

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**“DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL
AGUA NSF Y MODELACIÓN DEL CROMO
HEXALENTE EN LA PARTE ALTA DEL RÍO
SUQUIAPA, SANTA ANA, EL SALVADOR”.**

PRESENTADO POR:

FELICIANA MARÍA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

ERICK DANIEL NOLASCO TOVAR

MIRIAM ELENA SALGUERO SANDOVAL

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

DIRECTOR :

INGA. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO QUÍMICO

Título :

**“DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL
AGUA NSF Y MODELACIÓN DEL CROMO
HEXAVALENTE EN LA PARTE ALTA DEL RÍO
SUQUIAPA, SANTA ANA, EL SALVADOR”.**

Presentado por :

FELICIANA MARÍA HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

ERICK DANIEL NOLASCO TOVAR

MIRIAM ELENA SALGUERO SANDOVAL

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA

San Salvador, Septiembre 2016.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. FERNANDO TEODORO RAMÍREZ ZELAYA

RESUMEN.

Los índices de calidad del agua surgen como una herramienta simple para la evaluación del recurso hídrico, fundamental en procesos decisorios de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos. Este proyecto surge por la necesidad de determinar la calidad actual de las aguas de la parte alta del Río Suquiapa, siendo considerado uno de los tres ríos más contaminados en el país según estudios realizados por el MARN.

En esta investigación se calculó el índice de calidad del agua propuesto por la NSF en la parte alta de la subcuenca del Río Suquiapa, dicho índice se determinó haciendo uso de los parámetros: Potencial de Hidrógeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días, Nitratos, Fosfatos, Cambio de Temperatura, Turbidez, Sólidos Disueltos Totales, Oxígeno Disuelto y Coliformes Fecales, obteniéndose un valor de 50.35, además, se realizó la modelación del Cromo Hexavalente haciendo uso del Programa de Simulación de Análisis de Agua (WASP).

Con los resultados obtenidos de cada uno de los parámetros fisicoquímicos y del parámetro biótico, necesarios para el cálculo del índice de calidad, se determinaron las aptitudes de uso para los diferentes puntos evaluados en el tramo en estudio, haciendo una comparativa con los límites establecidos en el Decreto 51 y parámetros adicionales establecidos de acuerdo al MARN en un estudio realizado en el año 2013.

Finalmente, se proponen medidas preventivas para evitar el aumento de la contaminación en el río en estudio, así como, medidas correctivas para remediar la contaminación presente en dicho cuerpo de agua. Con respecto al Cromo Hexavalente presente en el río, dado que la concentración actual no sobrepasa los límites permisibles por la normativa salvadoreña, se plantea un escenario de remoción de dicho contaminante, para el caso que este aumentara su concentración.

AGRADECIMIENTO.

Damos gracias a **Dios** por permitirnos finalizar una etapa más en nuestra vida.

A nuestros **padres y familiares** por su apoyo incondicional a lo largo de nuestras vidas y principalmente en estos últimos años de formación académica.

A nuestros **amigos y amigas** quienes estuvieron apoyándonos en los momentos, tanto de alegría como de tristeza.

A nuestro querido asesor, el **Ing. Fernando Teodoro Ramírez**, quien nos apoyó en todo momento durante la realización del trabajo de graduación.

A la **Inga. Ana Cecilia Flamenco**, por toda su valiosa colaboración durante todos los años de formación académica y en la realización del trabajo de graduación.

A la **Inga. Vilma de Caballero**, por compartir sus valiosos conocimientos.

A los **docentes** de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por brindarnos sus valiosos conocimientos a lo largo de la carrera.

A **Doris Bonilla**, secretaria de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos, por toda su colaboración.

A **Alexander Padilla** y a **Oscar Morán**, personal de la Planta Piloto de la Universidad de El Salvador, por la colaboración brindada.

A **Julián Ayala**, gerente general del Sauce S.A. de C.V., por la apertura de sus instalaciones para la realización de algunos de los muestreos.

A **Douglas García**, director del Laboratorio de Calidad de Agua de ANDA, por su colaboración con los análisis de DBO₅.

Y finalmente a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proyecto de investigación.

Feliciana Hernández, Erick Nolasco y Miriam Salguero.

ÍNDICE.

CAPÍTULO 1.0. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES.	1
1.1. Generalidades del Río Suquiapa.	2
1.1.1. Indicadores demográficos de Santa Ana.	2
1.1.2. Clima en Santa Ana.	3
1.1.3. Subcuenca del Río Suquiapa.	6
1.1.4. Ríos tributarios del Río Suquiapa.	10
1.1.5. Fuentes contaminantes del Río Suquiapa.	11
1.2. Índices de calidad del agua.	12
1.2.1. Índice de calidad del agua de Oregón.	15
1.2.2. Método Bhargava.	16
1.2.3. Índice de Smith.	17
1.2.4. Índice de calidad del agua de Columbia, Gran Bretaña.	17
1.2.5. Índice de calidad del agua del CCME.	18
1.2.6. Índice de toxicidad acuática.	20
1.2.7. Índice de calidad del agua.	20
1.2.8. Índice de calidad del agua Dinius.	22
1.2.9. Índice de calidad del agua NSF.	23
1.2.9.1. Parámetros fisicoquímicos del NSF-WQI.	25
1.2.9.2. Elemento biótico.	30
1.3. Contaminante Cromo Hexavalente.	31
1.3.1. Cromo hexavalente en aguas superficiales de ríos.	32
1.3.2. Efectos negativos del Cromo Hexavalente en la salud y el medio ambiente.	32
1.4. Modelación ambiental de metales pesados.	33
1.4.1. Definición de modelación de metales pesados.	34
1.4.2. Generalidades del software WASP.	37
1.5. Antecedentes de estudios de calidad de agua.	44
CAPÍTULO 2.0. METODOLOGÍA DE CAMPO.	55
2.1. Técnica de muestreo en ríos.	55
2.2. Procedimiento de medición de parámetros para la determinación del NSF-WQI.	62
2.2.1. Procedimiento de medición del Potencial de Hidrógeno.	62
2.2.2. Procedimiento de medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.	64
2.2.3. Procedimiento de medición de Nitratos.	65
2.2.4. Procedimiento de medición de Fosfatos.	65
2.2.5. Procedimiento de medición del Cambio de Temperatura.	66
2.2.6. Procedimiento de medición de Turbidez.	67
2.2.7. Procedimiento de medición de Sólidos Disueltos Totales.	68
2.2.8. Procedimiento de medición de Oxígeno Disuelto.	69

2.2.9.	Procedimiento de medición de Coliformes Fecales.	71
2.3.	Metodología de cálculo del NSF-WQI.	74
2.4.	Procedimiento de medición de Cromo Hexavalente.	82
2.5.	Procedimiento de modelación de metales pesados.	83
2.5.1.	Segmentación del río.	84
2.5.2.	Calibración del software.	85
2.5.3.	Modelación en el software.	86
CAPÍTULO 3.0. OBTENCIÓN DE RESULTADOS.		93
3.1.	Resultados de parámetros del NSF-WQI.	93
3.1.1.	Potencial de Hidrógeno.	93
3.1.2.	Demanda Bioquímica de Oxígeno.	95
3.1.3.	Nitratos.	96
3.1.4.	Fosfatos.	98
3.1.5.	Cambio de Temperatura.	99
3.1.6.	Turbidez.	101
3.1.7.	Sólidos Totales Disueltos.	103
3.1.8.	Oxígeno Disuelto.	104
3.1.9.	Coliformes Fecales.	106
3.2.	Resultados de la calidad del agua.	107
3.2.1.	Resultados del NSF-WQI.	109
3.3.	Resultados del Cromo Hexavalente.	110
3.4.	Resultados de la modelación del Cromo Hexavalente utilizando el WASP.	111
3.4.1.	Calibración del software.	111
3.4.2.	Modelación del Cromo Hexavalente.	114
CAPÍTULO 4.0. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE DESCONTAMINACIÓN.		116
4.1.	Análisis de parámetros del NSF-WQI.	116
4.1.1.	Potencial de Hidrógeno.	116
4.1.2.	Demanda Bioquímica de Oxígeno.	117
4.1.3.	Nitratos.	117
4.1.4.	Fosfatos.	118
4.1.5.	Cambio de Temperatura.	118
4.1.6.	Turbidez.	119
4.1.7.	Sólidos Totales Disueltos.	120
4.1.8.	Oxígeno Disuelto.	120
4.1.9.	Coliformes Fecales.	120
4.2.	Análisis de los resultados de la calidad del agua.	121
4.2.1.	Análisis de aptitud de uso de los ríos tributarios.	121
4.2.1.1	Análisis de aptitud de uso del punto A02VERTI.	121
4.2.1.2	Análisis de aptitud de uso del punto A04APANT.	123
4.2.1.3	Análisis de aptitud de uso del punto A06SAUCE.	124

4.2.1.4	Análisis de aptitud de uso del punto A07CARCA.....	125
4.2.1.5	Análisis de aptitud de uso del punto A09MOLIN.....	126
4.2.1.6	Análisis de aptitud de uso del punto A11ZARCO.....	128
4.2.1.7	Análisis de aptitud de uso del punto A13VERTI.....	129
4.2.1.8	Análisis de aptitud de uso del punto A15PUENTE.....	130
4.2.1.9	Análisis de aptitud de uso del punto A17GUILGU.....	132
4.2.2.	Análisis de aptitud de uso de los puntos pertenecientes al Río Suquiapa.....	133
4.2.2.1.	Análisis de aptitud de uso del punto A01SUQUI.....	133
4.2.2.2.	Análisis de aptitud de uso del punto A03SUQUI.....	135
4.2.2.3.	Análisis de aptitud de uso del punto A05SUQUI.....	136
4.2.2.4.	Análisis de aptitud de uso del punto A08SUQUI.....	137
4.2.2.5.	Análisis de aptitud de uso del punto A10SUQUI.....	138
4.2.2.6.	Análisis de aptitud de uso del punto A12SUQUI.....	140
4.2.2.7.	Análisis de aptitud de uso del punto A14SUQUI.....	141
4.2.2.8.	Análisis de aptitud de uso del punto A16SUQUI.....	142
4.2.2.9.	Análisis de aptitud de uso del punto A18SUQUI.....	143
4.2.3.	Análisis de aptitud de uso del Río Suquiapa.....	145
4.3.	Análisis de los resultados del Cromo Hexavalente.....	148
4.3.1.	Análisis de Cromo Hexavalente.....	148
4.3.2.	Análisis de la modelación de Cromo Hexavalente en el Río Suquiapa.....	148
4.4.	Medidas de descontaminación del Río Suquiapa.....	151
4.4.1.	Medidas preventivas para evitar la contaminación del Río Suquiapa.....	151
4.4.2.	Medidas correctivas de descontaminación del Río Suquiapa.....	153
4.4.3.	Escenario de remoción de Cromo Hexavalente y su respectiva propuesta de descontaminación.....	155
CONCLUSIONES.....		159
RECOMENDACIONES.....		160
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		162
ANEXOS.....		165
A.	Metodología de campo.....	165
A.1.	Carta de custodia a utilizar en el muestreo.....	165
A.2.	Calendarización de toma de muestras.....	166
A.3.	Equipo medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129.....	167
A.4.	Equipo utilizado para la determinación de Nitratos.....	167
A.5.	Equipo utilizado para la determinación de Fosfatos y Cromo Hexavalente.....	168
A.6.	Equipo utilizado para la determinación de la Turbidez.....	168
A.7.	Equipo utilizado para la determinación del Oxígeno Disuelto.....	169
A.8.	Equipo utilizado para la determinación de los Coliformes Fecales.....	169
A.9.	Descarga de aguas residuales cercana al Río El Molino.....	170
A.10.	Descarga de aguas residuales cercana a la zona del Río Zarco.....	170
A.11.	Fosa séptica cercana al punto A18SUQUI.....	171

A.12.	Presencia de ganado en las cercanías al Río Suquiapa.	171
A.13.	Establo en las cercanías del Río Zarco.	172
B.	Procedimiento de calibración de los equipos utilizados.	173
B.1.	Calibración del Medidor HI 98129 para la determinación del pH.	173
B.2.	Calibración del Labquest Vernier/Sensor TRB-BTA para la determinación de la turbidez.	174
B.3.	Procedimiento de calibración del Medidor HI 98129 para la determinación de los SDT.	175
B.4.	Calibración del Labquest Vernier para la determinación del OD.	176
C.	Fichas técnicas de los sitios de estudio.	179

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1.	Población por edades en Santa Ana.	3
Tabla 1.2.	Índice de calidad del agua. Ventajas y limitaciones.	13
Tabla 1.3.	Ecuaciones para la modelación en WASP.	40
Tabla 1.4.	Antecedentes de estudios de calidad de agua.	45
Tabla 2.1.	Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.	56
Tabla 2.2.	Factores de ponderación NSF.	75
Tabla 2.3.	Ajuste de curvas para determinación de factores de escala Q_i	78
Tabla 2.4.	Clasificación de la calidad de agua en función del índice NSF-WQI.	82
Tabla 3.1.	Resultados de Potencial de Hidrógeno.	94
Tabla 3.2.	Resultados de Demanda Bioquímica de Oxígeno.	95
Tabla 3.3.	Resultados de Nitratos.	97
Tabla 3.4.	Resultados de Fosfatos.	98
Tabla 3.5.	Resultados de Cambio de Temperatura.	100
Tabla 3.6.	Resultados de Turbidez.	102
Tabla 3.7.	Resultados de Sólidos Totales Disueltos.	103
Tabla 3.8.	Resultados de Oxígeno Disuelto.	105
Tabla 3.9.	Resultados de Coliformes Fecales.	106
Tabla 3.10.	Resultados de la calidad del agua.	108
Tabla 3.11.	Resultados de la calidad del agua para la parte alta de la subcuenca del Río Suquiapa.	110
Tabla 3.12.	Resultados de Cromo Hexavalente.	110
Tabla 3.13.	Resultados de conductividad eléctrica.	112
Tabla 4.1.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A02VERTI, de acuerdo al decreto 51.	122
Tabla 4.2.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A02VERTI, según la Norma de la OMS. ...	122
Tabla 4.3.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A04APANT, de acuerdo al decreto 51.	123
Tabla 4.4.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A04APANT, según la Norma de la OMS. ...	124
Tabla 4.5.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A06SAUCE, de acuerdo al decreto 51.	124
Tabla 4.6.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A06SAUCE, según la Norma de la OMS. ...	125
Tabla 4.7.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A07CARCA, de acuerdo al decreto 51.	126
Tabla 4.8.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A07CARCA, según la Norma de la OMS. .	126
Tabla 4.9.	Comparativa de los valores obtenidos para el punto A09MOLIN, de acuerdo al Decreto 51.	127

Tabla 4.10. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A09MOLIN, según la Norma de la OMS....	127
Tabla 4.11. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A11ZARCO, de acuerdo al Decreto 51.	128
Tabla 4.12. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A11ZARCO, según la Norma de la OMS. .	129
Tabla 4.13. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A13VERTI, según el Decreto 51.	129
Tabla 4.14. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A13VERTI, según la Norma de la OMS. ...	130
Tabla 4.15. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A15PUENTE, según el Decreto 51.	131
Tabla 4.16. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A15PUENTE, según la Norma de la OMS.	131
Tabla 4.17. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A17GUILGU, según el Decreto 51.	132
Tabla 4.18. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A17GUILGU, según la Norma de la OMS.	133
Tabla 4.19. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A01SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	134
Tabla 4.20. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A01SUQUI, según la Norma de la OMS....	134
Tabla 4.21. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A03SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	135
Tabla 4.22. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A03SUQUI, según la Norma de la OMS....	136
Tabla 4.23. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A05SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	136
Tabla 4.24. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A05SUQUI, según la Norma de la OMS....	137
Tabla 4.25. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A08SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	138
Tabla 4.26. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A08SUQUI, según la Norma OMS.	138
Tabla 4.27. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A10SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	139
Tabla 4.28. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A10SUQUI según la Norma de la OMS.....	139
Tabla 4.29. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A12SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	140
Tabla 4.30. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A12SUQUI, según la Norma de la OMS....	141
Tabla 4.31. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A14SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	141
Tabla 4.32. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A14SUQUI, según la Norma de la OMS...	142
Tabla 4.33. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A16SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	143
Tabla 4.34. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A16SUQUI, según la Norma de la OMS....	143
Tabla 4.35. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A18SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.....	144
Tabla 4.36. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A18SUQUI, según la Norma de la OMS....	144
Tabla 4.37. Comparativa de los valores obtenidos para el Río Suquiapa, de acuerdo al Decreto 51.....	145
Tabla 4.38. Comparativa de los valores obtenidos, para el Río Suquiapa, según la norma del OMS.....	146
Tabla 4.39. Resumen de las aptitudes de uso evaluadas para en el Río Suquiapa y sus tributarios.	147

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1. Promedio mensual de precipitación en el municipio de Santa Ana.	4
Figura 1.2. Promedio mensual de humedad relativa en el municipio de Santa Ana.....	5
Figura 1.3. Promedio de temperaturas en el municipio de Santa Ana.	6
Figura 1.4. División de una cuenca hidrográfica.	7
Figura 1.5. Ríos de la Subcuenca del Río Suquiapa.	8
Figura 1.6. Manantiales en el área geográfica de interés.	10
Figura 1.7. Ríos principales y secundarios del área geográfica de interés.	11
Figura 1.8. Etapas de un modelo de calidad de agua.....	36

Figura 1.9. Red del modelo con transporte advectivo.....	38
Figura 2.1. Esquema del río principal con sus tributarios..	59
Figura 2.2. Técnicas de muestreo en ríos.....	60
Figura 2.3. Factores de escala, Q para los parámetros involucrados en el NSF-WQI.....	76
Figura 2.4. Imagen Satelital de los 18 tramos de división del Río Suquiapa..	85
Figura 2.5. Pantalla de Datos (Data Set Screen).....	87
Figura 2.6. Pantalla de Segmentos (Segments).....	88
Figura 2.7. Pantalla de Flujos (Flows Screen).....	89
Figura 2.8. Pantalla de intercambios (Exchanges screen).....	90
Figura 2.9. Condiciones de borde (Boundaries).....	91
Figura 2.10. Pantalla de Ejecución del Modelo.....	92
Figura 3.1. Gráfico de valores de Potencial de Hidrógeno.....	94
Figura 3.2. Gráfico de valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno.....	96
Figura 3.3. Gráfico de valores de concentración de Nitratos.....	97
Figura 3.4. Gráfico de valores de concentración de Fosfatos.....	99
Figura 3.5. Gráfico de valores de Cambio de Temperatura.....	101
Figura 3.6. Gráfico de valores de Turbidez.....	102
Figura 3.7. Gráfico de valores de Sólidos Totales Disueltos.....	104
Figura 3.8. Gráfico de valores de Oxígeno Disuelto.....	105
Figura 3.9. Gráfico de valores de concentración de Coliformes Fecales.....	107
Figura 3.10. Gráfica de valores del WQI-NSF para el Río Suquiapa y sus ríos tributarios.....	109
Figura 3.11. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente.....	111
Figura 3.12. Gráfico de valores de conductividad eléctrica.....	113
Figura 3.13. Gráfico de Conductividad Eléctrica por segmento en WASP.....	113
Figura 3.14. Gráfico de Conductividad Eléctrica versus tiempo en WASP.....	114
Figura 3.15. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por segmento en WASP.....	115
Figura 3.16. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por tiempo en WASP.....	115
Figura 4.1. Gráfico de valores de Cambio de Temperatura.....	119
Figura 4.2. Esquema de disposición de Vetiver en balsas.....	154
Figura 4.3. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por segmento en WASP aplicando remediación.....	157
Figura 4.4. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por tiempo en WASP aplicando remediación.....	158

NOMENCLATURA.

ANDA:	Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
ATI:	Índice de toxicidad acuática por sus siglas en inglés.
BCWQ:	Índice de calidad del agua de Columbia, Gran Bretaña por sus siglas en inglés.
°C:	Grado Celsius.
CCME:	Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente por sus siglas en inglés.
CCME-WQI:	Índice de Calidad del Agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente por sus siglas en inglés.
<i>Cl</i> :	Cloruro.
<i>Cr</i> :	Cromo.
<i>Cr</i> ⁰ :	Cromo Metálico.
<i>Cr</i> ³⁺ :	Cromo Trivalente.
<i>Cr</i> ⁶⁺ :	Cromo Hexavalente.
DBO:	Demanda Bioquímica de Oxígeno.
DBO ₅ :	Demanda Bioquímica de Oxígeno en un período de 5 días.
DQO:	Demanda Química de Oxígeno.
DWQI:	El Índice de calidad del agua Dinius por sus siglas en inglés,
g:	Gramo.
GPS:	Global Position System.
h:	Hora.
<i>H</i> ⁺ :	Iones libres de hidrógeno.
km:	Kilómetro.
km ² :	Kilómetro cuadrado.
L:	Litro.
LCD:	Liquid Crystal Display.
M:	Mol/Litro.
m:	Metro.
m ² :	Metro cuadrado.
m ³ :	Metro cúbico.

MARN:	El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
mg:	Miligramo.
min:	Minuto.
ml:	Mililitro.
N:	Nitrógeno.
NMP:	Número Más Probable.
nm:	Nanómetro.
NO_3^- :	Nitrato.
NSF:	National Sanitation Foundation.
NSF-WQI:	Índice de Calidad del Agua propuesto por la Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU por sus siglas en inglés.
NSO:	Norma Salvadoreña Obligatoria.
NTU:	Nephelometric Turbidity Unit.
OD:	Oxígeno Disuelto.
OH ⁻ :	Iones Hidroxilo.
OMS:	Organización Mundial de la Salud.
OWQI:	Índice de calidad del agua de Oregón.
pH:	Potencial de Hidrógeno.
PO_4^{3-} :	Fosfato.
ppm:	Parte por millón.
s:	Segundo.
SDT:	Sólidos Disueltos Totales.
SNET:	Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
UES:	Universidad de El Salvador.
UV:	Ultra Violeta.
WASP:	Programa de Simulación de Análisis de Calidad del Agua, WASP por sus siglas en inglés.
WQI:	Water Quality Index.
µg:	Microgramo.
µm:	Micrometro.
µS:	MicroSiemens.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Determinar la calidad del agua en la parte alta del Río Suquiapa y modelar el comportamiento del Cromo Hexavalente.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar la calidad de las aguas superficiales del Río Suquiapa en el tramo de estudio a través del índice NSF-WQI.
- Determinar el nivel de Cromo Hexavalente y modelar su comportamiento en la parte alta del Río Suquiapa a través del Programa de Simulación de Análisis de Calidad del Agua (WASP).
- Proponer medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del agua del Río Suquiapa.

CAPÍTULO 1.0. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y ANTECEDENTES.

En el capítulo uno se presenta los fundamentos teóricos y antecedentes necesarios para llevar a cabo la investigación.

Se dan a conocer las generalidades del Río Suquiapa e información del departamento de Santa Ana que es donde este se encuentra, como lo son: los indicadores demográficos y el clima de dicho departamento. Con respecto al apartado del clima se detalla información referente a las precipitaciones mensuales, a la humedad relativa y a las temperaturas promedio. Además, se menciona tanto información sobre la subcuenca del Río Suquiapa como de sus ríos tributarios. También se detallan las fuentes contaminantes de dicha subcuenca actualizadas a la fecha.

Además, se describen los índices de calidad del agua, definiendo sus ventajas, limitaciones y otros datos relevantes. Entre los índices definidos se tienen el índice de calidad del agua de Oregon, el método de Bhargava, el índice de Smith, el índice de Columbia, el índice del Consejo Canadiense del Ministerio de Medio Ambiente, el índice de toxicidad acuática, índice de calidad del agua de Dinius y el índice propuesto por la Fundación Nacional de Sanidad de los EE.UU. Se menciona una breve descripción de los parámetros necesarios para el cálculo del índice propuesto por la Fundación Nacional de Sanidad como lo son: los Nitratos, los Fosfatos, el Cambio de Temperatura, el Oxígeno Disuelto, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, la Turbidez, los Sólidos Disueltos Totales, el Potencial de Hidrógeno y los Coliformes Fecales.

También, se presenta información del Cromo Hexavalente como lo son: su presencia en aguas superficiales de ríos y sus efectos negativos, tanto a la salud, como el medio ambiente.

Se presenta información referente a la modelación ambiental de metales pesados. Se definen las generalidades del Programa de Simulación de Análisis de Calidad del Agua.

Por último se mencionan antecedentes de estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, el Servicio Nacional de Estudios Territoriales y la Universidad de El Salvador.

1.1. Generalidades del Río Suquiapa.

Para tener un criterio más amplio y poder caracterizar posteriormente la calidad de las aguas de la subcuenca del Río Suquiapa, se presenta información más detallada del sitio en estudio como son indicadores demográficos de Santa Ana, el perfil climatológico actualizado para poder tener noción de la época seca y la época lluviosa, la ubicación geográfica de la subcuenca del Río Suquiapa y sus ríos tributarios, y finalmente cuales son las principales fuentes contaminantes del Río Suquiapa.

1.1.1. Indicadores demográficos de Santa Ana.

El departamento de Santa Ana con cabecera departamental del mismo nombre, posee un área geográfica de 400.05 km², con una población total de 572,081.00 habitantes y una densidad poblacional de 1,430.02 habitantes por km² (Dygestic, 2008). En la Tabla 1.1 se detalla la población por edades.

Tabla 1.1. Población por edades en Santa Ana.

Municipio: Santa Ana	Número de habitantes
Población de 0 a 17 años	50,468.00
Población de 0 a 8 años	22,039.00
Población de 0 a 6 años	21,348.00
Población de 0 a 4 años	102,323.00
Población adulta	375,903.00
Población total	572,081.00

Fuente: Elaboración propia en base a información de Dygestic (2008). Densidad Poblacional.

1.1.2. Clima en Santa Ana (MARN, 2016).

La ciudad de Santa Ana se encuentra en el occidente de El Salvador, la estación El Palmar, de la cual se extraen los datos del perfil climatológico de este departamento, está ubicada al costado sur del estadio Oscar Quiteño, en el valle interior de la región occidental del país, siendo una zona urbanizada en los alrededores, se caracteriza por tener tierras planas con suelo arcilloso.

La región de Santa Ana se zonifica climáticamente según Koppen, Sapper y Laurer como Sabana Tropical Caliente o Tierra Caliente, teniendo una elevación de 780 msnm. Considerando la regionalización climática de Holdridge, la zona de interés se clasifica como Bosque Húmedo Subtropical, con biotemperatura y temperatura del aire media anual menor a los 24°C. Los rumbos de los vientos son predominantes del Suroeste y del Oeste durante la estación seca y lluviosa y la velocidad promedio anual es de 8 km/h.

En la Figura 1.1 se muestra el promedio mensual de precipitación en el municipio de Santa Ana, es importante resaltar que la época lluviosa principalmente se registra entre los meses de Mayo y Octubre y la época seca entre los meses de

Noviembre y Abril, siendo generalmente los meses límites los considerados de transición propios de cada año hidrológico.

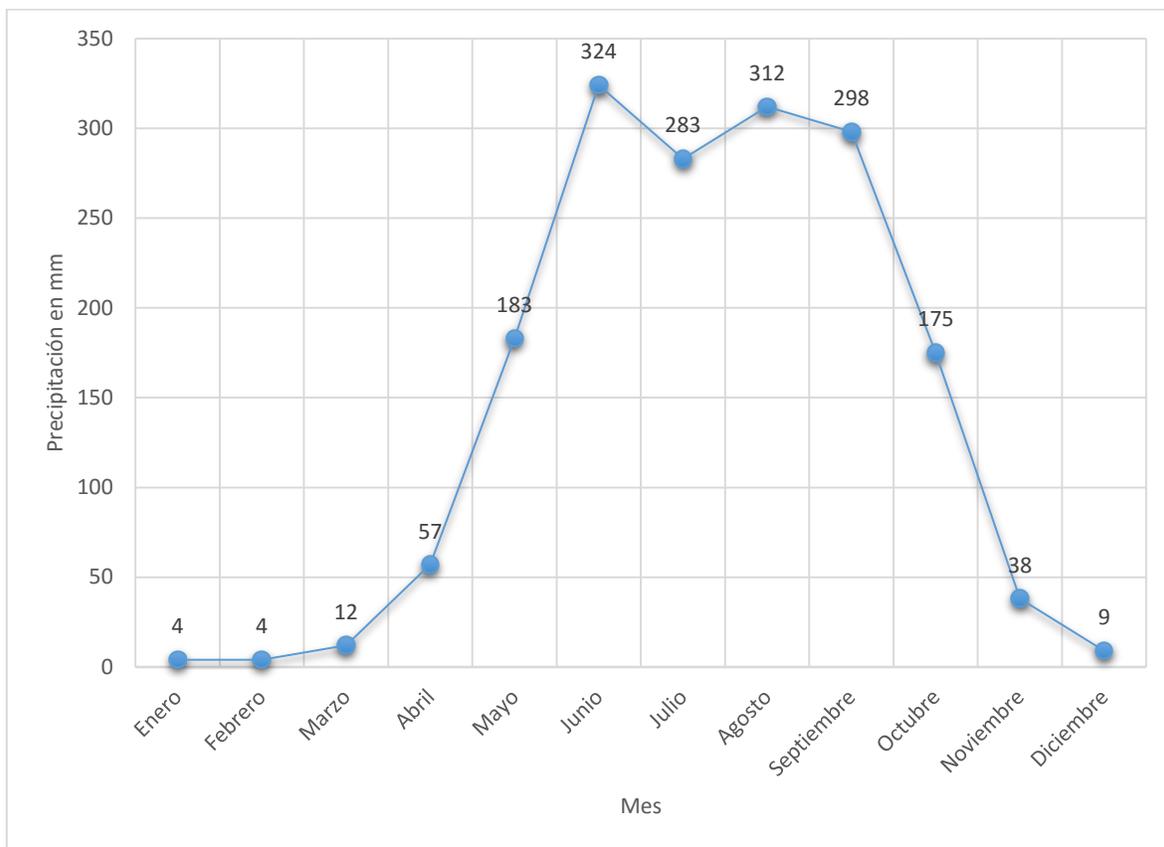


Figura 1.1. Promedio mensual de precipitación en el municipio de Santa Ana. Fuente: Elaboración propia en base a información de MARN (2016). Informe climatológico de Santa Ana, El Palmar.

