^{k_1 t} \quad (16)$$

²⁴ Ibidem. Streeter y Phelps.

Donde: L y L_0 es la demanda bioquímica de la materia orgánica en el punto final e inicial respectivamente, t el tiempo transcurrido para que un elemento de flujo de agua llegue desde el punto inicial al punto final y k_1 es el coeficiente cinético de la velocidad de degradación de la materia orgánica. La constante k_1 depende del tipo de materia orgánica que se degrada, del tipo y cantidad de microorganismos presentes.

En el proceso de degradación de la materia orgánica; la demanda de oxígeno se da en términos de oxígeno disuelto. Entonces, la tasa de oxidación de la materia ($-dL/dt$) es equivalente a la tasa de agotamiento del oxígeno en el agua, que sería el déficit de oxígeno de saturación en el agua, por lo que es la tasa de agotamiento (dD_1/dt) expresada en la relación.

$$-dL/dt = k_1 L = dD_1/dt \quad (17)$$

Es importante indicar que la velocidad de degradación de materia orgánica está definida por el coeficiente k_1 el cual depende del tipo de materia, los microorganismos y, esencialmente, de la temperatura.

Otros estudios han demostrado que el coeficiente de degradación de la materia orgánica k_1 está relacionado con la temperatura por la ecuación:

$$k'_1/k_1 = 1.047^{(T' - T)} \quad (18)$$

Donde: k'_1 y T' es el coeficiente cinético de degradación determinada en estudios a $T = 20$ °C. Y k_1 y T el coeficiente cinético de degradación de la materia a la temperatura del agua.

2.3.1.2 Aporte de oxígeno al río. Lewis y Whitman 1924, citado por Hernández (1988)²⁵, describen que la tasa de transferencia del gas en el agua es proporcional a la diferencia entre la concentración de saturación y la concentración instantánea del oxígeno en el cuerpo de agua y el área de contacto. Como se observa en la ecuación.

$$dO_r/dt = K_L A (C_S - C_t) \quad (19)$$

Donde:

dO_r/dt es la tasa de reoxigenación en términos de concentración de saturación y de oxígeno disuelto.

K_L es el coeficiente de difusión del oxígeno en una lámina de agua

A es el área de interfase por unidad de volumen de líquido

C_S es la concentración de saturación del gas disuelto en la superficie de interfase gas líquido mg/l

C_t es la concentración instantánea del gas disuelto en el cuerpo de agua

La ecuación (19), no es posible de resolver en términos de la concentración de saturación y concentración de oxígeno en el agua. Una forma alterna es plantear la tasa de reoxigenación en términos del déficit de oxígeno. Como se observa en la figura 14, la tasa de reoxigenación es proporcional al déficit de oxígeno, éste se define como la diferencia entre la concentración de saturación y del oxígeno disuelto a condiciones ambientales.

$$D = C_S - C_o. \quad (20)$$

²⁵ Ibidem. Hernández M. A.

Donde; D es el déficit de oxígeno, C_S es la concentración de saturación del oxígeno en el agua y C_o la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. De tal manera que:

$$\frac{dD_2}{dt} = -k_2 D \quad (21)$$

Donde:

D = déficit de saturación de oxígeno del agua en mg/l

$\frac{dD_2}{dt}$ = Tasa de reoxidación en términos de déficit de saturación

k_2 = Coeficiente cinético de reoxigenación.

Al integrar la ecuación diferencial se obtiene:

$$D_t = D_0 e^{(k_2 t)} \quad (22)$$

Donde D_t y D_0 déficit de oxígeno en el punto final e inicial respectivamente; k_2 es el coeficiente cinético de reoxigenación, que depende del área de interfase por unidad de volumen del líquido y del coeficiente de difusión del gas en el agua.

La solubilidad del oxígeno en el agua es afectada por la altura sobre el nivel del mar, la temperatura y la presión atmosférica. (Tablas IV y V del apéndice). Se presentan valores de presión en función de la altura y los valores de la concentración de saturación del oxígeno como función de la presión y la temperatura del agua.

2.3.1.3 Balance de oxígeno. Para la comprensión de los procesos de reoxigenación y desoxigenación en las corrientes de agua se plantea el balance de masa. Según Streeter y Phelps,²⁶ las dos reacciones opuestas de reoxigenación y desoxigenación, tienden siempre a llegar a una condición de equilibrio temporal.

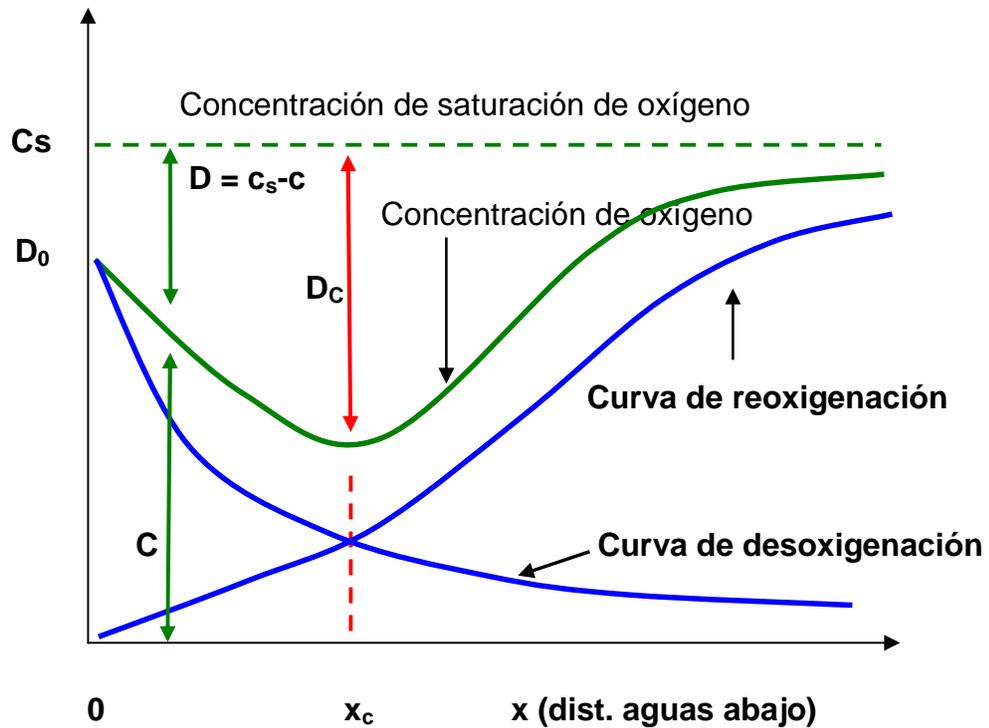
Si el agua está saturada de oxígeno y altamente contaminada, sucede una rápida pérdida de oxígeno (desoxidación) y una lenta tasa de restitución (reoxigenación), lo que resulta en una lenta disminución en la disponibilidad de oxígeno disuelto (concentración de oxígeno disuelto en el agua). Este valor inicialmente disminuye, debido que la tasa de velocidad de reoxigenación es mayor comparada con la tasa de velocidad de desoxigenación.

Las dos reacciones alcanzan el punto de equilibrio momentáneo, al disminuir la demanda de oxígeno, debido a la degradación de la materia orgánica. Después del equilibrio momentáneo, la tasa de reoxigenación es mayor que la tasa de desoxidación, entonces la concentración de oxígeno disuelto en el agua aumenta hasta alcanzar los niveles de saturación a las condiciones ambientales. Este proceso se da en condiciones ideales cuando no existen otros aportes de contaminación, como se observa en la figura 14.

De acuerdo con lo planteado, la tasa de cambio en el déficit de oxígeno se rige por las dos ecuaciones independientes. En primer lugar, el déficit aumenta a un ritmo que puede ser proporcional a la demanda de oxígeno de la materia orgánica (desoxidación).

²⁶ Ibidem. Streeter y Phelps.

Figura 14. Concentración de oxígeno en agua de ríos



Fuente: Fuentes de oxígeno en un río.
<http://www.fing.edu.uy/~danielg/repart/O2encursos.doc>

En segundo lugar disminuye a un ritmo proporcional a la oferta de oxígeno (reoxigenación). Como se expresa en las ecuaciones.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dD_1}{dt} = -k_1 L \quad (23)$$

y

$$\frac{dD_2}{dt} = -k_2 D \quad (24)$$

Donde:

t = tiempo de la reacción en días

L = demanda de oxígeno de la materia orgánica expresada en mg/l

D = déficit de saturación de oxígeno del agua en mg/l

$\frac{dD_1}{dt}$ = Tasa de desoxidación en términos de déficit de saturación

$\frac{dD_2}{dt}$ = Tasa de reoxidación en términos de déficit de saturación

k_1 = Coeficiente cinético de desoxigenación

k_2 = Coeficiente cinético de reoxigenación

La tasa neta de cambio en el déficit de oxígeno (D) en cualquier momento es igual a la suma lineal de las tasas de desoxigenación y reoxigenación²⁷, de la forma:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dD_1}{dt} + \frac{dD_2}{dt} \quad (25)$$

$$\frac{dD}{dt} = k_1 L - k_2 D \quad (26)$$

Resulta una ecuación diferencial lineal con variable dependiente (D) e independiente (t) de la forma:

$$\frac{dy}{dx} + Py = Q(x) \quad (27)$$

La integral para la tasa neta de cambio en el déficit de oxígeno, derivada de la ecuación diferencial lineal, resulta ser:

$$D = \frac{k_1 L_0}{k_2 - k} \left(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t} \right) + D_0 e^{-k_2 t} \quad (28)$$

Donde:

²⁷ Jolánkai, Géza. "Basic river water quality models" Technical Documents in Hydrology No. 13, International Hydrological Programme, UNESCO, París 1997. 50 pp.

D_0 = oxígeno disuelto inicial de déficit de saturación del agua mg/l.

D = déficit de saturación, en mg/l. después de tiempo (t).

L_0 = inicial de demanda de oxígeno de la materia orgánica del agua, en mg/l

k_1 = coeficiente de definición de la tasa de desoxigenación.

k_2 coeficiente de definición de la tasa de reoxigenación.

t = tiempo transcurrido, en días.

e = base de logaritmos naturales = 2,71828

El déficit crítico de oxígeno disuelto D_c en el punto x_c es importante desde el punto de vista técnico. El déficit crítico puede determinarse porque la tasa de utilización de oxígeno es igual a la de reaireación en dicho punto.

$$D_c = \frac{k_1}{k_2} \left(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t} \right) + D_0 e^{-k_2 t} \quad (29)$$

$$D_c = k_1 [L_e - k_1 (x_c / v)] / k_2 \quad (30)$$

El valor de x_c puede determinarse diferenciando la ecuación anterior con respecto a x y haciendo que dD/dx sea igual a cero:

$$X_c = [v / (k_2 - k_1)] \ln(k_2 / k_1) [1 - D_0 (k_2 - k_1) / k_1 L] \quad (31)$$

y

$$t_c = x_c / v \quad (32)$$

Donde t_c es igual al tiempo requerido para alcanzar el punto crítico, x_c es la distancia y v velocidad media del agua en el río

2.4 Constante de auto depuración “f” De Fair

Basado en la condición hidráulica de la corriente, según Hernández²⁸, Fair definió que la constante de auto depuración “f” es:

$$f = \frac{k_2}{k_1} \quad (33)$$

Donde k_2 es el coeficiente de reaireación y k_1 es el coeficiente de descomposición bioquímica de la materia orgánica. En la tabla V se presentan los rangos respectivos.

Tabla V. Constante de auto depuración “f” de Fair

Tipo de corriente	Rango de “f”
Pequeños estanques	0.5 – 1
Corrientes remansadas, lagos	1 – 1.5
Corrientes lentas	1.5 – 2
Corrientes moderadas	2 – 3
Corrientes rápidas	3- 4
Rápidos y cascadas	4 - 5

Fuente: HERNÁNDEZ Muñoz, Aurelio. Depuración de aguas residuales. 4ª ed. Madrid: Paraninfo S.A. 1998. pp. 165.

2.4 Hidrología

Para medir los caudales en ríos y canales existen varios métodos y tecnologías para su aplicación. Según IMTA (1991)²⁹ Los métodos más usados son los de área y velocidad y la relación escala y gasto.

²⁸ HERNÁNDEZ M. A. “Depuración de Aguas Residuales” 4ª ed. Paraninfo S.A.: Madrid, España 1998. pp. 165.

El método de área velocidad, consiste en determinar el área de una sección transversal de la corriente y la velocidad media del agua, en donde

$$V = \text{espacio} / \text{tiempo} \quad (34)$$

$$Q = 0.9 * A * V \quad (35)$$

Donde: Q es el caudal m³/s. A es el área hidráulica de la sección transversal y V es la velocidad media. La velocidad se puede determinar por medio de las ecuaciones de equipos calibrados como molinetes. O bien por flotadores, midiendo el tiempo que recorre el flotador una distancia recta del cauce del río. El área hidráulica de la sección transversal se puede determinar por medio de secciones, subdividiendo el ancho del río y midiendo su respectiva profundidad.

El método escala gasto consiste en la selección de un tramo recto del río o canal, se determina el gasto para diferentes alturas de tirante de agua, que podría ser con el método área velocidad y con los datos se puede usar la ecuación:

$$Q = C_0 H^b \quad (36)$$

Donde Q caudal en volumen/tiempo, H altura de tirante, y C₀, y b se determinan por regresión lineal.

²⁹ IMTA (1991), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Manual de foros, Kenedy P. A. otros, colecciones manuales. Pág. 3-25

3. METODOLOGÍA

Para propósitos prácticos del estudio, para limitar el número de lugares de muestreo y facilitar la representación de los datos se decidió simplificar algunos aspectos del muestreo, tomando de base la clasificación de la cuenca del río Naranjo, en la parte alta, media y baja como lo describe Orozco (estudio realizado para FUNSOLAR 2007³⁰), el área tributaria definida por la estación hidrométrica de Corral Grande, el cauce principal del río Naranjo y por ser el área de mayor densidad poblacional en la cuenca, aunque esto abarca cinco sub cuencas. En este sentido se estableció un perfil longitudinal, se definieron tres puntos de muestreo a lo largo del cauce principal del río. Dentro del área tributaria de la parte alta de la cuenca del río Naranjo, definida por la estación hidrométrica de Corral Grande. Según este criterio pueden determinarse los impactos debido a las descargas de aguas residuales, la auto depuración natural y la dilución debido a los afluentes.

La realización del estudio sobre la calidad del agua en la parte alta de la cuenca del río Naranjo, fue necesario establecer los recursos, los materiales, las metodologías, los procedimientos y técnicas con respaldo técnico científico, que permitiera la seguridad de las diferentes actividades para obtener resultados confiables. Entre las principales actividades con sustento se tiene: la metodología de muestreo, la técnica de recolección de muestra, las técnicas de análisis de muestras en el laboratorio, los procedimientos de cálculo de

³⁰ Ibidem. FUNSOLAR, CADISNA, Holanda.

parámetros, de índices de calidad, de coeficientes cinéticos, hidrológicos y el análisis estadístico.

3.4 Recursos. El área tributaria definida por la estación hidrométrica de Corral Grande abarca parcialmente los municipios del departamento de San Marcos: Esquipulas Palogordo, San Marcos (Cabecera), San Pedro Sacatepéquez, San Antonio Sacatepéquez y Palestina de los Altos del departamento del Quetzaltenango, como se observa en la figura 2.

El estudio se realizó sobre el cauce principal del río Naranjo, en la parte alta. Este río nace en las cercanías de las montañas de San Pedro Sacatepéquez, con el nombre de Nahualá. Que drena parte de las aguas del municipio de San Pedro. En su trayecto se unen las sub cuencas de los ríos San Ramón, que drena las aguas del municipio de San Antonio; Tacaná, que drena las aguas de San Antonio y parte de Palestina; Alto Naranjo, que drena las aguas de San Marcos; Túrbala, drenan parte de las aguas de Palestina y Palatza, que drena las agua de San Marcos y Esquipulas Palogordo, como se observa en la figura 2. Las estaciones definidas están sobre el cauce principal del río Naranjo en la parte alta de la cuenca figura 15.

3.4.1 Ubicación de estaciones de muestreo. Los lugares donde se tomaron las muestras están referenciadas en las estaciones (figura 15).

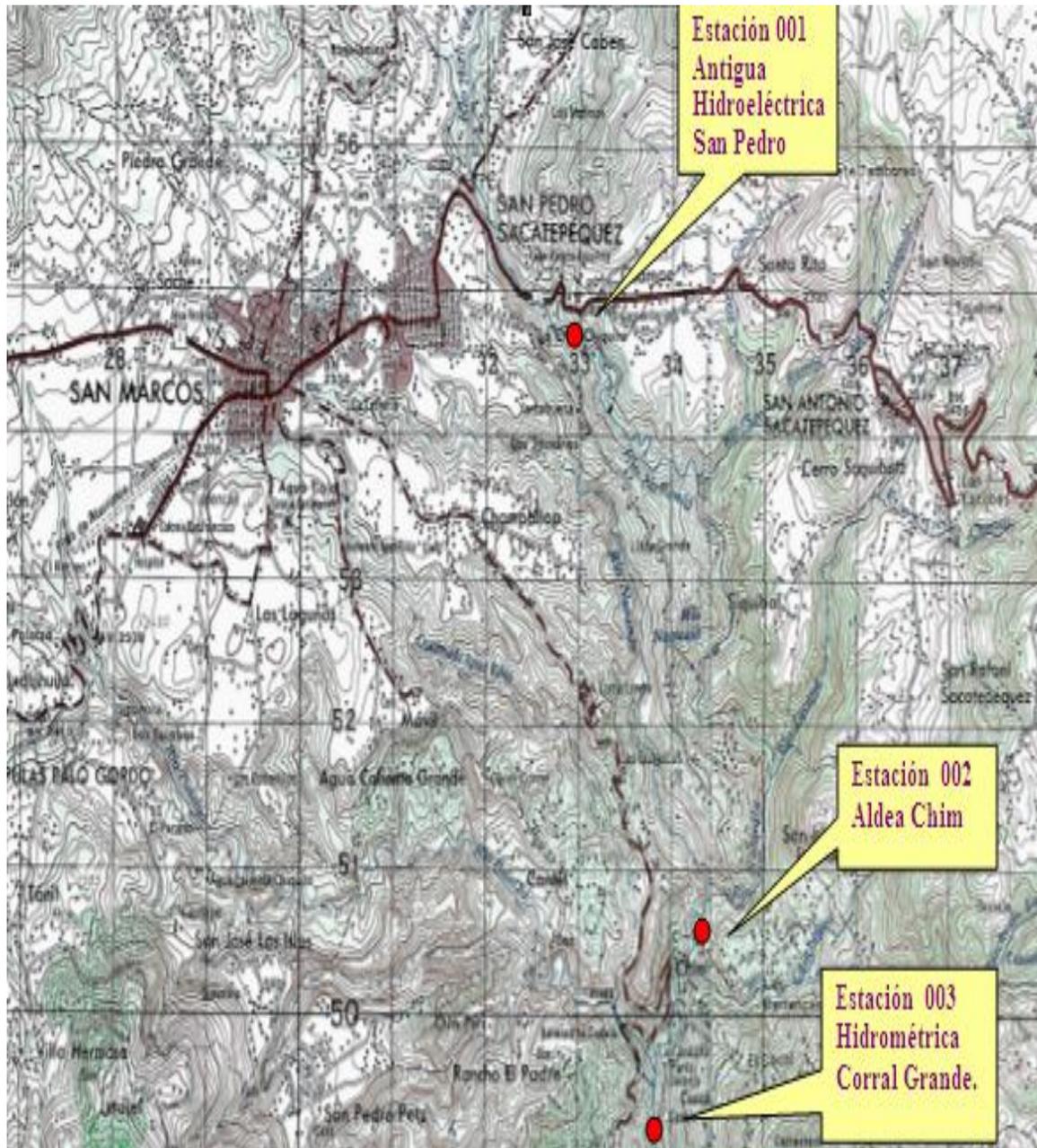
3.4.1.1 Estación 001, antigua planta hidroeléctrica de San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. Latitud 14°57'59" y longitud 91°46'04" a una altura de 2230 msnm.

3.4.1.2 Estación 002, aldea Chim, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. Latitud 14°55'39" y longitud 91°45'09" y una altura de 1810 msnm.

3.4.1.3 Estación 003, estación hidrométrica de Corral Grande, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. Latitud 14°54'04" y longitud 91°45'20" a una altura de 1750.88 msnm.

En las estaciones 001 y 002 se determinó el perfil hidráulico de la sección transversal del río, y la velocidad media del flujo. Y se colocó un limnómetro para medir la altura del agua del cauce del río que permitiera la medición del caudal por el método área velocidad. En la estación 003 se usó la ecuación generada por el INSIVUMEH para la estación hidrométrica de Corral Grande.

Figura 15 Ubicación de las estaciones de muestreo.



Fuente: IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1978. Mapa topográfico de la república de Guatemala; escala 1:25,000. Color. Hojas cartográficas No. III y IV

3.5 Análisis de muestras. Los análisis se realizaron en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina", de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.6 Técnicas y procedimientos

3.6.1 Muestreo estadístico. El número de muestras de agua que se tomó en cada punto de muestreo, para los análisis de laboratorio y determinación de los índices de calidad WQA, ISQA, los coeficientes cinéticos y la carga contaminante planteados en los objetivos del estudio. Se tomó de base los resultados de la desviación estándar obtenidos por De León³¹ en la determinación del índice ISQA, en tres estaciones de muestreo de un río en el occidente del país, los resultados de la desviación estándar variaron entre 8.33 a 12.99

De estos valores se tomó el menor valor de la desviación estándar, argumentando la menor variabilidad de la media muestral del índice ISQA. Además, se establece un nivel de confianza del 90 % ($z=1.645$) y un error de 5.

El análisis fundamentado en la determinación de la media muestral del ISQA, según Kazmier³² puede usarse la fórmula: $N = (z/E)^2$ Donde: N es el número de muestras, es la desviación estándar, z valor que se utiliza para el nivel de confianza y E el error, al sustituir los valores citados, se tiene que el

³¹ DE LEÓN Barrios Francisco Khalil. Estudio de calidad del agua del río Samalá del tramo Cantel – Zunil – El Palmar Quetzaltenango. Tesis de Maestro en Ciencias, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005.

³² Kazmier L. y otros, (1996), "Estadística aplicada a la administración y la economía" 2da edición. Editorial McGraw-Hill. México. pp145-162

número de muestras es de 8. Por recomendación se tomó un número de 10 muestreos en cada punto.

3.6.2 Toma de muestras. Se realizó de acuerdo con el método 1060 B de los métodos normalizados de la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, por sus siglas en inglés)³³, la Asociación Americana de Obras de Agua (AWWA) y la Federación de Control de la Contaminación del Agua (WPCF; ahora Federación de Ambientes Acuáticos, WEF), correspondientes a la edición oficial en español de la décimo séptima edición en inglés.

3.6.3 Determinación de los caudales. Los caudales en las estaciones 001 y 002 se determinaron por el método área velocidad³⁴. La velocidad se determinó por medio de un flotador, en un tramo recto del cauce, usando la ecuación (34). El área se determinó por integración numérica través del método de Simpson, usando las mediciones de profundidad y altura en una sección de perfil hidráulico.

Para la estación 003, se usó la ecuación proporcionada por el INSIVUMEH³⁵ en el boletín No. 19. Desarrollada para dicha estación.

$$Q = 5.42 * (H + 0.29)^{2.30} \quad (37)$$

³³ Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual. Ediciones Madrid: Diaz Santos S.A. 1992. pp. 1-1 a 6-13.

³⁴ ÍMTA. (1991), Manual de aforos, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Kenedy P. A. otros, colecciones de manuales. Pág. 3-25.

³⁵ BOLETÍN hidrológico No. 19. Información 2001-2007. Guatemala. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH 2007. pp. 50-95.

3.6.4 Técnicas de análisis. Los parámetros físicos químicos y biológicos, se determinaron por los métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, descritos en STANDARD³⁶ Methods for the Examination of Water & Waste Water,

3.6.5 Cálculo del Índice de Calidad del Agua WQI. El índice de calidad del agua en la parte alta del río Naranjo, se determinó en tres momentos, a) por fecha de muestreo, b) por estación de control y c) correlacionando los resultados de las tres estaciones para obtener el índice calidad del agua del río Naranjo en el área objeto de estudio.

Con los resultados de los análisis de laboratorio, se seleccionaron los parámetros requeridos para el cálculo del WQI. Luego, para cada parámetro, se determinó el factor de calidad correspondiente, enseguida se determinaron los factores de ponderación. Con el factor de calidad, el factor de ponderación y la ecuación (1) se determinó el índice WQI para cada fecha de muestreo en cada estación.

3.6.6 Calculo del Índice Simplificado de Calidad ISQA. La determinación del ISQA. Se realizó en tres momentos a) por fecha de muestreo, b) por estación de muestreo y c) Correlacionando las tres estaciones de muestreo.

Con los resultados de los análisis de laboratorio, se seleccionaron los parámetros requeridos para el cálculo del ISQA, con las ecuaciones de la (3) a la (14) se obtuvieron los factores de calidad para cada parámetro. Y con la ecuación (2), se determinó el ISQA, para cada fecha y estación de muestreo.

³⁶ STÁNDAR Methods for the Examination of Water & Wastewater.18ª ed. Maryland: Victor Graphics, Inc., 1992. pp. 1-100.

Luego de la determinación de los índices WQI e ISQA, se correlacionaron los resultados para cada estación.

3.6.7 Calculo de los coeficientes cinéticos k_1 y k_2 : La determinación se realizó en dos fases: primero, se determinó el tramo con la mejor correlación de variables entre las estaciones de muestreo 001, 002 y 003. Segundo, se determinaron los coeficientes cinéticos.

En los tramos para la determinación de los coeficientes cinéticos se correlacionaron los parámetros físicos, químicos y biológicos entre las estaciones y se seleccionó el tramo con los mejores coeficientes de correlación entre las estaciones.

El cálculo de los coeficientes cinéticos se divide en dos partes; primero, la determinación del coeficiente cinético de descomposición bioquímica de materia orgánica k_1 , (desoxidación). Segundo, la determinación del coeficiente cinético de reaireación k_2 .

Con los resultados de los análisis de laboratorio se seleccionaron los parámetros requeridos para el cálculo de los coeficientes cinéticos.

Para determinar el coeficiente de descomposición bioquímica k_1 . Primero haciendo uso del mapa cartográfico, escala 1:50,000, se determinó la distancia del cauce del río entre las estaciones 001 y 002 y de ésta a la 003.

Con la distancia, la velocidad media entre las estaciones y la ecuación (32), se determinó el tiempo de recorrido de un diferencial de volumen de agua de la estación 001 a la estación 002 y de ésta a la estación 003. Segundo, se

determinó el “Coeficiente cinético de descomposición bioquímica de la materia orgánica” (coeficiente cinético de desoxidación). Con los datos de la demanda bioquímica de oxígeno, en las estaciones 001 (denominada punto inicial) y 002 (denominada punto final), el tiempo de recorrido del diferencial de volumen de agua entre las estaciones y al despejar k_1 de la ecuación (16), se determinó el coeficiente cinético de desoxidación por fecha y por estación.

Para determinar el coeficiente cinético de reaireación k_2 . Primero, se determinó el oxígeno disuelto a presión y temperatura de saturación (OD_{pts}) a las condiciones de presión ambiental y temperatura del agua para cada estación y fecha de muestreo, realizando las interpolaciones correspondientes; luego con la ecuación (20), los datos de oxígeno de saturación, de oxígeno disuelto se determinó el déficit de oxígeno, para cada estación y por fecha de muestreo. Segundo, con la ecuación (28), los datos del coeficiente de descomposición de la materia orgánica (k_1), la demanda bioquímica de oxígeno, el déficit de oxígeno y el tiempo de recorrido entre las dos estaciones. Usando la serie de aproximación de Newton se determinó el coeficiente de reaireación.

3.3.8 Cálculo de la carga contaminante. La carga contaminante se refiere a la cantidad de los sólidos, de los nutrientes, de la demanda bioquímica de oxígeno, de la demanda química de oxígeno y el oxígeno disuelto expresada en kilogramos de materia por día. La carga contaminante, se determinó multiplicando la concentración de la carga por el caudal.

4. RESULTADOS

Los resultados de los parámetros obtenidos *in situ* y de laboratorio, se presentan para cada estación de muestreo. Estación 001, antigua planta hidroeléctrica de San Pedro Sacatepéquez. Estación 002, aldea Chim, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. Estación 003, estación hidrométrica de Corral Grande, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos. Siguiendo la secuencia longitudinal del cauce del río, como se observa en las tablas de la VI a la XV.

En la tabla XVI se presentan los resultados *in situ* y de laboratorio. De los nueve parámetros por estación y por fecha de muestreo, requeridos, para determinar el Índice de calidad del agua (WQI), según la NSF, de los Estados Unidos.

En la tabla XVII se presentan los resultados obtenidos del Índice WQI por estación y fecha de muestreo, el comportamiento del índice se observa en la figura 16.

En la tabla XVIII se presentan los resultados *in situ* y de laboratorio, de los cinco parámetros, por estación y por fecha de muestreo, requeridos para determinar el Índice Simplificado de Calidad del Agua (ISQA).

En la tabla XIX se presentan los resultados del ISQA por estación y fecha de muestreo. El comportamiento del índice para cada estación y fecha de muestreo se observa en la figura 17.

En las figuras de la 18 a la 31 se presenta el comportamiento de cada parámetro utilizado para la determinación del WQI y del ISQA. Para cada estación y fecha de muestreo.

En las figuras de la 32 a la 34 se presentan los coeficientes de correlación al relacionar los resultados de los índices ISQA Y WQI. Entre las estaciones 001, 002 y 003.

En las figuras de la 35 a la 38 se presentan los resultados de los mejores coeficientes de correlación al relacionar los parámetros entre las estaciones 001 y 002 y los parámetros entre las estaciones 002 y 003. Para seleccionar el tramo entre las estaciones con los mejores coeficientes de correlación; para determinar los coeficientes cinéticos de auto depuración del río en la parte alta del Naranjo.

En la tabla XX se presentan los resultados *in situ* y de laboratorio, de los parámetros físicos, químicos e hidrológicos, por estación y fecha de muestreo, requeridos para determinar los coeficientes cinéticos k_1 (desoxigenación) y k_2 (reaireación) y la constante de auto depuración de Fair en la parte alta de la cuenca del río Naranjo.

En la tabla XXI se presentan los resultados de la carga contaminante expresada en Kg./día de sólidos, nutrientes, reaireación y materia orgánica biodegradable por estación y fecha de muestreo así como el comportamiento de la carga contaminante en las figuras de la 39 a la 46.

En la figura 47 se presentan el comportamiento del caudal del río en las estaciones de muestreo en las fechas de muestreo.

4.1 ANÁLISIS DE LABORATORIO Y DE CAMPO

Tabla VI. Resultados de los parámetros del primer muestreo realizado el 26 de marzo de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	145.00	126.00	129.00
Sólidos suspendidos	mg/l	61.79	9.33	6.00
Nitratos	mg/l	1.40	2.20	2.90
Fosfatos	mg/l	3.38	3.08	4.05
Turbiedad	UTN	23.20	8.50	5.31
Sólidos totales	mg/l	263.00	224.00	303.00
DQO	mg/l	115.00	32.00	17.00
DBO	mg/l	26.80	3.40	1.00
Conductividad eléctrica	µS/cm.	273.00	238.00	243.00
Ph	U. pH	6.97	7.00	7.00
Oxígeno disuelto	mg/l	0.97	1.18	3.82
Oxígeno disuelto	%	14.80	17.00	59.50
Temperatura agua	°C	14.20	17.30	22.90
Temperatura ambiente	°C	14.30	25.30	30.00
Coliformes totales *	NMP/100ML	2400	2400	2400
Coliformes fecales *	NMP/100ML	2400	2400	2400
Altura de caudal.	cms	16.00	46.00	45.00
Cambio de temperatura	°C	0.10	8.00	7.10

Tabla VII. Resultados de los parámetros del segundo muestreo realizado el 30 de marzo de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	136.00	129.00	130.00
Sólidos suspendidos	mg/l	54.17	12.29	9.00
Nitratos	mg/l	0.90	2.40	2.60
Fosfatos	mg/l	3.40	5.00	3.75
Turbiedad	UTN	36.60	10.60	5.40
Sólidos totales	mg/l	261.00	221.00	228.00
DQO	mg/l	58.00	25.00	14.00
DBO	mg/l	39.00	10.60	4.80
Conductividad eléctrica	µS/cm.	256.00	243.00	246.00
Ph	U. pH	7.00	7.40	7.50
Oxígeno disuelto	mg/l	2.50	3.10	3.40
Oxígeno disuelto	%	38.73	40.05	52.25
Temperatura agua	°C	14.00	15.60	21.00
Temperatura ambiente	°C	16.00	18.90	24.50
Coliformes totales *	NMP/100ML	20000	36000	23000
Coliformes fecales *	NMP/100ML	20000	36000	7000
Altura	cms	25.50	45.00	49.00
Cambio de temperatura	°C	2.00	3.30	3.50

Tabla VIII. Resultados de los parámetros del tercer muestreo realizado el 2 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	148.00	130.00	129.00
Sólidos suspendidos	mg/l	84.00	12.50	42.31
Nitratos	mg/l	2.00	2.40	2.80
Fosfatos	mg/l	7.10	8.95	2.65
Turbiedad	UTN	49.50	7.96	20.10
Sólidos totales	Mg/l	185.00	185.00	227.00
DQO	Mg/l	86.00	28.00	20.00
DBO	Mg/l	62.60	23.60	7.80
Conductividad eléctrica	µS/cmI	279.00	245.00	243.00
pH	U. pH	6.99	7.00	7.41
Oxígeno disuelto	mg/l	4.67	3.82	3.27
Oxígeno disuelto	%	68.00	59.30	50.60
Temperatura agua	°C	14.70	20.90	22.60
Temperatura ambiente	°C	15.00	23.40	24.30
Coliformes totales	NMP/100ML	35000	1500	2800
Coliformes fecales	NMP/100ML	36000	360	300
Altura	cms	25.00	45.50	45.00
Cambio de temperatura	Δ°C	0.30	2.50	1.70

Tabla IX. Resultados de los parámetros del cuarto muestreo realizado el 6 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	126.00	123.00	133.00
Sólidos suspendidos	mg/l	79.05	23.18	17.43
Nitratos	mg/l	1.60	2.40	2.80
Fosfatos	mg/l	3.80	3.55	3.40
Turbiedad	UTN	47.70	15.00	9.87
Sólidos totales	mg/l	264.00	214.00	237.00
DQO	mg/l	63.00	48.00	35.00
DBO	mg/l	48.20	15.60	9.60
Conductividad eléctrica	µS/cm.	240.00	232.00	252.00
pH	U. pH	7.65	7.49	7.61
Oxígeno disuelto	mg/l	2.98	3.04	2.45
Oxígeno disuelto	%	46.90	47.10	38.40
Temperatura agua	°C	15.70	20.70	23.20
Temperatura ambiente	°C	16.60	22.50	25.50
Coliformes totales	NMP/100ML	2100000	460000	240000
Coliformes fecales	NMP/100ML	110000	460000	240000
Altura	cms	23.00	48.00	46.00
Cambio de temperatura	°C	0.90	1.80	2.30

Tabla X. Resultados de los parámetros del quinto muestreo realizado el 9 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	145.00	130.00	129.00
Sólidos suspendidos	mg/l	68.80	10.40	30.40
Nitratos	mg/l	1.80	2.90	2.80
Fosfatos	mg/l	2.55	5.00	2.80
Turbiedad	UTN	58.00	8.84	17.20
Sólidos totales	mg/l	257.33	172.00	230.67
DQO	mg/l	65.00	40.00	20.00
DBO	mg/l	41.20	21.20	5.00
Conductividad eléctrica	µS/cm.	273.00	245.00	243.00
pH	U. pH	7.65	7.68	7.65
Oxígeno disuelto	mg/l	2.71	3.03	2.38
Oxígeno disuelto	%	39.40	48.40	38.10
Temperatura agua	°C	12.20	22.30	24.30
Temperatura ambiente	°C	13.00	25.58	26.20
Coliformes totales	NMP/100ML	4600000	230000	150000
Coliformes fecales	NMP/100ML	360000	90000	43000
Altura	cms	22.50	45.50	46.00
Cambio de temperatura	°C	0.80	3.28	1.90

Tabla XI. Resultados de los parámetros del sexto muestreo realizado el 13 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	115.00	109.00	121.00
Sólidos suspendidos	mg/l	156.00	85.22	56.88
Nitratos	mg/l	1.20	1.40	1.30
Fosfatos	mg/l	2.80	2.30	10.75
Turbiedad	UTN	142.00	91.50	46.60
Sólidos totales	mg/l	292.00	281.00	261.00
DQO	mg/l	54.00	23.00	32.00
DBO	mg/l	51.80	16.40	9.80
Conductividad eléctrica	µS/cm.	216.00	206.00	228.00
pH	U. pH	7.49	7.41	7.40
Oxígeno disuelto	mg/l	2.00	2.65	2.25
Oxígeno disuelto	%	32.30	39.70	37.00
Temperatura agua	°C	14.00	18.60	22.50
Temperatura ambiente	°C	16.60	21.00	24.50
Coliformes totales	NMP/100ML	>24196000	2723000	1421000
Coliformes fecales	NMP/100ML	985000	31000	41000
Altura	cms	22.50	44.00	49.00
Cambio de temperatura	°C	2.60	2.40	2.00

Tabla XII. Resultados de los parámetros del séptimo muestreo realizado el 16 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	122.00	123.00	115.00
Sólidos suspendidos	mg/l	72.00	42.40	40.00
Nitratos	mg/l	3.25	4.00	3.50
Fosfatos	mg/l	2.40	2.48	2.25
Turbiedad	UTN	42.20	19.20	23.50
Sólidos totales	mg/l	278.00	62.40	105.20
DQO	mg/l	61.00	29.00	35.00
DBO	mg/l	42.20	8.80	15.80
Conductividad eléctrica	μS/cm.	231.00	233.00	217.00
pH	U. pH	7.50	7.00	7.40
Oxígeno disuelto	mg/l	3.64	3.04	3.40
Oxígeno disuelto	%	55.20	47.10	52.25
Temperatura agua	°C	14.50	20.70	21.00
Temperatura ambiente	°C	16.90	24.50	24.50
Coliformes totales	NMP/100ML	19863000.00	2046000.00	10000.00
Coliformes fecales	NMP/100ML	292000.00	31000.00	<10000
Altura	cms	22.50	45.00	50.00
Cambio de temperatura	°C	2.40	3.80	3.50

Tabla XIII. Resultados de los parámetros del octavo muestreo realizado el 20 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	116.00	130.00	131.00
Sólidos suspendidos	mg/l	32.50	17.00	25.00
Nitratos	mg/l	3.25	4.00	4.50
Fosfatos	mg/l	3.65	3.20	2.00
Turbiedad	UTN	21.80	10.10	14.60
Sólidos totales	mg/l	215.00	165.00	214.00
DQO	mg/l	37.00	31.00	21.00
DBO	mg/l	25.80	24.60	9.40
Conductividad Eléctrica	μS/cm.	218.00	245.00	246.00
pH	U. pH	7.00	7.00	7.42
Oxígeno disuelto	mg/l	4.84	5.25	5.44
Oxígeno disuelto	%	61.60	71.60	77.30
Temperatura agua	°C	14.90	18.70	20.70
Temperatura ambiente	°C	15.00	19.70	22.30
Coliformes totales	NMP/100ML	1700000	464000	404000
Coliformes fecales	NMP/100ML	20000	<10000	<10000
Altura	cms	25.50	46.00	45.00
Cambio de temperatura	°C	0.10	1.00	1.60

Tabla XIV. Resultados de los parámetros del noveno muestreo realizado el 23 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	122.00	114.00	124.00
Sólidos suspendidos	mg/l	93.00	13.50	23.50
Nitratos	mg/l	4.00	4.25	4.50
Fosfatos	mg/l	3.48	3.65	3.35
Turbiedad	UTN	51.50	11.20	15.10
Sólidos totales	mg/l	307.00	109.00	254.00
DQO ₅	mg/l	80.00	33.00	26.00
DBO	mg/l	30.40	8.00	8.00
Conductividad eléctrica	μS/cm.	230.00	215.00	233.00
pH	U. pH	7.54	7.38	7.44
Oxígeno disuelto	mg/l	2.90	3.00	3.70
Oxígeno disuelto	%	45.15	47.50	56.60
Temperatura agua	°C	14.00	18.00	22.00
Temperatura ambiente	°C	19.00	23.00	25.00
Coliformes totales	NMP/100ML	>2419600	1203300	488400
Coliformes fecales	NMP/100ML	>2419600	25600	16900
Altura	cms	23.50	45.00	46.00
Cambio de temperatura	°C	5.00	5.00	3.00

Tabla XV. Resultados de los parámetros del décimo muestreo realizado el 27 de abril de 2008.

Parámetro	Unid.	Est. 001	Est. 002	Est. 003
Sólidos disueltos	mg/l	128.00	123.00	130.00
Sólidos suspendidos	mg/l	48.89	7.00	14.00
Nitratos	mg/l	4.00	4.75	4.50
Fosfatos	mg/l	5.25	2.80	1.60
Turbiedad	UTN	27.00	6.45	8.85
Sólidos totales	mg/l	276.00	202.00	205.00
DQO ₅	mg/l	74.00	28.00	26.00
DBO	mg/l	20.80	7.20	6.60
Conductividad eléctrica	μS/cm.	240.00	231.00	244.00
pH	U. pH	7.54	7.50	7.75
Oxígeno disuelto	mg/l	3.20	3.80	4.00
Oxígeno disuelto	%	49.95	59.00	61.30
Temperatura agua	°C	13.00	16.00	20.00
Temperatura ambiente	°C	19.00	23.00	25.00
Coliformes totales	NMP/100ML	>2419600	866400	344800
Coliformes fecales	NMP/100ML	139100	7400	7500
Altura	cms	27.00	47.50	45.00
Cambio de temperatura	°C	6.00	7.00	5.00

4.2 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA WQI

Tabla XVI. Parámetros para la determinación del índice general de calidad del agua