En la Figura 1.2 se observa el promedio mensual de humedad relativa en el municipio de Santa Ana; es importante destacar que el mes más húmedo del municipio es Septiembre y los meses más secos son Febrero, Marzo y Abril.

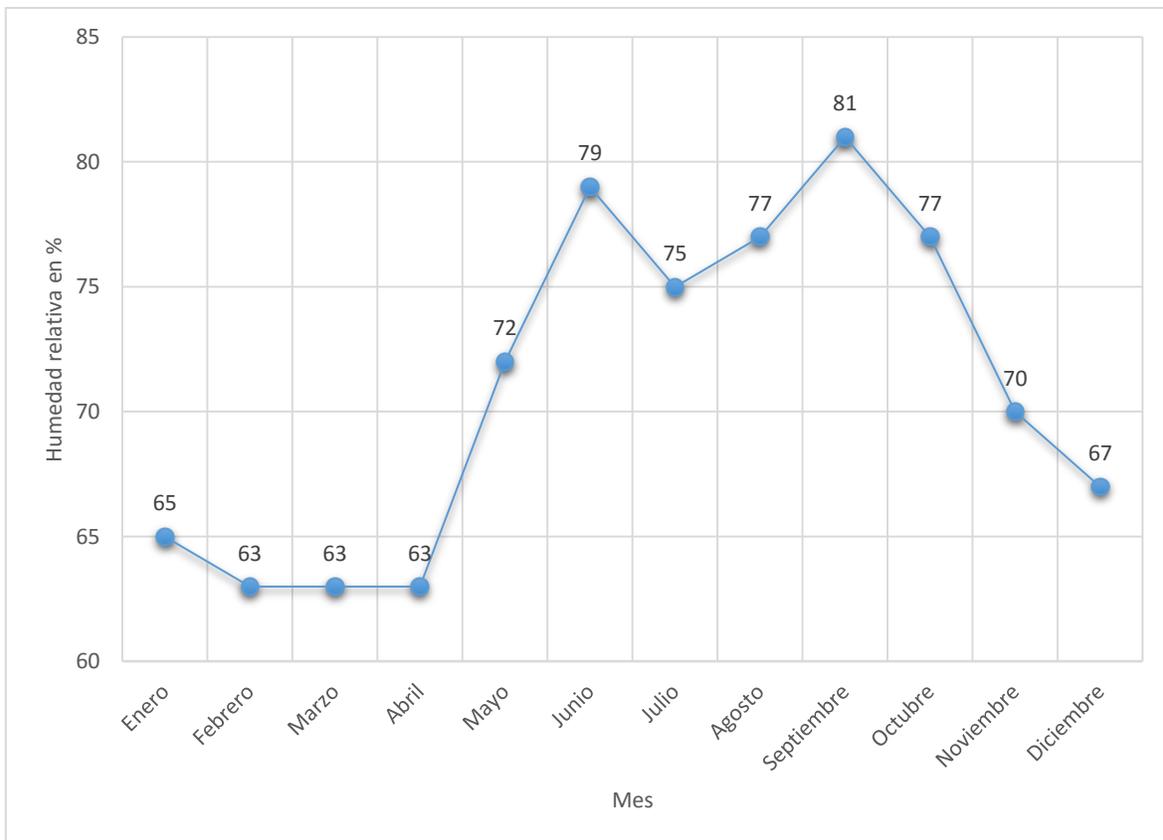


Figura 1.2. Promedio mensual de humedad relativa en el municipio de Santa Ana. Fuente: Elaboración propia en base a información de MARN (2016). Informe climatológico de Santa Ana, El Palmar.

En la Figura 1.3 se muestra el promedio de temperaturas en el municipio de Santa Ana, correspondientes a la mínima, máxima y media para cada mes del año. En general la temperatura mínima promedio es de 18.5°C, la temperatura máxima promedio de 30.1°C y la temperatura media de 22.8°C. Es importante mencionar que las temperaturas ambientales contribuyen indirectamente a la especiación química de las especies y a la microbiología de los cuerpos de agua en especial a los que se encuentran en reposo.

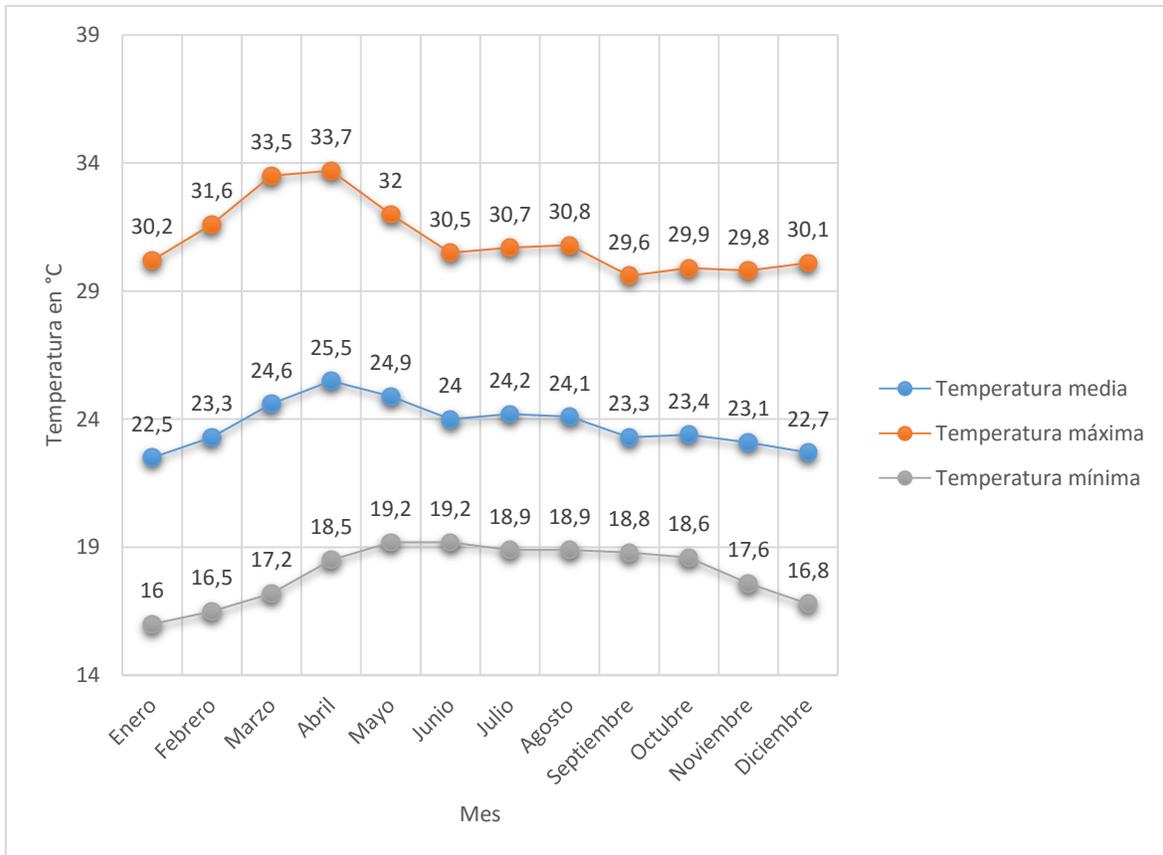


Figura 1.3. Promedio de temperaturas en el municipio de Santa Ana. Fuente: Elaboración propia en base a información de MARN (2016). Informe climatológico de Santa Ana, El Palmar.

1.1.3. Subcuenca del Río Suquiapa.

De acuerdo a World Vision (2004), una cuenca es el espacio de territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, conformado por un sistema hídrico que conducen sus aguas a un río principal, a un río muy grande, a un lago o a un mar. Este es un ámbito tridimensional que integra las interacciones entre la cobertura sobre el terreno, las profundidades del suelo y el entorno de la línea divisoria de las aguas.

La cuenca hidrográfica, según World Vision (2004), puede dividirse en espacios definidos por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con

el curso principal. El trazo de la red hídrica es fundamental para delimitar los espacios en que se puede dividir la cuenca. A un curso principal llega un afluente secundario, este comprende una subcuenca. Luego al curso principal de una subcuenca, llega un afluente terciario, este comprende una microcuenca, además están las quebradas que son cauces menores. Para mayor comprensión de los conceptos de cuenca, subcuenca y microcuenca ver la Figura 1.4.

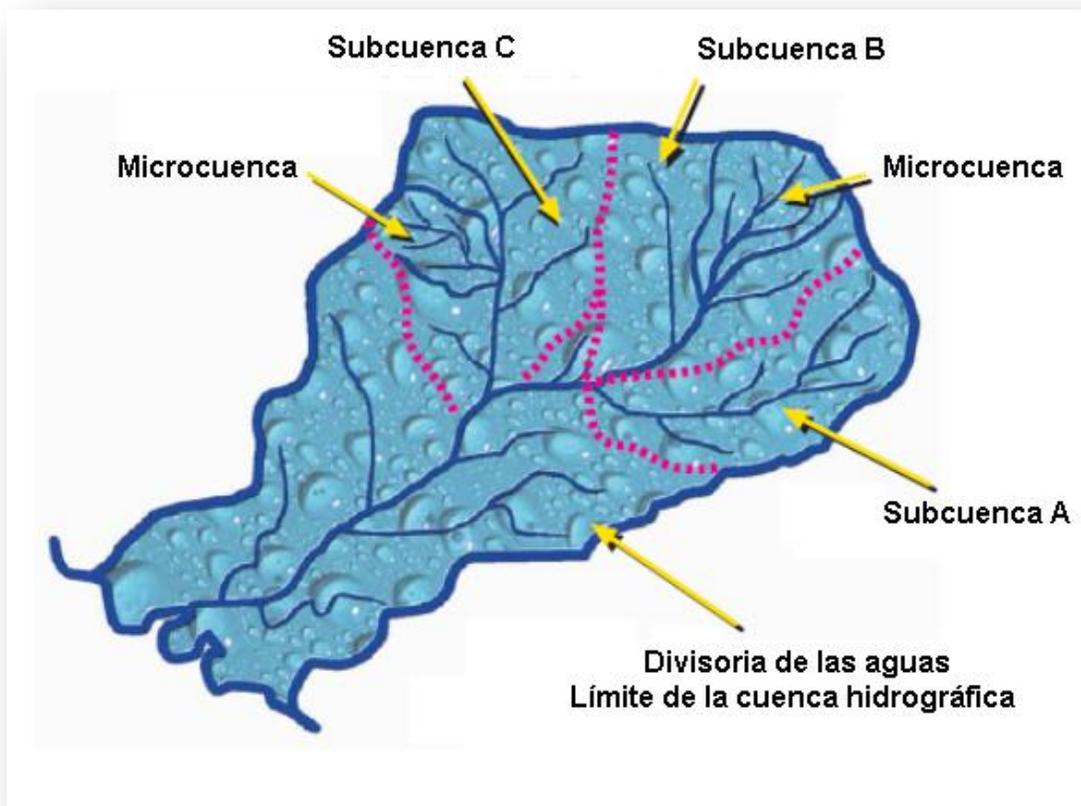


Figura 1.4. División de una cuenca hidrográfica. Fuente: (World Vision, 2004).

Según Amaya, Arriola y Cerna (2015), la subcuenca del Río Suquiapa tiene un área de 425 km², en el 21% de ésta área (88 km²) se encuentran localizadas las fuentes que contaminan el río principal y sus afluentes. La contaminación es producida principalmente por las descargas de aguas negras de las áreas urbanas, beneficios de café que aún descargan a los ríos (algunos sin darle

tratamiento a sus aguas mieles), tenerías, industrias alimenticias y otro tipo de vertidos en la ciudad de Santa Ana.

La subcuenca del Río Suquiapa abarca significativamente cinco municipios que son: Santa Ana, Coatepeque, San Juan Opico, San Matías y San Pablo Tacachico. Es importante considerar las actividades agrícolas, comerciales e industriales de tales municipios; con el objetivo de considerar el impacto ambiental en el cuerpo de agua en estudio debido a estas actividades (Amaya, Arriola y Cerna, 2015).

En la Figura 1.5 se presentan los ríos de las subcuenca del Río Suquiapa, en dicha imagen el contorno rojo delimita la superficie de la subcuenca a la que pertenecen catorce ríos.

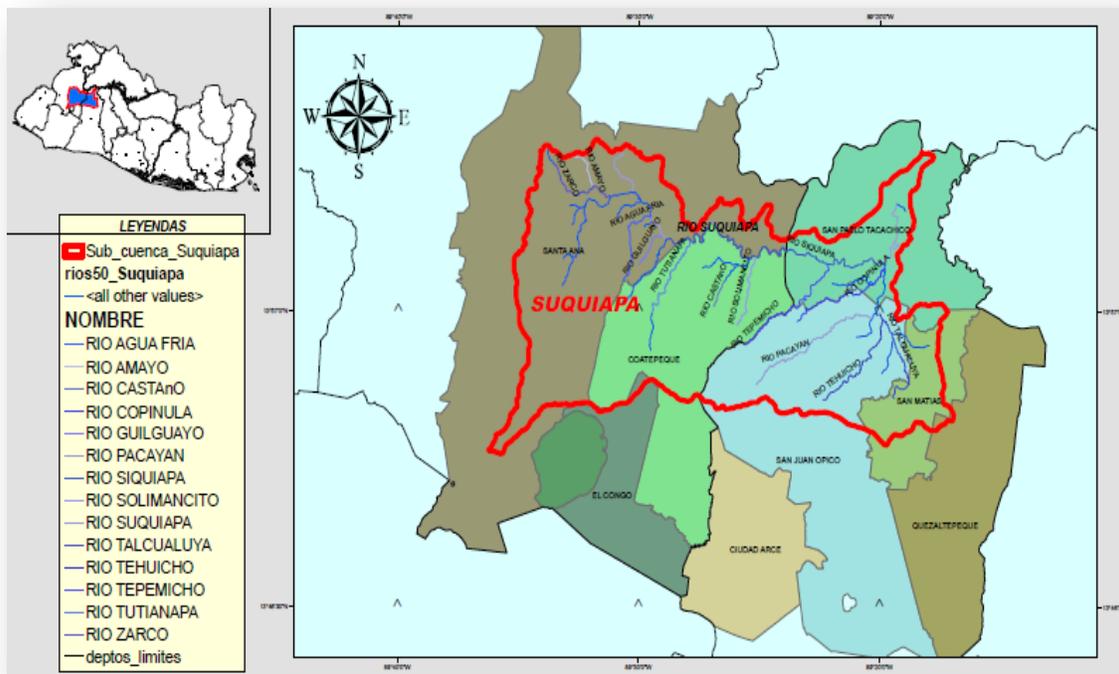


Figura 1.5. Ríos de la Subcuenca del Río Suquiapa. Fuente: (Amaya, 2015).

A continuación se presentan los usos que se observaron se le dan al Río Suquiapa y a sus tributarios durante las visitas de campo a esos lugares.

- Generación de energía hidroeléctrica.

La velocidad del cauce del Río Suquiapa y de algunos de sus tributarios es utilizada para la producción de energía hidroeléctrica. Las centrales hidroeléctricas que hacen uso del Río Suquiapa o de sus tributarios en el tramo de estudio son La Central Hidroeléctrica Atehuesias, La Central Hidroeléctrica Cutumay Camones, La Central Hidroeléctrica San Luis I y El Proyecto Hidroeléctrico San Luis II.

- Agricultura.

Los principales cultivos de la zona son granos básicos, entre estos, arroz y maíz. También se cultivan cítricos, frutas y caña de azúcar.

- Turismo.

Dentro del área de estudio se encuentran: el balneario Las Cascadas ubicado en las cercanías del Río Zarco, las piscinas artesanales ubicadas en la Hacienda San Cayetano, la vertiente ubicada en las cercanías del Beneficio El Sauce y las piscinas artesanales para fines recreativos ubicadas dentro del Beneficio El Sauce.

- Acuicultura.

Dentro del área de estudio, el beneficio El Sauce y El Comité Acuicultores de Atiocoyo, crían y venden tilapias.

- Distribución de agua.

La vertiente, ubicada en las cercanías de la Hacienda San Cayetano, que alimenta la corriente principal del Río Suquiapa, además de ser un espacio de recreación, sirve como fuente de agua para los hogares aledaños.

1.1.4. Ríos tributarios del Río Suquiapa.

Los manantiales que se encuentran en el área geográfica de interés son: El Zarco, Carcagua, El Sauce, Apanteos, Apanchacal, Sapoapa, Chinameca, El Molino 1, El Molino 2 y Chiguillo, como puede observarse en la Figura 1.6.

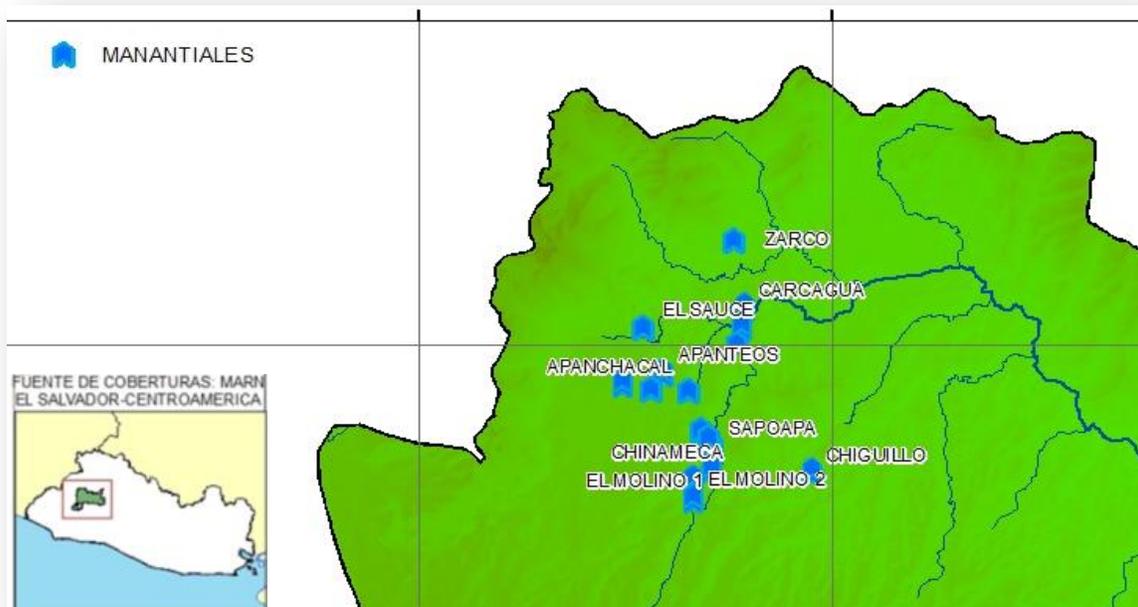


Figura 1.6. Manantiales en el área geográfica de interés. Fuente: (Amaya, 2015).

Los ríos principales y secundarios del área geográfica en estudio son: Río El Molino, El Río Sucio, El Río Zarco, El Río Amayo, El Río Suquiapa, El Río El Puente, El Río Agua Fría, El Río Guilguayo y El Río Tutianapa, como se observa en la Figura 1.7.

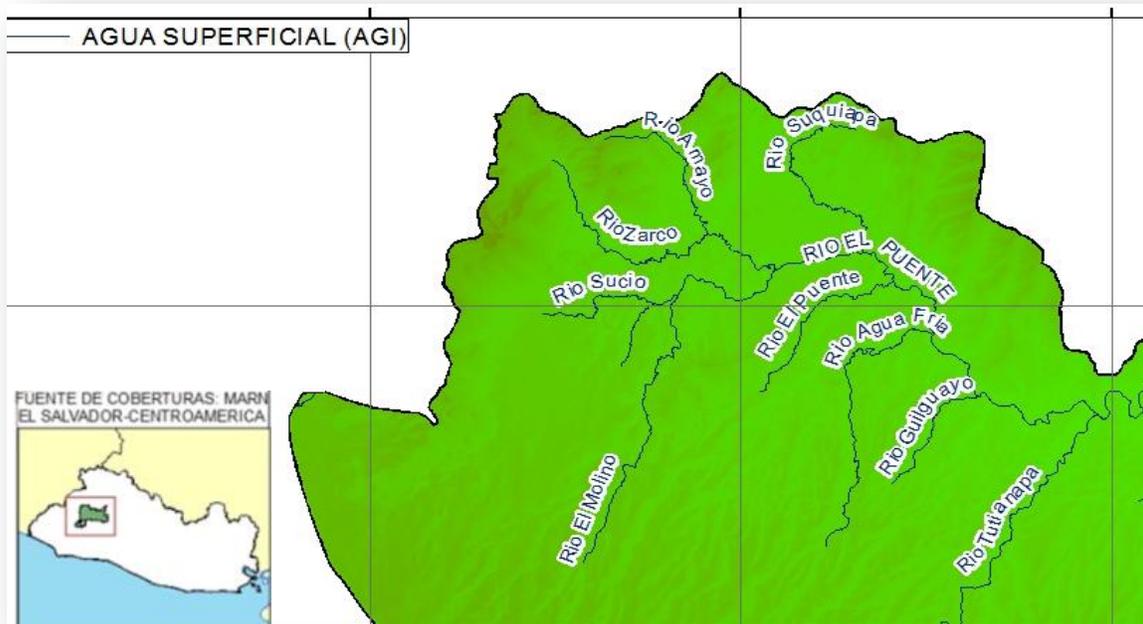


Figura 1.7. Ríos principales y secundarios del área geográfica de interés. Fuente: (Amaya, 2015).

1.1.5. Fuentes contaminantes del Río Suquiapa.

Según el SNET (2002), las fuentes de contaminación en las diferentes cuencas se pueden dividir en dos grandes categorías: las fuentes puntuales y las fuentes no puntuales.

Las fuentes puntuales son aquellas que cuentan con un punto de descarga bien definido y generalmente son continuas. Una descarga determinada puede localizarse e identificarse por una tubería o grupo de tuberías. Los dos grupos principales de fuentes puntuales son los vertidos municipales y los vertidos industriales (SNET, 2002).

Las principales fuentes no puntuales son agrícolas, forestales, atmosféricas y por escorrentía. El aspecto característico de toda fuente no puntual es el origen disperso

de la descarga. Esto quiere decir que no es posible relacionar la descarga con un lugar específico y definido. Además, la fuente puede ingresar al río por escorrentía superficial, como es el caso de las descargas agrícolas (SNET, 2002).

Entre los beneficios y tenerías que se encuentran aguas arriba del Río Suquiapa y que aún operan, pudiendo contaminar el caudal del río, se tienen: el beneficio El Mono, el beneficio Montealegre, el beneficio El 77, el beneficio Venecia, el beneficio Borbollo, el beneficio Las Tres Puertas y la tenería La Sirenita, además, el penal de Apanteos descarga aguas residuales a uno de los ríos tributarios del Río Suquiapa, el Río Apanteos, dicha información se obtuvo en visitas de campo a la zona.

1.2. Índices de calidad del agua (Hernán, Patiño y Torres, 2009).

Los índices de calidad del agua surgen como una herramienta simple para la evaluación del recurso hídrico fundamental en procesos decisorios de políticas públicas y en el seguimiento de sus impactos. Entre otros, se definen los índices de calidad del agua como una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros que sirven como expresión de la calidad del agua; el índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color.

La valoración de la calidad del agua puede ser entendida, como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación con la calidad natural, los efectos humanos y usos posibles. Para simplificar la interpretación de los datos de su monitoreo, existen índices de calidad de agua e índices de contaminación, los cuales reducen una gran cantidad de parámetros a una expresión simple de fácil interpretación entre técnicos, administradores ambientales y el público en general. La principal diferencia entre unos y otros está en la forma de evaluar los procesos de contaminación y el número de variables tenidas en cuenta en la formulación del índice respectivo. En términos simples, un índice de la calidad del agua, WQI

por sus siglas en inglés, es un número único que expresa la calidad del recurso hídrico mediante la integración de las mediciones de determinados parámetros de calidad del agua y su uso es cada vez más popular para identificar las tendencias integradas a los cambios en la calidad del agua. La Tabla 1.2 presenta las principales ventajas y limitaciones de los WQI.

Tabla 1.2. Índice de calidad del agua. Ventajas y limitaciones.

Ventajas.	Limitaciones.
Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua.	Proporcionan un resumen de los datos.
Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio.	No proporcionan información completa sobre la calidad del agua.
Útiles en la evaluación de la calidad del agua para usos generales.	No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua.
Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas.	No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra.
Permiten priorizar para evaluaciones de calidad del agua más detalladas y ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión.	Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal.
Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua.	Algunos científicos y estadísticos tienden a rechazar y criticar su metodología, afectando la credibilidad de los WQI como una herramienta para la gestión.
Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos.	Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación.

Fuente: (Hernán, Patiño y Torres, 2009).

La evaluación general de la calidad del agua ha sido objeto de múltiples discusiones en cuanto a su aplicación para la regulación del recurso hídrico en el mundo ya que ésta considera criterios que no siempre garantizan el resultado esperado para regiones con diferentes características. Como consecuencia, muchos países han desarrollado estudios e indicadores tendentes a aplicar criterios de evaluación propios, de tal manera que su aplicabilidad corresponda con sus requerimientos y necesidades. Los intentos para lograr construir un índice que permita calificar la calidad del agua tienen bastante historia. Existe información de que en Alemania en 1848 ya se realizaban algunos intentos por relacionar la presencia de organismos biológicos con la pureza del agua.

Desde 1965 Horton propone el uso de los WQI para estimar patrones o condiciones de contaminación acuática, y son pioneros en la generación de una metodología unificada para su cálculo, Horton utiliza diez variables, incluyendo las comúnmente monitoreadas, tales como Oxígeno Disuelto (OD), recuento de coliformes, ph, conductancia específica, alcalinidad, contenido de cloruro y la temperatura. Sin embargo, el desarrollo e implementación de un WQI de manera formal y demostrada lo hicieron Brown, Deininger y Macclelland en 1970 con el apoyo de la Fundación de Sanidad Nacional de EE.UU, NSF por sus siglas en inglés, basándose en la estructura del índice de Horton y en el método Delphi para definir los parámetros, pesos ponderados, subíndices y clasificación a ser empleados en el cálculo. A pesar de haber sido desarrollado en Estados Unidos, es ampliamente empleado en el mundo y ha sido validado y/o adaptado en diferentes estudios.

En 1982 en España, Queralt desarrolló el índice simplificado de calidad del agua para las cuencas de Cataluña; sin embargo el índice más empleado en ese país es el Índice de Calidad General, desarrollado por el antiguo Ministerio de Obras Públicas, en 1983.

En Canadá en 1995, El Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente, CCME por sus siglas en inglés, desarrolló un WQI orientado inicialmente a la evaluación de la calidad ecológica de las aguas basado en la comparación de los valores de cada parámetro con un punto de referencia, el cual generalmente es obtenido de una norma o guía de calidad del agua; dada su flexibilidad en los parámetros y el uso de directrices para protección de la vida acuática que emplea, el índice permite evaluar la calidad de las aguas destinadas a consumo humano.

En Europa, Boyacioglu desarrolló el Universal Water Quality Index conformado por 11 parámetros fisicoquímicos y uno microbiológico, con el objetivo de proporcionar un método más sencillo para describir la calidad de las aguas superficiales utilizadas para el abastecimiento de agua potable. Sin embargo los aportes han provenido de estudios como los de van Helmond y Breukel en 1996, quienes demostraron que por lo menos 30 índices de calidad de agua son de uso común alrededor del mundo.

En Brasil, la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental desarrolló e implementó el WQI de agua cruda para abastecimiento público como respuesta al aumento en la complejidad de los contaminantes vertidos a las fuentes de agua; su cálculo se realiza mediante el producto de la ponderación de los resultados del índice de calidad de agua y el índice de sustancias tóxicas desarrollado en el año 2002.

1.2.1. Índice de calidad del agua de Oregón (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

El índice de calidad del agua de Oregón, OWQI por sus siglas en inglés, desarrollado por el Departamento de Calidad Medioambiental de Oregón a finales de los años 70's y actualizado varias veces desde entonces, es un WQI frecuentemente utilizado en el dominio público. El OWQI original fue descontinuado en 1983 debido a la gran cantidad de recursos necesarios para calcular y reportar los resultados. Con los avances en las tecnologías de la computación los cuales

mejoraron las herramientas de visualización de datos y el mejor entendimiento de la calidad del agua, el OWQI fue actualizado en 1995, mejorando el subíndice original, agregando la temperatura y el total de fósforo y mejorando su cálculo. El OWQI es calculado por la integración de ocho variables de calidad del agua. El OWQI es aplicado en las corrientes de Oregón para determinar la calidad del agua pero se debe tener cuidado si se desea aplicar en otros cuerpos de agua. Este índice utiliza transformaciones logarítmicas para convertir los resultados de la variable de calidad del agua en valores de subíndices. Una función aritmética ponderada se utilizó en el OWQI original, dicha función se presenta en la Ecuación 1.1.

$$WQI = \sum_{i=1}^n SI_i W_i \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde, SI_i es el subíndice de cada parámetro, W_i es el factor de ponderación, n es el número de subíndices.

La fórmula de ponderación aritmética puede ser mejorada por medio de una fórmula que incluya una raíz cuadrada, dicha fórmula del OWQI se presenta en la Ecuación 1.2.

$$WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{SI_i^2}}} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

1.2.2. Método Bhargava (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

El método Bhargava identificó 4 grupos de parámetros. Cada grupo contenía grupos de un tipo de parámetros. En el primer grupo se incluyeron los Coliformes, los cuales representan la calidad bacteriana del agua potable. En el segundo grupo se incluyeron los metales pesados y tóxicos. En el tercer grupo se incluyeron parámetros que causan efectos físicos como el olor, color y la Turbidez. Sustancias orgánicas e inorgánicas, como el sulfato y cloruro, fueron incluidas en el cuarto grupo. El modelo simplificado para el WQI está dado por la Ecuación 1.3.

$$WQI = \prod_{i=1}^n fi(Pi)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Dónde, n es el número de variable relevantes, $fi(Pi)$ es una función de la sensibilidad de la variable i , incluyendo el efecto de la ponderación de dicha variable.

1.2.3. Índice de Smith (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

El índice de Smith es un híbrido de dos índices y está basado tanto en la opinión de expertos como en los estándares de calidad de agua utilizados para cuatro usos del agua. El método Delphi fue utilizado para la selección de los parámetros de cada clase de agua, desarrollando subíndices y asignando ponderaciones. El puntaje final del índice fue calculado utilizando la técnica del menor operador, como se presenta en la Ecuación 1.4.

$$I_{min} = \sum \min(I_{sub1}, I_{sub1}, \dots \dots I_{subn}) \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde, I_{min} iguala al valor del subíndice más bajo.

1.2.4. Índice de calidad del agua de Columbia, Gran Bretaña (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

El Índice de calidad del agua de Columbia, Gran Bretaña, BCWQI por sus siglas en inglés fue desarrollado en 1995 por el Ministerio Canadiense de Medioambiente como un índice para la evaluación de la calidad del agua. Este índice es similar al índice de calidad del agua del CCME, donde los parámetros de calidad del agua son medidos y su incumplimiento es determinado por comparación con unos límites predefinidos.

El BCWQI hace posible la clasificación en base a todos los parámetros medibles existentes. La Ecuación 1.5 permite la determinación del BCWQI.

$$BCWQI = 100 - \left(\sqrt{\frac{F_1^2 + F_2^2 + \left(\frac{F_3}{3}\right)^2}{1.453}} \right) \quad \text{Ecuación 1.5}$$

En la Ecuación 1.5 el 1.453 es el número utilizado para dar garantía que el número del índice se encontrará en la escala de 0 a 100. La precisión del BCWQI depende del número de muestras repetidas y del número de estaciones.

1.2.5. Índice de calidad del agua del CCME (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

Para la simplificación de la información compleja y técnica de la calidad del agua, un índice de calidad del agua se desarrolló por el CCME, el cual es una herramienta de comunicación basada en la ciencia que prueba información multivariable de la calidad del agua en contra un punto de referencia determinado por el usuario. El Índice de Calidad del Agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente, CCME-WQI por sus siglas en inglés, matemáticamente combina tres medidas de varianza (alcance, frecuencia y magnitud) para generar un número que representa la calidad global del agua en un sitio relativo al punto de referencia seleccionado. El resultado final es representado como un solo número en el rango de 0 a 100, donde 100 indica que las variables son similares al punto de referencia seleccionado o están bajo dicho punto. Para simplificar, el CCME desarrolló una calculadora que es una hoja de cálculo preprogramada con ecuaciones matemáticas que ayudan a los usuarios a evaluar las condiciones en las que se encuentra un cuerpo de agua. En la evaluación de los cambios espaciales o temporales de la calidad del agua, el CCME-WQI es utilizado, el cual es basado en la Guía Canadiense de la Calidad del Agua. En resumen, la ecuación del Índice de Calidad del Agua del Consejo CCME-WQI es calculada utilizando tres factores como se muestra en la Ecuación 1.6.

$$WQI = 100 - \left(\sqrt{\frac{(F_1 * 100)^2 + (F_2 * 100)^2 + F_3^2}{1.732}} \right) \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde:

F_1 representa el alcance, es decir la fracción de variables superiores a la guía. La Ecuación 1.7 muestra como determinar F_1 .

$$F_1 = \frac{\text{Nº de variables de las cuales sus objetivos no se cumplen}}{\text{Total de número de variables}} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

F_2 representa la frecuencia, es decir la frecuencia en la que los objetivos no son cumplidos. La Ecuación 1.8 muestra como determinar F_2 .

$$F_2 = \frac{\text{Nº de pruebas en las cuales los objetivos no se cumplen}}{\text{Total de número de pruebas}} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

F_3 representa la amplitud, es decir el rango en el cual las pruebas fallidas no están más allá de la guía. Al utilizar las Ecuaciones 1.9, 1.10 y 1.11 se puede determinar F_3 .

$$\frac{\text{Rango}}{\text{Excursión } i} = \left(\frac{\text{Valor de las pruebas fallidas}}{\text{Objetivos}} \right)^{-1} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

$$nse = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Excursión}}{\text{Número de pruebas}} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

$$F_3 = \frac{nse}{0.01 \ln nse + 0.01} \quad \text{Ecuación 1.11}$$

La constante 1.732 es un factor de escala (raíz cuadrada de tres) que asegura que el índice varíe entre 0 y 100.

Una de las ventajas del CCME-WQI es la representación de las mediciones de diversas variables en un solo número. Las limitaciones del CCME-WQI incluyen la pérdida de información mediante la combinación de varias variables en un único valor, la pérdida de las interacciones entre las variables, la falta de portabilidad del índice para diferentes tipos de ecosistemas y la sensibilidad de los resultados para la formulación del índice.

1.2.6. Índice de toxicidad acuática. (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

El índice de toxicidad acuática, ATI por sus siglas en inglés, fue desarrollado por Du Preez, Euler, Kohler, Van Vuren y Wepener para evaluar la salud de los ecosistemas acuáticos. Los parámetros físicos de calidad del agua empleados son pH, OD y turbidez, mientras que el determinante químico incluyó amonio, sales totales disueltas, fluoruro, potasio y ortofosfatos y los metales potencialmente peligrosos elegidos fueron las concentraciones de zinc, manganeso, cromo (Cr), cobre, plomo y níquel. Se utilizó una escala de ATI, similar a la escala del WQI propuesto por Smith para el desove de salmónidos. La función Solway de agregación aditiva no ponderada modificada se empleó inicialmente para agregar los valores obtenidos de las curvas de clasificación. Para el cálculo del puntaje final del índice se utiliza la Ecuación 1.22.

$$I = \frac{1}{100} \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \right)^2 \quad \text{Ecuación 1.22}$$

Donde I es el índice de puntuación final, q_i es la calidad del parámetro i -ésimo (un valor entre 0-100) y n es el número de determinantes en el sistema de indexación.

1.2.7. Índice de calidad del agua (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

Un WQI es un algoritmo que expresa una medida del estado cualitativo del agua. Los WQI se pueden obtener por medio del método deductivo o inductivo. El

resultado final puede ser un símbolo o una combinación simple de variables numéricas y alfanuméricas.

Para el cálculo del WQI, asignar el peso (w_i) a los parámetros. Ver Ecuación 1.16.

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Donde, w_i es el peso relativo y n es el número de parámetros.

Para la determinación de la calificación de calidad q_i utilizar la Ecuación 1.17.

$$q_i = \frac{c_i}{s_i} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.17}$$

Donde, c_i es la concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en miligramos por litro, s_i es el estándar para cada parámetro químico en miligramos por litro.

Para el cálculo del subíndice del i -ésimo parámetro (SI_i) utilizar la Ecuación 1.18.

$$SI_i = W_i \times q_i \quad \text{Ecuación 1.18}$$

Para la determinación del WQI utilizar la Ecuación 1.19.

$$WQI = \sum SI_i \quad \text{Ecuación 1.19}$$

La clasificación del índice de calidad del agua se define como excelente (rango del índice > 80-100), buena (rango del índice > 60-80), moderada (rango del índice > 40-60), malo (rango del índice > 20-60) y muy mala (rango de índice > 0-20).

Los valores individuales ponderados de los parámetros medidos en el campo o en el laboratorio como físicos, químicos o biológicos se incluyen en el valor global de las condiciones del agua proporcionados por el WQI desarrollado por Bascaran en 1979. Si bien esta evaluación puede llevarse a cabo con los componentes fisicoquímicos de un análisis normal de agua (iones principales, pH, temperatura y

conductividad eléctrica), entre mayor sea la cantidad de elementos, mayor será la precisión de la estimación. Para la estimación, un peso y un porcentaje se asigna, en función de las concentraciones o valores de que se trate y de la relación presentada en la Ecuación 1.20.

$$WQI = K \frac{\sum C_i P_i}{\sum P_i} \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Donde: C_i es el valor del porcentaje asignado a los parámetros, P_i es el peso asignado a cada parámetro, K es una constante cuyos valores son 1.0 para aguas claras sin aparente contaminación, 0.75 para aguas con ligera coloración, espuma y turbidez aparentemente no natural, 0.50 para el agua con aspecto contaminado y olor fuerte, 0.25 para las aguas negras que presentan fermentación y olores.

Para cada muestra evaluada, la suma de los parámetros ponderados considerados se calcula y se multiplica por una constante relacionada con las características de sensibilidad de la muestra, como la apariencia y olor del agua. Los parámetros utilizados frecuentemente son: iones principales, DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), sólidos disueltos o aquellos en suspensión, compuestos de nitrógeno, azufre, fósforo, pH, dureza, turbidez, conductividad eléctrica, elementos tóxicos y patógenos. Los índices WQI van de 0 a 100.

1.2.8. Índice de calidad del agua Dinius (Poonam, Sukalyan y Tanushree, 2013).

El Índice de calidad del agua Dinius, DWQI por sus siglas en inglés, es un índice de la calidad del agua multiplicativo desarrollado por Dinius para seis categorías de usos del agua: abastecimiento público de agua, recreación, pesca, mariscos, agricultura e industria. Él empleó el método Delphi para la toma de decisiones. El índice incluye 12 parámetros: OD, Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días (DBO₅), el recuento de coliformes, recuento de *E-coli*, pH, alcalinidad, dureza, cloruro, conductividad específica, temperatura, color y nitratos.

La ponderación de cada parámetro fue asignada basándose en la evaluación de la importancia de los miembros del panel Delphi. Las funciones individuales de los subíndices se combinaron con la ayuda de una función de agregación multiplicativa como se muestra en la Ecuación 1.23.

$$WQI = \sum_{i=1}^n I_i^{W_i} \quad \text{Ecuación 1.23}$$

Dónde, WQI es el índice de la calidad del agua Dinius cuyo valor oscila entre 0-100, I_i es la función del subíndice del parámetro contaminante, W_i es el peso específico del parámetro contaminante cuyo valor oscila entre 0-1 y n es el número de parámetros de contaminantes.

1.2.9. Índice de calidad del agua NSF (SNET, 2012).

El índice de calidad de agua propuesto por Brown es una versión modificada del WQI que fue desarrollada por la NSF que en un esfuerzo por idear un sistema para comparar ríos en varios lugares del país, creó y diseñó un índice estándar llamado WQI. Este índice es ampliamente utilizado entre todos los índices de calidad de agua existentes siendo 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 compararlo con la calidad de agua de diferentes ríos alrededor del mundo. Los resultados pueden ser utilizados para determinar si un tramo particular de dicho río es saludable o no.

Para la determinación del NSF-WQI interviene 9 parámetros, los cuales son:

- Coliformes Fecales (en NMP/100 mL).
- pH (en unidades de pH).
- DBO₅ (en mg/L).
- Nitratos (NO_3^- en mg/L).
- Fosfatos (PO_4^{3-} en mg/L).

- Cambio de la Temperatura (en °C).
- Turbidez (en NTU).
- Sólidos Disueltos Totales (SDT en mg/L).
- OD (en % saturación).

Para desarrollar el NSF-WQI, La NSF seleccionó 142 personas quienes representaron un amplio rango a nivel local, estatal y nacional en los Estados Unidos. El proceso para el desarrollo del índice de calidad del agua se llevó a cabo en las etapas que se presentan a continuación.

La identificación de factores claves (parámetros biológicos, químicos o físicos) que pueden utilizarse como indicadores de la calidad del agua, basados en el criterio profesional colectivo de personas con conocimientos relativos al medio acuático o al foco de contaminación. Mediante una serie de cuestionarios, a cada panelista se le preguntó que considerara 35 parámetros de calidad de agua para una posible inclusión en dicho índice. Este número se redujo finalmente a 9 parámetros, los cuales fueron mencionados anteriormente.

Asignación de los pesos relativos o peso de importancia del parámetro, correspondientes a los factores de contaminación en aguas. En esta fase se corre el riesgo de introducir cierto grado de subjetividad en la evaluación, pero por otro lado sugiere que es importante una asignación racional y unificada de dichos pesos de acuerdo al uso del agua y de la importancia de los parámetros en relación al riesgo que implique el aumento o disminución de su concentración. En el caso de asignaciones de pesos relativos se identifican cuatro fases.

- El panel de expertos procede a la generación de las ideas que determinan los pesos relativos, escribiéndolas en un papel.
- Recolección de las ideas generadas por los participantes en un gráfico, mediante una discusión en serie.

- Discusión de cada idea recogida por el grupo con el fin de proceder a su clarificación y evaluación.
- Votación independiente sobre la prioridad de las ideas, es decir los pesos relativos, la decisión del grupo se determina mediante orientación matemática. Para esto se pueden establecer varias metodologías de índices como lo son las curvas funcionales.

Estos datos se promediaron dando origen a curvas que reflejan el criterio profesional de respuestas en una escala de 0-100. La agregación de la información, mediante fórmulas que incluyen adiciones simples o multiplicativas. La verificación en campo de su aplicabilidad implica la recolección de datos y su comprobación.

1.2.9.1. Parámetros fisicoquímicos del NSF-WQI.

A continuación se detallan cada uno de los parámetros fisicoquímicos necesarios para el cálculo del índice de calidad del agua propuesto por la Fundación Nacional de Sanidad.

a. Potencial de Hidrógeno (Aguirre, González y Guerrero, 2015).

El pH es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH.

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de Hidrógeno (H^+) en una sustancia. La acidez es una de las propiedades más importantes del agua. El agua disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua. El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (H^+) y el número de iones hidroxilo

(OH^-). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo el agua es neutra y tendrá un pH alrededor de 7.

b. Demanda Bioquímica de Oxígeno (Jaime, 2008).

El DBO es una prueba usada para la determinación de los requerimientos de Oxígeno para la degradación bioquímica de la materia orgánica en las aguas municipales, industriales y en general en las aguas residuales; su aplicación permite calcular los efectos de las descargas de los efluentes domésticos e industriales sobre la calidad de las aguas de los cuerpos receptores.

La prueba de DBO es un procedimiento experimental, tipo bioensayo que mide el Oxígeno requerido por los organismos en sus procesos metabólicos al consumir la materia orgánica presente en las aguas residuales o naturales. Las condiciones estándar del ensayo incluyen incubación en la oscuridad a 20°C por un tiempo determinado, generalmente cinco días. Las condiciones naturales de temperatura, población biológica, movimiento del agua, luz solar y la concentración de Oxígeno no pueden ser reproducidas en el laboratorio. Los resultados obtenidos deben tomar en cuenta los factores anteriores para lograr una adecuada interpretación.

c. Nitratos (Ojeda, 2005).

La contaminación de aguas con Nitratos puede provocar toxicidad aguda en seres humanos, sobre todo en infantes, y esta enfermedad es conocida como Metahemoglobinemia o enfermedad del niño azul. Un estudio realizado en 1996 en Indiana, Estados Unidos, determinó que el consumo de aguas con concentraciones de $N - NO_3^-$ entre 19 y 29 mg/L aumentaba la frecuencia de abortos espontáneos. También existirían evidencias que el consumo prolongado de agua con altas concentraciones de NO_3^- puede provocar cáncer.

El NO_3^- es soluble en agua, y solo es retenido por la fase sólida del suelo mientras lo sea el agua, por lo cual este anión puede lixiviarse fácilmente y alcanzar las napas de agua subterránea, pudiendo permanecer ahí por décadas. El origen de este NO_3^- es variado, pudiendo provenir tanto de fuentes localizadas como no localizadas. Las fuentes no localizadas son todas aquellas donde no existe un punto fijo de entrada de los contaminantes al sistema, como es el caso de la agricultura, una de las actividades humanas que más contribuye a la contaminación con NO_3^- . El aporte de NO_3^- en los suelos bajo agricultura puede provenir tanto de la mineralización del Nitrógeno (humos, estiércol, etc.) como del agregado de fertilizantes nitrogenados. En muchos estudios se ha constatado el potencial contaminante de la agricultura, observándose una relación positiva entre el aumento de la actividad agrícola y la contaminación de aguas por nitratos.

En el caso del NO_3^- las fuentes de contaminación localizadas son generalmente restos orgánicos, de origen humano como las aguas servidas y cámaras sépticas, o animal, como los restos provenientes de salas de ordeño, gallineros, porquerizas, etc. El NO_3^- que se forma de estos restos por los procesos de mineralización y nitrificación del Nitrógeno orgánico puede contaminar el agua subterránea al lavarse con las lluvias, especialmente cuando estos restos se acumulan a la intemperie.

d. Fosfatos.

La química de los Fosfatos en relación con los sistemas acuáticos se trata como ejemplo de la importancia que tienen los equilibrios heterogéneos en el agua. El Fósforo, presente como diversas formas de Fosfato, es de gran importancia en una amplia variedad de procesos biológicos y químicos en las aguas naturales, los desechos y tratamientos de aguas. El Fosfato es un nutriente que se requiere para el crecimiento del protoplasma viviente que contiene aproximadamente 2% de fósforo en peso, base seca. Como tal, el Fósforo puede ser el elemento limitante

del crecimiento de las plantas acuáticas fotosintéticas, dada su escasa concentración (Jenkins, 2000).

Los compuestos del Fósforo son nutrientes de las plantas y conducen al crecimiento de algas en las aguas superficiales. Dependiendo de la concentración de Fosfato existente en el agua, puede producirse la eutrofización. Tan sólo 1 g de fosfato-fósforo ($PO_4^{3-} - P$) provoca el crecimiento de hasta 100 g de algas. Cuando estas algas mueren, los procesos de descomposición dan como resultado una demanda de Oxígeno de alrededor de 150 g. Las concentraciones críticas para una eutrofización incipiente se encuentran entre 0.1-0.2 mg/L $PO_4^{3-} - P$ en el agua corriente y entre 0.005-0.01 mg/L $PO_4^{3-} - P$ en aguas tranquilas (Pütz, 2008).

Los compuestos de Fosfato que se encuentran en las aguas residuales o se vierten directamente a las aguas superficiales provienen de: fertilizantes eliminados del suelo por el agua o el viento, excreciones humanas y animales, detergentes y productos de limpieza (Pütz, 2008).

e. Cambio de Temperatura.

La temperatura es un factor abiótico que regula procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades químicas y físicas de otros factores abióticos en un ecosistema. La temperatura es un parámetro que nos revela que existe un contraste o gradiente de energía que provoca la transferencia de calor (Fuentes y Massol, 2002).

Las temperaturas elevadas, consecuencia de descargas de agua calentada, pueden tener un impacto ecológico significativo. A menudo, la identificación de la fuente de aporte hídrico, como en los manantiales profundos, solo es posible efectuando medidas de temperatura. Las plantas industriales suelen pedir datos de temperatura del agua para uso sistemático o cálculos de transmisión de calor (Hernández y Rivas, 2013).

f. Turbidez (APHA, 1992).

La transparencia del agua es importante para la elaboración de productos destinados al consumo humano y para numerosos usos industriales. Los fabricantes de bebidas, los procesadores de alimentos y el tratamiento de las plantas de extracción sobre agua superficial generalmente confían en la coagulación, la clasificación y el filtrado para garantizar productos aceptables. La transparencia de una masa natural de agua es un factor decisivo para la calidad y productividad de estos sistemas. La turbidez del agua es producida por materias en suspensión, como arcilla, cieno o materias orgánicas e inorgánicas finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos. La Turbidez es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. La correlación de la Turbidez con la concentración en peso de la materia en suspensión es difícil de establecer, ya que en la dispersión luminosa también intervienen el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas. Partículas ópticamente negras, como las de carbono activado, pueden absorber luz y aumentar significativamente las cifras de Turbidez.

g. Sólidos Totales Disueltos (WHO, 2003).

Sólidos totales disueltos es el término utilizado para describir las sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica presentes en solución en el agua. Los principales constituyentes son por lo general Calcio, Magnesio, Sodio, y Cationes de Potasio y Carbonato, Carbonato de Hidrógeno, Cloruro, Sulfato y Aniones Nitrato.

Los SDT en los suministros de agua se originan a partir de fuentes naturales, aguas residuales, la escorrentía urbana y agrícola y las aguas residuales industriales. Las sales utilizadas para el deshielo de caminos también pueden contribuir a la carga de SDT en el agua.

h. Oxígeno Disuelto.

Los niveles de OD en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. El análisis de OD es una prueba clave en la contaminación del agua y control del proceso de tratamiento de aguas residuales (Eliggi, Gilli, Lermann y Zerbato, 2007).

La baja disponibilidad del OD limita la capacidad autopurificadora de los cuerpos de agua y hace necesario el tratamiento de las aguas residuales para su disposición en ríos y embalses. La determinación de OD es el fundamento del cálculo de la DBO y de la valoración de las condiciones de aerobividad del agua. En general todo proceso aerobio requiere una concentración de OD mayor de 0.5 mg/L (Jaime, 2008).

1.2.9.2. Elemento biótico.

El elemento biótico necesario para el cálculo del índice de calidad del agua propuesto por la Fundación Nacional de Sanidad se describe a continuación.

a. Coliformes Fecales (DES, 2003).

Las bacterias Coliformes Fecales son indicadores de contaminación fecal y de la posible presencia de patógenos asociados con aguas residuales o lodos de depuración. Los organismos indicadores se utilizan normalmente para demostrar la presencia potencial o ausencia de grupos de agentes patógenos.

Los Coliformes Fecales son bacterias que se encuentran en las heces. Los Coliformes Fecales son un subconjunto de un grupo más grande de organismos conocidos como bacterias Coliformes. Los Coliformes Fecales se describen como bacterias anaerobias facultativas (organismos que pueden sobrevivir en ausencia de Oxígeno), gram-negativas, no formadoras de esporas, bacterias en forma de

bastón que fermentan la lactosa, productoras de gas y de ácido dentro de las 48 horas cuando se cultivan a 35°C. Su falta de capacidad de formar esporas las hace más susceptibles a la destrucción en las condiciones ambientales. Los Coliformes Fecales normalmente residen en el tracto intestinal de animales de sangre caliente. Fuera de un animal de sangre caliente, los Coliformes Fecales son de corta duración en comparación con las bacterias Coliformes que son de vida libre y no están relacionadas con el aparato digestivo de los animales. La categoría fecal contiene patógenos y bacterias no patógenas. Un ejemplo de un grupo de bacterias Coliformes Fecales es la *Escherichia coli* o *E. coli*. La presencia de Coliformes Fecales es indicativo de contaminación fecal y de la posible presencia de patógenos entéricos.

1.3. Contaminante Cromo Hexavalente (Barragán, Cristiani, Netzahuatl y Pineda, 2010).

La contaminación del medio ambiente por metales pesados es un serio problema mundial que ha atraído la atención de diversos sectores de la sociedad. De particular importancia es la contaminación del agua, ya que este líquido es esencial para la vida de todos los organismos vivos del planeta. Diversas instituciones e investigadores han considerado que los metales pesados son los principales contaminantes en este siglo. Los metales pesados son elementos químicos que tienen una densidad mayor a 5 g/cm³, no son biodegradables, se acumulan en el ambiente, son altamente reactivos, persistentes y tóxicos, incluso a bajas concentraciones, por lo que se les considera un gran peligro para la estabilidad del medio ambiente y la salud pública. Entre los diferentes metales pesados que se descargan al medio ambiente a través de diversos efluentes industriales, el *Cr* es uno de los más tóxicos. Las formas más comunes de este elemento son el Cromo Metálico (Cr^0), el Cromo Trivalente (Cr^{3+}) y el Cromo Hexavalente (Cr^{6+}), aunque puede existir en nueve diferentes estados de oxidación. El Cr^{6+} es la forma más tóxica de este metal, ya que es un potente oxidante de la materia orgánica, es sumamente carcinogénico, mutagénico y

teratogénico. Se ha demostrado que es 100 veces más tóxico y 1000 veces más mutagénico que la forma trivalente. Actualmente el Cr^{6+} se considera un contaminante prioritario en muchos países.

1.3.1. Cromo hexavalente en aguas superficiales de ríos (Blarasin, Cabrera, Damilano, Giuliano y Matteoda, 2009).

El Cr está distribuido ampliamente en la naturaleza y si bien en aguas naturales está presente en concentraciones muy bajas, su presencia, bajo los estados de oxidación +3 y +6, puede aumentar como consecuencia de aportes antropogénicos derivados de la utilización de compuestos de Cr . En su estado de oxidación +3, el Cr tiende a formar complejos con aniones inorgánicos u orgánicos; en ausencia de éstos forma Óxidos Hidratados coloidales en medios neutros. En las condiciones de pH de las aguas naturales es improbable la existencia de grandes concentraciones de Cr^{3+} ya que precipita como Hidróxido de Cr^{3+} . El Cr^{6+} es muy soluble y relativamente estable en ambientes acuáticos aeróbicos. En condiciones anaeróbicas o reductoras, el Cr^{6+} se reduce a Cr^{3+} , que a pH neutro o levemente alcalino se remueve por el mecanismo de precipitación antes mencionado. Las condiciones oxidantes y de pH>5, típicas de las aguas superficiales, determinan que predomine el estado de oxidación +6.

1.3.2. Efectos negativos del Cromo Hexavalente en la salud y el medio ambiente (Cuberos, Prieto y Rodríguez, 2009).

El estado hexavalente es el más importante toxicológicamente, lo presentan los Cromatos, Dicromatos y el Ácido crómico. Es un oligoelemento presente en el organismo en forma trivalente Cr^{3+} , indispensable en el metabolismo de la Glucosa, Colesterol, Ácido graso y cristalino, involucrado en otros múltiples procesos biológicos. Hombre y animales están expuestos al Cr por vía inhalatoria (aire, humo del tabaco, etc.), por la piel o por ingestión (productos agrícolas, agua, etc.). El mayor peligro profesional ha sido el procesamiento del metal de Cromita

para producir Cromatos, se encontró que los trabajadores tenían una frecuencia elevada de cáncer pulmonar. Entre las ocupaciones que se encuentran en riesgo están: la minería y la trituración, la preservación de madera, la soldadura, la fabricación de cemento, la industria de pinturas, la industria del cuero, la industria fotográfica, la industria galvánica, los trabajadores de metales y la producción de acero inoxidable.

La toxicidad se debe a los derivados de Cr^{6+} que, contrariamente al Cr^{3+} penetran en el organismo por cualquier vía con mayor facilidad. El Cr^{6+} es considerado carcinógeno del grupo I por la Agencia Internacional para la Búsqueda del Cáncer. El Cr^{3+} no ha sido comprobado como carcinogénico.

El Cr se absorbe por vía oral, respiratoria o dérmica. Se distribuye a nivel de médula ósea, pulmones, ganglios linfáticos, bazo, riñón e hígado. La absorción del Cr^{3+} es menor que la del Cr^{6+} .

Las manifestaciones tóxicas son generalmente atribuidas a los derivados del Cr^{6+} . Entre otras, la acción tóxica se produce por: acción cáustica directa, sensibilización cutánea, citotoxicidad e inflamación de neumocitos, interacción con biomoléculas, el Cr^{6+} induce alteración de Cromátidas hermanas, aberraciones Cromosómicas y reacciones cruzadas en la cadena de ácido desoxirribonucleico.

1.4. Modelación ambiental de metales pesados (Bedoya, 2007).

Los metales pesados son peligrosos porque tienden a bioacumularse. La bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico, en un organismo biológico en un cierto tiempo. Los metales pesados pueden entrar en un abastecimiento de agua por medio de residuos industriales depositándose en corrientes, lagos y ríos.

A diferencia en la modelación de sustancias orgánicas, se considera que estas se degradan; y en la modelación de trazas de metales, se asume que estos sufren reacciones químicas o transformaciones, medidas por reacciones biológicas, Sin embargo los totales de la masa del metal permanecen invariables. Cuando la existencia del equilibrio químico no aplica, entonces cada especie química debe ser simulada utilizando su propia ecuación de balance de masa.

1.4.1. Definición de modelación de metales pesados (Bedoya, 2007).

Los modelos de calidad de aguas tienen por finalidad determinar las nuevas concentraciones de contaminantes del cuerpo de agua en cada punto y a lo largo de zonas de interés, cuando las condiciones de modificación y el estado primitivo son conocidas.

De acuerdo a lo anterior, podemos establecer que un modelo de simulación es la herramienta adecuada para la predicción del comportamiento de la calidad del agua en un río u otro cuerpo de agua, Correspondiendo a un set de expresiones matemáticas definir los procesos físicos, biológicos y químicos a que tienen lugar en este medio. Estas ecuaciones están basadas fundamentalmente en la conservación de la masa o energía, de tal forma que existen fenómenos como: a) el ingreso de contaminantes al cuerpo de agua desde el exterior del sistema b) el transporte y las reacciones en el cuerpo de agua. El transporte puede ser por advección o dispersión, por lo tanto dependerá de las características hidrodinámicas e hidrológicas del cuerpo de agua. Para que un modelo de calidad de aguas pueda ser aplicado confiablemente, para la predicción de las condiciones de los diversos parámetros, tiene que cumplir, obviamente, con la condición básica de reproducir aceptablemente las condiciones actuales. Los procesos fundamentales que rigen la calidad de agua de un cuerpo acuático, ya sean fluviales o lacustres, son los hidrológicos, térmicos y bioquímicos. Los procesos hidrológicos deben entenderse, como aquellos exclusivamente relativos a la hidrología del cuerpo de agua, como aquellos referidos al comportamiento hidrodinámico. El objetivo primario

del desarrollo de cualquier modelo de calidad de agua, es producir una herramienta que tenga la capacidad de simular el comportamiento de los componentes hidrológicos y de calidad de un cuerpo de agua. El desarrollo de esta herramienta para simular el comportamiento del prototipo, se hace aplicando un modelo matemático, producto de tres fases generales: representación conceptual, representación funcional y representación computacional.