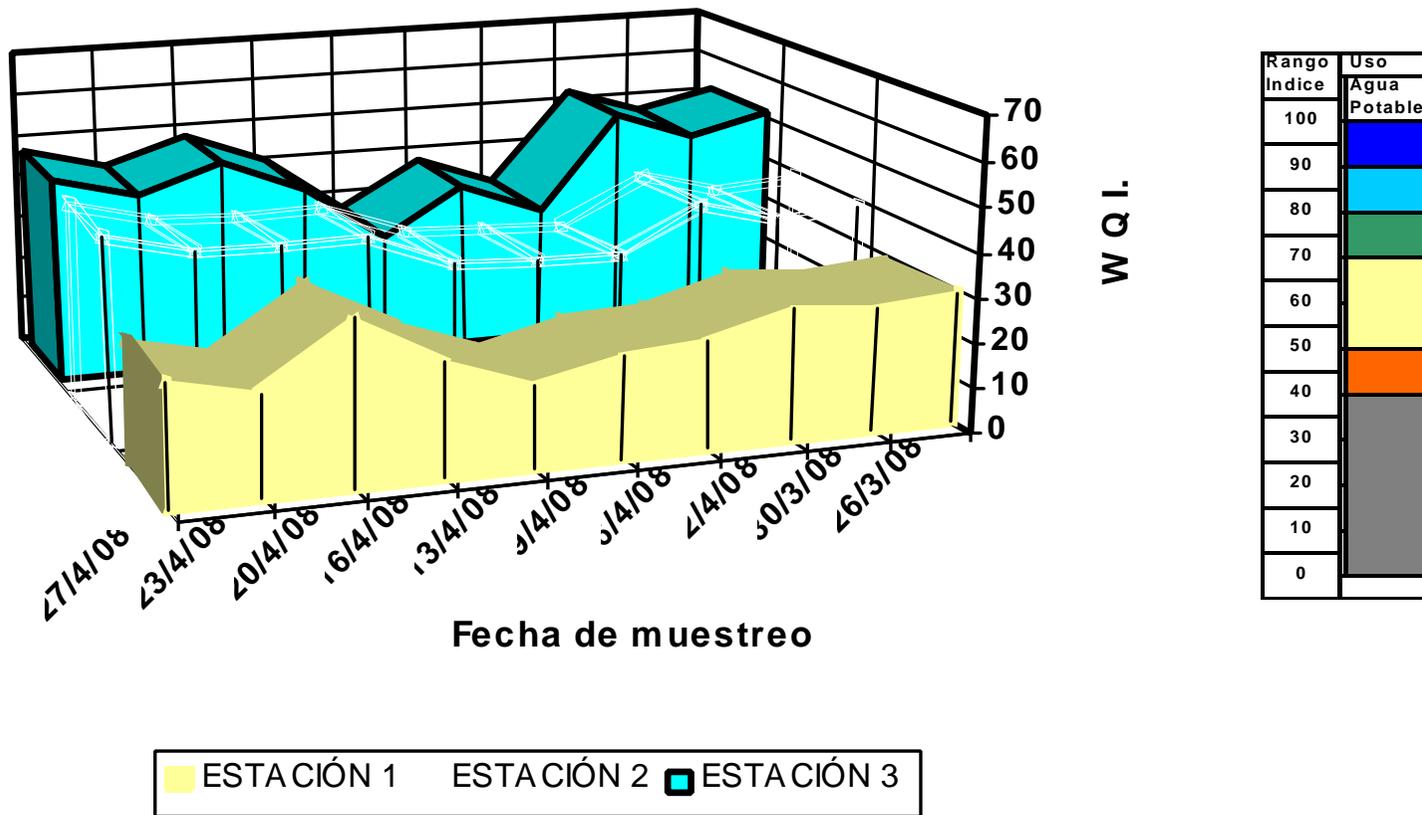
PARÁMETRO	ESTACIÓN	FECHA MUESTREO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		26/03/08	30/03/08	02/04/08	06/04/08	09/04/08	13/04/08	16/04/08	20/04/08	23/04/08	27/04/08
% OD	001*	14.80	38.73	68.00	46.90	39.40	32.30	55.20	61.60	45.15	49.95
	002**	17.00	40.05	59.30	47.10	48.40	39.70	47.10	71.60	47.50	59.00
	003***	59.50	52.25	50.60	38.40	38.10	37.00	52.25	77.30	56.60	61.30
Coli. Fec, NMP/100ml	001	2400	20000	36000	110000	360000	985000	292000	20000	2419600	139100
	002	2400	36000	360	460000	90000	31000	31000	<10000	25600	7400
	003	2400	7000	300	240000	43000	41000	<10000	<10000	16900	7500
pH	001	6.97	7.00	6.99	7.65	7.65	7.49	7.50	7.00	7.54	7.54
	002	7.00	7.40	7.00	7.49	7.68	7.41	7.00	7.00	7.38	7.50
	003	7.00	7.50	7.41	7.61	7.65	7.40	7.40	7.42	7.44	7.75
DBO mg/l	001	26.80	39.00	62.60	48.20	41.20	51.80	42.20	25.80	30.40	20.80
	002	3.40	10.60	23.60	15.60	21.20	16.40	8.80	24.60	8.00	7.20
	003	1.00	4.80	7.80	9.60	5.00	9.80	15.80	9.40	8.00	6.60
?º de Temp ºC.	001	0.10	2.00	0.30	0.90	0.80	2.60	2.40	0.10	5.00	6.00
	002	8.00	3.30	2.50	1.80	3.28	2.40	3.50	1.00	5.00	7.00
	003	7.10	3.50	1.70	2.30	1.90	2.00	3.00	1.60	3.00	5.00
Fostatos mg/l	001	3.38	3.40	7.10	3.80	2.55	2.80	2.40	3.65	3.48	5.25
	002	3.08	5.00	8.95	3.55	5.00	2.30	2.48	3.20	3.65	2.80
	003	4.05	3.75	2.65	3.40	2.80	10.75	2.25	2.00	3.35	1.60
Nitratos mg/l	001	1.40	0.90	2.00	1.60	1.80	1.20	3.25	3.25	4.00	4.00
	002	2.20	2.40	2.40	2.40	2.90	1.40	4.00	4.00	4.25	4.75
	003	2.90	2.60	2.80	2.80	2.80	1.30	3.50	4.50	4.50	4.50
Turbiedad UNT	001	23.20	36.60	49.50	47.70	58.00	142.00	42.20	21.80	51.50	27.00
	002	8.50	10.60	7.96	15.00	8.84	91.50	19.20	10.10	11.20	6.45
	003	5.31	5.40	20.10	9.87	17.20	46.60	23.50	14.60	15.10	8.85
S.T. mg/l	001	263.00	261.00	185.00	264.00	257.33	292.00	278.00	215.00	307.00	276.00
	002	224.00	221.00	185.00	214.00	172.00	281.00	62.40	165.00	109.00	202.00
	003	303.00	228.00	227.00	237.00	230.67	261.00	105.20	214.00	254.00	205.00

* Est.001 Antigua hidroeléctrica San Pedro ** Est. 002 aldea Chim *** Est. 003 Estación hidrométrica Corral Grande INSIVUMEH

Tabla XVII. Resultados del índice general de la calidad del agua.

ÍNDICE	ESTACIÓN	FECHA DE MUESTREO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		26/03/08	30/03/08	02/04/08	06/04/08	09/04/08	13/04/08	16/04/08	20/04/08	23/04/08	27/04/08
WQI	001	29.23	27.73	29.32	23.67	22.82	18.04	25.19	36.31	22.09	26.46
	002	37.98	36.37	41.85	31.19	31.68	32.83	40.08	39.76	40.29	45.44
	003	50.86	46.89	53.19	31.31	38.72	27.68	41.04	48.31	42.45	47.61

Figura 16. Índice de Calidad del Agua (WQI) por estación y fecha de muestreo



4.3 RESULTADOS DEL ÍNDICE SIMPLIFICADO DE LA CALIDAD DEL AGUA ISQA.

Tabla XVIII. Parámetros para el cálculo del Índice Simplificado de la Calidad de Agua

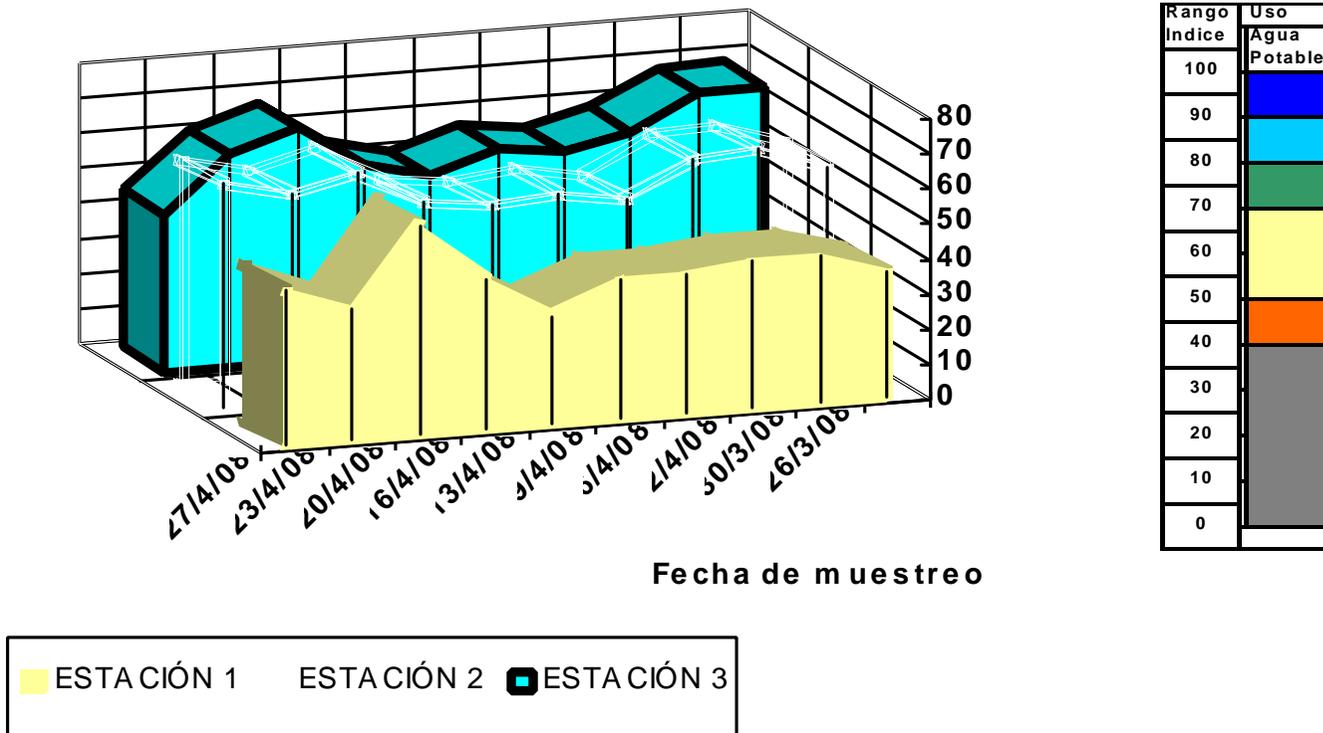
PARÁMETRO	ESTACIÓN	FECHA DE MUESTREO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		26/03/08	30/03/08	02/04/08	06/04/08	09/04/08	13/04/08	16/04/08	20/04/08	23/04/08	27/04/08
Temp. Ambiente °C.	001	14.30	16.00	15.00	16.60	13.00	16.60	14.50	15.00	19.00	19.00
	002	25.30	18.90	23.40	22.50	25.58	21.00	20.70	19.70	23.00	23.00
	003	30.00	24.50	24.30	25.50	26.20	24.50	21.00	22.30	25.00	25.00
Temp. De Agua °C.	001	14.20	14.00	14.70	15.70	12.20	14.00	14.50	14.90	14.00	13.00
	002	17.30	15.60	20.90	20.70	22.30	18.60	20.70	18.70	18.00	16.00
	003	22.90	21.00	22.60	23.20	24.30	22.50	22.50	20.70	22.00	20.00
DQO mg/l	001	115.00	58.00	86.00	63.00	65.00	54.00	61.00	37.00	80.00	74.00
	002	32.00	25.00	28.00	48.00	40.00	23.00	29.00	31.00	33.00	28.00
	003	17.00	14.00	20.00	35.00	20.00	32.00	35.00	21.00	26.00	26.00
Sól. Susp. mg/l	001	61.79	54.17	84.00	79.05	68.80	156.00	72.00	32.50	93.00	48.89
	002	9.33	12.29	12.50	23.18	10.40	85.22	42.40	17.00	13.50	7.00
	003	6.00	9.00	42.31	17.43	30.40	56.88	40.00	25.00	23.50	14.00
O.D. mg/l	001	0.97	2.50	4.67	2.98	2.71	2.00	3.64	4.84	2.90	3.20
	002	1.18	3.10	3.82	3.04	3.03	2.65	3.04	5.25	3.00	3.80
	003	3.82	3.40	3.27	2.45	2.38	2.25	3.40	5.44	3.70	4.00
C. E. µS/cm	001	273.00	256.00	279.00	240.00	273.00	216.00	231.00	218.00	230.00	240.00
	002	238.00	243.00	245.00	232.00	245.00	206.00	233.00	245.00	215.00	231.00
	003	243.00	246.00	243.00	252.00	243.00	228.00	217.00	246.00	233.00	244.00

Tabla XIX. Resultados del Índice Simplificado de la Calidad de Agua

ÍNDICE	ESTACIÓN	FECHA DE MUESTREO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		26/03/08	30/03/08	02/04/08	06/04/08	09/04/08	13/04/08	16/04/08	20/04/08	23/04/08	27/04/08
ISQA	001	36.079803	41.478105	41.852695	39.377604	39.378095	30.569412	42.340376	59.70277	37.369391	44.451414
	002	55.190715	61.858806	60.489882	50.240844	53.616268	51.598836	54.320446	64.371842	59.445448	63.690376
	003	67.401663	66.869599	57.595768	53.49038	55.915486	49.42713	53.967629	66.532303	60.067526	44.72342

ISQA = Índice Simplificado de Calidad del Agua.

Figura 17. Índice Simplificado de la Calidad del Agua ISQA, por estación y fecha de muestreo



4.4 RESULTADOS DE COEFICIENTES CINÉTICOS

Tabla XX. Parámetros y resultados de coeficientes cinéticos del agua.

PARAMETRO	ESTACION	FECHA DE MUESTREO										ANALISIS ESTADISTICO			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Valor	Valor	Promedio	Desv.
		26/03/08	30/03/08	02/04/08	06/04/08	09/04/08	13/04/08	16/04/08	20/04/08	23/04/08	27/04/08	Máximo	Mínimo	Aritm.	Est.
DBO mg/l	'001*	26.80	39.00	62.60	48.20	41.20	51.80	42.20	25.80	30.40	20.80	62.60	20.80	38.88	13.12
	'002**	3.40	10.60	23.60	15.60	21.20	16.40	8.80	24.60	8.00	7.20	24.60	3.40	13.94	7.44
	'003***	1.00	4.80	7.80	9.60	5.00	9.80	15.80	9.40	8.00	6.60	15.80	1.00	7.78	3.92
O.D. mg/l	'001	0.97	2.50	4.67	2.98	2.71	2.00	3.64	4.84	2.90	3.20	4.84	0.97	3.04	1.16
	'002	1.18	3.10	3.82	3.04	3.03	2.65	3.04	5.25	3.00	3.80	5.25	1.18	3.19	1.03
	'003	3.82	3.40	3.27	2.45	2.38	2.25	3.40	5.44	3.70	4.00	5.44	2.25	3.41	0.95
Temp. De Agua °C.	'001	14.20	14.00	14.70	15.70	12.20	14.00	14.50	14.90	14.00	13.00	15.70	12.20	14.12	0.98
	'002	17.30	15.60	20.90	20.70	22.30	18.60	20.70	18.70	18.00	16.00	22.30	15.60	18.88	2.23
	'003	22.90	21.00	22.60	23.20	24.30	22.50	22.50	20.70	22.00	20.00	24.30	20.00	22.17	1.28
O.D.pts mg/l	'001	9.71	9.75	9.60	9.40	10.13	9.75	9.64	9.56	9.75	9.96	10.13	9.40	9.73	0.20
	'002	9.10	9.40	8.45	8.48	8.23	8.86	8.48	8.84	8.95	9.32	9.40	8.23	8.81	0.39
	'003	8.02	8.31	8.07	7.98	7.81	8.08	8.08	8.36	8.16	8.48	8.48	7.81	8.14	0.20
Area m2	'001	0.8250	0.5638	0.5775	0.6325	0.6463	0.6463	0.6463	0.5638	0.6188	0.5225	0.8250	0.5225	0.6243	0.0828
	'002	0.6625	0.7000	0.6813	0.5875	0.6813	0.7375	0.7000	0.6625	0.7000	0.6063	0.7375	0.5875	0.6719	0.0453
	'003	2.5740	2.8028	2.5740	2.6312	2.6312	2.8028	2.8600	2.5740	2.6312	2.5740	2.8600	2.5740	2.6655	0.1118
Vel. m/s	'001	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.0000
	'002	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.6619	0.0000
	'003	1.0535	1.0920	1.0535	1.0629	1.0629	1.0920	1.1020	1.0535	1.0629	1.0535	1.1020	1.0535	1.0689	0.0189
Caudal m3/s	'001	0.3171	0.2167	0.2220	0.2431	0.2484	0.2484	0.2167	0.2378	0.2008	0.3171	0.2008	0.3171	0.2400	0.0318
	'002	0.4385	0.4633	0.4510	0.3889	0.4510	0.4882	0.4633	0.4385	0.4633	0.4013	0.4882	0.3889	0.4447	0.0300
	'003	2.7116	3.0607	2.7116	2.7967	2.7967	3.0607	3.1517	2.7116	2.7967	2.7116	3.1517	2.7116	2.8510	0.1716
Deficit de O mg/l	'001	8.74	7.25	4.93	6.42	7.42	7.75	6.00	4.72	6.85	6.76	8.74	4.72	6.68	1.24
	'002	7.92	6.30	4.63	5.44	5.20	6.21	5.44	3.59	5.95	5.52	7.92	3.59	5.62	1.13
	'003	4.20	4.91	4.80	5.53	5.43	5.83	4.68	2.92	4.46	4.48	5.83	2.92	4.72	0.82
Altura H	Est. 003	0.45	0.49	0.45	0.46	0.46	0.49	0.50	0.45	0.46	0.45	0.50	0.45	0.47	0.02
tiempo dias	tramo 1-2	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00
	tramo 2-3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
K1 d-1	tramo 1-2	-11.48	-7.25	-5.43	-6.28	-3.70	-6.40	-8.72	-0.26	-7.43	-5.90	-0.26	-11.48	-6.28	2.96
	tramo 2-3	-70.63	-46.75	-63.90	-28.17	-83.83	-30.38	34.73	-55.52	0.00	-5.02	34.73	-83.83	-34.95	36.67
K2 d-1	tramo 1-2	-11.83	-18.30	-33.00	-23.80	-18.50	-22.80	-21.80	-3.20	-15.80	-11.70	-3.20	-33.00	-18.07	8.15
	tramo 2-3	-133.00	-180.00	-340.00	-168.00	-290.00	-177.00	-68.80	-525.00	0.00	-81.80	0.00	-525.00	-196.36	153.05
k2/K1	tramo 1-2	1.03	2.53	6.08	3.79	5.01	3.56	2.50	*	2.13	1.98	6.08	1.03	3.18	1.59
	tramo 2-3	1.88	3.85	5.32	5.96	3.46	5.83	*	9.46	*	*	9.46	1.88	5.11	2.41

* Valores afectados por la diferencia de la DBO₅ entre las estaciones 001 y 002 y la 002 y 003, ver ecuaciones 16 y 28

4.5 RESULTADOS DE LA CARGA CONTAMINANTE

Tabla XXI. Resultados de la carga contaminante del agua

PARAMETRO	ESTACION	FECHA DE MUESTREO									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		26/03/08	30/03/08	02/04/08	06/04/08	09/04/08	13/04/08	16/04/08	20/04/08	23/04/08	27/04/08
DBO Kg/dia	'001	734.25	730.21	1200.56	1012.43	884.28	1111.79	905.74	483.06	624.72	360.92
	'002	128.82	424.35	919.54	524.15	826.03	691.72	352.29	932.06	320.27	249.66
	'003	234.29	1269.32	1827.43	2319.66	1208.16	2591.53	4302.42	2202.29	1933.05	1546.29
DQO Kg/dia	'001	3150.72	1085.95	1649.33	1323.30	1395.10	1159.01	1309.25	692.76	1643.99	1284.03
	'002	1212.43	1000.83	1090.99	1612.77	1558.55	970.09	1160.96	1174.55	1321.10	970.89
	'003	3982.86	3702.19	4685.72	8457.11	4832.63	8462.15	9530.67	4920.00	6282.42	6091.43
Fostatos kg/dia	'001	92.47	63.66	136.17	79.82	54.73	60.10	51.51	68.34	71.41	91.10
	'002	116.51	200.17	348.73	119.28	194.82	97.01	99.08	121.24	146.12	97.09
	'003	948.86	991.66	620.86	821.55	676.57	2842.75	612.69	468.57	809.47	374.86
Nitratos Kg/dia	'001	38.36	16.85	38.36	33.61	38.63	25.76	69.76	60.85	82.20	69.41
	'002	83.35	96.08	93.51	80.64	112.99	59.05	160.13	151.55	170.14	164.70
	'003	679.43	687.55	656.00	676.57	676.57	343.77	953.07	1054.29	1087.34	1054.29
S.T. Kg/dia	'001	7205.56	4886.79	3547.99	5545.27	5523.17	6267.22	5966.74	4025.52	6308.80	4789.10
	'002	8487.04	8847.34	7208.30	7190.25	6701.77	11851.98	2498.07	6251.62	4363.62	7004.25
	'003	70988.60	60292.80	53182.88	57266.72	55736.38	69019.39	28646.47	50137.16	61374.46	48028.59
Sol. Susp. Kg/dia	'001	1692.86	1014.18	1610.98	1660.38	1476.66	3348.24	1545.34	608.51	1911.14	848.31
	'002	353.63	491.84	487.05	778.89	405.22	3594.29	1697.41	644.11	540.45	242.72
	'003	1405.71	2379.98	9912.09	4211.30	7345.60	15040.15	10892.19	5857.15	5678.35	3280.00
Sol. Disuelt. Kg/dia	'001	3972.65	2546.37	2838.39	2646.61	3112.15	2468.26	2618.50	2171.91	2507.08	2221.03
	'002	4773.96	5164.28	5065.29	4132.71	5065.29	4597.39	4924.09	4925.52	4563.79	4264.96
	'003	30222.87	34377.47	30222.87	32137.02	31170.49	31997.50	31315.06	30691.44	29962.33	30457.16
Rel, DBO/DQO	'001	0.23	0.67	0.73	0.77	0.63	0.96	0.69	0.70	0.38	0.28
	'002	0.11	0.42	0.84	0.33	0.53	0.71	0.30	0.79	0.24	0.26
	'003	0.06	0.34	0.39	0.27	0.25	0.31	0.45	0.45	0.31	0.25

4.6 COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS EN LA PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO

Figura 18. Contenido del % O. D. del agua por estación y fecha de muestreo

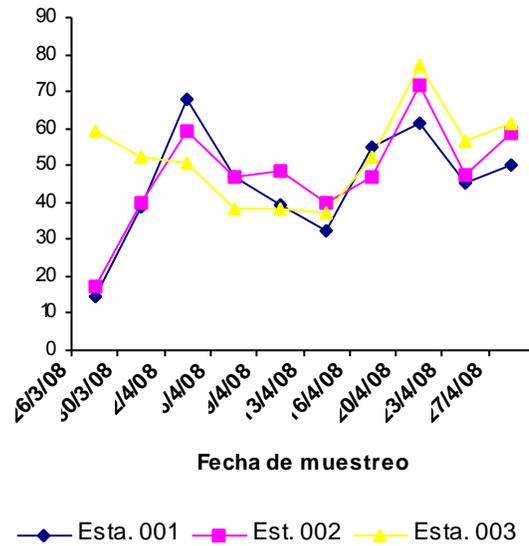


Figura 19. Coliformes totales del agua por estación y fecha de muestreo

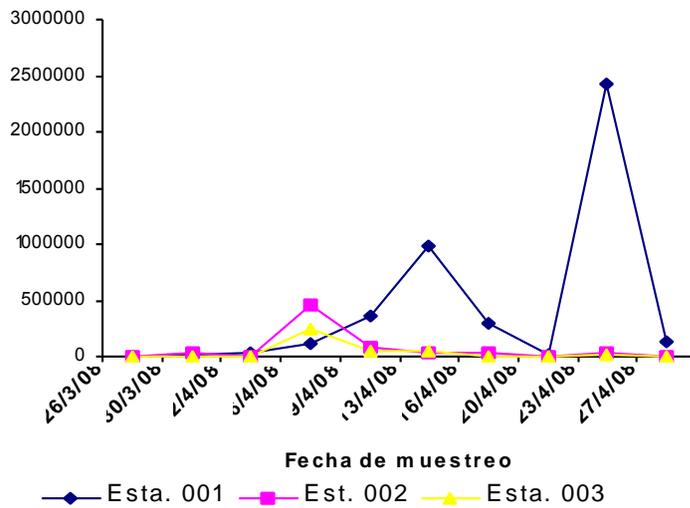


Figura 20. pH del agua por estación y fecha de muestreo

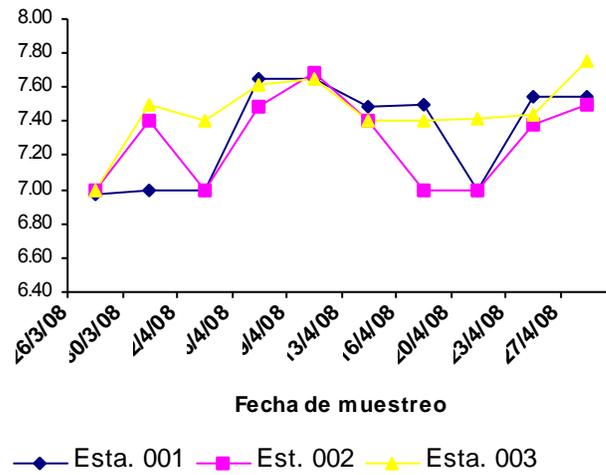


Figura 21. Demanda bioquímica de oxígeno del agua por estación y fecha de muestreo

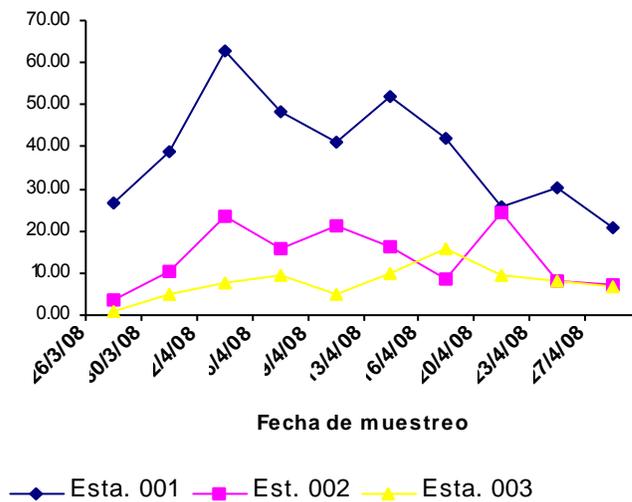


Figura 22. Cambio de temperatura entre el ambiente y el agua por estación y fecha de muestreo

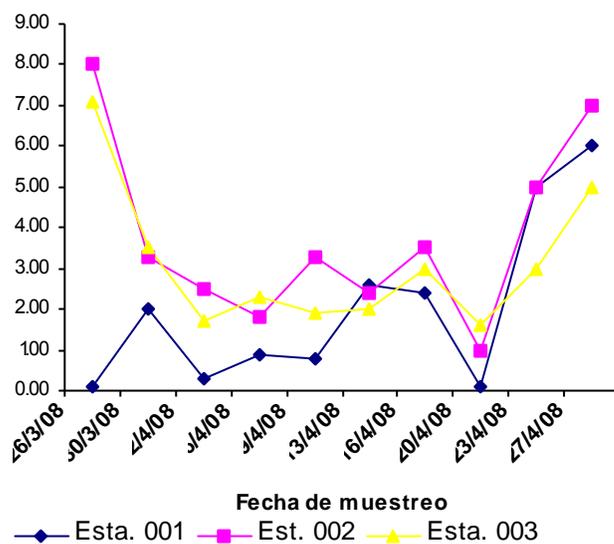


Figura 23. Contenido de fosfatos del agua por estación y fecha de muestreo

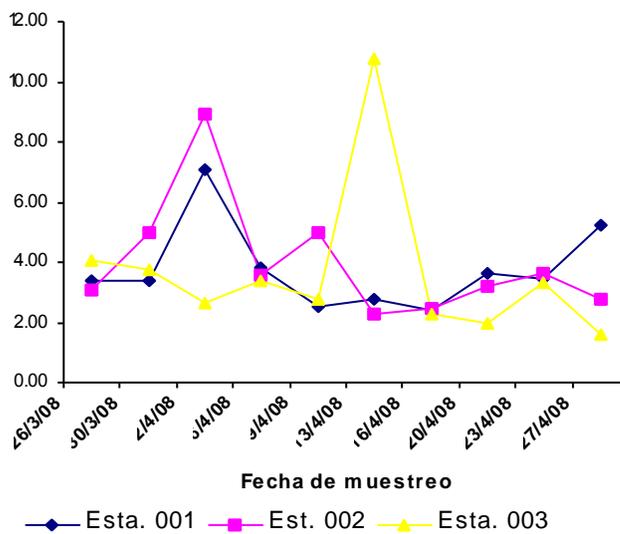


Figura 24. Contenido de nitratos del agua por estación y fecha de muestreo

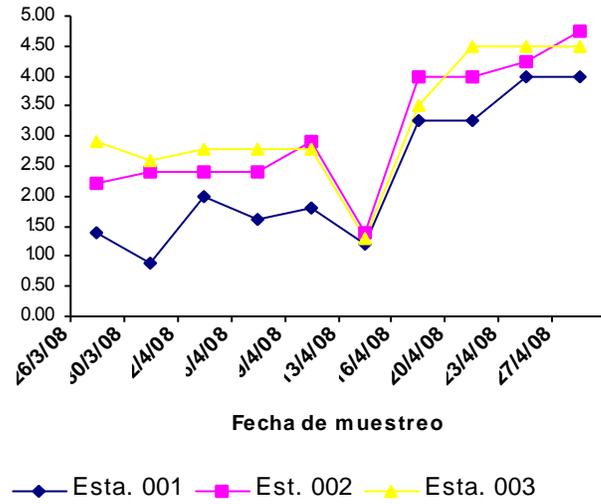


Figura 25. Turbiedad del agua por estación y fecha de muestreo

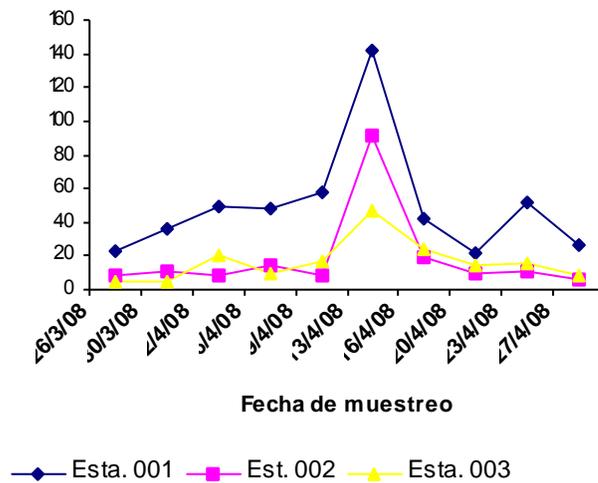


Figura 26. Sólidos totales del agua por estación y fecha de muestreo

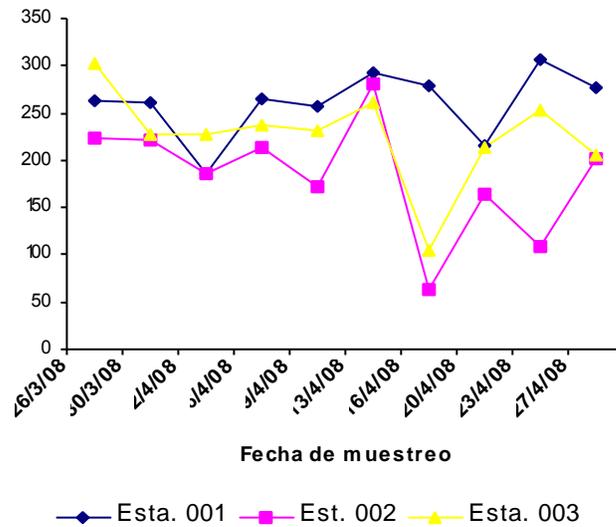


Figura 27. Temperatura del agua por estación y fecha de muestreo

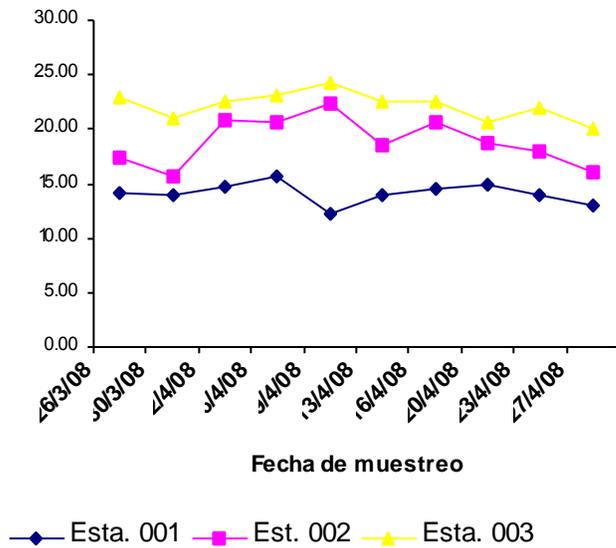


Figura 28. Demanda química del agua por estación y fecha de muestreo

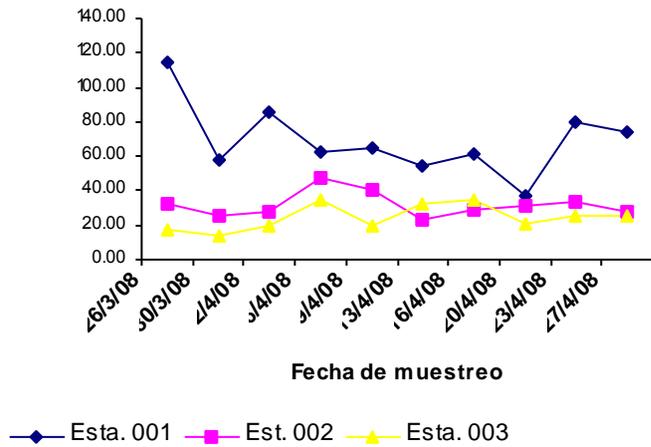


Figura 29. Sólidos suspendidos totales del agua por estación y fecha de muestreo.

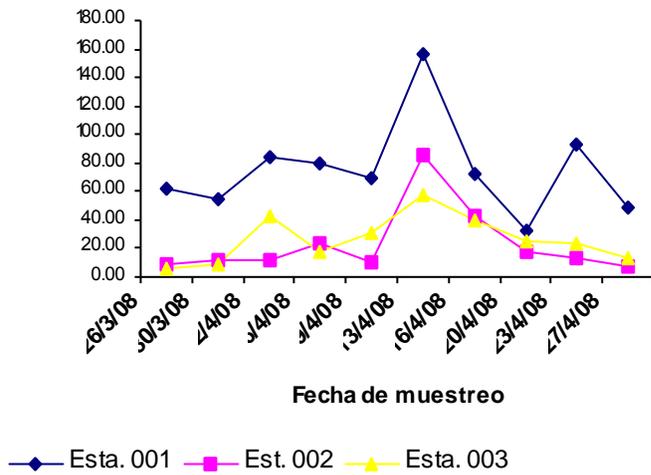


Figura 30. Contenido de oxígeno disuelto del agua por estación y fecha de muestreo

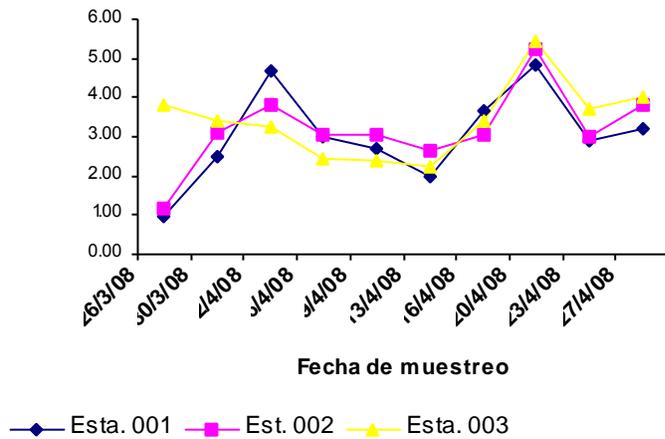
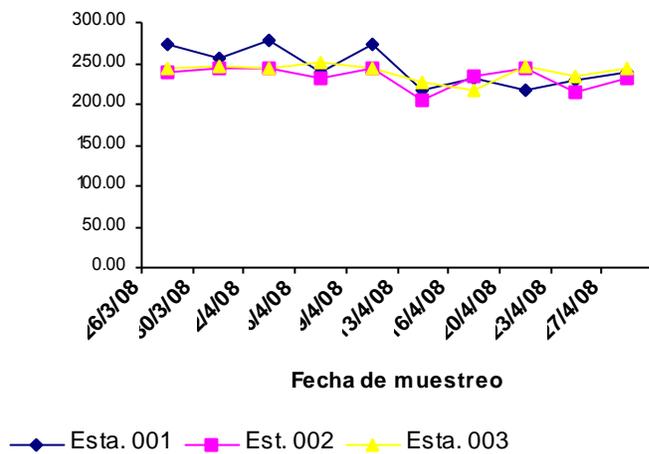


Figura 31. Conductividad eléctrica del agua por estación y fecha de muestreo



4.7 CORRELACIÓN DE VARIABLES EN LA PARTE ALTA DEL RÍO NARANJO

Figura 32. Relación entre los índices WQI y el ISQA de la estación 001

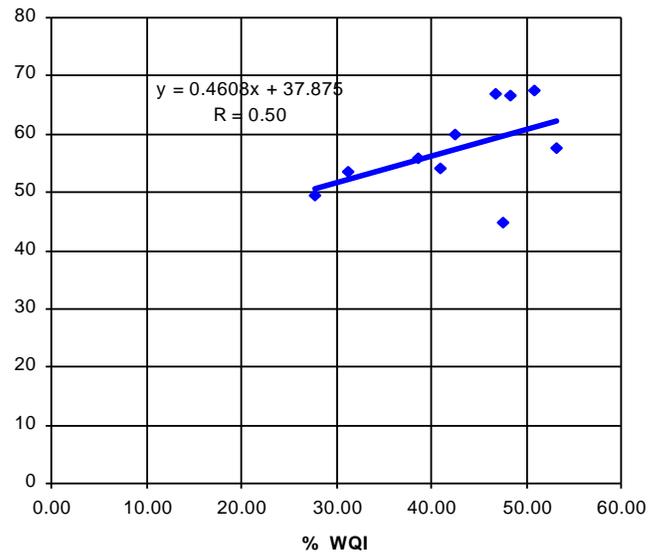


Figura 33. Relación entre los índices WQI y el ISQA de la estación 002

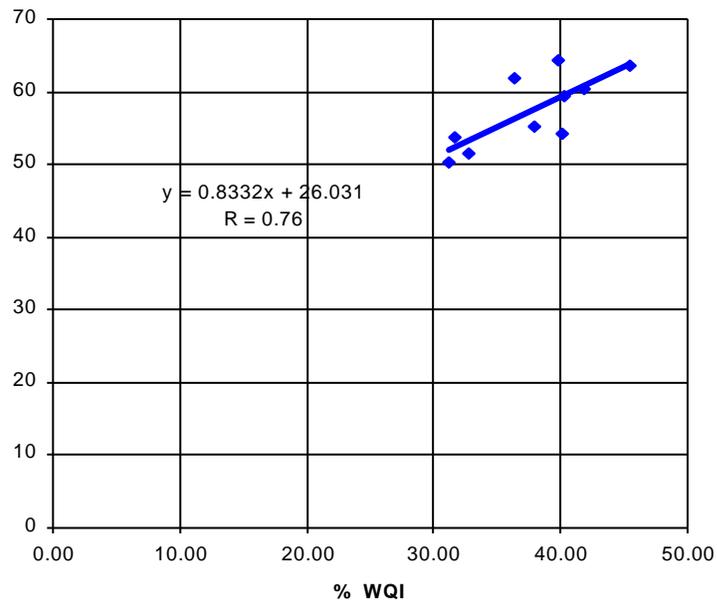


Figura 34. Relación entre los índices WQI y el ISQA de la estación 003

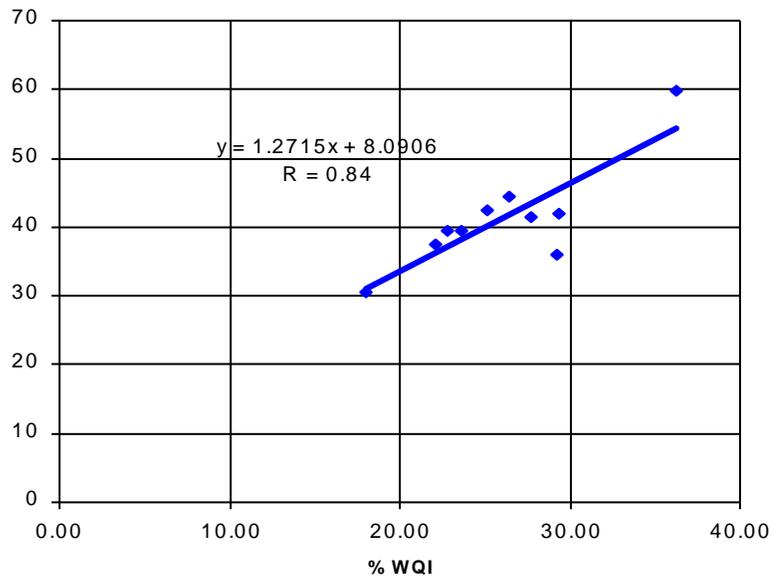


Figura 35. Relación del % de oxígeno disuelto entre las estaciones 001 y 002

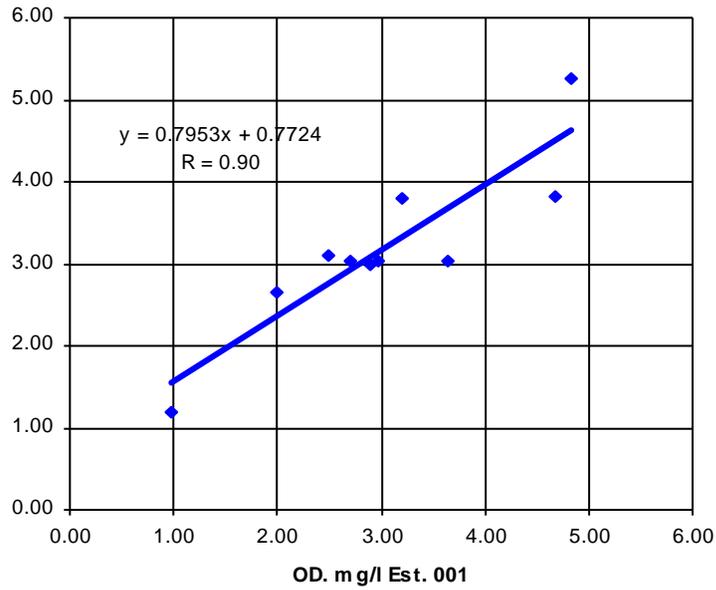


Figura 36. Relación del contenido de nitratos entre las estaciones 001 y 002

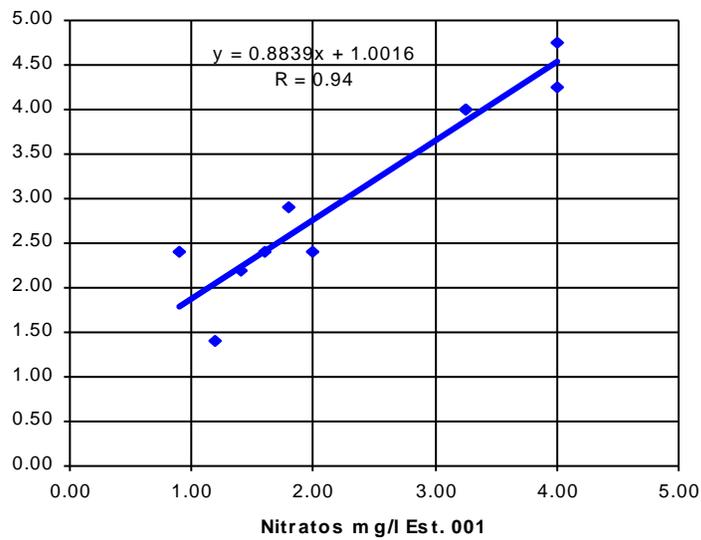


Figura 37. Relación de sólidos suspendidos totales entre las estaciones 001 y 002