El desarrollo de un modelo de calidad de aguas, así como de cualquier otro, debe seguir las etapas que se muestran en la Figura 1.8. La representación conceptual comprende una idealización gráfica del prototipo, considera la descripción de las propiedades geométricas que van a ser modeladas y la identificación de las condiciones de borde e interrelación entre las partes del prototipo. Normalmente, este proceso impone divisiones del prototipo en elementos discretos de un tamaño compatible con los objetivos que el modelo debe servir, estos elementos se definen de acuerdo a algunas simples reglas geométricas, y se diseña el modo por el cual serán conectados tanto física como funcionalmente para ser parte integrante de un todo. Una parte de esta estructuración es la designación de aquellas condiciones de borde a ser consideradas en la simulación. Ver Figura 1.8.

La representación funcional vincula las características físicas, procesos, y condiciones de borde en sets de ecuaciones matemáticas. Esto implica la definición precisa de cada variable y sus relaciones con todos los otros parámetros que caracterizan el modelo o su relación entrada-salida. La representación computacional es el proceso por el cual, el modelo funcional es traducido a fórmulas matemáticas y procedimientos computacionales requeridos para la solución del problema.

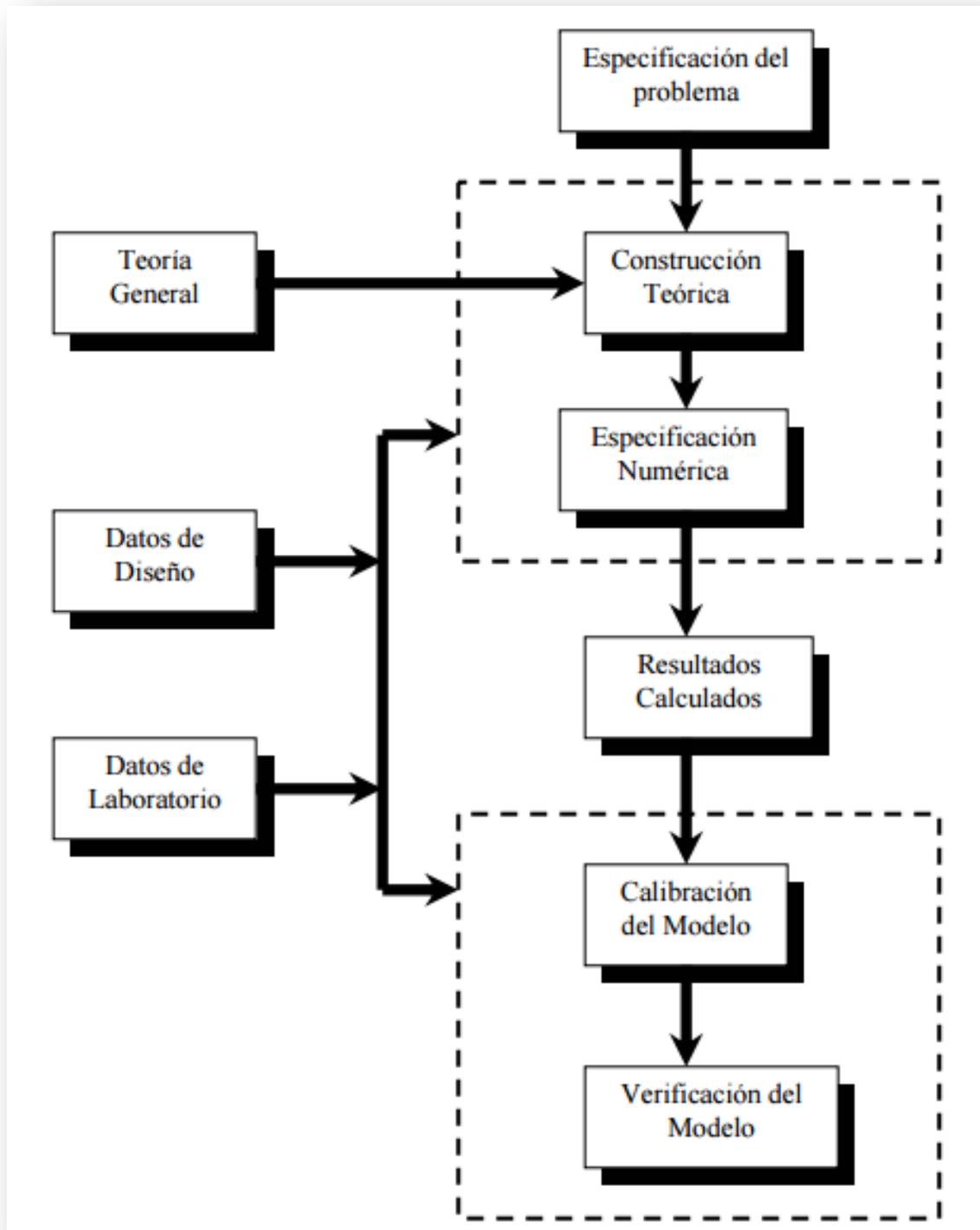


Figura 1.8. Etapas de un modelo de calidad de agua. Fuente: (Bedoya, 2007).

1.4.2. Generalidades del software WASP (Cubillos, 2013).

El Programa de Simulación de Análisis de Calidad del Agua, WASP por sus siglas en inglés, es en general un sistema de balances de masa dinámico para modelar el destino y transporte de contaminantes en aguas superficiales. Basado en un enfoque de modelación por compartimientos flexibles, el WASP puede ser aplicado en una, dos o tres dimensiones con transporte advectivo y dispersivo entre compartimientos físicos discretos o “segmentos”. El modelo WASP provee una selección de módulos que permiten la simulación de variables de calidad de agua así como contaminantes convencionales.

Los modelos cinéticos del WASP están basados en un set de ecuaciones de transporte y transformación. El transporte advectivo es manejado por el flujo de agua a través de una red computacional específica (Ver Figura 1.9). Las “entradas de flujo” (*inflows*) establecen las concentraciones de borde en la red, y los “flujos internos” (*internal flows*) transportan mediante advección la mayoría de los componentes a lo largo de las trayectorias de flujo especificadas a través de la red y fuera de los bordes corriente abajo.

Para ejecutar la última versión del modelo, WASP7 (7.5, 2013), el usuario debe proporcionar información de flujo e información de segmentos. La información correspondiente a segmentos incluye largo, ancho y profundidad para condiciones de flujo promedio, así como también los coeficientes de fricción de Manning. Los exponentes de profundidad hidrogeométricos también pueden ser especificados para controlar la forma del canal.

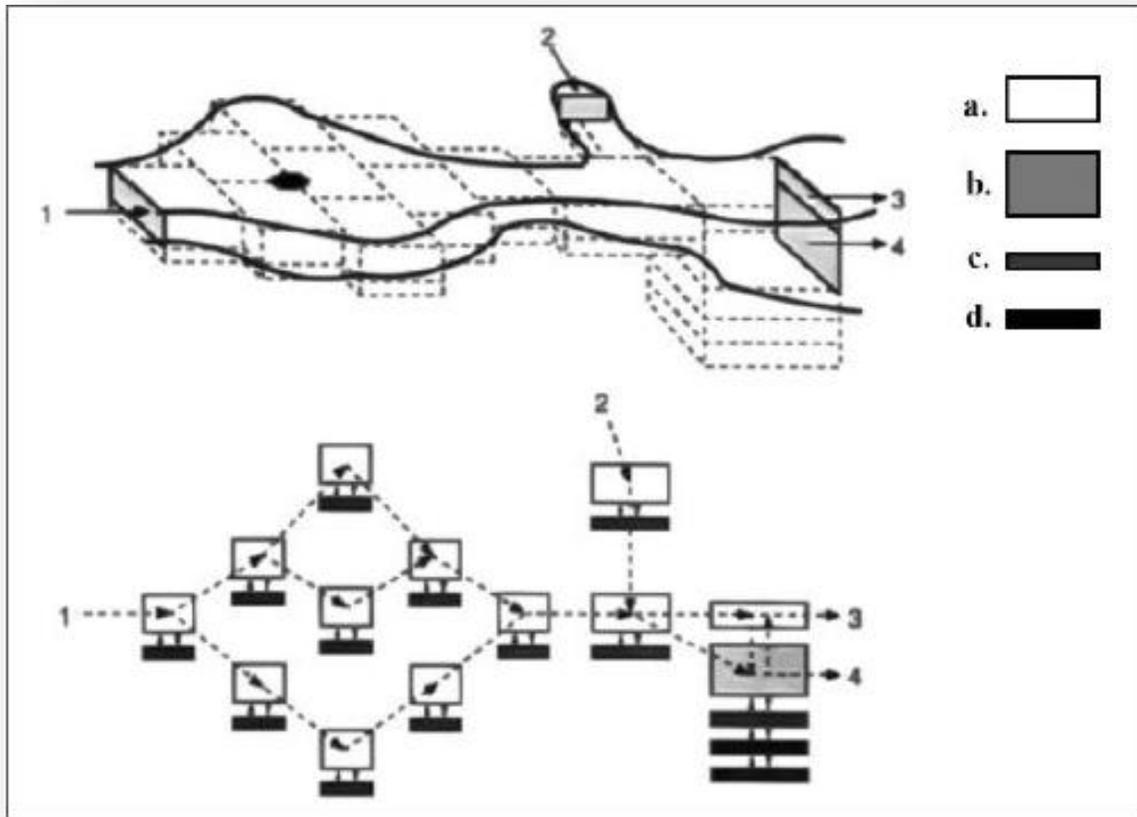


Figura 1.9. Red del modelo con transporte advectivo. Fuente: (Cubillos, 2013).

En la Figura 1.9 se muestra la red del modelo con transporte advectivo con entrada de caudal en 1 (cabecera), 2 (tributario) y salida en 3 y 4. En a) segmento de agua superficial, b) segmento de agua superficial, c) segmento béntico superficial y d) segmento béntico superficial.

El WASP es un modelo dinámico que puede ser usado para analizar una variedad de problemas de calidad en diversos cuerpos de agua tales como corrientes, lagos, ríos, estuarios y aguas costeras.

Las ecuaciones de transporte consideradas en el WASP están basadas en el principio de la conservación de la masa. Este principio requiere que la masa de cada constituyente de calidad de agua que se está investigando debe tenerse en

cuenta de una manera u otra. El WASP rastrea cada constituyente desde el punto de entrada espacial y temporal a su punto final de salida, conservando la masa en el espacio y el tiempo. Para llevar a cabo estos cálculos de balance de masa, el usuario debe suministrar al WASP datos de entrada definiendo siete características importantes:

- Control y simulación de la salida.
- Segmentación del modelo.
- Transporte advectivo y dispersivo.
- Concentraciones de borde.
- Cargas tóxicas de fuentes puntuales y difusas.
- Parámetros cinéticos, constantes y funciones temporales.
- Concentraciones iniciales.

Estos datos de entrada, en conjunto con las ecuaciones de balance de masa general del WASP y las ecuaciones específicas químicas cinéticas, definen un set especial de ecuaciones de calidad de agua. Estas son integradas numéricamente por el WASP a medida que avanza la simulación.

En la Tabla 1.3 se muestran las ecuaciones que utiliza el Programa de Simulación de Análisis de Calidad del Agua para realizar la modelación.

Tabla 1.3. Ecuaciones para la modelación en WASP.

ECUACIONES PARA LA MODELACION EN WASP.
<p>Ecuación general de balance de masa en WASP:</p> $\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(uc) - \frac{\partial}{\partial y}(vc) - \frac{\partial}{\partial z}(wc) + \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(E_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) + S_L + S_B + S_K$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> -c es la concentración puntual del constituyente (mg/l). -t es el tiempo (días). -u, v, w son las componentes de la velocidad longitudinal, lateral y vertical respectivamente (m/s). -E_x, E_y, E_z, son los coeficientes de difusión turbulenta longitudinal, lateral y vertical respectivamente (m^2/s). -S_L es la tasa de carga directa y difusa ($g/(m^3 \text{ día})$). -S_B es la tasa de carga de contorno ($g/(m^3 \text{ día})$). -S_K es la tasa de transformaciones cinéticas totales, positiva si es una fuente y negativa si es un sumidero ($g/(m^3 \text{ día})$).
<p>Ecuación unidimensional:</p> $\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(-U_x AC + E_L A \frac{\partial C}{\partial x}\right) + A(S_L + S_B) + A(S_K)$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> -C es la concentración del constituyente medido en la sección (mg/l). -U_x es la velocidad media en la sección (m/s); A es el área de la sección transversal al flujo (m^2). -E_L es el coeficiente de dispersión longitudinal (m^2 /s).

Fuente: Elaboración propia en base a Amaya, Arriola y Cerna (2015).

Tabla 1.3. (Continuación) Ecuaciones para la modelación en WASP.

ECUACIONES PARA LA MODELACION EN WASP.

Ecuación de mecanismo de advección del agua de los poros del lecho:

$$\frac{\partial M_{ik}}{\partial t} = \frac{Q_{ji} f_{Dj} C_{jk}}{n_j}$$

Dónde:

- M_{ik} es la masa del metal pesado k en el segmento i (g).
- C_{jk} es la concentración total de metal pesado k en el segmento j (mg/l).
- n_j es la porosidad del segmento (l_w/l).
- f_{Dj} es la fracción disuelta de metal pesado en el segmento j.
- Q_{ji} es el flujo de agua de los poros desde j hacia i (m³ /día).

$$\frac{\partial M_{ik}}{\partial t} = \frac{E_{ij}(t) A_{ij} n_{ij}}{\frac{L_{cij}}{n_{ij}}} \left(\frac{f_{Djk} C_{jk}}{n_j} - \frac{f_{Dik} C_{ik}}{n_i} \right)$$

Dónde:

- M_{ik} es la masa de constituyente k en el segmento i (g).
- C_{ik} y C_{jk} son las concentraciones del constituyente k en segmentos i y j (mg/l).
- E_{ij} (t) es el coeficiente de dispersión temporal entre ij (m² /día).
- A_{ij} es la sección de interface entre los segmentos i y j (m²).
- L_{cij} es la longitud de mezcla característica entre segmentos i y j (m).

Ecuación de intercambio difusivo del metal pesado en el agua de los poros:

$$\frac{\partial M_{ik}}{\partial t} = \frac{E_{ij}(t) A_{ij} n_{ij}}{\frac{L_{cij}}{n_{ij}}} \left(\frac{f_{Djk} C_{jk}}{n_j} - \frac{f_{Dik} C_{ik}}{n_i} \right)$$

Dónde:

- f_{Dik} y f_{Djk} son las fracciones disueltas del metal k en segmentos i y j.
- n_{ij} es la porosidad promedio en la interface ij (l_w/l).
- E_{ij} (t) es el coeficiente de difusión temporal en el intercambio ij (m² /s).
- A_{ij} es la sección de interface entre los segmentos i y j (m²);
- L_{cij} es la longitud de mezcla característica entre segmentos i y j (m).

Fuente: Elaboración propia en base a Amaya, Arriola y Cerna (2015).

Tabla 1.3. (Continuación) Ecuaciones para la modelación en WASP.

ECUACIONES PARA LA MODELACION EN WASP.

Ecuación de intercambio entre la superficie béntica y la columna de agua:

$$W_{BS} = A_{ij}(w_R S_i - w_D S_j)$$

Donde

- W_{BS} es el flujo neto de sedimentos (g/día);
- S es la concentración de sedimentos (g/m^3);
- w_D es la velocidad de depositación (m/día);
- w_R es la velocidad de erosión o re suspensión (m/día);
- A_{ij} es el área de la superficie del lecho en planta (m^2);
- i es el segmento béntico;
- j es el segmento de agua.

Ecuación de balance de sedimentos en un lecho superior estacionario:

$$d_i \frac{\partial S_i}{\partial t} = w_D S_j - (w_R + w_S) S_i$$

Dónde:

- w_S es la velocidad de sedimentación del lecho superior (m/día);
- S_i es la concentración de sedimentos en el lecho superior (g/m^3);
- S_j es la concentración de sedimentos en el agua (g/m^3);
- d_i es la profundidad del lecho superior (m).

Fuente: Elaboración propia en base a Amaya, Arriola y Cerna (2015).

Tabla 1.3. (Continuación) Ecuaciones para la modelación en WASP.

ECUACIONES PARA LA MODELACION EN WASP.
<p>Ecuación de capa inferior del lecho:</p> $d_k \frac{\partial S_k}{\partial t} = w_s S_i - w_{sk} S_k$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> -S_k es la concentración de sedimentos en el lecho inferior (g/m^3); -w_{sk} es la velocidad de sedimentación del lecho inferior (m/día); -d_k es la profundidad del lecho inferior (m).
<p>Mecanismos de adsorción y desorción del metal pesado sobre el sedimento fino:</p> $C_{sij} = f_s C_{ij}$ $C_{wij} = f_D C_{ij}$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> -C_{sij} es la concentración sorbida del metal i sobre el sólido s en el segmento j (mg/l); -C_{wij} es la concentración disuelta del metal i en el segmento j (mg/l); -C_{ij} es la concentración total del metal i en el segmento j (mg/l). <p>Siendo:</p> $f_D = \frac{n}{n + \sum_s K_{ps} M_s}$ $f_s = \frac{K_{ps} M_s}{n + \sum_s K_{ps} M_s}$ <p>Dónde:</p> <ul style="list-style-type: none"> -M_s es la concentración del sedimento de tipo s (kg/L) -K_{ps} es el coeficiente de partición del metal en el sedimento s (lw/kg).

Fuente: Elaboración propia en base a Amaya, Arriola y Cerna (2015).

1.5. Antecedentes de estudios de calidad de agua.

Diferentes estudios han sido realizados desde el año 2002 hasta el 2015 enfocados al análisis de las aguas superficiales del territorio nacional. El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) a partir del 2006 realizó un monitoreo de la calidad y cantidad de agua a nivel nacional, efectuando muestreos en 122 sitios distribuidos en 55 ríos; en la Tabla 1.4 se muestra un resumen de los estudios llevados a cabo por el MARN y además investigaciones desarrolladas por otras instituciones donde se presenta el tema de la investigación, los autores, la descripción de objetivos, la descripción de resultados y la fecha de publicación.

Tabla 1.4. Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
<p>Propuesta de descontaminación del canal principal de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa.</p>	<p>MARN</p>	<p>Objetivo del estudio. Elaborar una propuesta de trabajo técnica y económicamente factible para descontaminar los ríos Sucio, Suquiapa y Acelhuate con una calidad del agua que responda a un uso propuesto, en base a los planes de desarrollo locales y a un balance real entre economía y sostenibilidad del recurso. Con el objetivo de disminuir el riesgo a la salud de la población y el riesgo por la disminución de la disponibilidad hídrica.</p> <p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El Índice de Calidad de Agua, WQI por sus siglas en inglés, en los cuatro puntos del canal principal del Río Acelhuate, califica la calidad del agua como pésima en todo el recorrido del canal principal con un valor ponderado alrededor de siete. ▪ El WQI calculado para los cuatro puntos en el canal principal del Río Sucio, decrece a medida avanza el recorrido del río de mala a pésima. Luego se observa un proceso de auto depuración en el río y la calidad 	<p>Octubre- 2002</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<p>asciende de pésima a mala antes de desembocar al Río Lempa.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El WQI calculado para los tres puntos del canal principal del Río Suquiapa varía de calidad de agua pésima en su nacimiento a mala en la desembocadura al Río Lempa. La contaminación del Río Suquiapa originada en la cabecera departamental por la descarga de aguas negras y vertidos agroindustriales sin tratamiento alguno, sufre un proceso de estabilización de la materia orgánica en los cuarenta kilómetros antes de la desembocadura. 	
<p>Balance hídrico integrado y dinámico componente evaluación de recursos hídricos.</p>	<p>Servicio Nacional de Estudios Territoriales</p>	<p>Objetivo de estudio.</p> <p>Determinar el estado actual y proyecciones futuras del recurso hídrico en cuanto a cantidad y calidad, estableciendo la presión sobre el mismo al considerar su distribución espacial y temporal de oferta, disponibilidad y demanda, con el fin de ser una herramienta que permita desarrollar lineamientos de protección del recurso, ordenación de usos, ordenamiento territorial, mejorar la calidad de vida de la población y asegurar la inversión.</p>	<p>Diciembre-2005</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Todas las aguas superficiales evaluadas no cumplen con la aptitud de uso para potabilizar por métodos convencionales por los altos niveles de fenoles. Aunque las aguas pueden ser potabilizadas usando métodos no convencionales para su eliminación, incrementando el costo de tratamiento. ▪ De 51 sitios de muestreo evaluados, solamente el 33% de las aguas cumplen con la calidad sanitaria necesaria para potabilizar. Es decir, el 77% se puede considerar no apto para este uso. ▪ En general las aguas superficiales del país tienen una calidad de agua físico-química buena para riego, exceptuando pocos casos donde los niveles de contaminación son muy altos y afectan la conductividad de sus aguas como en los ríos Acelhuate, Sucio y Grande de San Miguel. 	

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
<p>Informe de la calidad de agua de los ríos de El Salvador.</p>	<p>MARN</p>	<p>Objetivo del estudio.</p> <p>Debido a que las aguas superficiales del país muestran la presencia de altas concentraciones de contaminantes procedentes de fuentes puntuales y no puntuales, el MARN desde el 2006 realiza un monitoreo permanente de la calidad y cantidad de agua en 55 ríos distribuidos en el territorio nacional.</p> <p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En la mayoría de muestras analizadas se observan altas concentraciones de bacterias coliformes fecales, turbidez, color, alta carga orgánica biodegradable, cuantificada a través de la DBO₅ y bajos niveles de OD como consecuencia de las altas cargas contaminantes en los ríos. ▪ Solo el 2% de los sitios evaluados presenta calidad de agua “Buena”, lo que indica condiciones adecuadas para el desarrollo de vida acuática. El 65% de los sitios. 	<p>Enero-2011</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<p>evaluados presenta una calidad de agua “Regular” lo que indica que en esos sitios existen limitaciones para el desarrollo de vida acuática y un 27% presenta una calidad de agua “Mala” y el 6% presenta una calidad de agua “Pésima”, lo que indica para estos últimos que se dificulta o impide el desarrollo de vida acuática deseada.</p>	
<p>Informe de la calidad de agua de los ríos de El Salvador.</p>	<p>MARN</p>	<p>Objetivo del estudio. Realizar el monitoreo permanente de la calidad y cantidad de agua en 122 sitios de muestreo de 55 ríos distribuidos en el territorio nacional, con el propósito de evaluar su condición para permitir el desarrollo de la vida acuática y aptitud para diferente usos.</p> <p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ El 5% de los sitios evaluados presenta calidad de agua “Buena”, lo que indica condiciones adecuadas para el desarrollo de vida acuática. El 73% de los sitios 	<p>Julio- 2013</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<p>evaluados presenta una calidad de agua “Regular”, lo que indica que en estos sitios existe limitaciones para el desarrollo de la vida acuática y un 17% presentan una calidad de agua “Mala” y el 5% presentan una calidad de agua “Pésima”, lo que indica para estos últimos sitios la calidad de agua presenta serias limitaciones que en un grado mayor impiden el desarrollo de vida acuática deseada.</p>	
<p>Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del Río Suquiapa, Santa Ana.</p>	<p>Roberto Espinoza, Allan Vinicio, Rebeca Zavaleta. Universidad de El Salvador (UES)</p>	<p>Objetivo de estudio. Evaluación de los principales parámetros hidrodinámicos y la evaluación del coeficiente de dispersión de un tramo de aproximadamente de 10 km de la parte alta del Río Suquiapa.</p> <p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Los resultados fueron obtenidos por la técnica de aforo por vadeo y utilizando un molinete hidrométrico tipo Gurley, mediante un experimento de pulso de trazadores utilizando Cloruro de Sodio y tomando como parámetro de campo la conductividad eléctrica. 	<p>Octubre-2013</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los resultados obtenidos mediante la técnica de aforo por vadeo fueron valores de caudal, velocidad media, perímetro mojado, radio hidráulico, profundidad, área de sección transversal y coeficientes de dispersión obtenidos con la ecuación empírica de Fischer para 18 sitios aforados, que se resumen en 18 fichas. ▪ Utilizando la técnica de Fogler y la ecuación de Singh y Beck para la evaluación del coeficiente de dispersión, se obtuvo un valor de aproximadamente $120.602 \text{ m}^2/\text{s}$ y un promedio de número de Peclet de 7.86, que indica que la dispersión mecánica prevalece en el sentido del flujo, sin embargo, los efectos transversales son significativos. 	
Evaluación hidrogeoquímica e hidroquímica de la subcuenca del Río Aranchacal.	Álvaro Amaya, UES	<p>Objetivo de estudio.</p> <p>Evaluar la hidrogeoquímica de las aguas en el sistema acuífero de la subcuenca del Río Aranchacal y su interacción con la hidroquímica superficial.</p>	Abril-2015

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Respecto a la caracterización geológica, se ha realizado un análisis detallado por cada una de las 3 formaciones geológicas presentes en el área geográfica de interés: Formaciones en San Salvador, Formaciones en Cuscatlán y Formaciones en El Bálsamo y se ha detallado la caracterización mineralógica de los sitios de muestreo de la base de datos hidrogeoquímica de la investigación. ▪ La dispersión mecánica predomina en el sentido del flujo; siendo el valor promedio del coeficiente de dispersión hidrodinámico longitudinal del cuerpo de agua en estudio de 113.9 m²/s. El fenómeno de dispersión aporta una variación del 20-30% al valor del tiempo medio de residencia. ▪ Al analizar la dispersión de Cloro vs Boro se confirmó una relación directa entre las aguas del Lago de Coatepeque y el acuífero de Santa Ana y la teoría de que existe enlace subterráneo. 	<p>Abril-2015</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
<p>Modelación de la calidad fisicoquímica de las aguas del Río Suquiapa.</p>	<p>Luis Amaya, Daniel Arriola, Zulma Cerna (UES)</p>	<p>Objetivo de estudio. Modelar la calidad del agua del Río Suquiapa para la posterior proposición de medidas adecuadas de mitigación a través de tecnologías adecuadas y con un enfoque de análisis de Ingeniería Química.</p> <p>Resultados.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Al aplicar el “modelo de DBO₅/OD en ríos” en un tramo de aproximadamente 10 km del río Suquiapa, el software WQMCAL (Water Quality Modeling Computer Aided Learning) despliega un resultado promedio de Tolerable para DBO₅ y de Contaminado para OD, exceptuando dos puntos radicalmente opuestos: el sector A01SUQUI-A02VERTI, donde ambos parámetros están completamente deteriorados y A17GUILGU-A18SUQUI donde se presenta cierta mejoría. ▪ Con los análisis fisicoquímicos y de calidad de agua se llega a la conclusión de que la calidad del agua del río 	<p>Septiembre-2015</p>

Tabla 1.4. (Continuación). Antecedentes de estudios de calidad de agua.

TEMA	AUTORES	DESCRIPCIÓN	FECHA
		<p>se categoriza como Regular, esto concuerda con el análisis de la modelación orgánica.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ En cuanto a la modelación de metales pesados (Arsénico y Plomo) se concluye que la dispersión de los datos de concentraciones en el río genera una complicación, ya que los datos insertados son de los puntos tributarios que para el Plomo son generalmente de 0 ppm y para el Arsénico es el promedio de 0.03 ppm, pero se incrementan drásticamente en los puntos de la corriente principal del río (puntos con terminación SUQUI). 	

Fuente: Elaboración propia en base a SNET (2002) Propuesta de descontaminación del canal principal de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa, SNET (2005) Balance hídrico integrado y dinámico componente evaluación de recursos hídricos, MARN (2011) Informe de la calidad de agua de los ríos de El Salvador, MARN (2013) Informe de la calidad del agua de los ríos El Salvador, Espinoza, Vinicio y Zavaleta (2013) Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del Río Suquiapa, Santa Ana, Amaya (2015) Evaluación hidrogeoquímica e hidroquímica de la subcuenca del Río Aranchacal y Amaya, Arriola y Cerna (2015) Modelación de la Calidad Físicoquímica de las aguas del Río Suquiapa.

CAPÍTULO 2.0. METODOLOGÍA DE CAMPO.

En el presente capítulo, se describe la metodología de campo, detallando las técnicas de muestreo en ríos, además, se define el procedimiento para la medición de los parámetros necesarios para la determinación del índice de calidad del agua propuesto por la Fundación Nacional de Sanidad de los EE.UU, también, se describe la metodología a seguir para el cálculo de dicho índice, así mismo, se presenta el procedimiento de medición del Cromo Hexavalente en aguas superficiales y por último, se detalla el procedimiento para la modelación de metales pesados en agua.

2.1. Técnica de muestreo en ríos.

Según Espinoza, Merino y Zavaleta (2013), los puntos de muestreo deben establecerse en las operaciones previas al ensayo, lo que hace necesario un análisis del área de estudio, así, la selección de estos puntos debe determinarse en base a las características hidrogeológicas de la región que se está investigando, además, se debe estudiar la bibliografía y cartografía geológica existente y las eventuales experiencias previas al ensayo. Además, se debe analizar con interés la información que las personas que viven en el área puedan proporcionar. En esta investigación se tomaron como referencia los puntos de muestreo determinados en el trabajo de graduación realizado por Espinoza, Merino y Zavaleta (2013).

Es necesario realizar un análisis previo de la accesibilidad al área de estudio mediante la consulta de los correspondientes planos topográficos y fotografías aéreas, además, se deben realizar visitas técnicas para la localización de los puntos de muestreo. En la Tabla 2.1 se presenta la ubicación geográfica de los puntos de muestreo, dichas ubicaciones fueron georeferenciadas nuevamente a partir

de la información presente en el trabajo realizado por Espinoza, Merino y Zavaleta (2013). En la Figura 2.1 se presenta un esquema del río principal y sus tributarios.