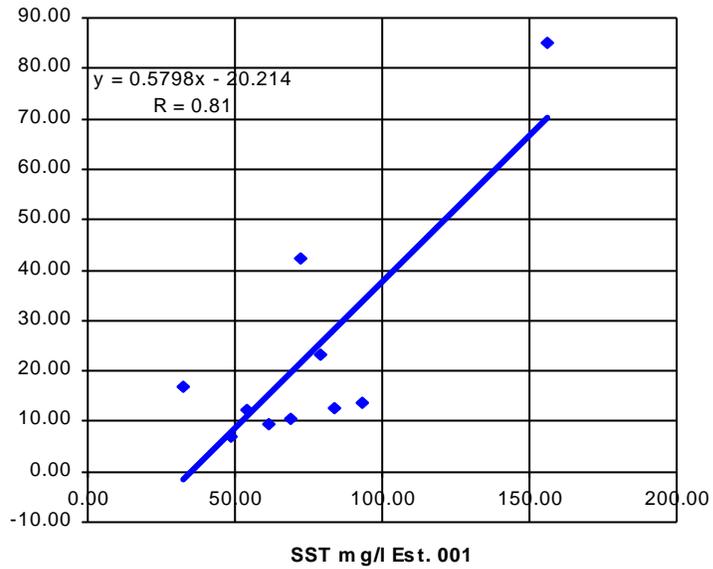
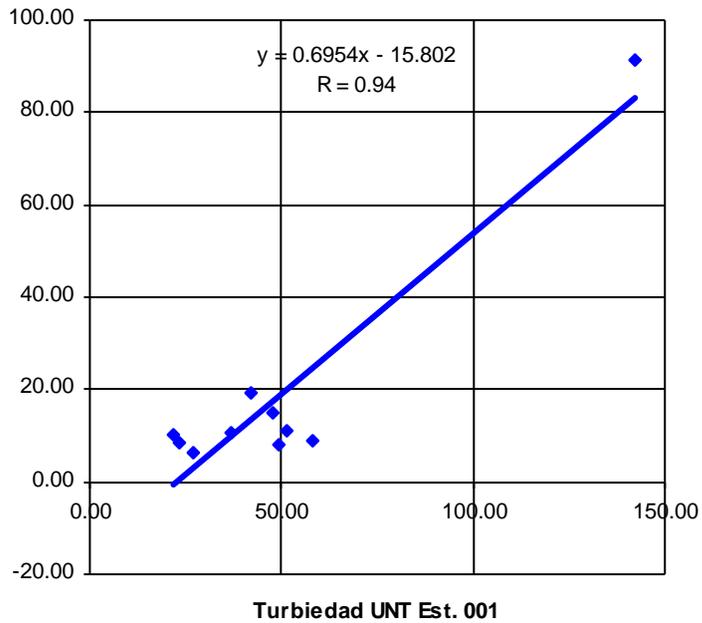


Figura 38. Relación de la turbiedad entre las estaciones 001 y 002



4.8 CONTENIDO DE LA CARGA CONTAMINANTE DEL AGUA DEL RÍO NARANJO PARTE ALTA

Figura 39. Carga contaminante de la DBO₅ por estación y fecha de muestreo

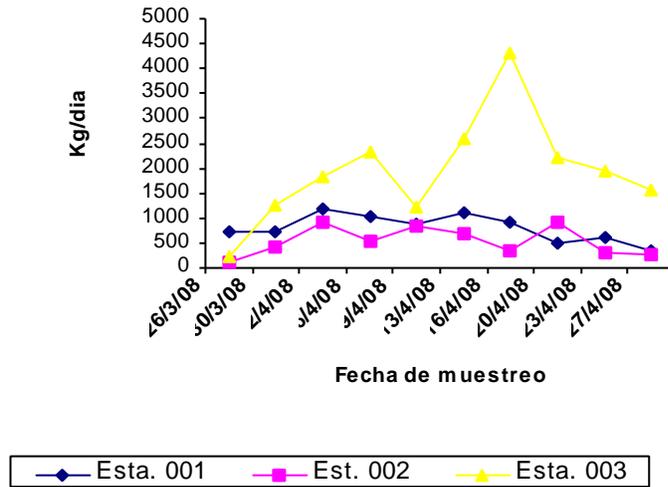


Figura 40. Carga contaminante de DQO por estación y fecha de muestreo

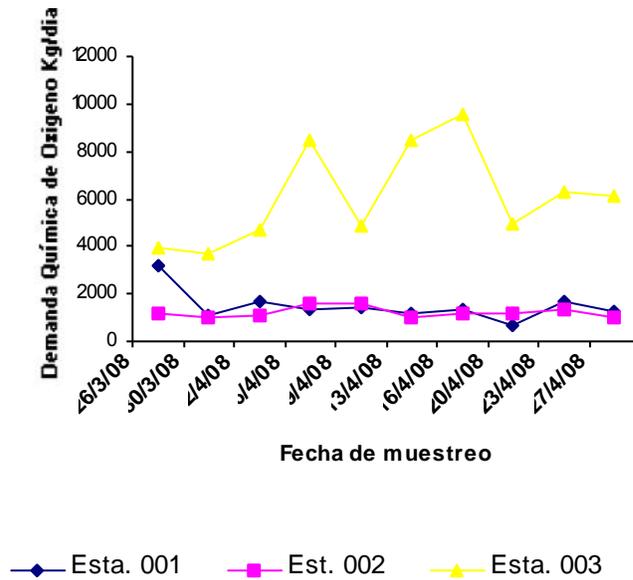


Figura 41 Carga contaminante de fosfatos del agua, por estación y fecha de muestreo

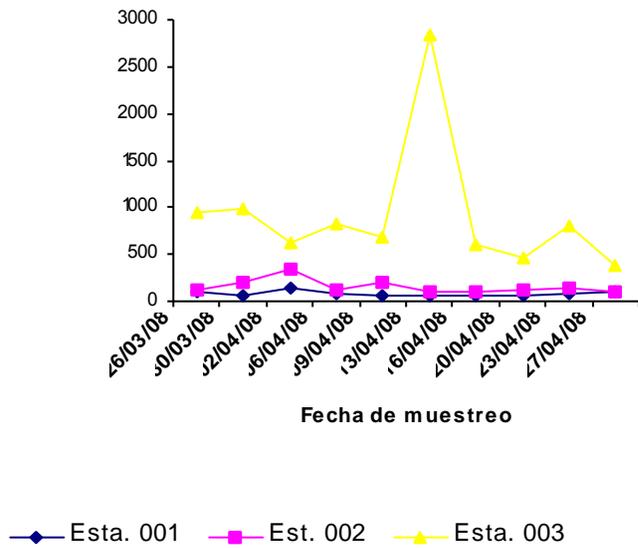


Figura 42. Carga contaminante de nitratos, por estación y fecha de muestreo

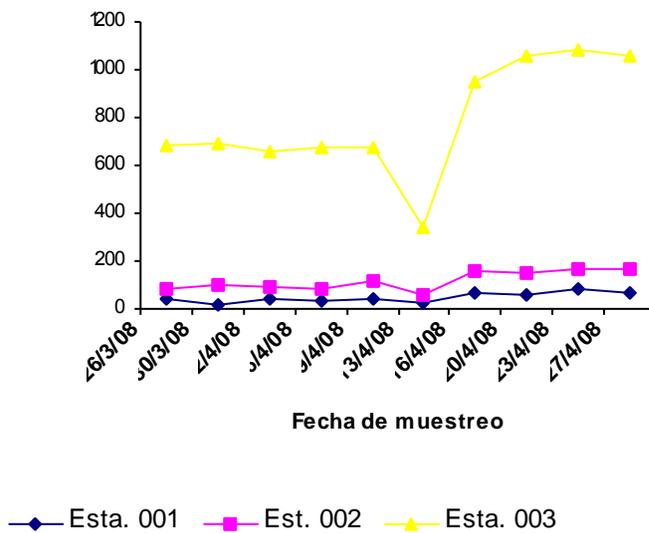


Figura 43. Carga contaminante de sólidos totales del agua, por estación y fecha de muestreo

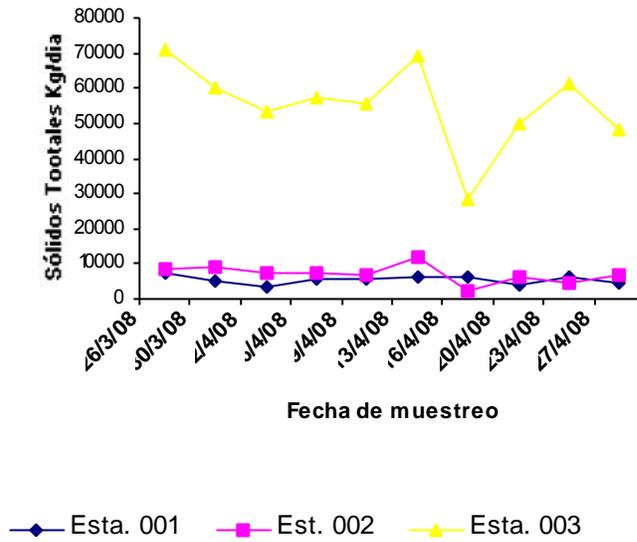


Figura 44. Carga contaminante de sólidos suspendidos totales del agua, por estación y fecha de muestreo

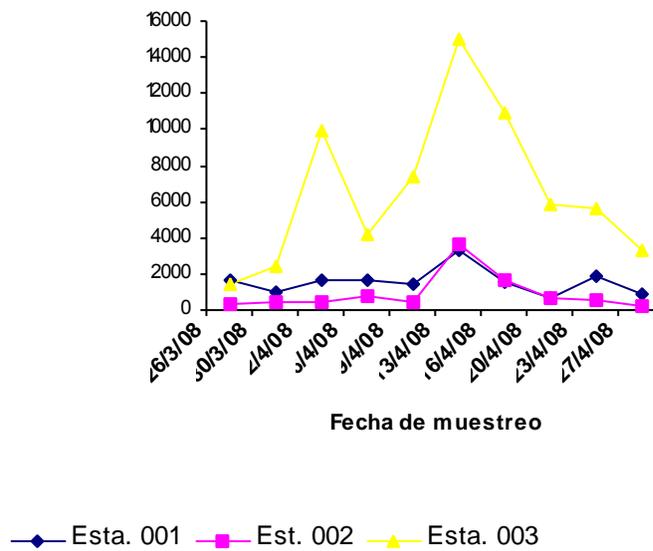


Figura 45. Carga contaminante de sólidos disueltos del agua, por estación y fecha de muestreo

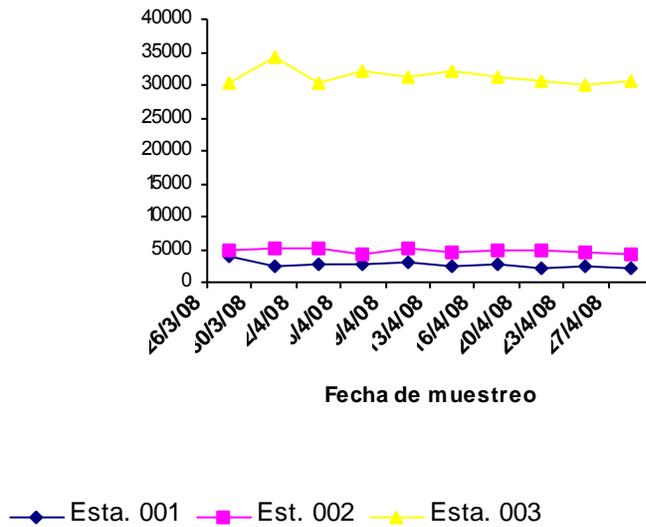
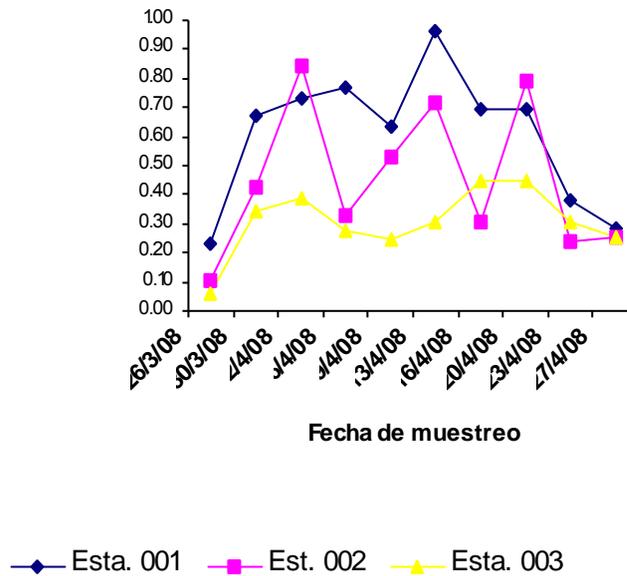
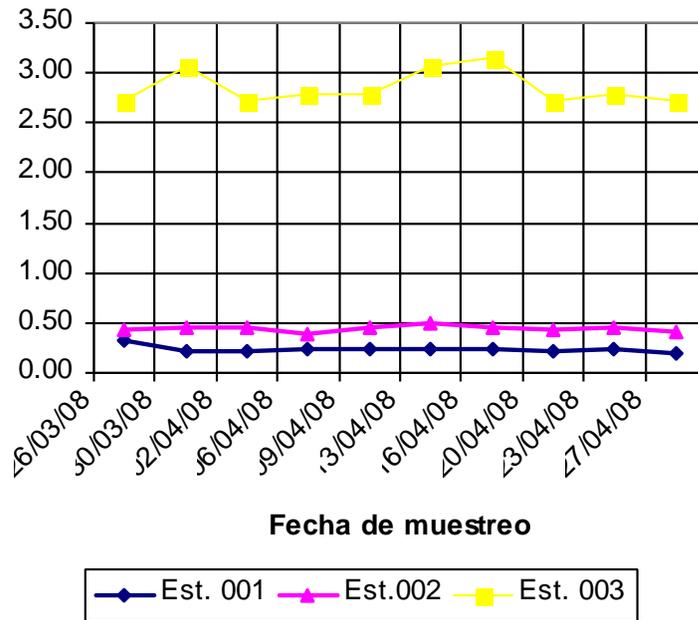


Figura 46. Relación DBO₅/DQO. Por estación y fecha de muestreo



4.9 COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL EN LAS ESTACIONES, PARTE ALTA DE LA CUENCA DEL RÍO NARANJO.

Figura 47. Comportamiento del caudal en las estaciones de control



5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Análisis de parámetros. Los parámetros fueron afectados por cuatro situaciones. La primera fue la estandarización del método para la determinación de coliformes totales y fecales, en el primer muestreo, de fecha 26 de marzo, lo cual se observa en la tabla XVI y figura 19. La segunda, fueron las actividades agrícolas y de pequeña industria que realizan entre las estaciones 002 y 003, pobladores de la región, lo cual afecta la determinación de la DBO_5 en las fechas 16, 20 y 23 de abril. La tercera, un evento de lluvia el día 12 de abril que afectó el muestreo el 13 de abril, aumentando la turbiedad como se observa en la figura 25. La cuarta, el ingreso de caudales de agua residual y afluentes al cauce del río Naranjo, lo cual se observa con el aumento de caudal en la figura 47.

5.1.1 Oxígeno disuelto. En la figura 18 se observa el comportamiento del porcentaje de O.D. de las tres estaciones sobre el cauce principal del río Naranjo en la parte alta de la cuenca. Puede observarse que para cada estación existe una amplia variabilidad del porcentaje de oxígeno disuelto del agua del río y los niveles medidos no llegan al porcentaje de saturación. Al relacionar las tres estaciones no existe una tendencia definida.

Lo observado se justifica debido a las diversas variables que afectan la solubilidad del oxígeno en el agua. El contenido de oxígeno en cada estación es afectado por las condiciones ambientales medidas por los indicadores de presión y temperatura. Así como las características físicas, químicas y biológicas del agua que llega a cada estación. Otros factores que afectan la solubilidad del oxígeno entre las estaciones son las características hidrológicas

del río, definidas por la topografía del terreno con pendientes de 5 a 8 %; el tipo de suelo por la cantidad de piedras de origen volcánico en el cauce; los procesos biológicos y los aportes de agua al cauce principal por afluentes y aguas servidas de comunidades.

Entre los fenómenos que aumentan el oxígeno a las aguas del río se tienen: al bajar temperatura del agua, al aumentar la presión atmosférica, la reoxigenación del agua por fotosíntesis, y la adsorción del oxígeno del aire ambiental debido al movimiento del agua y el área de contacto entre el agua y el aire.

Entre los procesos que disminuyen el oxígeno en el agua esta la degradación de la materia orgánica por fermentación aerobia con microorganismos; la elevación de la temperatura disminuye la solubilidad del oxígeno en el agua, el ingreso de otros caudales que influyen en la cantidad de oxígeno disuelto, aumentándolo o disminuyéndolo por dilución o concentración.

El oxígeno disuelto en el agua influye en varios fenómenos, es un parámetro importante que define la calidad del agua. En el índice WQI tiene un valor de 17 puntos en la ponderación, y es uno de los nueve parámetros. En el índice ISQA tiene un valor de 25 puntos, y es uno de los cinco parámetros. El valor adecuado de oxígeno disuelto en el agua es el nivel de saturación.

5.1.2 Coliformes fecales. En la figura 19 puede observarse el comportamiento del contenido de coliformes fecales de las muestras de agua tomada de las tres estaciones, en las fechas de muestreo. En las primeras tres fechas de muestreo los resultados del NMP/100 ml son bajos debido a la estandarización de los

métodos usados (tubos múltiples de fermentación³⁷ y Colilert³⁸), los valores están representados con el signo mayor que (>). En las últimas siete fechas de muestreo los valores son los obtenidos con el método estandarizado con signo mayor o igual a ().

La estación 001 presenta los valores altos de coliformes fecales, debido a que el río arriba de la estación (entre 300 y 1000 mts), recibe las descargas de agua residual del municipio de San Pedro Sacatepéquez, con una población de más de 60,000 habitantes. Con 17 descargas al río sin tratamiento, como se observa en la figura 51 del apéndice.

La estación 002 ubicada a 8.12 Km. río abajo de la estación 001 sobre el cauce principal, presenta valores intermedios de coliformes fecales. Entre las estaciones 001 y 002 del cauce principal del río, se reciben las aguas de los afluentes del río San Ramón que lleva parte de las aguas residuales del municipio de San Antonio y el río Tacaná que lleva parte de las aguas residuales de los municipios de San Antonio y Palestina de los Altos.

La estación 003 ubicada a 1.12 Km. río abajo de la estación 002 presenta niveles un poco más bajos de contenido de coliformes fecales que ésta. Y entre las estaciones 002 y 003, el cauce principal del río Naranjo recibe las aguas de los afluentes de los ríos Alto Naranjo, Palatza y Túrbala, que drenan parte de las aguas residuales de los municipios de San Marcos, Esquipulas Palogordo y Palestina de los Altos. Es importante indicar que la estación 003 (Estación Hidrométrica de Corral Grande) mide la contaminación del cauce principal

³⁷ Pelczar Jr. M otros (1982) Microbiología. Cuarta edición. México: McGraw-Hill, pp 200.

³⁸ Colilert, Quany-Tray/2000 y Defined Sustrate Tecnology, IDEXX Laboratories, Inc de los Estados Unidos

donde se tiene las aguas residuales de los cinco municipios con una población de más de 200,000 habitantes.

Michaud 2001³⁹ indica que las concentraciones de coliformes fecales no son fáciles de predecir, puesto que dependen de condiciones específicas para su desarrollo y son muy sensibles a los cambios ambientales. Sin embargo, la determinación del Número Más Probable (NMP), en este estudio, fue un proceso; en las primeras fechas de muestreo se obtuvieron resultados bajos con valores de NMP mayores que. Pero, a partir de la cuarta fecha, se obtienen valores con el NMP mayor que o igual a. Observándose, los mayores valores para la estación 001, luego para la estación 002 y los valores más bajos para la estación 003.

Los coliformes son los causantes de muchas enfermedades de origen hídrico, provocan problemas de salud pública. Es por ello, que el análisis microbiológico por recuento de bacterias indicadoras de contaminación fecal en las aguas del río Naranjo es de suma importancia para evaluar el estado sanitario en la parte alta de la cuenca.

Las coliformes fecales⁴⁰ se utilizan, normalmente, porque forman parte de un grupo llamado coliformes, dentro de la familia *enterobacteriaceae*. Dicho grupo se caracteriza por estar formado por microorganismos que habitan en el tracto gastrointestinal de los vertebrados. Su presencia indica el potencial patogénico de las aguas, es decir, la probable existencia de agentes causantes de enfermedades como cólera, hepatitis, polio, fiebre tifoidea, giardiasis,

³⁹ MICHAUD, Jery P. (2001). Eurovisión – Environmental Consulting Service-Olympia-Washington www.ecy.gov/programs/wq/plant/management/yourmanual/streams.html.

⁴⁰ Truque B. Paola Andrea. Armonización de Los estándares de agua potable en las Américas, OMS/OPS informe 2005.

amebiasis, etc. Debido a que la concentración de dichos agentes habitualmente es baja, su detección directa en aguas es complicada, por la cual se utiliza, entre otras, a las bacterias coliformes fecales, que son de fácil detección y cultivo en laboratorio y presentan un tiempo de supervivencia que excede al de los patógenos en ese ambiente. Con los valores altos de coliformes fecales reportados; el río presenta niveles altos de contaminación, que pueden causar serios daños a la salud, si en determinado momento se usa el agua para consumo humano y sin previo tratamiento.

Las condiciones de temperatura limitan el desarrollo de los microorganismos, pero el alto contenido de materia orgánica biodegradable, la capacidad de reoxigenación del río, el pH neutro y el contenido de nutriente, indican un adecuado medio para el desarrollo de microorganismos, y una oportunidad para el tratamiento de los vertidos de agua residual.

En general, los valores reportados en la tabla XVI tienen una tendencia decreciente de las estaciones 001 a la 003. Aunque los niveles de contaminación fecal determinados en las tres estaciones son mayores que los límites recomendados para la reutilización del agua para consumo humano. De acuerdo con el artículo 35 de la ley de agua residual Decreto 236-2006⁴¹.

Los coliformes fecales son un indicador que restringe el uso del agua para los seres humanos. Para el cálculo del índice de calidad WQI es el segundo factor en importancia con 15 % en su ponderación. El cálculo del índice ISQA no toma en cuenta los coliformes fecales.

⁴¹ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos” versión electrónica. Guatemala, mayo de 2006

5.1.3 El pH. Los niveles de pH en las tres estaciones, durante los diez muestreos fueron neutros con un leve incremento a alcalino, como se observa en la tabla XVI y figura 20. Pero todos los valores estuvieron dentro del rango permisible de 6 a 9 unidades de pH, permitido para descargas de aguas residuales decreto 236-2006.

Las variaciones de pH pueden ser de origen natural o antropogénico, por ejemplo, la geología de la cuenca para el caso de la parte alta del río Naranjo comprende a depósitos cuaternarios. Los niveles de pH del río también varían con relación al origen de las aguas, del clima, el tipo antropogénico de aguas residuales, de éstas últimas, la descarga de efluentes municipales e industriales son de gran importancia, más aun, si dichos efluentes son vertidos al río Naranjo sin tratamiento. En época de estiaje constituyen el flujo base del río.

El pH de las aguas de río, es un factor que favorece el desarrollo de la vida acuática, por lo tanto, el tratamiento de las aguas con procesos biológicos.

El pH es el tercer parámetro en importancia para determinar el Índice de Calidad WQI, según la NFS de los EE. UU, con una ponderación de 12 %.