Tabla 2.1. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

Sitio	Descripción	Coordenadas	Altura (m)
A01SUQUI	Punto de partida, cercano al Beneficio El Sauce.	N 14°00'48.7" W089°32'37.0"	580
A02VERTI	Aproximadamente a 50 m de A01SUQUI. Tributario conocido por los lugareños como Vertiente.	N14°00'47.7" W089°32'34.4"	579
A03SUQUI	Punto antes de la unión del Río Suquiapa con el Río Apanteos. A 35 m aguas arriba de la unión de los ríos.	N14°00'45.2" W089°32'30.5"	572
A04APANT	Río Apanteos dentro del Beneficio El Sauce.	N14°00'43.6" W089°32'29.3"	582
A05SUQUI	Aproximadamente a 30 m aguas debajo de la unión con el Río Apanteos.	N14°00'44.2" W089°32'27.3"	576
A06SAUCE	A 75 m del punto anterior.	N14°00'44.9" W089°32'24.4"	579

Fuente: Elaboración propia en base a Espinoza, Merino y Zavaleta (2013).

Tabla 2.1. (Continuación) Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

Sitio	Descripción	Coordenadas	Altura (m)
A07CARCA	Tributario cercano a A06SAUCE.	N14°00'43.2" W089°32'23.2"	582
A08SUQUI	A aproximadamente 210 m de A07CARCA.	N14°00'46.3" W089°32'17.9"	580
A09MOLIN	A 50 m del enganche con la corriente principal. El enganche se encuentra aproximadamente a 135 m de A08SUQUI.	N14°00'49.8" W089°32'13.2"	567
A10SUQUI	A 2710 m de la unión con el Río Molino.	N14°01'06.7" W089°31'10.9"	526
A11ZARCO	Conocido por los lugareños como Poza "El Cajón". A unos 50 m del enganche con el río principal.	N14°01'08.1" W089°31'16.4"	530
A12SUQUI	A 1650 m de la unión con el Río Zarco.	N14°01'17.5" W089°30'19.8"	524
A13VERTI	Corriente utilizada para recreación, lavar ropa y para bombear agua a comunidades aledañas (aproximadamente 200 familias).	N14°01'26.1" W089°30'16.7"	528

Fuente: Elaboración propia en base a Espinoza, Merino y Zavaleta (2013).

Tabla 2.1. (Continuación) Ubicación geográfica de los puntos de muestreo.

Sitio	Descripción	Coordenadas	Altura (m)
A14SUQUI	A 175 m de la unión con A13VERTI.	N14°00'26.4" W089°29'32.9"	499
A15PUENT	A 2500 m de A14SUQUI.	N14°00'26.6" W089°29'38.9"	501
A16SUQUI	A 800 m del enganche con el Río Puente.	N14°00'07.6" W089°29'14.5"	506
A17GUILG	A 810 m del sitio A16SUQUI.	N13°59'43.5" W089°29'07.1"	487
A18SUQUI	A 500 m de la unión con el Río Guilguayo.	N13°59'42.6" W089°28'53.2"	473

Fuente: Elaboración propia en base a Espinoza, Merino y Zavaleta (2013).

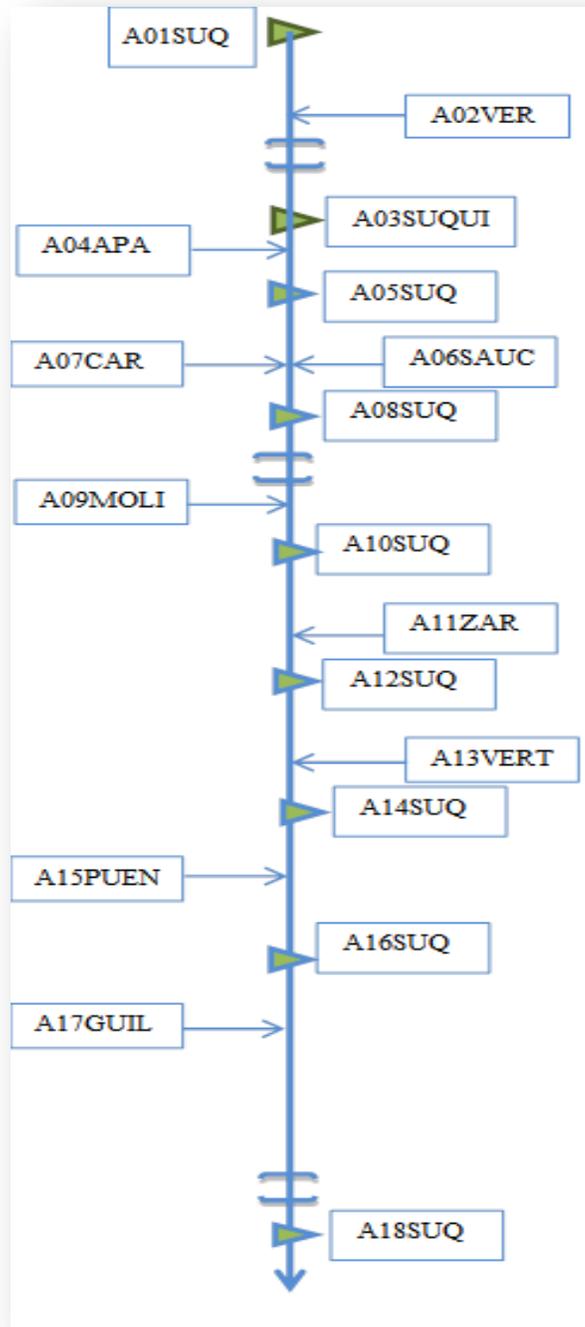


Figura 2.1. Esquema del río principal con sus tributarios. Fuente: (Espinoza, Vinicio y Zavaleta, 2013).

Para la toma de muestras se realizaron 7 visitas al Río Suquiapa y sus tributarios. En la Figura 2.2 se muestra el procedimiento de muestreo en ríos.

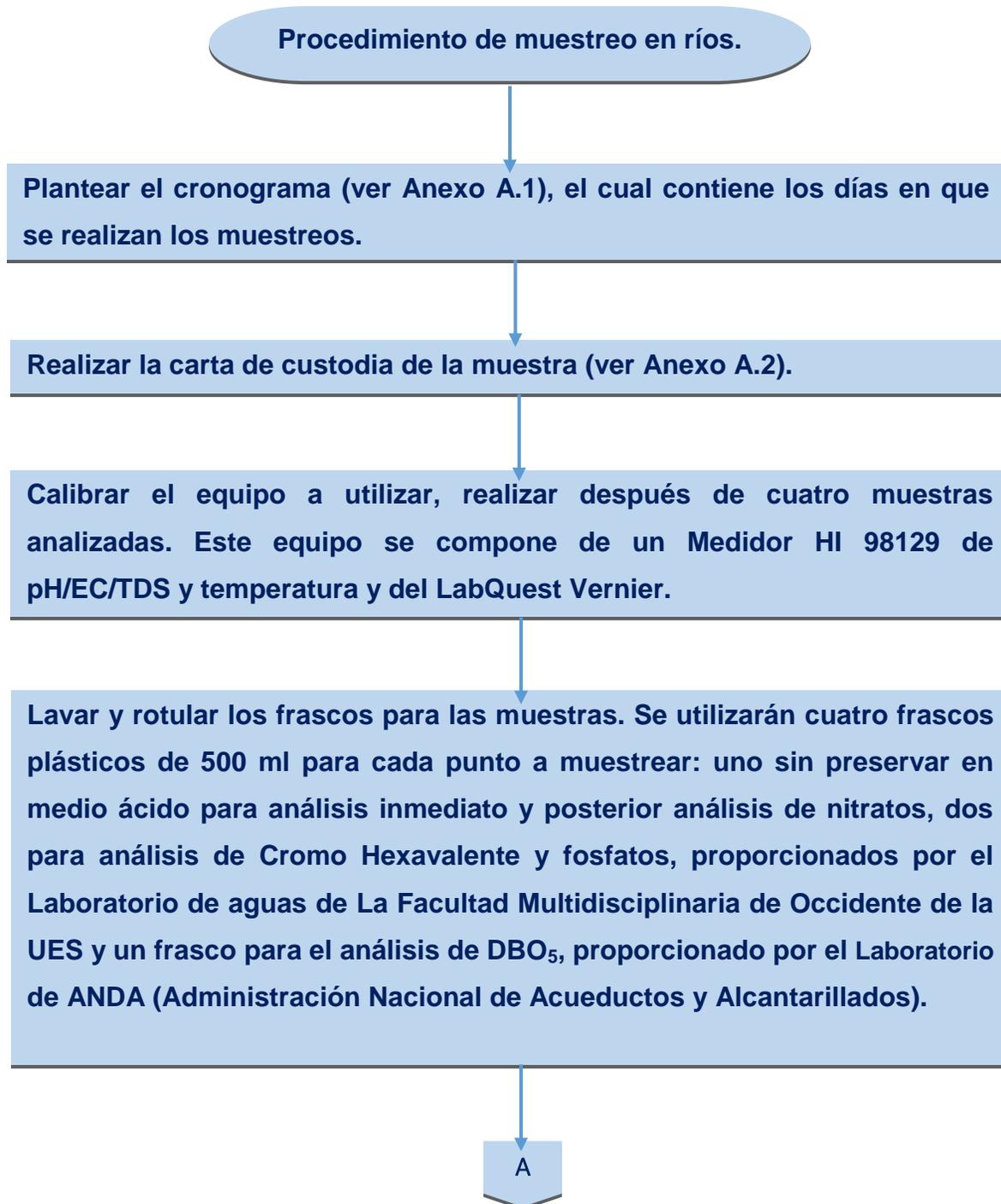


Figura 2.2. Técnicas de muestreo en ríos. Fuente: Elaboración propia.

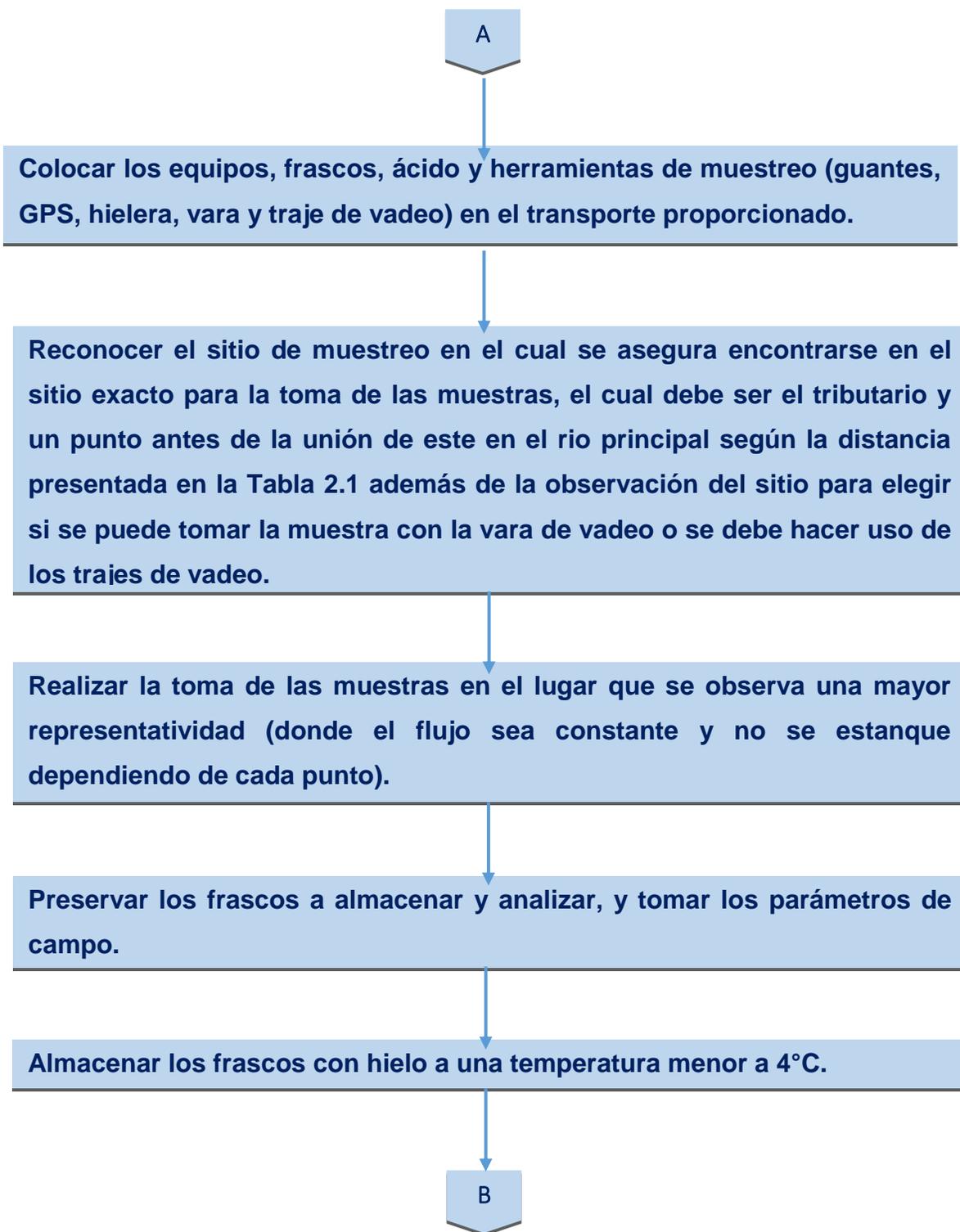


Figura 2.2. (Continuación) Técnicas de muestreo en ríos. Fuente: Elaboración propia.

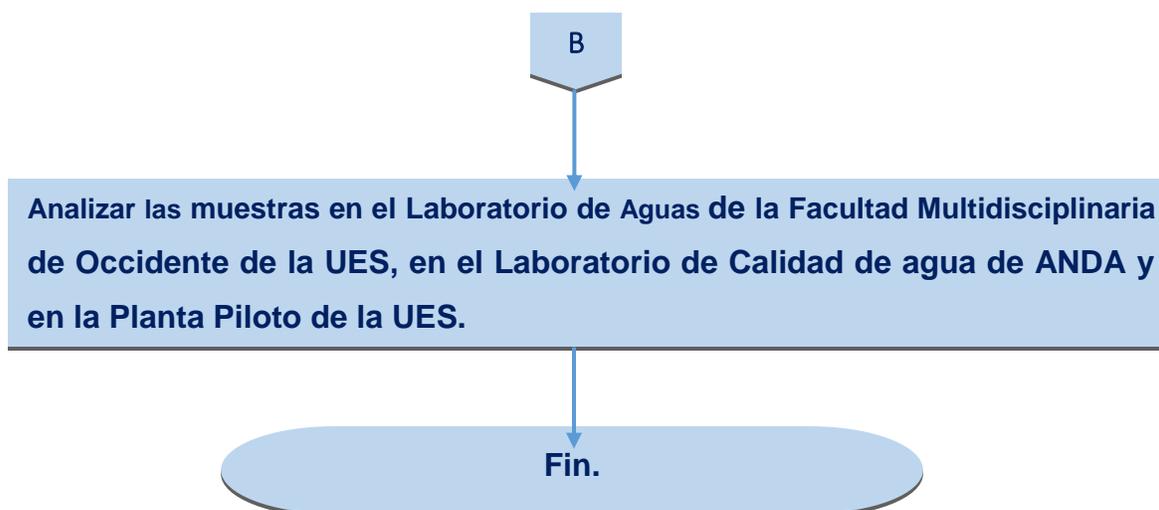


Figura 2.2. (Continuación) Técnicas de muestreo en ríos. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Procedimiento de medición de parámetros para la determinación del NSF-WQI.

A continuación se presentan los diferentes procedimientos para el análisis de los parámetros necesarios para determinar el índice de calidad del agua de la NSF, además del procedimiento para determinar el Cr^{+6} . Para el análisis de algunos de los parámetros fisicoquímicos determinados se utilizó el equipo disponible en la Planta Piloto de la Universidad de El Salvador, siendo estos el Labquest Vernier, el medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129 y Shimadzu UV-Vis 1800.

2.2.1. Procedimiento de medición del Potencial de Hidrógeno.

A continuación se presentan los pasos seguidos para la determinación del pH según Aguirre, González y Guerrero (2015), utilizando el medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129 (Ver Anexo A.3). Para ver el procedimiento de calibración del equipo ver el Anexo B.1. Tomar en cuenta que las muestras deben ser tomadas en recipientes de Polipropileno, asegurándose que estén bien tapados,

además, se recomienda analizar el pH lo más pronto posible y evitar la exposición de las muestras al aire.

- A) Si el electrodo está seco, enjuagar en solución de almacenamiento (HI 70300) o pH 7.01 (HI 7007) por lo menos una hora para reactivarlo.
- B) Encender el medidor presionando y manteniendo el medidor MODE por 2 o 3 s. Todos los segmentos del LCD estarán visibles por algunos segundos, seguido de la indicación de porcentaje de vida restante de la batería.
- C) Seleccionar el modo pH con el botón SET/HOLD.
- D) Antes de tomar cualquier medición asegurarse que el instrumento esté bien calibrado.
- E) Enjuagar el electrodo con agua de la llave cuidadosamente para eliminar cualquier contaminación. Luego de la limpieza enjuagar la sonda con la muestra a ser medida.
- F) Sumergir el electrodo en la solución a ser testada. La medición estará tomada cuando el símbolo de estabilidad desaparezca. El valor de pH automáticamente compensado se mostrará en el LCD primario y el display secundario mostrará la temperatura de la muestra.
- G) Para congelar el display, presionar el botón SET/HOLD por 2 o 3 s hasta que aparezca HOLD en el display secundario. Anotar la medición.
- H) Presionar nuevamente el botón SET/HOLD para retornar al modo normal de medición.
- I) Enjuagar el electrodo con agua de la llave cuidadosamente para eliminar cualquier contaminación. Si se siguen tomando mediciones y son en diferentes muestras sucesivamente, luego de la limpieza, enjuagar la sonda con la muestra a ser medida y repetir los pasos anteriores a partir del literal D. Importante: Tomar por lo menos 5 mediciones por muestra.
- J) Cuando se termine de medir, enjuagar y secar el electrodo. Apagar el medidor presionando el botón MODE mientras está en modo normal de medición. Aparecerá OFF en la parte inferior del display. Soltar el botón.

2.2.2. Procedimiento de medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno.

A continuación se presentan los pasos seguidos para la determinación del DBO_5 según Amaya, Arriola y Cerna (2015).

- A) Preparar y estandarizar una solución de Tiosulfato de Sodio a 0.025 M.
- B) Medir el valor de OD inicial del agua destilada, la cual debe de estar a $20 \pm 3^\circ\text{C}$.
- C) Hacer diluciones de las muestras a medida que la diferencia del nuevo valor de OD con el valor inicial sea lo más cercano a 1 para asegurar la precisión del cálculo.
- D) Almacenar las muestras por cinco días más o menos seis horas en recipientes adecuados para el análisis. Son tres frascos para blancos estándar y tres frascos para cada muestra.
- E) Eliminar el exceso de agua que poseen los frascos y agregar Sulfato Manganoso y solución de Alkali-Yoduro-Nitruro.
- F) Añadir Ácido Sulfúrico para romper el floculo formado por la presencia de Oxígeno y agitar fuertemente.
- G) Adicionar a un erlenmeyer 200 ml de la solución para titular con el Tiosulfato de Sodio, agregando el indicador de almidón para obtener una mejor percepción del viraje, tener en cuenta que cada ml de titulante representa 1 mg/L de OD.
- H) Obtener el DBO_5 por medio de la Ecuación 2.1. De las diluciones se obtiene el DBO_5 por medio del cociente de la diferencia de OD entre el volumen de la alícuota de la muestra multiplicada por cien.

$$DBO_5 = \frac{OD_{inicial} - OD_5}{V_{alícuota\ de\ muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde: DBO_5 es la Demanda Bioquímica de Oxígeno para un período de 5 días, $OD_{inicial}$ es el OD al inicio, OD_5 es el OD luego de 5 días y $V_{alícuota\ de\ muestra}$ es el volumen de la alícuota tomada de la muestra.

2.2.3. Procedimiento de medición de Nitratos.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para la determinación de Nitratos según APHA (1992), utilizando el equipo Shimadzu UV-Vis 1800 (Ver Anexo A.4). Recolectar la muestra en envases de vidrio de un volumen mínimo de 25 ml, sin cámara de aire y cerrar herméticamente. Analizar tan pronto como sea posible. Si no es posible analizar antes de 24 h de recolectada la muestra, ajustar a un pH menor de 2 con Ácido Clorhídrico o Ácido Sulfúrico y refrigerar a 4°C.

- A) Tratamiento de la muestra: Sobre 50 ml de muestra transparente, filtrada si fuera preciso, añadir 1 ml de solución de Ácido Clorhídrico y mezclar bien.
- B) Preparación de la curva patrón: Preparar estándares de calibrado de Nitrato en el rango de 0 a 70 mg de $NO_3^{3-} - N/L$, donde N es el Nitrógeno, por dilución a 50 ml de los siguientes volúmenes de solución intermedia de Nitrato: 0, 1, 2, 4, 7... 35 ml. Tratar los patrones de Nitrato del mismo modo que las muestras.
- C) Medida espectrofotométrica: Leer la absorbancia o transmitancia frente a agua destilada, ajustada a absorbancia cero o transmitancia 100%. Utilizar el equipo Shimadzu UV-Vis 1800 a una longitud de onda 220 nm, para obtener la lectura de Nitratos y a una longitud de onda de 275 nm, para determinar la interferencia debida a la materia orgánica disuelta.

2.2.4. Procedimiento de medición de Fosfatos.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para la determinación de PO_4^{3-} según Lugo (2013), utilizando el espectrofotómetro HACH DR 2000 (Ver Anexo A.5). Tomar en consideración que si las formas de Fósforo disuelto deben ser diferenciadas, filtrar la muestra inmediatamente después de la recolección. Preservar por congelación o por debajo de -10°C. No guardar las muestras que contienen bajas concentraciones de Fósforo en botellas de plástico a menos que

se mantenga en un estado de congelación, porque los Fosfatos pueden ser adsorbidos sobre las paredes de las botellas de plástico.

- A) Encender el equipo e ingresar el código de programa almacenado, esto indica el código del programa correspondiente a Fosfatos.
- B) Girar la perilla del lado derecho del equipo hasta que el display muestre 890 nm.
- C) Presionar el botón READ/ENTER y el display mostrará: mg/L PO_4^{3-} .
- D) Llenar la celda de muestra con 25 ml de la misma.
- E) Agregar el contenido de un sobre de PhosVer 3 a la celda con muestra preparada, agitar la muestra y si un color celeste aparece es indicador de presencia de Fosfatos.
- F) Presionar SHIFT TIMER, entonces el equipo activa un temporizador con un período de reacción de 2 minutos, que es el tiempo que necesita la muestra para reaccionar por completo con el reactivo.
- G) Llenar la otra celda con 25 ml de muestra (el blanco).
- H) Cuando el temporizador suena, el display muestra: mg/L PO_4^{3-} .
- I) Colocar el blanco en la celda de luz y se cierra la tapa.
- J) Presionar ZERO y el display muestra: WAIT y luego: 0.00 mg/L PO_4^{3-} .
- K) Retirar el blanco, se coloca la muestra preparada con el reactivo para la lectura en la celda de luz y se cierra la tapa.
- L) Presionar READ/ENTER y el display muestra: WAIT, entonces los resultados en mg/L son mostrados en el display.

2.2.5. Procedimiento de medición del Cambio de Temperatura.

Para la medición de la temperatura de la muestra se utilizó el Medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129. Para seleccionar las unidades de la temperatura (de °C a °F), desde el modo de medición presionar y mantener el botón MODE hasta TEMP y la temperatura actual se verá desplegada en la parte inferior del

LCD. Para determinar la temperatura ambiente utilizar un termómetro de mercurio. Por último determinar el cambio de temperatura.

2.2.6. Procedimiento de medición de Turbidez.

Para la determinación de la turbidez se utilizó el equipo Labquest Vernier/Sensor TRB-BTA. El procedimiento de calibración se muestra en el Anexo B.2. A continuación se presenta el procedimiento de medición de turbidez según Aguirre, González y Guerrero (2015). Tomar en cuenta que la turbidez debe determinarse tan pronto como sea posible después que se toma la muestra. Agitar suavemente todas las muestras antes de examinarlas para garantizar una medición representativa. Refrigerar a 4°C para minimizar la descomposición microbiológica de los sólidos. Para obtener los mejores resultados medir la turbidez de inmediato, sin alterar las condiciones originales de la muestra, tales como temperatura o el pH.

- A) Conectar el sensor de turbidez en el canal 1 de la interfaz del LabPro.
- B) Iniciar el software de recopilación de datos. El programa reconocerá automáticamente el sensor de turbidez.
- C) Preparar el sensor de turbidez para la calibración.
- D) Invertir suavemente la muestra de agua para mezclar. Importante: No agitar la muestra.
- E) Vaciar el agua destilada de la cubeta y enjuagar con agua de la muestra. Llenar la cubeta hasta la parte superior de la línea de agua de la muestra.
- F) Enroscar la tapa en la cubeta. Limpiar el exterior con un paño suave y sin pelusa.
- G) Sostener la cubeta por la tapa y colocar en el sensor de turbidez. Asegurar que las marcas estén alineadas.
- H) Cerrar la tapa.
- I) Monitorear el valor de turbidez. Nota: Tomar las lecturas poco después de colocar la cubeta en el sensor.

- J) Enjuagar la cubeta entre mediciones con agua destilada.
- K) Cuando se termine de usar el sensor de turbidez, simplemente enjuagar la cubeta de la muestra con agua destilada y secarla suavemente.
- L) Apagar el equipo y desconectar el sensor.

2.2.7. Procedimiento de medición de Sólidos Disueltos Totales.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para la medición de los SDT según Aguirre, González y Guerrero (2015). El procedimiento de calibración del medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129 se muestra en el Anexo B.3. Importante: Se debe asegurar que el medidor esté acorde con las condiciones ambientales en que va a ser usado. El bulbo de vidrio al final del electrodo es sensible a descargas electrostáticas por lo que se debe evitar tocar el bulbo de vidrio. Tomar un mínimo de 500 ml de muestra en envases de polietileno y tapar inmediatamente después de la colecta. Preservar la muestra a 4°C hasta su análisis. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días. Realizar el análisis dentro de las 24 horas posteriores a su colecta. Las muestras deben estar a temperatura ambiente al momento del análisis.

- A) Si el electrodo está seco, enjuagar en solución de almacenamiento (HI 70300) o pH 7.01 (HI 7007) por lo menos una hora para reactivarlo.
- B) Encender el medidor presionando y manteniendo el medidor MODE por 2 o 3 s. Todos los segmentos del LCD estarán visibles por algunos segundos, seguido de la indicación de porcentaje de vida restante de la batería.
- C) Seleccionar el modo TDS con el botón SET/HOLD.
- D) Antes de tomar cualquier medición se debe asegurar que el instrumento esté bien calibrado.
- E) Enjuagar el electrodo con agua de la llave cuidadosamente para eliminar cualquier contaminación. Luego de la limpieza enjuagar la sonda con la muestra a ser medida.

- F) Sumerjir el electrodo en la solución a ser medida. Utilizar un vaso plástico para minimizar interferencias electromagnéticas. La medición estará tomada cuando el símbolo de estabilidad desaparezca. El valor de TDS automáticamente compensado se mostrará en el LCD primario y el display secundario mostrará la temperatura de la muestra.
- G) Para congelar el display, presione el botón SET/HOLD por 2 o 3 s hasta que aparezca HOLD en el display secundario. Anotar la medición.
- H) Presionar nuevamente el botón SET/HOLD para retornar al modo normal de medición.
- I) Enjuagar el electrodo con agua de la llave cuidadosamente para eliminar cualquier contaminación. Si se siguen tomando mediciones y son en diferentes muestras sucesivamente, luego de la limpieza, enjuagar la sonda con la muestra a ser medida y repetir los pasos anteriores a partir del literal D. Importante: Tomar por lo menos 5 mediciones por muestra.
- J) Cuando haya terminado de medir, enjuagar y secar el electrodo. Apagar el medidor presionando el botón MODE mientras está en modo normal de medición. Aparecerá OFF en la parte inferior del display. Soltar el botón.

2.2.8. Procedimiento de medición de Oxígeno Disuelto.

A continuación se muestra el procedimiento seguido para la medición del OD según Aguirre, González y Guerrero (2015). El procedimiento de calibración del equipo Labquest Vernier se muestra en el Anexo B.4. Importante: Si se hacen las lecturas después de retornar al laboratorio, se debe asegurar que no haya burbujas de aire en el contenedor de la muestra de agua y que el contenedor este bien cerrado. Se deben almacenar las muestras en una caja con hielo o en un refrigerador hasta que se vayan a tomar las mediciones. Cuando se toman las lecturas en agua fría (0-10°C) o caliente (25-35°C), dejar pasar un tiempo mayor hasta observar que las lecturas de OD se estabilizan.

- A) Preparar el sensor de OD para su uso.
- Retirar la tapa protectora azul de la punta de la sonda. Esta tapa protectora puede ser descartada una vez que haya desembalado la sonda.
 - Desenroscar la tapa de la membrana de la punta de la sonda.
 - Con una pipeta, llenar la tapa de la membrana con un ml de solución de llenado de electrodo.
 - Atornillar cuidadosamente la tapa de la membrana de nuevo en el electrodo.
 - Colocar la sonda en un vaso de precipitados lleno con aproximadamente 100 ml de agua destilada.
- B) Conectar la sonda de OD en el canal 1 de la interfaz del LabPro y arrancar el software de DataPro. Pulsar New dos veces. El programa reconocerá automáticamente la sonda de OD.
- C) Dejar la sonda de OD en el agua durante 10 minutos para que esta se caliente. Estando conectado empezará a interactuar con el programa de recolección de datos de corriente.
- D) Preparar la sonda de OD para calibración.
- E) Para la recopilación de datos pulsar MODE: TIME GRAPH.
- F) Reunir datos de la concentración de OD.
- Situar la punta del sensor en la muestra a medir. Sumergirlo de 4-6 cm.
 - Suavemente agitar el sensor en la muestra.
 - Pulsar START para comenzar la adquisición de datos. Importante: Tomar por lo menos 5 mediciones por muestra.
- G) Enjuagar el electrodo con agua destilada entre mediciones.
- H) Cuando se termine de medir, enjuagar y secar el electrodo. Apagar el equipo y desconectar la sonda.