5.1.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Los valores de DBO_5 . En las tres estaciones durante los 10 muestreos fue variable. Presenta los mayores valores para la estación 001, seguido de los valores de la estación 002 y los valores bajos para la estación 003; como se presentan en la tabla XVI y figura 21. Esto se explica porque la estación 001 está cerca de las descargas residuales del municipio de San Pedro, San Marcos. Mientras que las estaciones 002 y 003 están ubicadas a 8.125 y 9.5 Km. río debajo de la estación 001, respectivamente, transcurso durante el cual, en el agua se

realizan procesos físicos, químicos y biológicos para la degradación y sedimentación y dilución de la materia orgánica.

El factor DBO_5 es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica biodegradable, según Sawyer⁴², (1978). La DBO_5 es la medida de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar, la materia orgánica presenta hasta una forma inorgánica estable por los microorganismos.

Las cantidades elevadas de materia orgánica, es un factor que permite el aumento de las poblaciones bacterianas, la disminución del oxígeno disuelto, por los procesos oxidativos. La disminución de la DBO_5 en las estaciones río abajo, se debe a la degradación de la materia orgánica y al factor de dilución debido al ingreso de otros caudales.

Las condiciones que favorecen la degradación de la materia orgánica son la cantidad de microorganismos, el pH neutro, el incremento de la temperatura, la cantidad de oxígeno disuelto, el contenido de nutrientes.

Los valores de DBO_5 en las tres estaciones, presentan niveles bajos con relación a los límites establecidos por la ley de aguas residuales.

La DBO_5 ocupa el cuarto lugar en importancia para la determinación del índice WQI, con una ponderación de 10 %

5.1.5 Temperatura. El efecto de la temperatura para la determinación de los índices y los coeficientes cinéticos se aborda desde el punto de vista de la

⁴² SAWYER, Clair N. Perry Mc Carty. (1978). Chemistry for Environmental Engineering. 3th Edition. McGraw-Hill Publishing Company.

temperatura del agua del río, del ambiente y la diferencia entre la temperatura ambiente y del agua. La medición de estos fenómenos tiene efecto en variables importantes del proceso de auto depuración de las aguas del río Naranjo.

La temperatura del agua (T_a), en las tres estaciones se comportó variable como se observa en la tabla XVIII y figura 27. Puede observarse que la temperatura del agua de la estación 003 es mayor que la temperatura de la estación 002, y ésta, es mayor que la del agua de la estación 001, lo cual se explica por dos razones. La primera, es que la temperatura no fue tomada en forma simultánea en las tres estaciones. La temperatura en las estaciones 002 y 003 se tomó con una diferencia de 1 y 2 horas de diferencia respecto de la estación 001. En ese tiempo los rayos del sol aumentaron la temperatura del ambiente y del agua. La segunda razón y con mayor grado de incidencia en el fenómeno de auto depuración de las aguas del río, es que la temperatura es una función de la altura como lo indica Orozco (estudio realizado para la fundación FUNSOLAR⁴³). A menor altura sobre el nivel del mar, es mayor la temperatura del ambiente. La temperatura es una medida del contenido de energía (calor) de los cuerpos en el ambiente.

La temperatura del agua es importante en los fenómenos y factores que se realizan en las aguas contaminadas, en su proceso de depuración. En el cálculo del índice ISQA pondera la sumatoria de los otros cuatro factores que intervienen, como se observa en la ecuación (2), de 80 a 100 %.

La temperatura ambiente (T_{amb}): se refiere a la temperatura del aire. Ésta fue superior a la temperatura medida en el agua. Y su comportamiento fue

⁴³ Ibidem FUNSOLAR.

similar en las tres estaciones, fue mayor en la estación 003, con temperaturas intermedias en la estación 002, los valores mas bajos fueron medidos en la estación 001. Como se observa en la tabla XVIII. La temperatura ambiente es una función lineal decreciente con respecto a la altura. A mayor altura sobre el nivel del mar, es menor la temperatura.

Según Wetzel⁴⁴ (1981) la temperatura es un factor abiótico que regula los procesos vitales para los organismos vivos. Afectando otras propiedades físicas y químicas. Por ejemplo, el aumento de la temperatura del agua del río favorece el crecimiento de los microorganismos que degradan la materia orgánica (de tipo psicrófilico y mesófilico), inhibe el crecimiento de los microorganismos de tipo termófilico; también aumenta la solubilidad de sales disueltas, aumentando la conductividad eléctrica. Por otro lado, el aumento de la temperatura regula otros fenómenos naturales como la solubilidad de nutrientes, la solubilidad del oxígeno, del sustrato, las propiedades físico-químicas del medio, como el pH, la densidad, la viscosidad etc.

La temperatura es afectada por las estaciones del año; en verano se registra aumento de la temperatura hasta alcanzar los valores máximos y en invierno, la temperatura empieza a descender, hasta alcanzar los valores mínimos; la secuencia de ese ciclo, seguirá los procesos de auto depuración del río.

Por otro lado, la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura del agua, son datos de suma importancia para los procesos de reoxigenación del agua y los procesos de equilibrio. En la diferencia de

⁴⁴ Wetzel, R. (1981) Limnología, Ediciones Omega, S. A. Barcelona España, pp. (50 – 100)

temperatura (T), en las tres estaciones, se determinó que fue mayor en las estaciones 003 y 002 y las menores diferencias en la estación 001; los resultados se presentan en la tabla XVI y figura 22. La explicación puede deberse a razones topográficas y de circulación de viento. La estación 002 se encuentra en la salida de un cañón de dos montañas, es decir, una depresión topográfica, mientras que la estación 003 se encuentra en una región de mayor planicie.

La diferencia de temperatura entre el ambiente y el agua, es factor importante para el cálculo del índice WQI con un 10 % de ponderación.

5.1.6 Fosfatos. Los valores del contenido de fosfatos en las aguas de las tres estaciones está en un rango de 3.6 a 4 mg/l. como se observa en la tabla XVI y figura 23. El pico que se observa en el muestreo de fecha 13 de abril, es debido a un evento de lluvia en la tarde del día anterior. El contenido de fosfatos en las aguas se debe a la contaminación por aguas residuales y las actividades económicas que realizan en las riberas del río como actividades de comercialización agrícola, cuando lavan las verduras y hortalizas; o a las actividades de pequeña industria cuando extraen arena y piedra del río. Lo que sucede es la agitación de los bentos del cauce, aumentando la materia en suspensión y soluble. También realizan actividades de riego, y la escorrentía del riego va al cauce del río.

Cuando no realizan actividades económicas en las riberas del río, los niveles de fosfatos provienen de las aguas residuales vertidas por las poblaciones en la parte alta como las cabeceras municipales de San Pedro Sacatepéquez, San Marcos, San Antonio, Palestina de los Altos y San Cristóbal

Cucho. En este sentido la fuente de fosfatos son las heces, la orina, los detergentes y productos de limpieza.

El fósforo es esencial para el crecimiento y productividad en el río Lory⁴⁵ (1999) pero, con niveles altos de fósforo, puede inducir a un sobre crecimiento y sobre productividad del río, lo cual disminuye la calidad de sus aguas y la recuperación de su calidad toma tiempo. El fósforo, junto con el nitrógeno, producen los procesos de eutrofización de los cuerpos de agua. Aunque el fósforo es el elemento limitante de la productividad biológica.

El pico que se observa el 13 de abril en la estación 003, se debe al evento de lluvia ocurrida el día anterior.

Los fosfatos son importantes en la caracterización de las aguas como nutrientes y para el cálculo del índice WQI lo pondera con un aporte de 10 %.

5.1.7 Nitratos. La concentración de nitratos en las tres estaciones se determinó en un rango promedio de 2 a 3.5 mg/l, con valores máximo y mínimo de 4.75 y 0.9 mg/l. La relación de los nitratos entre estaciones presenta una leve tendencia a aumentar de la estación 001 a la 003; debido a la oxidación, lo que representa también un consumo de OD; como se observa en la tabla XVI, y figura 24. El nitrógeno se puede encontrar en forma de amoníaco, nitrógeno albuminoideo, nitritos, nitratos, y nitrógeno orgánico Hernández⁴⁶ (1991). Los cuales están en equilibrio y en presencia de oxígeno tienden a oxidarse a

⁴⁵ LORY, J.A. (1999). Agricultural Phosphorus and water quality. MU guide extension. University of Missouri. Columbia.

⁴⁶ Ibidem Hernández 1991

nitratos. Los nitratos son los más frecuentes en las aguas residuales porque es el producto de mayor grado de oxidación.

El ciclo del nitrógeno explica los procesos de transformación: el amoniaco se transforma a nitritos por fermentación aerobia, y este se transforma a nitratos y los nitratos son absorbidos por las plantas para formar proteínas.

El consumo de agua con altas concentraciones de nitrógeno (mayor a 100 mg/l) es causa de la enfermedad metahemoglobinemia infantil, (niños azules). El nitrógeno junto con el fósforo, son nutrientes para la vida animal y vegetal.

Las altas concentraciones causan el rápido crecimiento de algas, proceso de la eutrofización de cuerpos de agua. En el cauce del río se observan plantas como el berro y otras especies que indican que el río está en este proceso.

Las fuentes de nitrógeno en el río son de origen antrópico (aguas residuales con heces, orina, detergentes y uso de fertilizantes amoniacales en la agricultura). Esto se constituye en un problema porque los pobladores ubicados en las riberas del río en la parte alta, realizan actividades agrícolas, usando en ocasiones esta agua para regar cultivos de verduras y hortalizas en general; luego el agua por escorrentía se drena al río.

Al contenido de nitratos en el agua es importante caracterizarlos, por los efectos que causa y para el cálculo del índice WQI lo pondera en 10 %.

5.1.8 Turbiedad. De los niveles de turbiedad en las tres estaciones se determinó en un rango promedio de 50 a 16 UNT, con valores máximo y mínimo de 142 y 5 UNT. La relación de la turbiedad entre estaciones es de forma decreciente de la estación 001 a la 003, como se observa en la tabla XVI y figura 25. Los valores son mayores cerca de las descargas de aguas residuales (estación 001). Las fluctuaciones entre las estaciones 002 y 003, se deben a que al momento de tomar las muestras, en algunos casos, pobladores realizaban actividades económicas como lavado de verduras y hortalizas, y/o extracción de arena o piedra. El pico observado el 13 de abril es debido a un evento de lluvia ocurrido el día anterior.

La turbiedad es indicativa de la contaminación del agua por materia suspendida, que interfiere con el paso de la luz a través del agua, Sawyer⁴⁷. (1978) Las causas de la variedad de materiales suspendidos en el agua son el grado de turbulencia del cuerpo de agua, por ejemplo; los ríos bajo condiciones de inundación, la turbiedad que se presenta, será debido a la dispersión. La agricultura y otras operaciones de origen antrópico que remueven el suelo, contribuyen igualmente a la turbiedad del agua.

Las aguas residuales domésticas e industriales, ya sea tratadas o no, pueden incrementar la turbiedad, sin embargo, los materiales orgánicos, se constituyen en fuente de alimento para las bacterias y otros microorganismos, es un impacto benéfico hasta ciertos límites, cuyo crecimiento puede producir también el incremento de la turbiedad. Por tanto, se puede decir, de acuerdo a lo expuesto, que los materiales que causan turbiedad pueden variar desde sustancias inorgánicas puras hasta aquellas de naturaleza orgánicas.

⁴⁷ SAWYER, Clair N. Perry Mc Carty. (1978). Chemistry for Environmental Engineering. 3th Edition. McGraw-Hill Publishing Company.

La escorrentía es otra fuente de material, pero teniendo en cuenta las condiciones estacionales su aporte es mínimo o nulo lo cual significa que el nivel elevado registrado en la primera de las estaciones (figura 25), en todos los eventos de muestreo, se debe a las operaciones y/o actividades antrópicas llevadas a cabo en el sector: agricultura y descargas de agua residual.

Los niveles de turbiedad en el agua influyen en varios fenómenos, y constituyen un parámetro importante que define la calidad del agua. En el índice WQI se tiene una representación de 8 % en la ponderación.

5.1.9 Sólidos totales. Los niveles de sólidos totales en las tres estaciones se determinaron en un rango promedio de 259 a 183 mg/l, con valores máximo y mínimo de 307 y 62 UNT, respectivamente. Los valores altos de sólidos totales se encuentran en la estación 001 luego en la estación 003 y los menores valores en la estación 002, como se observa en la tabla XVI y figura 26. Los valores son mayores cerca de las descargas de aguas residuales (estación 1). Disminuye con el fenómeno de depuración natural a la estación 002, porque entre las estaciones existe poca actividad antrópica. Las fluctuaciones entre las estaciones 002 y 003 se deben a que al momento de tomar las muestras en algunos casos realizaban actividades económicas como lavado de verduras y hortalizas, y/o extracción de arena o piedra, y el pico que se observa en el muestreo del 13 de abril se debe a un evento de lluvia registrado el día anterior. Los sólidos totales lo constituyen los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos, Metcalf⁴⁸ (1996).

⁴⁸ Metcalf y Heddy (1997) "Ingeniería de las aguas residuales" tratamiento vertido y reutilización, tercera edición. Volumen I, Capítulo 3. Mexico: Editorial McGraw-Hill.

El contenido de sólidos totales en el agua influye en varios fenómenos, es un parámetro importante que define la calidad del agua. En el índice WQI tiene una representación de 8 % en la ponderación.

5.1.10 Demanda química de oxígeno (DQO). Los niveles de DQO. En las tres estaciones se determinó en un rango promedio de 69.30 a 24.60 mg/l, con valores máximo y mínimo de 115 y 14 mg/l. La relación de la DQO entre las estaciones, presenta la forma decreciente de la estación 001 a la 003 como se observa en la tabla XVIII, y figura 28. Es decir, que los mayores valores se encuentran en la estación 001 antigua hidroeléctrica de San Pedro Sacatepéquez, la cual esta cerca de las descargas de aguas residuales del citado municipio. La DQO tiene una relación mayor que la DBO, porque la DQO es la degradación de la materia orgánica e inorgánica presente en el agua. Mientras que la DBO es solo de la materia orgánica.

Los valores de DQO en el agua influyen en varios fenómenos, es un parámetro importante que define la calidad del agua. En el índice ISQA tiene una representación de 30 % en la ponderación.

5.1.11 Sólidos suspendidos totales (SST). Los niveles de SST en las tres estaciones se determinó en un rango promedio de 75.02 a 26.45 mg/l, con valores máximo y mínimo de 156 y 6 mg/l, respectivamente. La relación de los SST entre las estaciones presentó los valores más altos en la primera estación (estación 001); en la estación 002 se obtuvieron los resultados más bajos y luego en la estación 003 se incrementaron levemente, como se observa en la tabla XVIII y figura 29. Los sólidos suspendidos son las partículas retenidas a través de un filtro, y puede ser materia orgánica e inorgánica suspendida en el agua. Entonces, el leve aumento en los valores de los SST en la estación 003,

se debe a las actividades agrícolas y de pequeña industria que realizan agricultores entre las estaciones 002 y 003 originarias de las poblaciones cercanas de los municipios de San Pedro Sacatepéquez, San Marcos cabecera y San Cristóbal Cucho.

En los niveles de sólidos suspendidos totales en el agua influyen varios fenómenos, es un parámetro importante que define la calidad del agua. El índice ISQA tiene una representación de 25 % en la ponderación.

5.1.12 Conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica en las tres estaciones de muestreo se comporta en el rango promedio de 233 a 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Con valores máximo y mínimo de 279 y 206 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, como se observa en la tabla XVIII y figura 31. La conductividad es la capacidad del agua para conducir la electricidad y está relacionada con la concentración de sustancias ionizadas en el agua, que pueden provenir de la ionización de sustancias ácidas o básicas. Por los niveles de pH quizás sea la ionización de sustancias básicas. Como carbonatos provenientes de la geología del suelo y se solubilizan en el agua o bien proveniente de las aguas residuales descargadas al río. Del valor de la conductividad multiplicado por el factor 0.53 se obtiene el nivel de sólidos disueltos, lo que implicaría las sales disueltas en el agua lo cual afecta el uso del agua para consumo humano y riego.

En los valores de la conductividad eléctrica el agua influye en varios fenómenos, es un parámetro importante que define la calidad del agua. En el índice ISQA tiene una representación de 20 % en la ponderación.

5.2 Índices de calidad

5.2.1 Índice de Calidad del Agua (WQI) Para el cálculo, se analizan nueve parámetros como el oxígeno disuelto, los coliformes fecales, el pH, la DBO₅, el cambio de temperatura, los fosfatos, los nitratos, la turbiedad y los sólidos totales; cuatro parámetros se determinan en campo y cinco en laboratorio. Los análisis de los parámetros completos se disponen en 6 o 7 días. Es un método útil y confiable para tomar decisiones sobre fuentes de agua para consumo humano.

Los valores del índice (WQI) del agua del río Naranjo en la parte alta para la estación 001 variaron en el rango de 18.04 a 36.31; para la estación 002 estuvo en el rango de 31.19 a 45.44 y la estación 003 en el rango de 27.68 a 53.19 como se observa en la tabla XVII. De acuerdo con la valoración de la calificación para este índice, se encuentran en el rango de 25 a 50, con categoría de agua de mala calidad. Este tipo de agua tiene una baja diversidad de vida acuática y presentan problemas de contaminación. En dicha tabla se observa que, únicamente, en dos fechas de muestreo la calidad del agua paso a la categoría regular, en el rango de 50 a 70.

En los resultados del WQI en las tres estaciones se observa que los valores bajos se encuentran en la estación 001, los valores intermedios en la estación 002 y los valores más altos se encuentran en la estación 003.

Los parámetros que más influyen en la determinación del WQI son los coliformes fecales, los fosfatos, la turbiedad y los sólidos totales. En la tabla XVI puede observarse los valores altos de cada parámetro, y la principal responsable del grado de contaminación que aporta el contenido de los

parámetros a las aguas del río son las aguas residuales de las poblaciones de los municipios de San Antonio Sacatepéquez, Palestina de los Altos, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos y Esquipulas Palogordo, provocando en el trayecto del cauce del río problemas de saneamiento ambiental, debido a los procesos de degradación de la materia orgánica e inorgánica por microorganismos.

Otros parámetros que influyen en el cálculo del WQI son el oxígeno disuelto y la DBO_5 , en la tabla XVI se observa que el oxígeno disuelto en las aguas del río son bajos, debido al constante consumo de oxígeno para la degradación de la materia orgánica. Aunque la topografía del río ayuda a la reoxigenación debido a la pendiente y las rocas de origen volcánico que se encuentran en el cauce.

Finalmente, los parámetros de pH y la diferencia de la temperatura entre el ambiente y el agua, inciden poco en la baja del índice WQI.

En resumen, del análisis por parámetro de los índices de calidad de agua para el cauce principal de la parte alta del río Naranjo, puede concluirse que sólo el pH alcanzó la categoría de índices de calidad excelente; la diferencia de temperatura y los nitratos alcanzaron la categoría de calidad buena; los índices de turbiedad y sólidos totales alcanzaron la categoría mediana; los índices del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno alcanzaron la categoría mala y los índices de coliformes fecales y fosfatos alcanzaron la categoría de muy malos. Es de hacer notar que la variable coliformes fecales fue la que presentó el índice más bajo.

5.2.2 Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISQA). Este índice tiene un método sencillo de cálculo, se analizan cinco parámetros, es económico y

rápido de determinar. Solamente intervienen cinco parámetros (temperatura del agua, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos, oxígeno disuelto y la demanda química de oxígeno, como oxígeno consumido), tres parámetros se determinan en campo y dos en laboratorio. Es decir, que en poco tiempo se pueden disponer de los resultados. Sin embargo, es un método útil y confiable para tomar decisiones sobre fuentes de agua para consumo humano.

Respecto de los valores del índice (ISQA) del agua del río Naranjo en la parte alta para la estación 001, el valor estuvo en el rango de 30.57 a 59.70; para la estación 002 estuvo en el rango de 50.24 a 64.37 y para la estación 003 en el rango de 44.72 a 67.40 (Tabla XIX).

De acuerdo con la valoración de la calificación para el ISQA, se encuentran en el rango de 0 a 60 con categoría de calidad de agua **inadmisibile**. Este tipo de calidad de agua es continuamente afectada y las condiciones no cumplen con los niveles deseados para uso humano.

En la tabla XIX también se observa que en cuatro fechas de muestreo para la estación 002 la calidad del agua presentó valores entre 60 a 70 con categoría de **admisibile** en donde la calidad del agua es frecuentemente afectada y las condiciones a menudo no cumplen con los niveles deseados. En esta categoría también se presentaron las muestras de agua, de cuatro fechas de muestreo en la estación 003.

En los resultados del ISQA en las tres estaciones se observa que los valores bajos se encuentran en la estación 001, los valores intermedios en la estación 002 y los valores levemente más altos en la estación 003, figura 17.

El comportamiento del ISQA por fecha de muestreo entre las estaciones 001 y 002 fue de aumento. Esto significa que el resultado de los cinco parámetros expresados en un número expresado como el ÍSQA mejoró.

El comportamiento del ISQA por fecha de muestreo entre las estaciones 002 y 003 en 7 de los 10 muestreos mejoró, pues el valor del índice fue más alto en la estación 003 que en la estación 002, y únicamente en tres fechas de muestreo el valor del índice disminuyó. Como se observa en la figura 17.

Los resultados de los parámetros que más influyen en el cálculo del ISQA son los valores altos de la DQO y los sólidos suspendidos totales; también los valores bajos del oxígeno disuelto, como se observa en la tabla XVIII. La principal responsable del grado de contaminación que aporta el contenido de los parámetros a las aguas del río son las aguas residuales de las poblaciones de los municipios de San Antonio, Palestina de los Altos, San Pedro, San Marcos y Esquipulas Palogordo, provocando en el trayecto del cauce del río problemas de saneamiento ambiental. Esto debido a los procesos de degradación de la materia orgánica e inorgánica por microorganismos y fauna acuática.

Los otros parámetros que influyen poco en el cálculo del ISQA son la conductividad eléctrica y la temperatura del agua.

5.2.3 Relación de los índices WQI e ISQA. Los índices son expresiones numéricas que resumen en un valor, entre 0 a 100 puntos, la información de los parámetros que lo integran, para definir el uso del agua. En el caso del índice

WQI intervienen nueve parámetros físicos, químicos y biológicos; y para el ISQA, intervienen cinco parámetros físicos y químicos.