2.2.9. Procedimiento de medición de Coliformes Fecales.

A continuación se detalla el procedimiento seguido para la determinación de Coliformes Fecales según APHA (1992). El Anexo A.8 muestra el equipo utilizado para la determinación de Coliformes Fecales.

- A) Seleccionar el tamaño de la muestra: El tamaño de la muestra dependerá de la densidad bacteriana que se espere, que en las muestras de agua solo estará limitada por el grado de turbidez o por el crecimiento de no coliformes en el medio.

Un volumen ideal de muestras es el que proporciona alrededor de 50 colonias de coliformes y no más de 200 colonias de todos los tipos. El agua potable se analiza filtrando de 100-500 ml o más, o bien muestras duplicadas de volúmenes más pequeños. Las demás aguas se analizarán filtrando 3 volúmenes distintos, diluidos o no, en función de la densidad bacteriana que se espere. Cuando se filtran menos de 20 ml, diluidos o no, se añadirán alrededor de 10 ml de agua de dilución estéril al embudo antes de la filtración. Se aumenta con ello el volumen del agua, lo que ayuda a obtener una dispersión uniforme de la suspensión bacteriana en la totalidad de la superficie filtrante efectiva.

- B) Filtrar la muestra: Colocar con pinzas estériles un filtro de membrana estéril con la trama hacia arriba sobre la placa porosa del receptáculo. Situar con cuidado la unidad del embudo correspondiente sobre el receptáculo y fijar. La filtración se lleva a cabo mediante un vacío parcial. Todavía con el filtro en su lugar, aclarar el embudo filtrando 3 porciones de 20-30 ml de agua de dilución estéril. Tras el enjuagado final y la desconexión al vacío del proceso de filtrado, desbloquear y retirar el embudo e inmediatamente quitar el filtro de membrana con unas pinzas estériles y colocarlo en el medio seleccionado con un movimiento de rotación para evitar que quede aire atrapado. Introducir una muestra de agua de lavar estéril de 100 ml después de filtrar una serie de 10 muestras para comprobar posibles contaminaciones

cruzadas o contaminación del agua de lavado. Incubar la membrana de control en las mismas condiciones que las de la muestra. Al comienzo de cada serie de filtraciones, utilizar unidades de filtración estériles como mínima precaución para evitar la contaminación accidental. Considerar que se interrumpe una serie de filtraciones cuando transcurre un intervalo de 30 o más minutos entre la filtración de 2 muestras. Si se produjeran una interrupción de este tipo, tratar la filtración siguiente como si fuera una nueva serie y esterilizar los soportes de los filtros de membrana que estén utilizándose. Descontaminar los filtros entre filtraciones sucesivas mediante rayos Ultra Violeta (UV), chorro de vapor o agua hirviendo. En el caso de empleo de luz UV, bastara con una exposición de 2 min. Tener cuidado de no exponer los cultivos de los filtros de membrana a la radiación UV que pueda escaparse de la cabina de esterilización. Se recomienda llevar protección ocular; tanto las cajas protectoras como las gafas graduadas proporcionan una protección adecuada frente a la radiación que emana una cabina de esterilización que no esté encendida en los intervalos entre exposiciones. Limpiar regularmente los tubos UV y comprobar de forma periódica para asegurarse de que producen una eliminación bacteriana de 99% en una exposición de 2 min.

- C) Técnica de enriquecimiento: Colocar una compresa absorbente estéril en la mitad superior de una placa de cultivo estéril y llevar con la pipeta una cantidad suficiente de medio enriquecido (1.8-2.0 ml de medio de Lauril Triptosa) para que se sature la compresa y retirar cuidadosamente de la misma el exceso de líquido. Colocar asépticamente sobre la compresa el filtro por el que se ha filtrado la muestra. Incubar el filtro sin invertir la placa durante 1.5-2.0 h a $35\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en una atmosfera con humedad relativa de al menos el 99%. Si se utiliza un medio con agar retirar el cultivo de enriquecimiento de la incubadora, levantar el filtro de compresa de enriquecimiento y arrollar sobre la superficie de agar. Es fácil observar, si la colocación del filtro es incorrecta, que aparecen parches de membrana sin teñir que indican atrapamiento de aire. En estos casos, volver a colocar

cuidadosamente el filtro sobre la superficie del agar. Si se utiliza un medio líquido, preparar el cultivo, retirando el cultivo de enriquecimiento de la incubadora y separar las dos mitades de la placa. Situar una nueva compresa estéril en la mitad inferior de la placa y saturar con 1.8-2.0 ml del medio M-Endo final. Transferir a la nueva compresa el filtro con las precauciones antes mencionadas desechándose la ya utilizada. Tanto en el caso del agar como en el medio líquido invertir la placa durante 20-22 h a $35\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, procediéndose después como se indica en el literal E.

D) Técnica de alternativa de un solo paso: Si se utiliza un medio con agar, situar en el agar el filtro preparado directamente, como se ha descrito antes, e incubar a $35\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ durante 22-24 h. Si se utiliza medio líquido, colocar la compresa en la capa de cultivo y saturar con 1.8-2.0 ml del medio M-Endo. Situar el filtro preparado directamente sobre la compresa e invertir la placa durante 22-24 h a $35\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

E) Recuento: La típica colonia de coliformes tiene un color rojo oscuro con un brillo metálico en superficie. El área brillante puede ser solo un pequeño punto o bien cubrir por completo la superficie de la colonia. Recontar las colonias con brillo con la ayuda de una lupa estereoscópica binocular de campo amplio y bajos aumentos (10-15 aumentos) o de otro instrumento óptico, con una luz blanca fría fluorescente y lo más perpendicular posible al plano del filtro. Las colonias sin brillo puede ser rosadas, rojas, blancas o incoloras y se consideran como no coliformes. El recuento total de colonias (coliformes y no coliformes) no tiene relación en un medio tipo M-Endo, con el número total de bacterias que existen en la muestra original. Sin embargo, un elevado recuento de colonias no coliformes puede interferir con el máximo desarrollo de las coliformes. La incubación anaerobia a 35°C durante 24 h permite inhibir en el caso de algunas aguas naturales, las colonias no coliformes pero el proceso debe valorarse cuidadosamente para comprobar que no se producen pérdidas en la recuperación de coliformes. Las muestras de aguas desinfectadas o fluentes de aguas residuales contienen a veces microorganismos de forma anómala que

crecen de forma relativamente lenta y producen un brillo máximo al cabo de 22-24 h. Los microorganismo procedentes de aguas no desinfectadas pueden producir brillo a las 16-17 h decayendo después de 24-30 h.

- F) Verificación de coliformes: Los microorganismos no coliformes producen a veces típicas colonias no coliformes con brillo por tanto, se deberá comprobar mediante una prueba de fermentación de lactosa o utilizando procedimientos alternativos, como una prueba rápida (4 h) de dos reacciones bioquímicas claves o un sistema multipuebas para especificación.

2.3. Metodología de cálculo del NSF-WQI (Jiménez y Vélez, 2006).

Para estimar el índice de calidad, NSF-WQI, se asignan factores de ponderación a cada una de las variables en las que se fundamentan, de tal forma que éste puede determinarse por medio de la Ecuación 2.2.

$$WQI = \sum_{i=1}^9 W_i \times Q_i \quad \text{Ecuación 2.2}$$

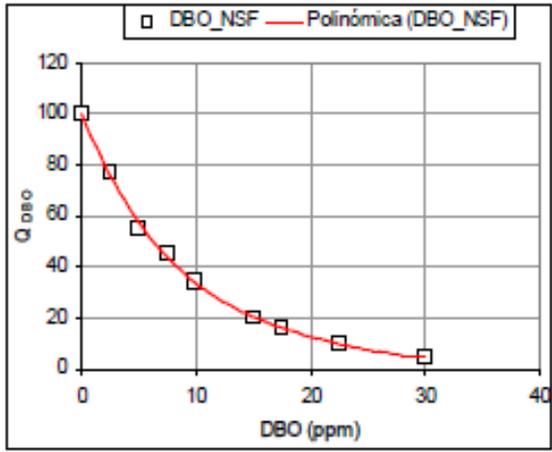
Donde: W_i denota el factor de importancia o ponderación de la variable i respecto a las restantes variables que conforman el índice, y Q_i corresponde al factor de escala de la misma. Este último depende de la magnitud de la variable y es independiente de las restantes, y se estima de acuerdo a diagramas construidos para cada variable y es independiente de las restantes, y se estima de acuerdo con diagramas construidos para cada variable que permiten llevarlas a una misma escala antes de ser agregadas en un solo valor. En la Tabla 2.2 se presentan los pesos asignados a cada variable y en la Figura 1.10 los factores de escala.

Tabla 2.2. Factores de ponderación NSF.

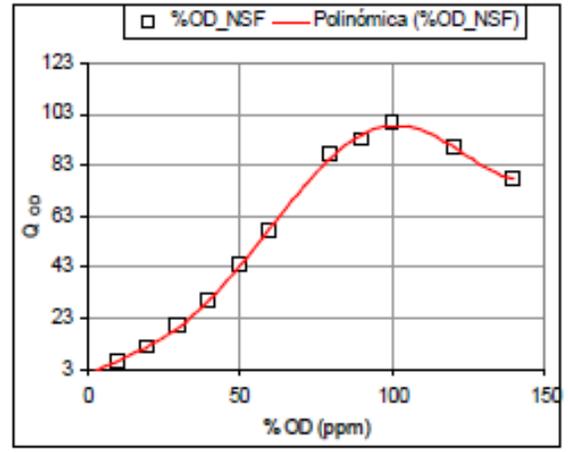
Parámetro	Factor W_i
% Saturación de oxígeno	0.17
Coliformes fecales	0.16
pH	0.11
Demanda Bioquímica de Oxígeno	0.11
Nitratos	0.10
Fosfatos	0.10
Temperatura ΔT	0.10
Turbidez	0.08
Sólidos Disueltos Totales	0.07

Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).

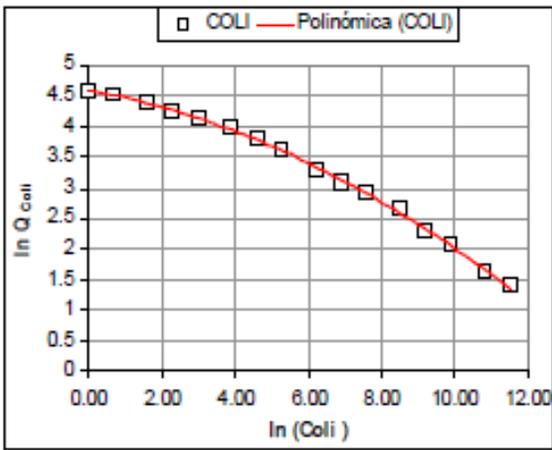
Teniendo en cuenta el número de puntos de medición definidos en la cuenca y lo complejo que resulta obtener los factores de escala Q_i directamente de los diagramas, se han elaborado ajustes polinómicos a las curvas de estandarización asociadas a cada variable. En la Tabla 2.3 se muestran los ajustes propuestos, que a su vez se muestran superpuestos en los diagramas originales de la NSF en la Figura 2.3 para los parámetros: (a) Demanda Bioquímica de Oxígeno, (b) Porcentaje de saturación de oxígeno, (c) Coliformes fecales, (d) Nitratos, (e) pH; (f) Cambio de temperatura; g) Sólidos totales; (h) Fosfatos y (i) Turbidez.



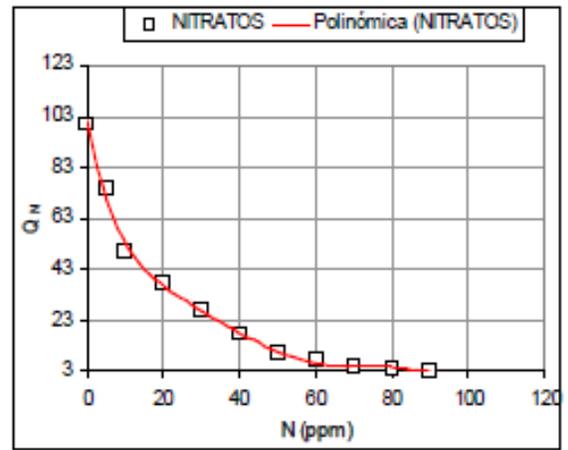
(a)



(b)

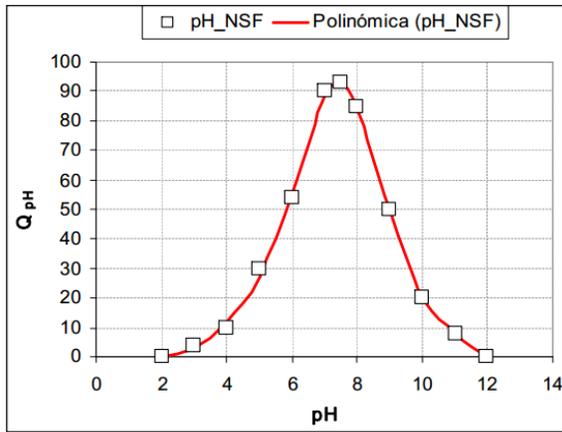


(c)

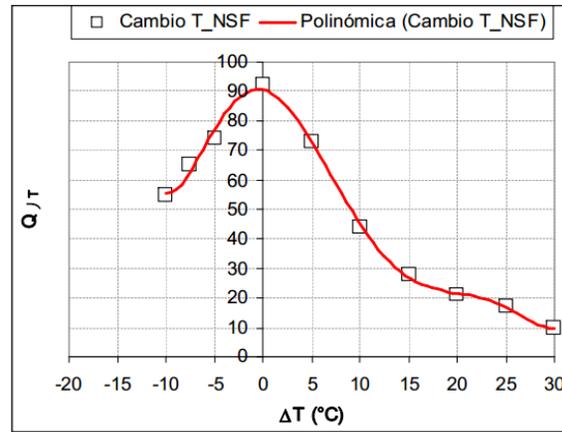


(d)

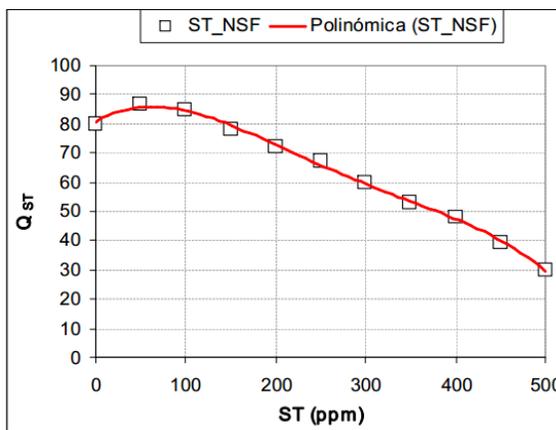
Figura 2.3. Factores de escala, Q para los parámetros involucrados en el NSF- WQI. Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).



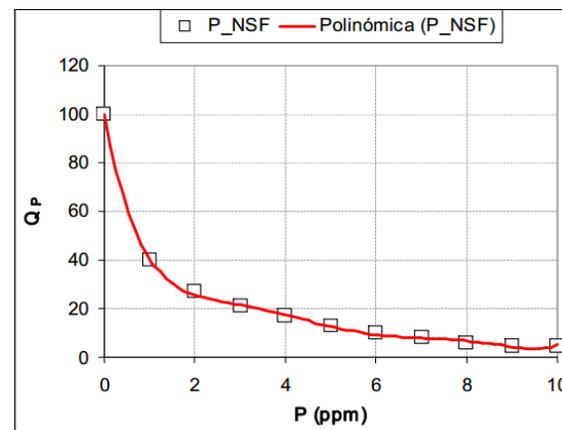
(e)



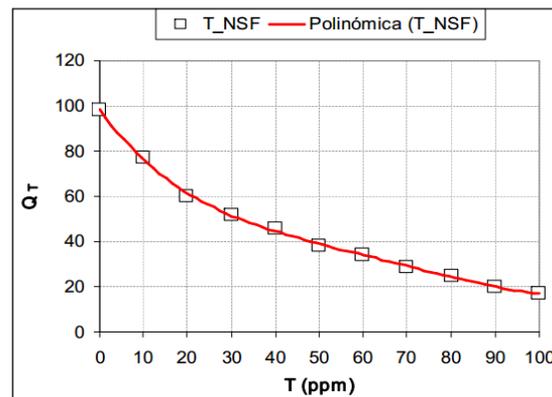
(f)



(g)



(h)



(i)

Figura 2.3. (Continuación) Factores de escala, Q para los parámetros involucrados en el NSF- WQI. Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).

Tabla 2.3. Ajuste de curvas para determinación de factores de escala Q_i .

Parámetro	Ecuación para determinar el factor de escala Q_i
<p style="text-align: center;">%</p> <p style="text-align: center;">Saturación de Oxígeno</p>	$Q_{OD} = 3.1615E - 08(OD\%)^5 - 1.0304E - 05(OD\%)^4 + 1.0076E - 03(OD\%)^3 - 2.7883E - 02(OD\%)^2 + 8.4068E - 01(OD\%) - 1.6120E - 01$ <p style="text-align: center;">$R^2 = 0.9995$</p> <p style="text-align: center;">Donde</p> <p style="text-align: center;"><i>Q_{OD}: Factor de escala Oxígeno Disuelto</i></p> <p style="text-align: center;"><i>– $OD\%$: Oxígeno Disuelto expresado como porcentaje de saturación.</i></p>
<p style="text-align: center;">Demanda Bioquímica de Oxígeno</p>	$Q_{DBO} = 1.8677E - 04(DBO)^4 - 1.6615E - 02(DBO)^3 + 5.9636E - 01(DBO)^2 - 1.1152E + 01(DBO) + 1.0019E + 02$ <p style="text-align: center;">$R^2 = 0.9989$</p> <p style="text-align: center;">Donde</p> <p style="text-align: center;"><i>Q_{dbo}: Factor de escala Demanda Bioquímica de Oxígeno</i></p> <p style="text-align: center;"><i>– DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno expresado en mg/L.</i></p>
<p style="text-align: center;">Coliformes Fecales</p>	$\ln(Q_{COL}) = -0.0152(\ln C)^2 - 0.1063(\ln C) + 4.5922$ <p style="text-align: center;">$R^2 = 0.999$</p> <p style="text-align: center;">Donde</p> <p style="text-align: center;"><i>Q_{COL}: Factor de escala Coliformes Fecales – C: Coliformes Fecales como NMP.</i></p>

Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).

Tabla 2.3. (Continuación) Ajuste de curvas para determinación de factores de escala Q_i .

Parámetro	Ecuación para determinar el factor de escala Q_i
Nitratos	$Q_{NITRA} = 3,5603E - 09(N)^6 - 1,2183E - 06(N)^5 + 1,6238E - 04(N)^4 - 1,0693E - 02(N)^3 + 3,7304E - 01(N)^2 - 7,5210N + 1,0095E + 02$ $R^2 = 0.9972$ <p style="text-align: center;">Donde</p> <p style="text-align: center;">Q_{NITRA}: Factor de escala Nitratos – N: Conentracion de Nitratos en mg/l.</p>
pH	<p style="text-align: center;"><i>Para pH: 7.5</i></p> $Q_{pH} = -0,1789(pH)^5 + 3,7932(pH)^4 - 30,517(pH)^3 + 119,75(pH)^2 - 224,58(pH) + 159,46$ $R^2 = 0.9981$ <p style="text-align: center;"><i>Para pH > 7.5</i></p> $Q_{pH} = -1.11429(pH)^4 + 44.50952(pH)^3 - 656.60000(pH)^2 + 4215.34762(pH) - 9840.14286$ $R^2 = 1.000$ <p style="text-align: center;">Donde</p> <p style="text-align: center;">Q_{pH}: Factor de escala pH – pH: Nivel de pH.</p>

Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).

Tabla 2.3. (Continuación) Ajuste de curvas para determinación de factores de escala Q_i .

Parámetro	Ecuación para determinar el factor de escala Q_i
Cambio de Temperatura	$Q_{\Delta T} = 1,9619E - 06(\Delta T)^6 - 1,3964E - 04(\Delta T)^5 + 2,5908E - 03(\Delta T)^4 + 1,5398E - 02(\Delta T)^3 - 6,7952E - 01(\Delta T)^2 - 6,7204E - 01(\Delta T) + 9,0392E + 01$ $R^2 = 0.9972$ <p><i>$Q_{\Delta T}$: Factor de escala de Cambio de temperatura – ΔT: Cambio de temperatura en °C.</i></p>
Sólidos Disueltos Totales	$Q_{SDT} = -4,4289E - 09(ST)^4 + 4,650E - 06(ST)^3 - 1,9591E - 03(ST)^2 + 1,8973E - 01(ST) + 8,0608E + 01$ $R^2 = 0.9977$ <p><i>Q_{SDT}: Factor de escala de Sólidos Totales – ST: Sólidos Totales en mg/l.</i></p>
Fosfatos	$Q_P = 4,67320E - 03(P)^6 - 1,61670E - 01(P)^5 + 2,20595(P)^4 - 1,50504 E + 01(P)^3 + 5,38893 E + 01(P)^2 - 9,98933E + 01(P) + 9,98311E + 01$ $R^2 = 0.9994$ <p>Donde</p> <p><i>Q_P: Factor de escala de Fosfatos – P: Fosfatos en mg/L.</i></p>
Turbidez	$Q_T = 1,8939E - 06(T)^4 - 4,9942E - 04(T)^3 + 4,9181E - 02(T)^2 - 2,6284T + 9,8098E + 01$ $R^2 = 0.9990$ <p>Donde</p> <p><i>Q_T: Factor de escala de Turbidez – T: Turbidez en mg/L.</i></p>

Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).

Para la estimación de los factores presentados en la Tabla 2.3 se tomaron las siguientes consideraciones:

Teniendo en cuenta que la variabilidad de la temperatura del agua se encuentra influenciada por la hora a la cual fue tomada la muestra y no hubo simultaneidad en las mediciones, se asumió un cambio DT nulo en cualquier parte de la cuenca al cual corresponde un factor de escala $QD_T = 90$.

El aporte del OD en el índice NSF-WQI viene dado en términos del porcentaje de saturación, que depende de parámetros como la temperatura, salinidad y presión atmosférica en el cuerpo de agua. Sólo el efecto de la temperatura del agua ha sido tenido en cuenta para estimar el nivel de oxígeno de saturación, O_{SF} (mg/L), de acuerdo a la Ecuación 2.3.

$$\ln(O_{SF}) = -1393441 + \frac{1,5757 \times 10^5}{T_{agua}} - \frac{6,6423 \times 10^7}{T_{agua}^2} + \frac{1,2438 \times 10^{10}}{T_{agua}^3} - \frac{8,621949 \times 10^{11}}{T_{agua}^4}$$

Ecuación 2.3

Donde:

$T_{agua} = T(^{\circ}C) + 273.15$, con temperatura absoluta en grados Kelvin.

La cantidad de OD que puede disolverse en el agua depende de la Temperatura, es así que el agua más fría puede contener más OD que el agua más caliente. Si los niveles son bajos ó demasiado bajos algunos peces y otros microorganismos no pueden sobrevivir.

De acuerdo al nivel de OD contenido en el agua, así será su porcentaje de saturación y le corresponderá las siguientes categorías: Pobre <60%, aceptable 60-79%, adecuado 80-89%, excelente 90-100% y sobresaturado mayor a 101%.

Una vez determinado el NSF-WQI en cualquier punto, puede clasificarse la fuente de acuerdo con los intervalos señalados en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Clasificación de la calidad de agua en función del índice NSF-WQI

VALOR DEL ÍNDICE	CLASIFICACIÓN	LEYENDA
0-25	Calidad muy mala (MM)	
26-50	Calidad mala (M)	
51-70	Calidad media (R)	
71-90	Calidad buena (B)	
91-100	Calidad excelente (E)	

Fuente: (Jiménez y Vélez, 2006).

Una de las limitaciones del NSF-WQI es que ha sido desarrollado como una herramienta para caracterizar en forma general la calidad de las aguas, de tal forma que procesos físicos, químicos o biológicos que indican alta degradación de las aguas pueden ser enmascarados por otros que no sugieren contaminación alguna (o mínima).

2.4. Procedimiento de medición de Cromo Hexavalente.

A continuación se presenta el procedimiento seguido para la determinación de Cr^{6+} según Álvarez y Proaño (2006), utilizando el espectrofotómetro HACH DR 2000 (Ver Anexo A.5). El método se basa en una reacción donde el Cr^{6+} reacciona con la 1,5-difenilcarbazida en medio ácido para dar un complejo color rojo violeta de composición desconocida que es determinado espectrofotométricamente a 540 nm. La intensidad de color es directamente proporcional a la concentración de Cr^{6+} . Tomar en cuenta que la muestra se debe recolectar en frasco de plástico o vidrio previamente enjuagados con disolución de Ácido Nítrico 1:1. Además todas las muestras deben refrigerarse a una temperatura de $4^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ hasta su análisis.

- A) Encender el equipo e ingresar el código de programa almacenado, esto indica el código del programa correspondiente a Cromo Hexavalente.
- B) Girar la perilla del lado derecho del equipo hasta que el display muestre 540 nm.
- C) Presionar el botón READ/ENTER y el display mostrará: mg/L Cr^{6+} .
- D) Llenar la celda de muestra con 25 ml de la misma.
- E) Agregar el contenido de un sobre de CromoVer 3 a la celda con muestra preparada, agitar la muestra y si un color rosa o lila pálido aparece es indicador de presencia de Cromo.
- F) Presionar SHIFT TIMER, entonces el equipo activa un temporizador con un período de reacción de 5 minutos, que es el tiempo que necesita la muestra para reaccionar por completo con el reactivo.
- G) Llenar la otra celda con 25 ml de muestra (el blanco).
- H) Cuando el temporizador suena, el display muestra: mg/L Cr^{6+} .
- I) Colocar el blanco en la celda de luz y cerrar la tapa.
- J) Presionar ZERO y el display muestra: WAIT y luego: 0.00 mg/L Cr^{6+} .
- K) Retirar el blanco, colocar la muestra preparada con el reactivo para la lectura en la celda de luz y cerrar la tapa.
- L) Presionar READ/ENTER y el display muestra: WAIT, entonces los resultados en mg/L son mostrados en el display.

2.5. Procedimiento de modelación de metales pesados (Amaya, Arriola y Cerna, 2015).

El WASP es un software que utiliza un modelo dinámico que puede ser usado para analizar una variedad de problemas de calidad en diversos cuerpos de agua tales como corrientes, lagos, ríos, estuarios y aguas costeras.

Las ecuaciones de transporte consideradas en WASP están basadas en el principio de la conservación de la masa. Este principio requiere que la masa de cada constituyente de calidad de agua que se está investigando debe tenerse en cuenta de una manera u otra. WASP rastrea cada constituyente desde el punto de

entrada espacial y temporal a su punto final de salida, conservando la masa en el espacio y el tiempo. Para llevar a cabo estos cálculos de balance de masa, el usuario debe suministrar a WASP datos de entrada definiendo siete características importantes:

- Control de la simulación y salida.
- Segmentación del modelo.
- Transporte advectivo y dispersivo.
- Concentraciones de borde.
- Cargas tóxicas de fuentes puntuales y difusas.
- Parámetros cinéticos, constantes y funciones temporales.
- Concentraciones iniciales.

Estos datos de entrada, en conjunto con las ecuaciones de balance de masa general de WASP y las ecuaciones específicas químicas cinéticas, definen un set especial de ecuaciones de calidad de agua. Estas son integradas numéricamente por WASP a medida que avanza la simulación.

2.5.1. Segmentación del río.

La segmentación consiste en separar en tramos el segmento total del río donde cada tramo posee condiciones homogéneas de comportamiento hidráulico y calidad ambiental. Cada uno de estos segmentos posee características biológicas y fisicoquímicas similares, en este caso el Río Suquiapa fue segmentado en 18 tramos como se puede ver en la Figura 2.4.

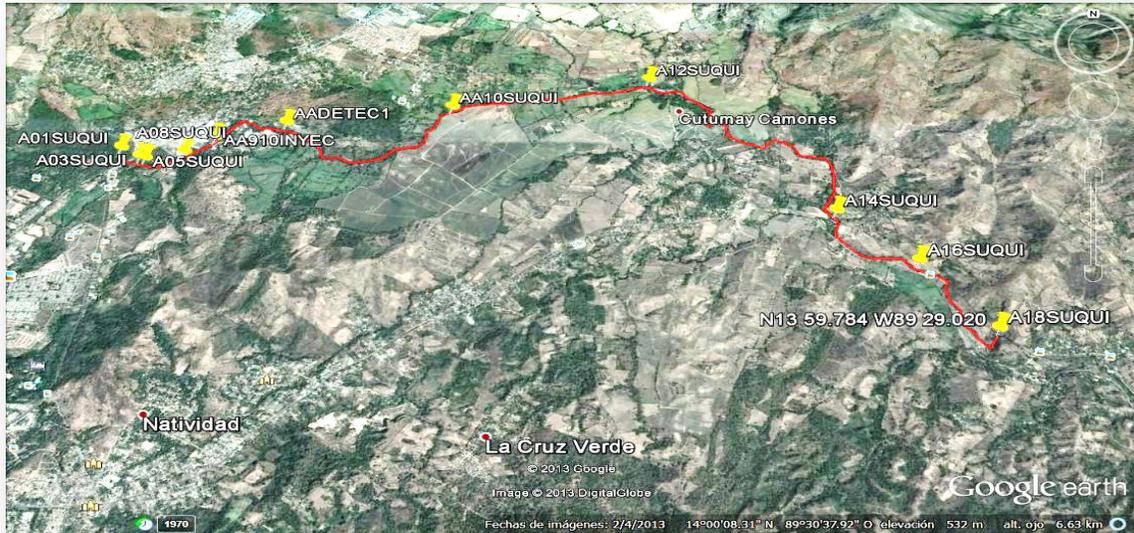


Figura 2.4. Imagen Satelital de los 18 tramos de división del Río Suquiapa. Fuente: (Amaya, Arriola y Cerna, 2015).

El modelo que se utiliza en el software es el Net Flows para hacer una simulación en estado estacionario, el largo de los segmentos no influye en el resultado de la simulación, debido a que en Net Flows los segmentos son solo “volúmenes en el espacio” para el modelo, por esa razón no se usa el modo transiente, kinematic wave este usa el largo del segmento para calcular el tiempo que le toma al agua cruzar el segmento

Para ingresar los datos necesarios como concentración inicial del metal pesado, profundidad, ancho, largo y velocidad del río en estudio nos referimos a la pantalla de segmentos, donde se debe ingresar una fila de información por cada segmento del modelo Para cada segmento, el usuario debe ingresar una cantidad de información mínima, que depende de la opción de flujo seleccionada.

2.5.2. Calibración del software.

Para poder tener una mejor perspectiva de cuál será el comportamiento del contaminante en el río realizamos una calibración del software. En este caso, se

calibraron parámetros del modelo hidrodinámico a partir de la comparación de la concentración de los elementos conservativos generada por el modelo con mediciones realizadas en campo.

Los elementos conservativos son sustancias no reactivas transportadas pasivamente a través de un cuerpo de agua. Su presencia es expresada a través de una concentración, por ejemplo la salinidad, o de un indicador como la conductividad eléctrica. Ésta es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar la corriente eléctrica. Depende de la presencia de iones en solución, de su concentración total, movilidad y balance y de la temperatura.

Para realizar el proceso de calibrado se toman los datos obtenidos en campo de conductividad eléctrica, lo cuales son ingresados en la pantalla de segmentos, en la pestaña de concentraciones iniciales del contaminante, luego se modifican los parámetros de borde (boundaries), lo cuales siguen siendo los mismos datos de concentración, que en este caso son de conductividad eléctrica y con todo ello se ejecuta el modelo obteniendo así la gráfica de conductividad versus tiempo que muestra la tendencia que seguirán los valores de concentraciones iniciales durante el tiempo en el río en estudio.

2.5.3. Modelación en el software.

Para realizar la modelación en WASP se requiere que se ingresen datos específicos en cada una de las pantallas que deben ser llenadas para su ejecución, a continuación se mencionan las pantallas que posee WASP, con una breve descripción de cada una de ellas:

Pantalla de Datos (Data Set Screen): En esta pantalla (Figura 2.5), se realizan modificaciones sobre fechas y horas de inicio y final de la modelación, la hidrodinámica a utilizar siendo Net Flows la que seleccionamos, la técnica de solución habiendo tres técnicas que pueden ser seleccionadas: 1) Euler: que es la técnica de solución tradicional que ha usado WASP desde su creación y que es la

que se utiliza en este estudio; 2) COSMIC Flux Limiting: que es la técnica de solución típicamente usada cuando WASP es enlazado a modelos hidrodinámicos multidimensionales; y 3) Runga Kutta 4 step: que es usada para simulaciones diurnas, el usuario tiene la habilidad de seleccionar la técnica de solución del modelo a ser usada por el módulo de calidad de agua durante la simulación finalmente el de tipo de volumen de lecho.

Figura 2.5. Pantalla de Datos (Data Set Screen). Fuente: Elaboración propia.

Pantalla de Segmentos (Segments): Esta pantalla (Figura 2.6), utiliza los datos que fueron mencionados con anterioridad, es decir: concentración inicial del metal pesado, profundidad, ancho, largo, tipo de segmento, volumen y velocidad del río en estudio.

Segments

Segments													
Parameters Initial Concentrations Fraction Dissolved													
Segment	Description	Volume	Velocity		Depth		Segment Type	Bottom Segment	Length	Width	Minimum Depth	Slope	Bottom Roughness
			Multiplier	Exponent	Multiplier	Exponent							
1	A01SUQUI	2.49	0.2480	0.0000	0.2490	0.0000	Surface Water	1: A01SUQUI	1.0000	10.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	A02VERTI	4.83	0.2140	0.0000	0.1820	0.0000	Surface Water	2: A02VERTI	17.7000	1.5000	0.0000	0.0000	0.0000
3	A03SUQUI	5.592E+2	0.2130	0.0000	0.3250	0.0000	Surface Water	3: A03SUQUI	191.1800	9.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	A04APANT	1.912E+1	0.2980	0.0000	0.2380	0.0000	Surface Water	4: A04APANT	19.6000	4.1000	0.0000	0.0000	0.0000
5	A05SUQUI	9.491E+1	0.2640	0.0000	0.3470	0.0000	Surface Water	5: A05SUQUI	26.0600	10.5000	0.0000	0.0000	0.0000
6	A06SAUCE	4.662E+1	0.2490	0.0000	0.5880	0.0000	Surface Water	6: A06SAUCE	79.3000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7	A07CARCA	1.839E+1	0.2280	0.0000	0.2310	0.0000	Surface Water	7: A07CARCA	53.1000	1.5000	0.0000	0.0000	0.0000
8	A08SUQUI	8.9866E+2	0.2320	0.0000	0.3450	0.0000	Surface Water	8: A08SUQUI	200.3500	13.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	A09MOLIN	8.819E+1	0.2410	0.0000	0.2200	0.0000	Surface Water	9: A09MOLIN	133.6300	3.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	A10SUQUI	1.26924E+4	0.3540	0.0000	0.3510	0.0000	Surface Water	10: A10SUQUI	2781.6000	13.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11	A11ZARCO	5.567E+1	0.1800	0.0000	0.3330	0.0000	Surface Water	11: A11ZARCO	25.7200	6.5000	0.0000	0.0000	0.0000
12	A12SUQUI	1.65607E+4	0.2980	0.0000	0.5710	0.0000	Surface Water	12: A12SUQUI	1706.0600	17.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13	A13VERTI	1.936E+1	0.0690	0.0000	0.3350	0.0000	Surface Water	13: A13VERTI	28.9100	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14	A14SUQUI	2.98117E+4	0.2330	0.0000	0.6580	0.0000	Surface Water	14: A14SUQUI	2831.6600	16.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	A15PUENTE	9.639E+1	0.4160	0.0000	0.2510	0.0000	Surface Water	15: A15PUENTE	64.0100	6.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16	A16SUQUI	3.6131E+3	0.5760	0.0000	0.3650	0.0000	Surface Water	16: A16SUQUI	824.9100	12.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17	A17GUILGU	4.3732E+2	0.2200	0.0000	0.1930	0.0000	Surface Water	17: A17GUILGU	906.3800	2.5000	0.0000	0.0000	0.0000
18	A18SUQUI	2.912E+2	0.8930	0.0000	0.2840	0.0000	Surface Water	18: A18SUQUI	146.4800	7.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 2.6. Pantalla de Segmentos (Segments). Fuente: Elaboración propia.

Pantalla de Flujos (Flows Screen): Para poder ingresar los valores de esta pantalla (Figura 2.7), hacemos uso de la Figura 2.1, la cual muestra cual es el recorrido del río principal, así como el de los tributarios, para poder desglosar cada uno de los recorridos y tener mejores resultados en la ejecución del modelo. Se escoge agua superficial y se ingresan los valores de caudal del inicio de cada cabecera, es decir de cada punto inicial al recorrido a seguir por el software.

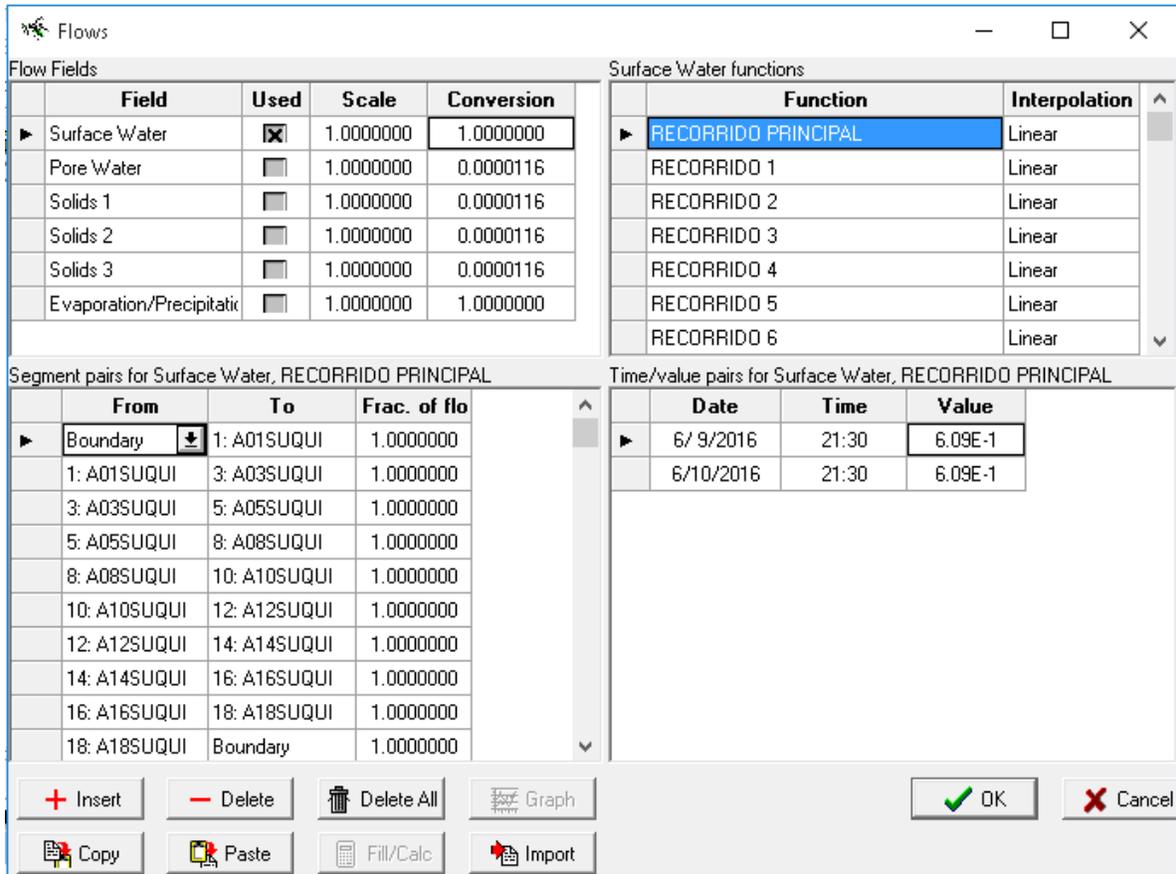


Figura 2.7. Pantalla de Flujos (Flows Screen). Fuente: Elaboración propia.

Pantalla de intercambios (Exchanges screen): Esta pantalla (Figura 2.8) requiere el ingreso del recorrido del río principal y además se ingresan los valores de áreas y distancia, de cada par de datos, tomando siempre en cuenta que debe ser la opción de agua superficial la seleccionada.

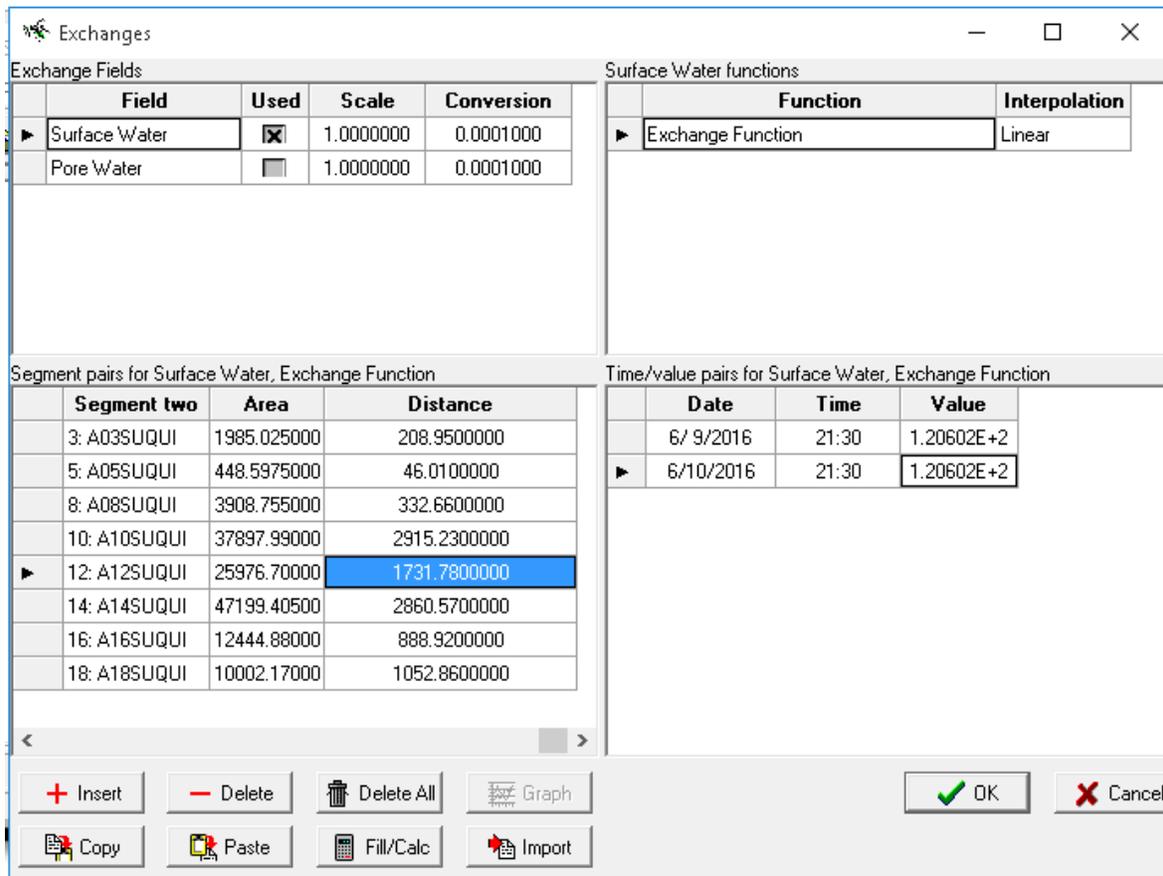


Figura 2.8. Pantalla de intercambios (Exchanges screen). Fuente: Elaboración propia.

Condiciones de borde (Boundaries): En la pantalla de condiciones de borde (Figura 2.9), se presenta una lista de condiciones de borde para los puntos del tramo del río en estudio, siendo estos: concentraciones de contaminante por punto, fecha de inicio de la modelación y finalización de la modelación. En este estudio en particular nos interesa la opción “toxicant” (tóxico), pues hace referencia al contaminante que se está estudiando.

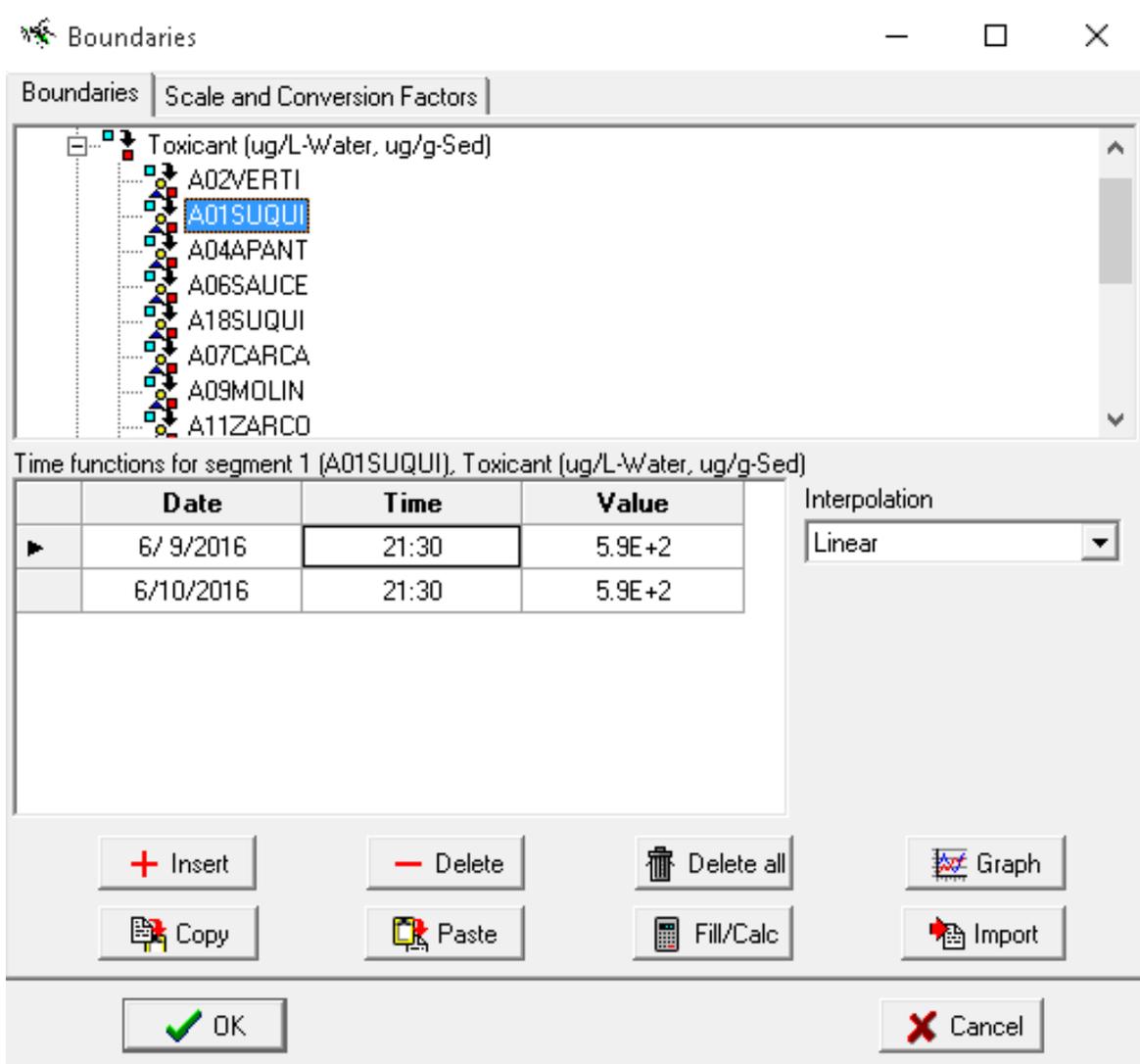


Figura 2.9. Condiciones de borde (Boundaries). Fuente: Elaboración propia.

Ejecución del Modelo: Para realizar la ejecución del modelo (Figura 2.10), todos los datos mencionados con anterioridad deben haber sido ingresados correctamente y luego se da clic en el icono del software en la pantalla principal del mismo y se prosigue al reconocimiento de las variables ingresadas.

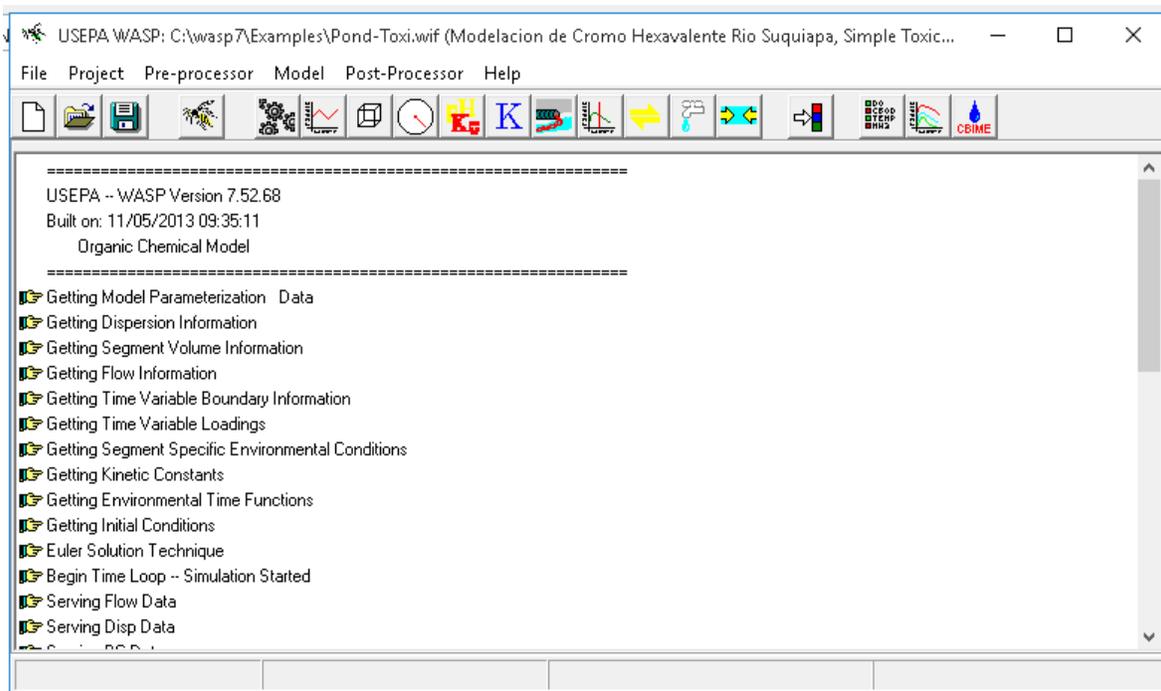


Figura 2.10. Pantalla de Ejecución del Modelo. Fuente: Elaboración propia.

Post Procesador (Post-Processor): Siendo esta la última etapa de la modelación, se obtienen los gráficos respectivos a la concentración del contaminante versus tiempo de modelación y de concentración de contaminante versus segmentos. En estos gráficos se presentan los datos actuales medidos en campo así como también los obtenidos por la modelación para un periodo de 24 h. (Ver capítulo 3, sección 3.4)

Para la mejor comprensión sobre el uso de este software de modelación se puede revisar el trabajo de graduación: “Modelación de la calidad fisicoquímica de las aguas del Río Suquiapa”, presentado por Amaya, Arriola y Cerna (2015), donde se explica con más detalle sobre las diferentes entradas de datos que posee el software, su manera de uso, los parámetros que contempla para realizar la modelación y finalmente la ejecución del modelo.

CAPÍTULO 3.0. OBTENCIÓN DE RESULTADOS.

En este capítulo se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos y bióticos necesarios para la determinación del índice de calidad del agua propuesto por la Fundación Nacional de Sanidad de los EE.UU., además, se presentan los resultados de la calidad del agua del tramo en estudio del Río Suquiapa y sus ríos tributarios, también, se dan a conocer los resultados de concentración de Cromo Hexavalente y la modelación de su comportamiento a partir del uso del Programa de Simulación de Análisis de Calidad del Agua. Para una mejor apreciación de los puntos de muestreo, el Anexo C muestra las fichas técnicas que contienen la ubicación geográfica de los puntos de muestreo, fotografía del sitio, entre otros datos importantes.

3.1. Resultados de parámetros del NSF-WQI.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros determinados en el tramo en estudio del Río Suquiapa.

3.1.1. Potencial de Hidrógeno.

En la Tabla 3.1 se presentan los valores de Potencial de Hidrógeno, los cuales fueron determinados haciendo uso del medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129.

Tabla 3.1. Resultados de Potencial de Hidrógeno.

Sitio de aforo	Potencial de Hidrógeno en <i>pH</i>	Sitio de aforo	Potencial de Hidrógeno en <i>pH</i>
A01SUQUI	7.40	A10SUQUI	7.75
A02VERTI	7.10	A11ZARCO	7.82
A03SUQUI	7.60	A12SUQUI	7.67
A04APANT	7.94	A13VERTI	6.52
A05SUQUI	7.83	A14SUQUI	7.71
A06SAUCE	7.34	A15PUENTE	7.57
A07CARCA	7.43	A16SUQUI	7.75
A08SUQUI	7.62	A17GUILGU	8.00
A09MOLIN	7.79	A18SUQUI	7.91

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.1, se muestra la gráfica de los valores de Potencial de Hidrógeno obtenidos en los 18 puntos muestreados, junto con los límites superior e inferior.

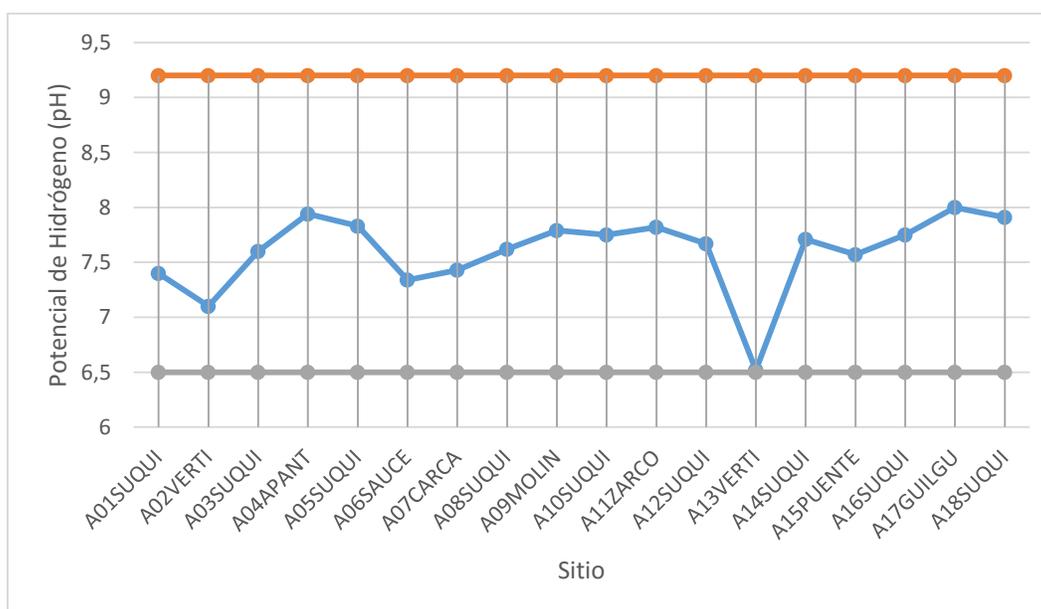


Figura 3.1. Gráfico de valores de Potencial de Hidrógeno. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

En la Tabla 3.2 se presentan los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno, los cuales fueron determinados en el Laboratorio de Calidad de Agua de ANDA y en el Instituto del Agua de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador.

Tabla 3.2. Resultados de Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Sitio de aforo	DBO ₅ en <i>mg/L</i>	Sitio de aforo	DBO ₅ en <i>mg/L</i>
A01SUQUI	49.00	A10SUQUI	15.00
A02VERTI	0.57	A11ZARCO	2.10
A03SUQUI	10.19	A12SUQUI	13.00
A04APANT	2.02	A13VERTI	8.00
A05SUQUI	6.06	A14SUQUI	12.00
A06SAUCE	1.52	A15PUENTE	4.00
A07CARCA	2.82	A16SUQUI	6.00
A08SUQUI	3.46	A17GUILGU	2.00
A09MOLIN	2.95	A18SUQUI	10.00

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.2 se muestra la gráfica de los valores de concentración de DBO₅ obtenidos, exceptuando el dato del punto A01SUQUI para una mejor apreciación del gráfico.

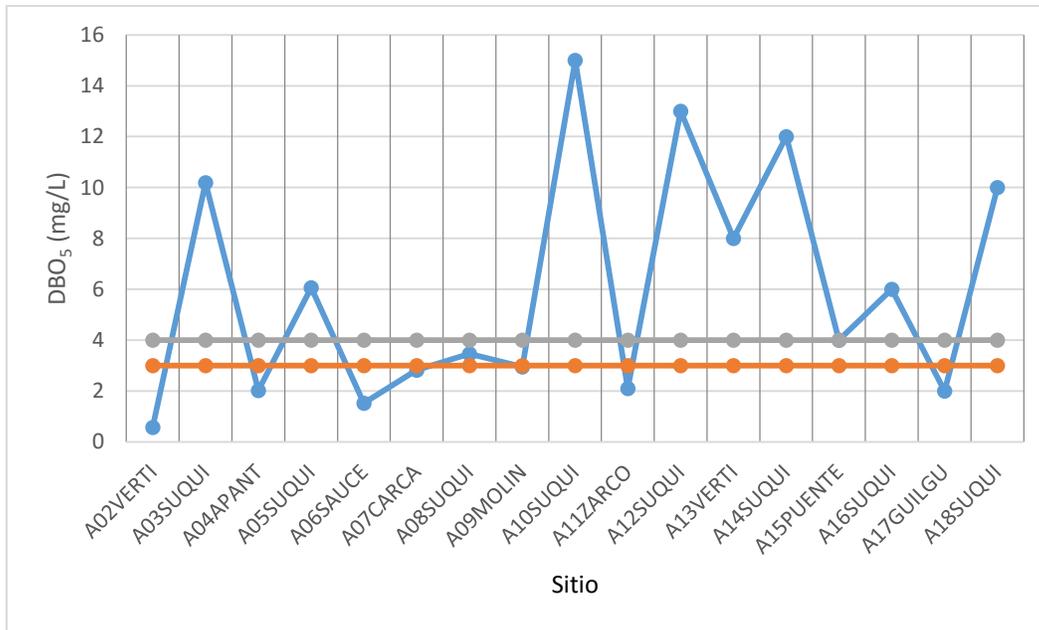


Figura 3.2. Gráfico de valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno. Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Nitratos.

En la Tabla 3.6 se presentan los valores de Nitratos, los cuales fueron determinados haciendo uso del equipo Shimadzu UV-Vis 1800.

Tabla 3.3. Resultados de Nitratos.