Los resultados al relacionar los índices WQI y ISQA, para la estación 001 se observan en las figura 32; presentan un coeficiente de correlación $R = 0.50$. Para la estación 002 se observan en las figura 33; presenta un coeficiente de correlación $R = 0.71$. Para la estación 003 se observa en las figura 34; presenta un coeficiente de correlación $R = 0.81$

La baja relación de los índices ISQA y del WQI, en las estaciones 001, posiblemente se deba al efecto de la estandarización del método de coliformes y al leve aumento de caudal entre las estaciones. Dado que al eliminar el resultado del primer muestreo la correlación mejora.

5.3 Procesos de auto depuración

5.3.1 Relación de parámetros entre las estaciones. Con el propósito de determinar el tramo entre estaciones para determinar los coeficientes cinéticos de descomposición de la materia orgánica y el de reoxigenación. Se graficaron los parámetros de la estación 002 en función de los de la estación 001, y los parámetros de la estación 003 en función de los de la estación 001 y, por último, los parámetros de la estación 003 en función de los de la estación 002.

Los resultados muestran mejores coeficientes de correlación (R) al relacionar los parámetros de la estación 002 en función de los parámetros de la estación 001. Como se presentan en las figuras de la 35 a la 38. Puede observarse para el oxígeno disuelto un $R = 0.90$; los nitratos tienen un $R = 0.94$; la turbiedad tiene un $R = 0.94$; los sólidos suspendidos tienen un $R = 0.81$; El

pH y los fosfatos tienen un $R = 0.7$. Los otros parámetros tienen menores coeficientes de correlación.

Para el cálculo de los coeficientes cinéticos intervienen los parámetros de de oxígeno disuelto y la DBO_5 como se observa en las ecuaciones (20) y (28). Los mejores resultados de coeficientes de correlación se obtienen al relacionar los parámetros de la estación 002 en función de la estación 001. Para el oxígeno disuelto se tiene un $R = 0.9$ y para la DBO_5 un $R = 0.5$

Con lo expuesto se tiene que los resultados que mejor se relacionan son los correspondientes a las estaciones 002 en función de la estación 001. La estación 001 es la ubicada en la antigua hidroeléctrica de San Pedro Sacatepéquez y la estación 002 es la ubicada en la aldea Chim de San Pedro Sacatepéquez; que distan a 8.125 kms. Del análisis también se tiene que los resultados que se relacionaron en segundo lugar son los correspondientes a la estación 002 en función de la estación 003. La estación 003 es la ubicada en la estación hidrométrica de Corral Grande de San Pedro Sacatepéquez.

5.3.2 Coeficientes cinéticos. En el fenómeno de la auto depuración de los ríos. Intervienen varios factores y procesos ambientales del río como el tipo de materia orgánica e inorgánica contenida en el agua, las características físicas del río, la temperatura, la presión atmosférica, las condiciones hidráulicas del río, etc.

Streeter y Phelps⁴⁹ (1925) lo resumieron en dos procesos: el de degradación de la materia orgánica y el de reoxigenación del río. En este

⁴⁹ Ibidem Streeter y Phelps.

sentido los coeficientes cinéticos k_1 y k_2 son las constantes de la velocidad con que se degrada la materia prima y la velocidad con que el oxígeno se disuelve en el agua del río (reoxigenación), como se explica en las ecuaciones 16 y 22, respectivamente.

Para la determinación de los coeficientes cinéticos k_1 y k_2 , se requiere de un tramo del río, con punto inicial y punto final. Como se explicó en la sección de metodologías. En la sección 5.3.1, se determinaron los tramos, definiéndose el tramo 1 con los mejores resultados de correlación de los parámetros entre las estaciones 001 y la 002; y el tramo 2 entre las estaciones 002 y la 003.

El coeficiente cinético de degradación de la materia orgánica (k_1), definido por la ecuación 16, depende de la cantidad y tipo de microorganismos presentes en el agua, de la materia orgánica suspendida en el río, de la temperatura y el oxígeno disuelto.

Los resultados del coeficiente de degradación de la materia orgánica (k_1), para cada tramo se presentan en la tabla XX. Se observa que para el tramo 1 entre las estaciones 001 y 002, los valores promedios para k_1 es de 6.28 día^{-1} y desviación estándar de ± 2.96 . Y para el tramo 2 entre las estaciones 002 y 003, los valores promedios para k_1 es de 42.69 día^{-1} . Y desviación estándar es de ± 28.96 .

En el análisis de la ecuación 16, se tiene que el valor de k_1 , es el resultado del cociente entre: el logaritmo de la relación entre la DBO final y la inicial, y el tiempo de recorrido del agua entre el punto inicial y final. El signo negativo es porque los valores de la DBO disminuyen con el tiempo. El valor

numérico indica la constante de la degradación de la materia orgánica por unidad de tiempo (día^{-1}).

En el tramo 1 de la estación 001 a la estación 002 la constante k_1 define la velocidad de degradación de la materia orgánica por unidad de tiempo (día^{-1}). Está entre el rango de valores que describe Metcalf⁵⁰ y los obtenidos por De León⁵¹ en el estudio sobre coeficientes cinéticos sobre el río Samalá. También se observa que la desviación estándar es baja comparada con los resultados del tramo 2. Las posibles explicaciones son que en el tramo 1 los caudales entre las dos estaciones son cercanas, mientras que en el tramo 2 los caudales son muy diferentes; como se puede observar en la figura 46. Sobre el comportamiento de caudales en las estaciones y fechas de muestreo.

El coeficiente cinético de reoxigenación del agua (k_2) es definido por la ecuación 22. La constante k_2 , depende de varios factores como la temperatura y presión ambiental, la temperatura del agua, de las condiciones físicas e hidráulicas del río, de la velocidad de difusión del oxígeno de la atmósfera para el agua.

Los resultados del coeficiente de reoxigenación del agua (k_2), para cada tramo del río, se presentan en tabla XX se observa que para el tramo 1, entre las estaciones 001 y 002, los valores promedios para k_2 son de 19.73 día^{-1} y desviación estándar de ± 6.64 ; y para el tramo 2 entre las estaciones 002 y 003,

⁵⁰ Metcalf y Heddy (1997) "Ingeniería de las aguas residuales" tratamiento vertido y reutilización. Tercera edición. Volumen I, Capítulo 3: México: Editorial McGraw-Hill

⁵¹ De LEÓN Barrios Francisco Khalil. Estudio de calidad del agua del río Samalá del tramo Cantel – Zunil – El Palmar, Quetzaltenango. Tesis de Maestro en Ciencias, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005

los valores promedios para k_2 son de 196.36 día^{-1} , y desviación estándar de ± 153.05 .

En el análisis de la ecuación 22 se tiene que el valor de k_1 , es el resultado del cociente entre el logaritmo de la relación entre el déficit de oxígeno final y el inicial y el tiempo de recorrido del agua entre el punto inicial y final. El signo negativo es porque los valores de la DBO disminuyen con el tiempo. El valor numérico indica la constante de la degradación de la materia orgánica por unidad de tiempo (día^{-1}).

En el tramo 1 de la estación 001 a la estación 002 la constante k_2 que define la velocidad de oxigenación del agua del río (reoxigenación) por unidad de tiempo (día^{-1}). Está entre el rango de valores que describe Metcalf⁵² y los obtenidos por De León⁵³ en el estudio sobre coeficientes cinéticos sobre el río Samalá. También se observa que la desviación estándar es baja comparada con los resultados del tramo 2. Las posibles explicaciones son que en el tramo 1 los caudales entre las dos estaciones son cercanos, mientras que en el tramo 2 los caudales son muy diferentes; como se puede observar en la figura 47. Sobre el comportamiento de caudales en las estaciones y fechas de muestreo. Además, las correlaciones de parámetros entre estaciones son mejores resultados para el tramo 1.

5.3.3 Constante de auto depuración “f” de Fair. Los resultados de la constante de auto depuración f se presentan en la tabla XX. Los valores promedios determinados entre la estaciones 001 y 002 son de 3.18 y una desviación 1.59, con valores extremos de 6.08 máximo y de 1.03 mínimo. Y

⁵² Ibidem Metcalf y Heddy (1997)

⁵³ Ibidem De LEÓN Barrios Francisco Khalil.

entre las estaciones 002 y la 003, se obtuvo el valor promedio de 5.11 y desviación estándar de 2.41. Con valores extremos de 9.46 máximo y de 1.88 mínimo. Y como promedio general 4.45.

En base a la clasificación de la tabla V, el río se clasifica entre las estaciones 001 a la 002 como corrientes rápidas; y entre las estaciones 002 a la 003 como corrientes rápidas y cascadas. Y la clasificación con los valores extremos es: desde corrientes remansadas hasta corrientes rápidas y cascadas.

La interpretación es que las pendientes debido a la topografía del terreno y el tipo geología del suelo con piedras de origen volcánico (como se describe en la tabla XXIV), hacen que las corrientes sean rápidas, con cascadas y con remansos. Esto le permiten tener buena reoxigenación del agua y buena desoxidación (Oxidación de la materia orgánica).

5.4 Carga contaminante

Los valores de la carga orgánica presentados en la tabla XXI, permiten analizarlos por procesos de reoxidación y reoxigenación y por contenido de nutrientes y sólidos por contaminación. Es importante indicar que los valores de la carga contaminante son afectados por los aportes de contaminación y corrientes de agua de la subcuencas (figura 51 del apéndice).

Los valores de la DBO_5 , expresados en Kg/día, en las diferentes fechas y estación de muestreo, se presentan en la tabla XXI. Puede observarse que los valores promedios disminuyen de la estación 001 a la 002 y aumentan de la estación 002 a la 003. Excepto en el muestreo realizado el 20/04/08, cuya

tendencia fue de aumento entre las estaciones 001 a la 003, como se observa en la figura 38. Lo que indican los resultados es que el proceso de desoxigenación (oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica), está en desarrollo por los microorganismos, como una de las características de auto depuración del río. La disminución de la DBO_5 en la estación 002 quizás, se deba al ingreso de la subcuenca del río Tacaná al cauce principal.

Los valores de la demanda química de oxígeno, expresados en Kg/día en las diferentes fechas y estación de muestreo, se presentan en la tabla XXI. Puede observarse que los valores promedios disminuyen de la estación 001 a la 002 y aumentan de la estación 002 a la 003. Excepto en tres muestreos en donde la tendencia fue de aumento entre las estaciones 001 a la 003, como se observa en la figura 40. Lo que indican los resultados es que el proceso de desoxigenación (oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica e inorgánica), está en desarrollo por biológicos y químicos, como una de las características de auto depuración del río.

Los valores del contenido de fosfatos, expresados en Kg/día en las diferentes fechas y estación de muestreo, se presentan en la tabla XXI. Puede observarse que los valores promedios aumentan de la estación 001 a la 003, como se observa en la figura 41. El aumento del contenido de fosfatos se debe al aumento de la contaminación debido a los aportes de las aguas residuales, actividades agrícolas, entre otros en el trayecto entre las estaciones. De acuerdo con el ciclo del fósforo, se requiere de condiciones y niveles para que los nutrientes sean removidos por procesos de eutrificación. Es importante indicar el incremento que se da entre las estaciones 002 y la 003. Y la explicación se debe al ingreso de las aguas de la subcuenca del río Palatza que

lleva las aguas residuales de los municipios de San Marcos y Esquipulas Palogordo.

Los valores del contenido de nitratos, expresados en Kg/día en las diferentes fechas y estación de muestreo, se presentan en la tabla XXI. Puede observarse que los valores promedios aumentan de la estación 001 a la 003, como se observa en la figura 42. El aumento del contenido de nitratos se debe al aumento de la contaminación debido a los aportes de las aguas residuales, actividades agrícolas entre otros, en el trayecto entre las estaciones. De acuerdo con el ciclo del nitrógeno, se requieren de condiciones y niveles para que los nutrientes sean removidos por procesos de eutrificación. Es importante indicar el incremento que se da entre las estaciones 002 y la 003. Y la explicación es debida al ingreso de las aguas de la subcuenca del río Palatza que lleva las aguas residuales de los municipios de San Marcos y Esquipulas Palogordo.

Los valores del contenido de sólidos totales, expresados en Kg/día en las diferentes fechas y estación de muestreo, se presentan en la tabla XXI. Puede observarse que los valores promedios aumentan de la estación 001 a la 003, como se observa en la figura 43. El aumento del contenido de sólidos totales se debe al aumento de la contaminación debido a los aportes de las aguas residuales y las actividades económicas que realizan pobladores en el trayecto, entre las estaciones. Es importante indicar el notable incremento que se da entre las estaciones 002 y la 003. Y la explicación es debida al ingreso de las aguas de la subcuenca del río Palatza que lleva las aguas residuales de los municipios de San Marcos y Esquipulas Palogordo

Los valores del contenido de sólidos suspendidos y disueltos, expresados en Kg/día. En las diferentes fechas y estación de muestreo, se presentan en la tabla XXI. Puede observarse que los valores promedios aumentan de la estación 001 a la 003, como se observa en la figuras 44 y 45. El aumento del contenido de estos sólidos. Es debido al aumento de la contaminación debido a los aportes de las aguas residuales y las actividades económicas que realizan pobladores en el cauce del río, en el trayecto entre las estaciones. Es importante indicar el notable incremento que se da entre las estaciones 002 y la 003. Y la explicación es debida al ingreso de las aguas de la subcuenca del río Palatza que lleva las aguas residuales de los municipios de San Marcos y Esquipulas Palogordo

En los valores de la relación entre la DBO_5 y la DQO, presentada en la tabla XXI, se observa que el promedio general disminuye de la estación 001 a la estación 002 con valores de 0.6 a 0.31 con valores extremos. Máximo 1.31 y mínimo 0.11. Como se observa en la figura 46. Los valores de la relación DBO/DQO con rangos de 0.2 a 0.6 indican que la materia orgánica es altamente biodegradable.

5.5 Análisis hidrológicos. La calidad de las aguas varía en las tres dimensiones, las cuales son, además, modificadas por las condiciones de flujo, descargas y el tiempo. Consecuentemente, la calidad del agua no puede ser medida solamente en una única localidad dentro del contexto límite del cuerpo de agua, sino que puede requerir una red de muestreo. En la figura 47 puede observarse la diferencia de caudal en las tres estaciones (001, 002 y 003). El mayor caudal se tuvo en la estación 003, datos intermedios en la estación 002 y los caudales bajos en la estación 001. La explicación es que el río Naranjo en el área de estudio tiene cinco afluentes o subcuencas.

CONCLUSIONES.

- 1 Los Índices de Calidad del Agua WQI y Simplificado de Calidad ISQA, muestran la auto recuperación del agua del río Naranjo de la estación 001 a la estación 003. Donde intervienen dos factores importantes, la degradación de la materia orgánica por vía biológica, y la dilución del agua debido al ingreso de otras corrientes por el aumento de caudal. Pero el agua en la estación hidrométrica Corral Grande, presenta malos índices de calidad y no se recomienda reutilizarla con fines de consumo humano, comprobándose la hipótesis.
- 2 Las características hidrológicas, físicas, químicas y biológicas registraron valores que evidencian un claro deterioro del ecosistema del río Naranjo. Los factores coliformes fecales, la demanda bioquímica de oxígeno, los fosfatos y los sólidos totales son los de mayor significancia por las cantidades encontradas en las aguas.
- 3 Los coeficientes cinéticos de descomposición bioquímica de materia orgánica (desoxigenación k_1) y de reaireación (reoxigenación k_2), determinados experimentalmente entre las estaciones 001 (antigua hidroeléctrica de San Pedro) y la estación 002 (aldea Chim de San Pedro Sacatepéquez), en la parte alta de la cuenca del río Naranjo son: $k_1 = 6.28 \text{ día}^{-1}$ con una desviación estándar de 2.96 y $k_2 = 19.73 \text{ día}^{-1}$ con desviación estándar de 6.64. Y la constante de (f) Fair de 3.18 y con desviación estándar de 1.59, clasificando la parte alta de la cuenca del río Naranjo como corrientes rápidas. Estos resultados son similares a los obtenidos por De León (2005) para la parte alta de la cuenca del río Samalá y dentro de los rangos dados por diversos

autores citados por Metcalf y Heddy (1997), Hernández (1988) y Saravia (2008).

- 4 La tendencia observada de la carga contaminante expresada en los parámetros sólidos totales, fosfatos, nitratos DBO₅ y DQO es de aumento de la estación 001 a la 003; por ejemplo, para los sólidos totales determinados en la estación 001 es de 5,406 Kg./día en la estación 002, es de 7,040 Kg./día y en la estación 003 de 55,467 Kg./día.

RECOMENDACIONES

- 1 Se recomienda a las municipalidades de los municipios de San Antonio Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, San Marcos (cabecera) y Esquipulas Palogordo, del departamento de San Marcos y el municipio de Palestina de los Altos del departamento de Quetzaltenango, promover acciones individuales y conjuntas a nivel nacional e internacional, para desarrollar planes, programas y proyectos de intervención para cambiar el estado actual de las aguas de la cuenca del río Naranjo en la parte alta.
- 2 Se recomienda a universidades, instituciones gubernamentales y no gubernamentales desarrollar investigaciones para el monitoreo de los recursos hídricos en la cuenca del río Naranjo.
- 3 se recomienda realizar estudios sobre el cauce principal que considere los ingresos de agua residual y de afluentes. Que permita un modelo hidrológico de entradas y salidas de agua al cauce del río Naranjo, así como aplicar modelos con sistemas informáticos.
- 4 Para la reutilización de las aguas en la estación hidrométrica de Corral Grande, se recomienda realizar procesos de potabilización del agua removiendo sólidos totales, suspendidos y la desinfección del agua a través de procesos unitarios como: desarenación, floculación, sedimentación y desinfección.

- 5 Se recomienda realizar estudios epidemiológicos en comunidades que habitan sobre la ribera de la cuenca del río Naranjo, que utilizan el agua del río para diversas actividades domésticas, agrícolas, de recreación y pequeña industria.

6 BIBLIOGRAFÍA

- 1 INSIVUMEH 2007 (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Metrología e Hidrología). Boletín hidrológico No. 19, pp. 225-45.
- 2 FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, “Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo” versión electrónica 2007.
- 3 INE. Instituto Nacional de Estadística, 2002. “Onceavo censo poblacional y habitacional Guatemala, versión electrónica.
- 4 INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología); MAGA (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación). 2005, Atlas hidrogeológico escala 1:250,000
- 5 CEPIS/OMS/OPS, Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida, Manual 1, tomo 1, capítulo 1, versión electrónica. Lima: Perú 2004.
- 6 Metcalf y Heddy (1997) Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento vertido y reutilización. Tercera edición. Volumen I, Capítulo 3. México: Editorial McGraw-Hill.
- 7 Wachsman, M. otros, aplicación de diferentes técnicas de recuento para bacterias de importancia sanitaria, abril de 2006. Área de microbiología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Buenos Aires, Argentina.

- 8 Cálculo de NSF Índice de calidad del agua, http://www.water-research_net-watrqualindex-index.htm, Wilkes University Center for Environmental Quality Environmental Engineering and Earth Sciences.
- 9 Pelczar y otros; Fundamentos de microbiología, cuarta edición. México: McGraw-Hill, 1982, pp 220.
- 10 Dinius, S. H. (1987) "Design of a Water Quality Index" W:R: V23 #5 833-843
- 11 Índice Simplificado de la Calidad del Agua (ISQA) http://mediambient.gencat.net/aca/es//aiguamediri/rius/indexs_qualitat.jsp
- 12 Hernández. M. A. (1988) "Depuración de aguas residuales" 4ta ed. Paraninfo S.A. Madrid, España pp. 99-171.
- 13 Streeter y Phelps "A Study Of The Pollution And Natural Purification Of The Ohio River. Factors Concerned in the Phenomena of Oxidation and Reaeration, United States Public Health Service - Public Health Bulletin No. 146 February, 1925, 69 pp, version electronic.
- 14 Saravia, Pedro. "Contaminación del agua". Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008.
- 15 Fuentes de Oxígeno en un río. <http://www.fing.edu.uy/~danielg/repart/O2encursos.doc>

- 16 IMTA (1991), Manual de aforos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Kenedy P. A. otros, colección manuales. Pág. 3-25
- 17 IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1978. Mapa topográfico de la república de Guatemala; escala 1:25,000. Color. Hojas cartográficas No. III y IV.
- 18 DE LEÓN Barrios Francisco Khalil. Estudio de calidad del agua del río Samalá del Tramo Cantel – Zunil – El Palmar Quetzaltenango. Tesis de Maestro en Ciencias, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005.
- 19 Kazmier L. y otros, (1996), “Estadística aplicada a la administración y la economía” 2da edicion. México: Editorial McGraw-Hill. pp145-162
- 20 Métodos normalizados para el análisis de agua potable y residual. Madrid, España: Ediciones Díaz Santos S.A.1992. pp. 1-1 a 6-13.
- 21 BOLETÍN hidrológico No. 19. Información 2001-2007. Guatemala. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH 2007. pp. 50-95.
- 22 STÁNDAR Methods for the Examination of Water & Wastewater.18^a ed. Maryland: Victor Graphics, Inc., 1992. pp. 1-100.
- 23 Pelczar Jr. M otros (1982) Microbiología, cuarta edición. México: McGraw-Hill, pp 200.

- 24 Colilert, Quanta-Tray/2000 y Defined Substrate Technology, IDEXX Laboratories, Inc de los Estados Unidos www.idexx.com
- 25 MICHAUD, Jerry P. (2001). Eurovisión – Environmental Consulting Service-Olympia-Washington
www.ecy.gov/programs/wq/plant/management/yourmanual/streams.html.
- 26 ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006 “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”. Versión electrónica. Guatemala, mayo de 2006
- 27 SAWYER, Clair N. Perry Mc Carty. (1978). Chemistry for Environmental Engineering. 3th Edition. McGraw-Hill Publishing Company.
- 28 Wetzel, R. (1981) Limnología. Barcelona España: Ediciones Omega, S. A. pp. (50 – 100)
- 29 LORY, J.A. (1999). Agricultural phosphorus and water quality. MU guide extension. University of Missouri. Columbia.
- 30 INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2005. Atlas hidrológico. Escala 1:250,000.
- 31 IGN. INE. MAGA. MANCUENA. Planificación estratégica territorial. Oficina intermunicipal de planificación. Mancomunidad de municipios de la cuenca del río Naranjo. 2008.

- 32 BARROS, S. otros. Recuperación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Cuenca. Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones. Agua potable y alcantarillado del cantón Cuenca. Ecuador. Universidad del Azuay – Escuela de Biología, edición universitaria.
- 33 MÉTODOS normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A., 1992. pp. 1-1 a 6-13.
- 34 CANTER, L.W.(1998). Manual de evaluación del impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto. 2da. edición. Editorial McGraw - Hill Interamericana de España.
- 35 CEPIS/OMS/OPS, Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1. Tomó 1, versión electrónica, Lima, Perú, 2004.
- 36 STANDARD methods for the examination of water & wastewater. 18^a ed. Maryland: Victor Graphics, Inc., 1992. pp. 1-21.
- 37 Jolánkai, Géza “Basic river water quality models” Technical Documents in Hydrology No. 13, International Hydrological Programme, UNESCO, París 1997. 50 pp.
- 38 Truque B. Paola Andrea. Armonización de los estándares de agua potable en América, OMS/OPS, informe 2005.
- 39 Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales MARN. “Proyecto estudios de cambio climático con énfasis en adaptación”. Programa nacional del cambio

climático. Guatemala Centro América, compilación y síntesis. noviembre de 2007. versión electrónica.

40 Oxígeno disuelto a diferentes presiones y temperaturas
http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm

APÉNDICES

TABLAS

Tabla XXII. Porcentaje de área por municipio que integra la cuenca del río Naranjo

PARTE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	% ÁREA EN LA CUENCA
ALTA	San Juan Ostuncalco	Quetzaltenango	64.3
	San Martín Sacatepéquez	Quetzaltenango	68.4
	Palestina de los Altos	Quetzaltenango	75.6
	San Antonio Sacatepéquez	San Marcos	68.7
	San Pedro Sacatepéquez	San Marcos	84.6
	San Marcos	San Marcos	27.3
	Esquipulas Palogordo	San Marcos	28.5
	San Cristóbal Cucho	San Marcos	100
MEDIA	El Quetzal	San Marcos	100
	La Reforma	San Marcos	100
	Nuevo Progreso	San Marcos	100
	El Tumbador	San Marcos	95
	El Rodeo	San Marcos	60
	Colomba Costa Cuca	Quetzaltenango	60
BAJA	Ocos	San Marcos	25
	Ayutla	San Marcos	70
	Catarina	San Marcos	60
	Pajapita	San Marcos	100
	Coatepeque	Quetzaltenango	10

Fuente: FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, "Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo" versión electrónica 2007.GIRH, FUNSOLAR

Tabla XXIII Caudales medios mensuales m³/s en las estaciones hidrométricas indicadas

Estación	ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic	anual
Coatepeque	11.65	25.22	26.47	30.37	42.97	40.97	21.29	14.61	10.76	9.23	8.00	8.52	20.84
Chuva	3.62	5.91	8.48	7.60	11.68	7.77	5.10	4.29	3.54	3.28	3.22	3.69	5.68
Corral Grande	1.37	2.44	2.37	2.65	3.55	2.39	2.39	1.63	1.39	1.33	1.29	1.24	2.10

Fuente: FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, "Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo" versión electrónica 2007.GIRH, FUNSOLAR

Tabla XXIV. Tipos de suelos en la cuenca

Símbolo	Tipo de roca	Período	Características
Op	Rocas ígneas y metamórficas	Cuaternario	Rellenos y cubiertas gruesas de ceniza y pómez, diverso origen
Qv	Rocas ígneas y metamórficas	Cuaternario	Rocas volcánicas, coladas de lava, material lahárico, tobas y edificios volcánicos
Tv	Rocas ígneas y metamórficas	Terciario	Rocas volcánicas sin dividir, predomina mió plioceno, tobas, colada de lava material lahárico y sedimento volcánico

Fuente: FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, "Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo" versión electrónica 2007. GIRH, FUNSOLAR.

Tabla XXV. Presión Barométrica Aproximada a Diferentes Elevaciones

Elevación (pies)	Presión (mm Hg)	Elevación (pies)	Presión (mm Hg)	Elevación (pies)	Presión (mm Hg)
0	760	2000	708	4000	659
250	753	2250	702	4250	653
500	746	2500	695	4500	647
750	739	2750	689	4750	641
1000	733	3000	683	5000	635
1250	727	3250	677	5250	629
1500	720	3500	671	5500	624
1750	714	3750	665	5750	618

Fuente: http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm

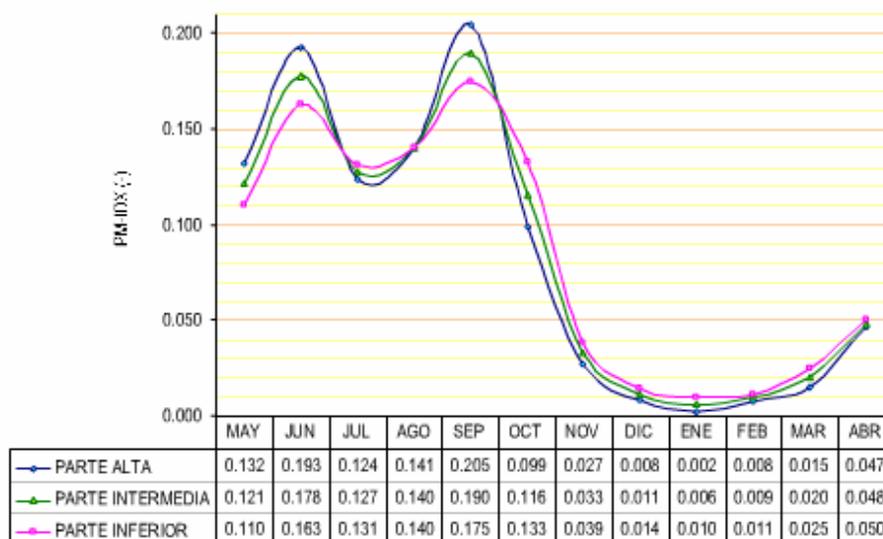
Tabla XXVI. Oxígeno disuelto en el agua en condiciones de saturación a diferentes presiones y temperatura.

Tem.	PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN mm de Mercurio.											
	770	760	750	740	730	720	710	700	690	680	770	660
0°C	14.76	14.57	14.38	14.19	13.99	13.80	13.61	13.42	13.23	13.04	12.84	12.65
1°C	14.38	14.19	14.00	13.82	13.63	13.44	13.26	13.07	12.88	12.70	12.51	12.32
2°C	14.01	13.82	13.64	13.46	13.28	13.10	12.92	12.73	12.55	12.37	12.19	12.01
3°C	13.65	13.47	13.29	13.12	12.94	12.76	12.59	12.41	12.23	12.05	11.88	11.70
4°C	13.31	13.13	12.96	12.79	12.61	12.44	12.27	12.10	11.92	11.75	11.58	11.40
5°C	12.97	12.81	12.64	12.47	12.30	12.13	11.96	11.80	11.63	11.46	11.29	11.12
6°C	12.66	12.49	12.33	12.16	12.00	11.83	11.67	11.51	11.34	11.18	11.01	10.85
7°C	12.35	12.19	12.03	11.87	11.71	11.55	11.39	11.23	11.07	10.91	10.75	10.59
8°C	12.05	11.90	11.74	11.58	11.43	11.27	11.11	10.96	10.80	10.65	10.49	10.33
9°C	11.77	11.62	11.46	11.31	11.16	11.01	10.85	10.70	10.55	10.39	10.24	10.09
10°C	11.50	11.35	11.20	11.05	10.90	10.75	10.60	10.45	10.30	10.15	10.00	9.86
11°C	11.24	11.09	10.94	10.80	10.65	10.51	10.36	10.21	10.07	9.92	9.78	9.63
12°C	10.98	10.84	10.70	10.56	10.41	10.27	10.13	9.99	9.84	9.70	9.56	9.41
13°C	10.74	10.60	10.46	10.32	10.18	10.04	9.90	9.77	9.63	9.49	9.35	9.21
14°C	10.51	10.37	10.24	10.10	9.96	9.83	9.69	9.55	9.42	9.28	9.14	9.01
15°C	10.29	10.15	10.02	9.88	9.75	9.62	9.48	9.35	9.22	9.08	8.95	8.82
16°C	10.07	9.94	9.81	9.68	9.55	9.42	9.29	9.15	9.02	8.89	8.76	8.63
17°C	9.86	9.74	9.61	9.48	9.35	9.22	9.10	8.97	8.84	8.71	8.58	8.45
18°C	9.67	9.54	9.41	9.29	9.16	9.04	8.91	8.79	8.66	8.54	8.41	8.28
19°C	9.47	9.35	9.23	9.11	8.98	8.86	8.74	8.61	8.49	8.37	8.24	8.12
20°C	9.29	9.17	9.05	8.93	8.81	8.69	8.57	8.45	8.33	8.20	8.08	7.96
21°C	9.11	9.00	8.88	8.76	8.64	8.52	8.40	8.28	8.17	8.05	7.93	7.81
22°C	8.94	8.83	8.71	8.59	8.48	8.36	8.25	8.13	8.01	7.90	7.78	7.67
23°C	8.78	8.66	8.55	8.44	8.32	8.21	8.09	7.98	7.87	7.75	7.64	7.52
24°C	8.62	8.51	8.40	8.28	8.17	8.06	7.95	7.84	7.72	7.61	7.50	7.39
25°C	8.47	8.36	8.25	8.14	8.03	7.92	7.81	7.70	7.59	7.48	7.37	7.26
26°C	8.32	8.21	8.10	7.99	7.89	7.78	7.67	7.56	7.45	7.35	7.24	7.13
27°C	8.17	8.07	7.96	7.86	7.75	7.64	7.54	7.43	7.33	7.22	7.11	7.01
28°C	8.04	7.93	7.83	7.72	7.62	7.51	7.41	7.30	7.20	7.10	6.99	6.89
29°C	7.90	7.80	7.69	7.59	7.49	7.39	7.28	7.18	7.08	6.98	6.87	6.77

Fuente: http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm

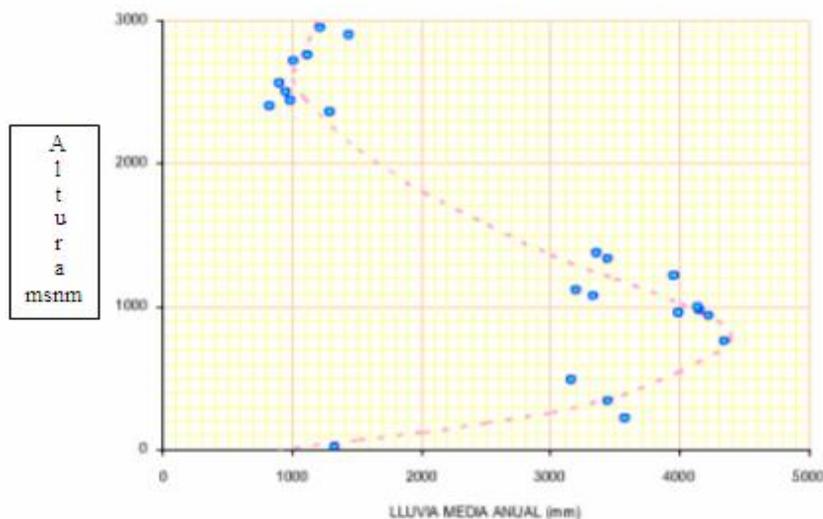
FIGURAS

Figura 48. Lluvia media mensual en base al índice promedio mensual



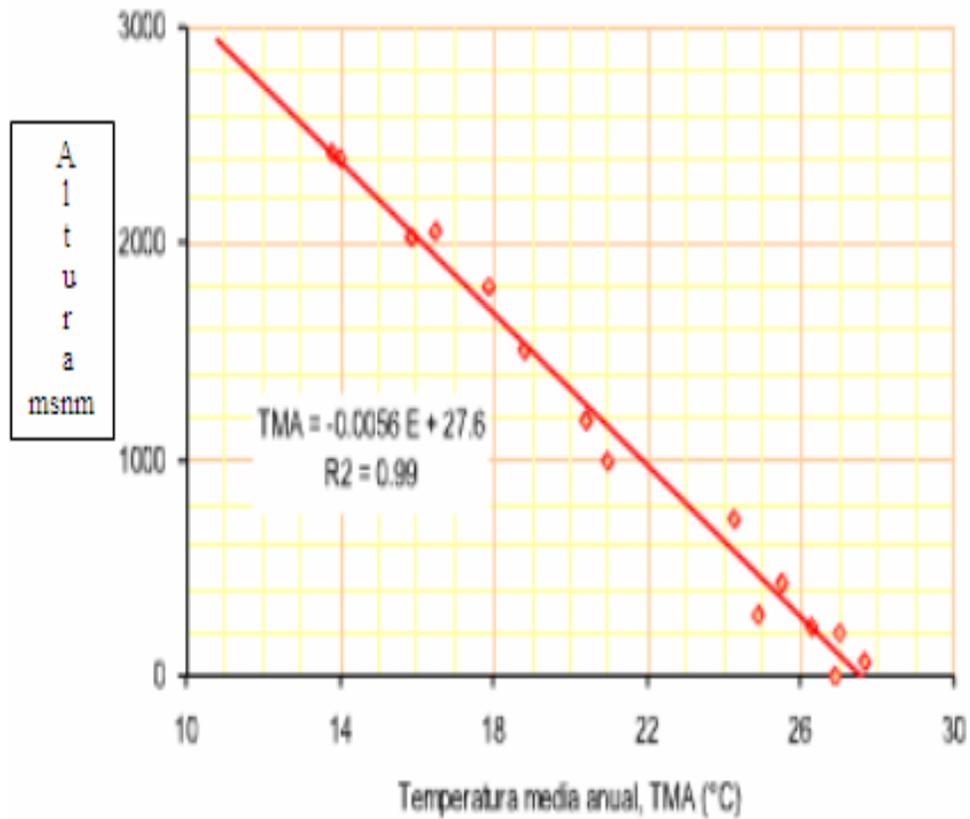
Fuente: FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, “Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo” versión electrónica 2007.GIRH.

Figura 49 Régimen de lluvias con respecto a la orografía del terreno



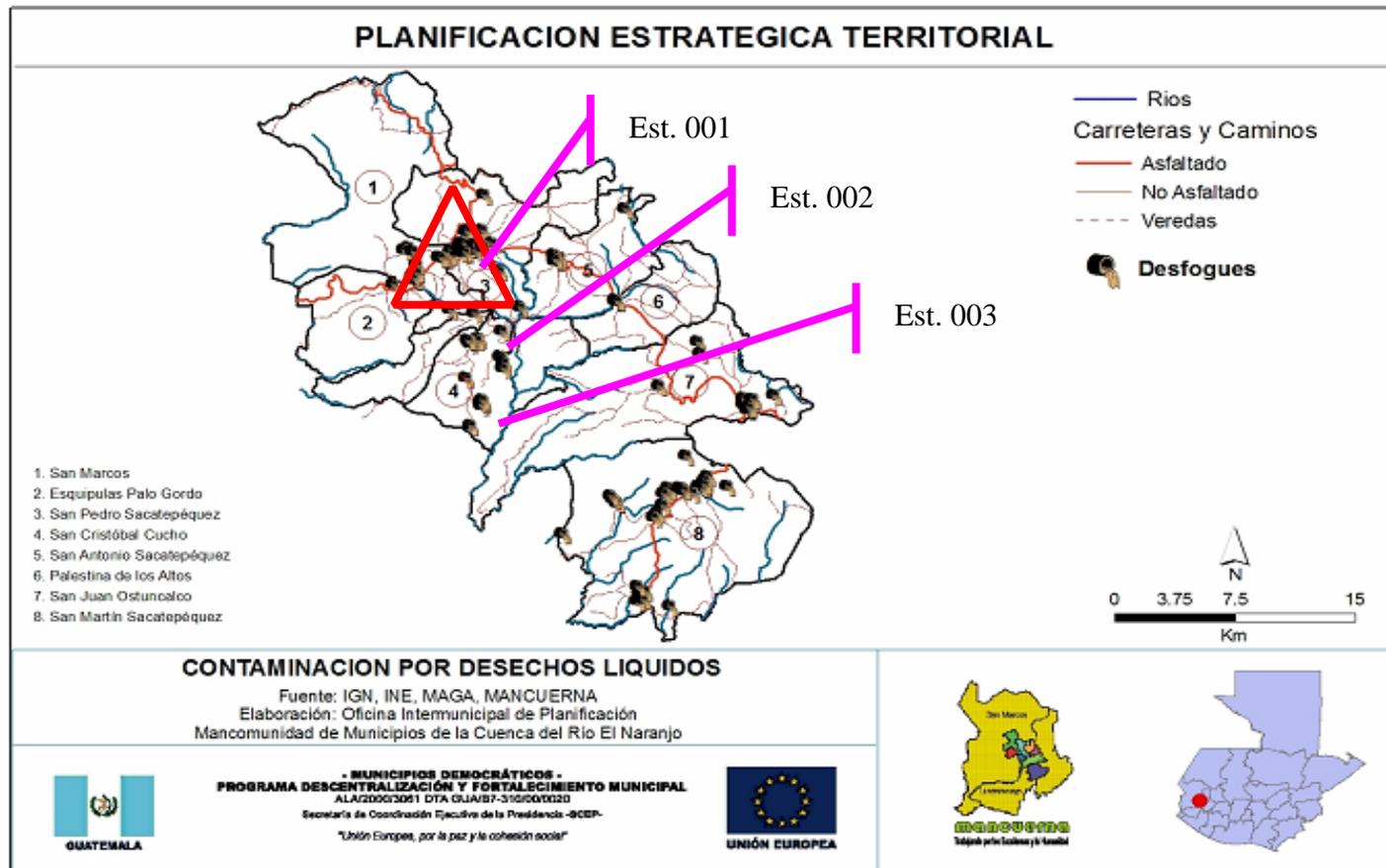
Fuente: FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, “Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo” versión electrónica 2007.GIRH.

Figura 50. Temperatura como función de la orografía



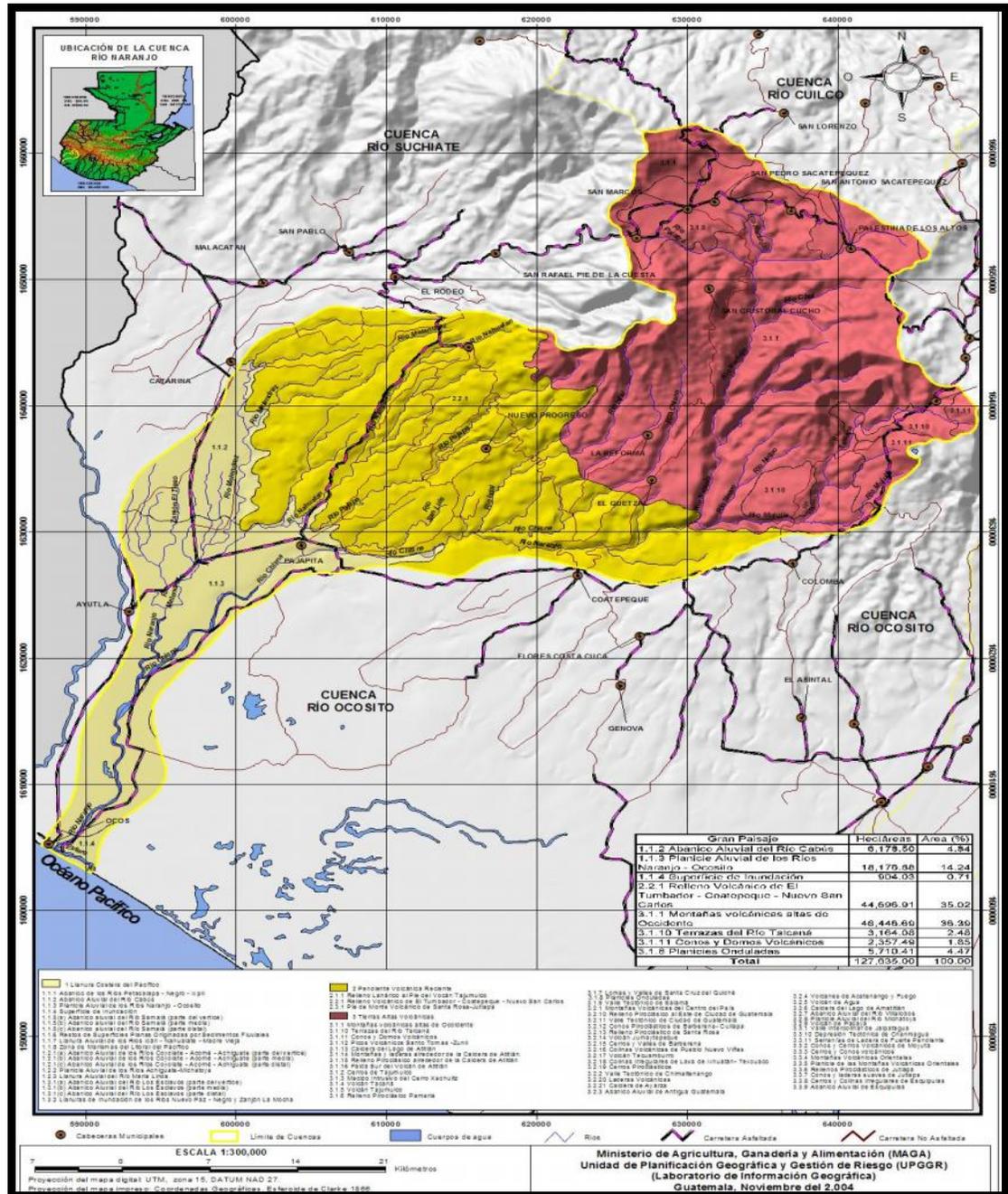
Fuente: FUNSOLAR, CADISNA, MANCUERNA, Holanda, "Gestión integrada del recurso hídrico en la parte alta del río Naranjo" versión electrónica 2007.GIRH.

Figura 51. Descargas de agua residual, municipios de la parte alta, cuenca río Naranjo.



Fuente: IGN. INE. MAGA. MANCUENA. Planificación estratégica territorial. Oficina intermunicipal de planificación. Mancomunidad de municipios de la cuenca del río Naranjo. 2008. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación.

Figura 52. Regiones geomorfológicas de la cuenca del río Naranjo



Fuente: INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT). 2005. Atlas hidrológico. Escala 1:250,000.