Sitio de aforo	Nitratos en <i>mg/L</i>	Sitio de aforo	Nitratos en <i>mg/L</i>
A01SUQUI	2.01	A10SUQUI	3.39
A02VERTI	4.39	A11ZARCO	4.19
A03SUQUI	2.20	A12SUQUI	3.34
A04APANT	4.55	A13VERTI	3.23
A05SUQUI	3.35	A14SUQUI	4.07
A06SAUCE	4.24	A15PUENTE	3.14
A07CARCA	4.38	A16SUQUI	3.31
A08SUQUI	3.40	A17GUILGU	3.12
A09MOLIN	1.96	A18SUQUI	3.50

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.3 se muestra la gráfica de los valores de concentración de Nitratos obtenidos en el muestreo. El límite de concentración de Nitratos no se muestra en el gráfico, dado que los valores obtenidos son mucho menores a éste.

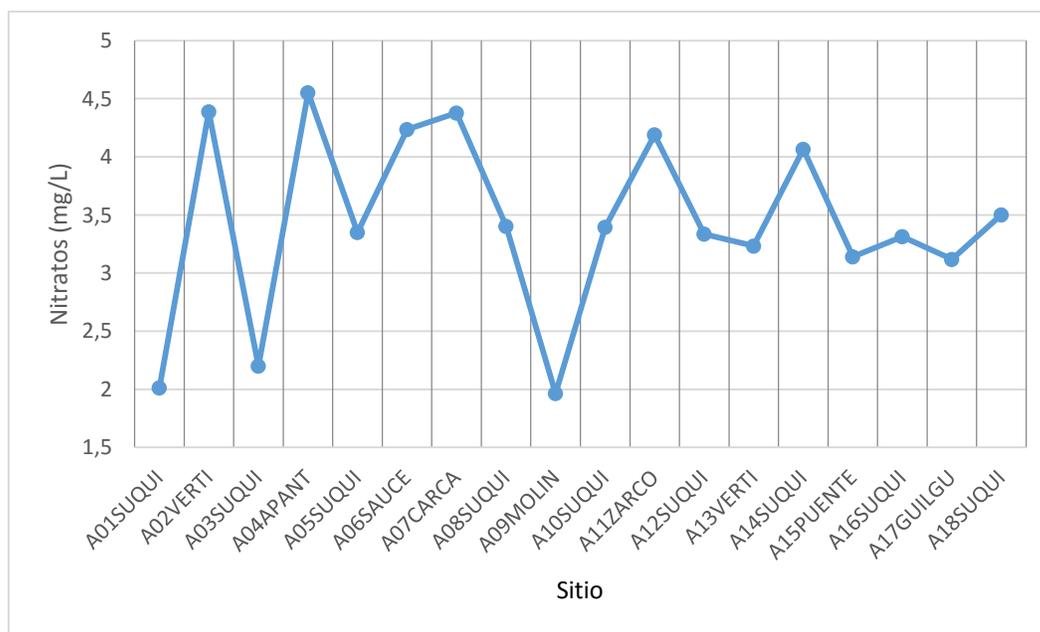


Figura 3.3. Gráfico de valores de concentración de Nitratos. Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Fosfatos.

En la Tabla 3.4 se presentan los valores de Fosfatos, los cuales fueron determinados por medio de colorimetría haciendo uso del equipo Direct Reading Spectrophotometer (DR 2000).

Tabla 3.4. Resultados de Fosfatos.

Sitio de aforo	Fosfatos en <i>mg/L</i>	Sitio de aforo	Fosfatos en <i>mg/L</i>
A01SUQUI	4.72	A10SUQUI	2.40
A02VERTI	0.78	A11ZARCO	0.93
A03SUQUI	6.35	A12SUQUI	1.56
A04APANT	0.93	A13VERTI	0.32
A05SUQUI	3.76	A14SUQUI	2.27
A06SAUCE	0.70	A15PUENTE	0.16
A07CARCA	0.16	A16SUQUI	1.67
A08SUQUI	2.64	A17GUILGU	0.33
A09MOLIN	5.75	A18SUQUI	1.48

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.4 se muestra la gráfica de los valores de concentración de Fosfatos obtenidos en los 18 puntos muestreados. El límite permisible de concentración de Fosfatos según la norma no se muestra en la gráfica, dado que los valores obtenidos en la toma de las muestras, son bastante inferiores a éste.

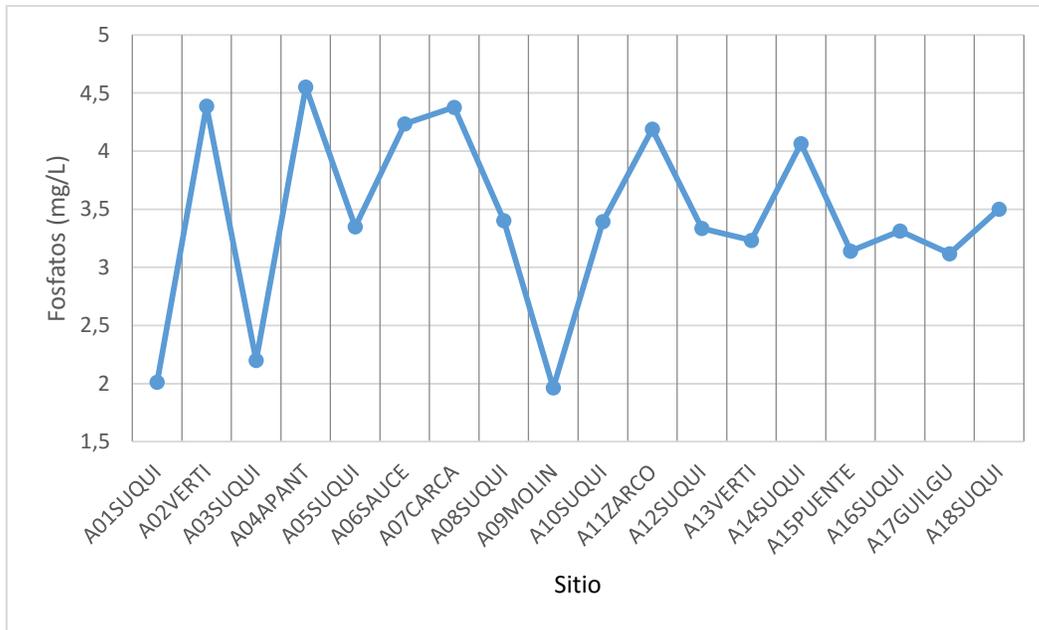


Figura 3.4. Gráfico de valores de concentración de Fosfatos. Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. Cambio de Temperatura.

En la Tabla 3.5 se presentan los valores de Temperatura Ambiente, Temperatura de la Muestra y de Cambio de Temperatura, los cuales fueron determinados haciendo uso del medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129.

Tabla 3.5. Resultados de Cambio de Temperatura.

Sitio de aforo	Temperatura Ambiente en °C	Temperatura de la Muestra en °C	Cambio de Temperatura (ΔT) en °C
A01SUQUI	31.2	29.1	2.1
A02VERTI	29.0	24.7	4.3
A03SUQUI	33.4	27.4	6.0
A04APANT	33.4	28.2	5.2
A05SUQUI	29.6	26.5	3.1
A06SAUCE	29.6	24.8	4.8
A07CARCA	33.4	26.1	7.3
A08SUQUI	29.7	26.2	3.5
A09MOLIN	29.1	27.3	1.8
A10SUQUI	29.0	27.1	1.9
A11ZARCO	31.8	26.4	5.4
A12SUQUI	31.4	28.9	2.5
A13VERTI	30.4	28.8	1.6
A14SUQUI	29.3	27.8	1.5
A15PUENTE	34.8	29.7	5.1
A16SUQUI	33.1	28.6	4.5
A17GUILGU	33.1	28.2	4.9
A18SUQUI	34.5	28.6	5.90

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.5 se muestra la gráfica de los valores de cambio de temperatura obtenidos para los 18 puntos muestreados.

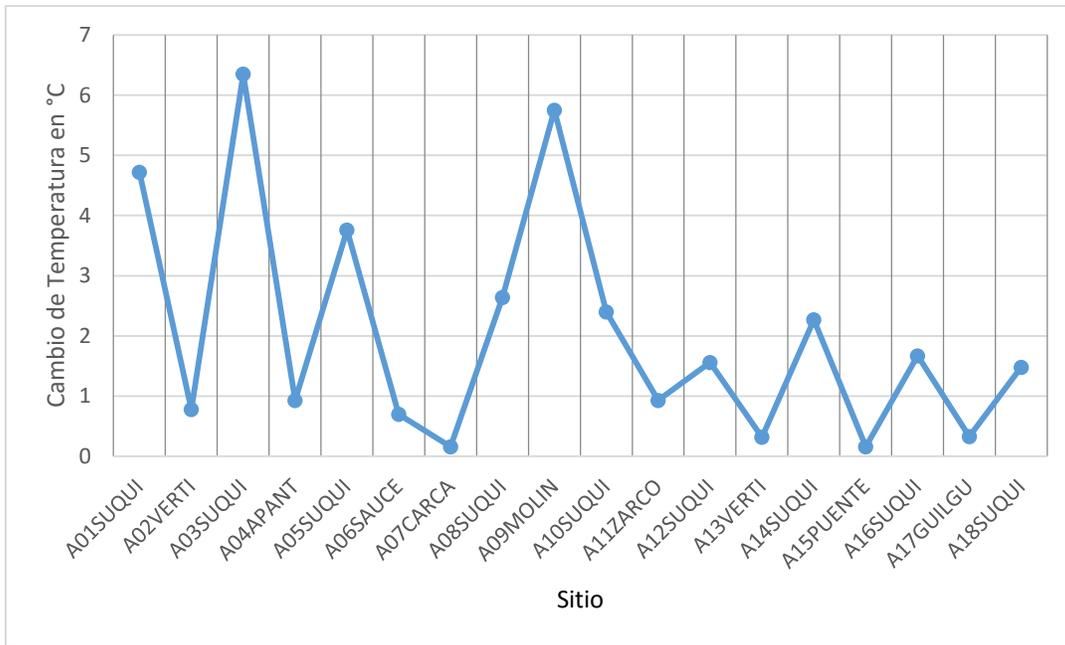


Figura 3.5. Gráfico de valores de Cambio de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

3.1.6. Turbidez.

En la Tabla 3.6 se presentan los valores de turbidez, los cuales fueron determinados haciendo uso del equipo Vernier LabQuest.

Tabla 3.6. Resultados de Turbidez.

Sitio de aforo	Turbidez en <i>NTU</i>	Sitio de aforo	Turbidez en <i>NTU</i>
A01SUQUI	72.1	A10SUQUI	6.6
A02VERTI	0.5	A11ZARCO	3.4
A03SUQUI	15.3	A12SUQUI	4.9
A04APANT	0.8	A13VERTI	1.3
A05SUQUI	6.4	A14SUQUI	6.7
A06SAUCE	2.9	A15PUENTE	5.9
A07CARCA	3.1	A16SUQUI	8.6
A08SUQUI	9.1	A17GUILGU	2.0
A09MOLIN	0.6	A18SUQUI	4.7

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.6 se presenta la gráfica de valores de turbidez obtenidos para los 18 puntos muestreados. En esta gráfica no aparece el límite máximo de turbidez debido a que este sobrepasa el valor máximo obtenido.

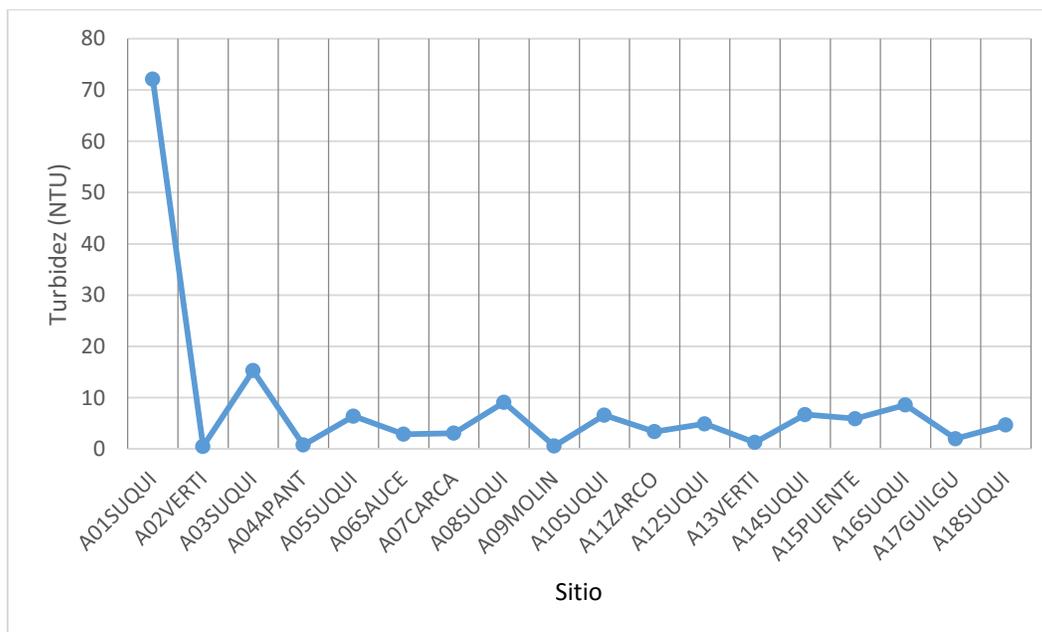


Figura 3.6. Gráfico de valores de Turbidez. Fuente: Elaboración propia.

3.1.7. Sólidos Totales Disueltos.

En la Tabla 3.7 se presentan los valores de Sólidos Totales Disueltos, los cuales fueron determinados haciendo uso del medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129.

Tabla 3.7. Resultados de Sólidos Totales Disueltos.

Sitio de aforo	Sólidos Totales Disueltos en <i>mg/L</i>	Sitio de aforo	Sólidos Totales Disueltos en <i>mg/L</i>
A01SUQUI	380	A10SUQUI	227
A02VERTI	205	A11ZARCO	220
A03SUQUI	330	A12SUQUI	232
A04APANT	232	A13VERTI	107
A05SUQUI	274	A14SUQUI	238
A06SAUCE	203	A15PUENTE	223
A07CARCA	219	A16SUQUI	182
A08SUQUI	264	A17GUILGU	79
A09MOLIN	256	A18SUQUI	238

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.7 se muestra la gráfica de los valores de Sólidos Disueltos Totales obtenidos en los 18 puntos muestreados, junto con los límites superior e inferior.

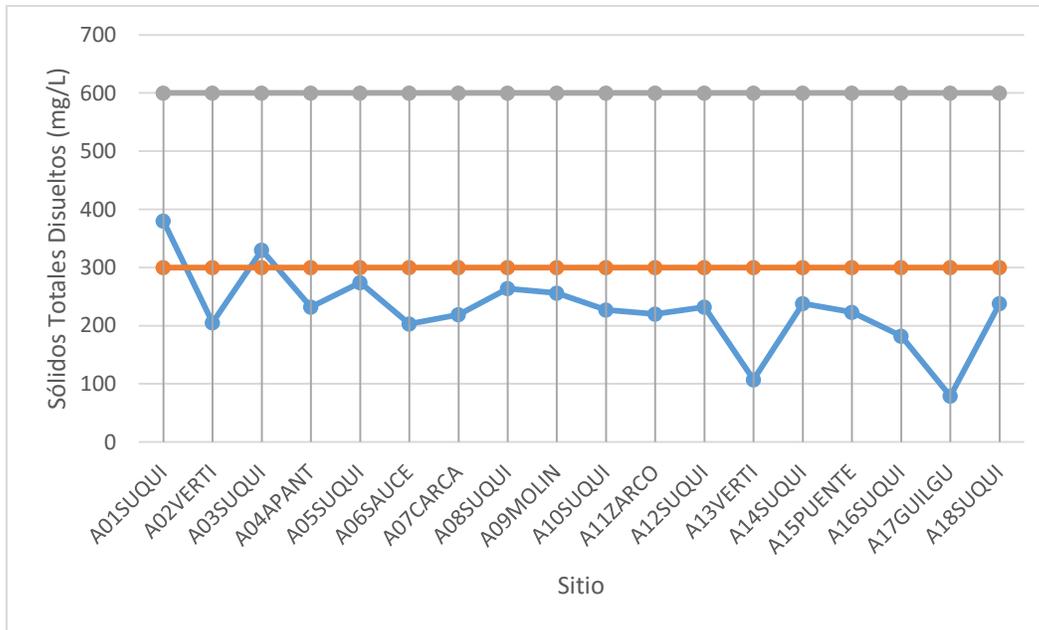


Figura 3.7. Gráfico de valores de Sólidos Totales Disueltos. Fuente: Elaboración propia.

3.1.8. Oxígeno Disuelto.

En la Tabla 3.8 se presentan los valores de Oxígeno Disuelto, los cuales fueron determinados haciendo uso del equipo Vernier LabQuest.

Tabla 3.8. Resultados de Oxígeno Disuelto.

Sitio de aforo	Oxígeno Disuelto en <i>mg/L</i>	Sitio de aforo	Oxígeno Disuelto en <i>mg/L</i>
A01SUQUI	1.4	A10SUQUI	6.5
A02VERTI	5.0	A11ZARCO	3.6
A03SUQUI	3.2	A12SUQUI	5.4
A04APANT	3.8	A13VERTI	4.0
A05SUQUI	5.7	A14SUQUI	5.9
A06SAUCE	6.6	A15PUENTE	5.3
A07CARCA	5.1	A16SUQUI	4.7
A08SUQUI	4.5	A17GUILGU	5.7
A09MOLIN	5.4	A18SUQUI	4.9

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.8 se muestra la gráfica de los valores de Oxígeno Disuelto obtenidos en los 18 puntos muestreados, junto con los límites superior e inferior.

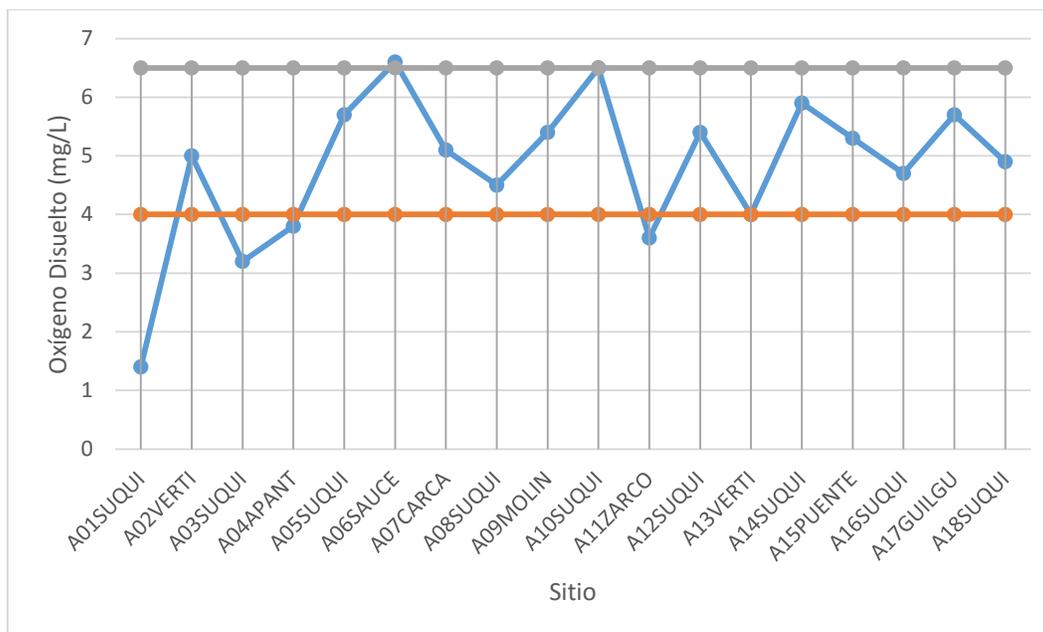


Figura 3.8. Gráfico de valores de Oxígeno Disuelto. Fuente: Elaboración propia.

3.1.9. Coliformes Fecales.

En la Tabla 3.9 se presentan los valores de Coliformes Fecales, los cuales fueron determinados por medio del Método de Membrana Filtrante.

Tabla 3.9. Resultados de Coliformes Fecales.

Sitio de aforo	Coliformes Fecales en <i>NMP/100ml</i>	Sitio de aforo	Coliformes Fecales en <i>NMP/100ml</i>
A01SUQUI	113566.17	A10SUQUI	186192.30
A02VERTI	0.00	A11ZARCO	18619.23
A03SUQUI	1275584.25	A12SUQUI	93478.10
A04APANT	53301.94	A13VERTI	14756.14
A05SUQUI	515327.74	A14SUQUI	193918.49
A06SAUCE	3166.86	A15PUENTE	22482.32
A07CARCA	6257.34	A16SUQUI	108930.46
A08SUQUI	776472.77	A17GUILGU	7029.95
A09MOLIN	124382.83	A18SUQUI	116656.65

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.9 se muestra la gráfica de los valores de concentración de Coliformes Fecales obtenidos en los 18 puntos muestreados. El límite de concentración para Coliformes Fecales es de 1000 NMP/100ml, dicho límite no se muestra en la Figura 3.9 dado que los valores de concentración son mucho mayores a éste.

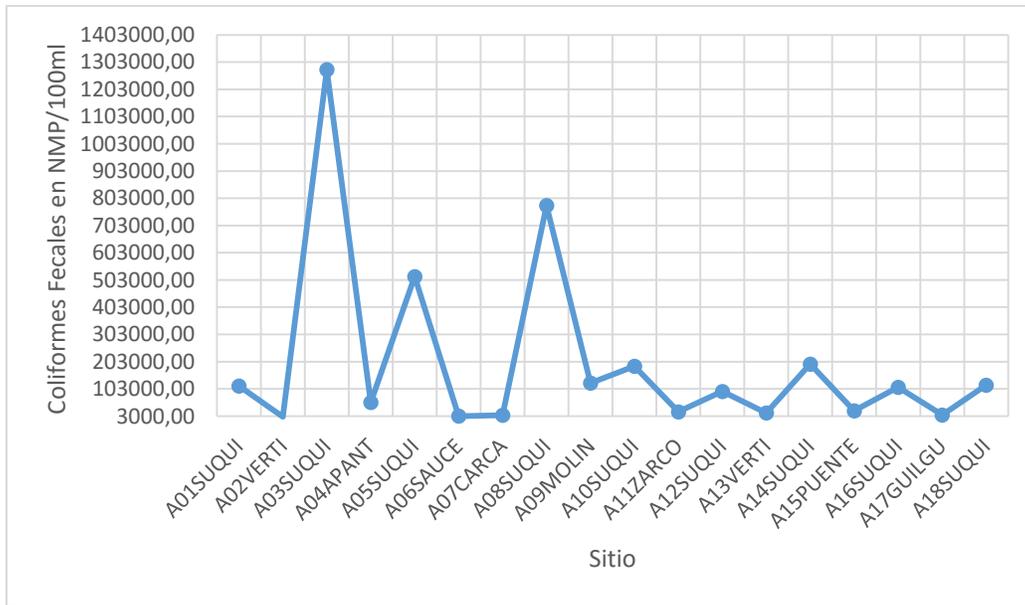


Figura 3.9. Gráfico de valores de concentración de Coliformes Fecales.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Resultados de la calidad del agua.

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados del índice de calidad del agua NSF para los diferentes sitios muestreados los cuales se calcularon a partir de los valores W_i presentados en la Tabla 2.2 y de los valores Q_i obtenidos por medio de las ecuaciones presentadas en la Tabla 2.3.

Tabla 3.10. Resultados de la calidad del agua.

Sitio	W _i Q _i									NSF-WQI	Clasificación
	pH	DBO ₅	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	ΔT	Turbidez	STD	OD	Coliformes fecales		
A01SUQUI	10.2262	11.8312	8.7238	1.4099	8.6171	2.2598	2.6673	1.9795	0.2073	47.92	Mala
A02VERTI	9.7315	10.3426	7.4287	4.8329	7.6855	7.7437	4.9190	11.0261	0.0000	63.71	Media
A03SUQUI	10.0179	3.6199	8.6096	0.8717	6.7586	5.4169	3.3635	5.8470	0.0149	44.52	Mala
A04APANT	9.9303	8.7959	7.3503	4.2974	7.2090	7.6821	4.5964	7.8805	0.2616	58.00	Media
A05SUQUI	9.7867	5.6170	7.9560	1.8672	8.2438	6.6530	4.0783	13.7331	0.0903	58.03	Media
A06SAUCE	10.1888	9.3015	7.5027	5.1652	7.4256	7.2702	4.9424	15.4544	0.4396	67.69	Media
A07CARCA	10.2262	8.0435	7.4338	8.5168	6.0024	7.2326	4.7532	11.7852	0.4002	64.39	Media
A08SUQUI	10.1409	7.4890	7.9276	2.2781	8.0695	6.2311	4.2028	9.7896	0.0567	56.19	Media
A09MOLIN	9.8717	7.9276	8.7534	1.0047	8.7095	7.7231	4.3020	13.0536	0.2005	61.55	Media
A10SUQUI	9.9489	2.2518	7.9322	2.3641	8.6798	6.6202	4.6569	15.6843	0.1703	58.31	Media
A11ZARCO	9.8917	8.7176	7.5249	4.2974	7.0983	7.1768	4.7412	6.6210	0.3324	56.40	Media
A12SUQUI	10.0782	2.7313	7.9634	2.9643	8.4794	6.9074	4.5964	13.4233	0.2215	57.37	Media
A13VERTI	8.1860	4.5539	8.0192	7.2913	8.7656	7.5810	5.8602	8.6219	0.3474	59.23	Media
A14SUQUI	10.0179	3.0144	7.5866	2.4182	8.7919	6.6039	4.5233	14.4746	0.1672	57.60	Media
A15PUENTE	10.1886	7.0519	8.0695	8.5168	7.2638	6.7362	4.7052	13.2906	0.3201	66.14	Media
A16SUQUI	9.9489	5.6540	7.9754	2.8364	7.5832	6.3059	5.1815	10.9911	0.2103	56.69	Media
A17GUILGU	9.3479	8.8156	8.0819	7.2220	7.3722	7.4427	5.9878	14.0242	0.3933	68.69	Media
A18SUQUI	9.5949	3.6915	7.8756	3.0723	6.8159	6.9424	4.5233	11.6086	0.2053	54.33	Media

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.10 se muestra la gráfica de valores del índice de calidad del agua NSF para el Río Suquiapa y sus ríos tributarios. En dicho gráfico se presentan los límites de clasificación de la calidad del agua propuestos por la NSF.

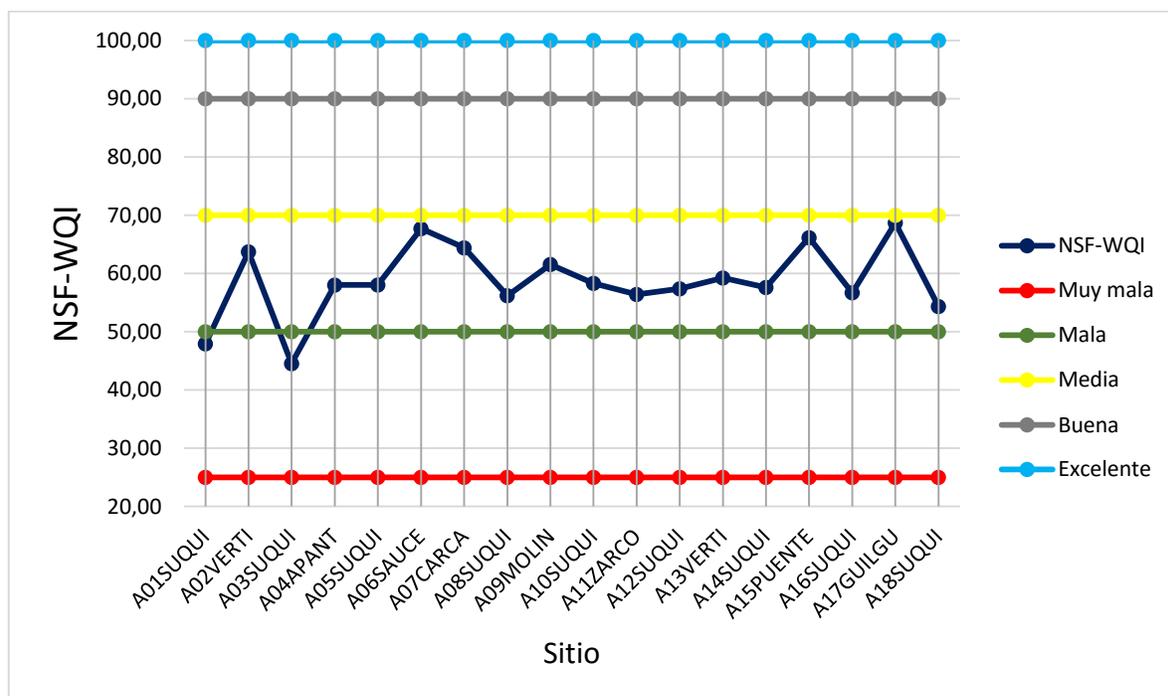


Figura 3.10. Gráfica de valores del WQI-NSF para el Río Suquiapa y sus ríos tributarios. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Resultados del NSF-WQI.

En la Tabla 3.11 se muestra el resultado del índice de calidad del agua NSF para el Río Suquiapa, el cual fue calculado a partir del promedio de los parámetros fisicoquímicos y bióticos para los diferentes puntos muestreados pertenecientes a éste, para posteriormente obtener sus respectivos W_i y Q_i y así calcular el índice de calidad del agua NSF del río principal.

Tabla 3.11. Resultados de la calidad del agua para la parte alta de la subcuenca del Río Suquiapa.

W_iQ_i					
pH	9.9734	PO₄³⁻	2.2313	STD	4.1993
DBO₅	5.1000	ΔT	8.0044	OD	10.8368
NO₃⁻	8.0612	Turbidez	5.9934	Coliformes fecales	0.1493
NSF-WQI	50.35				
Clasificación	Media				
Leyenda					

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Resultados del Cromo Hexavalente.

En la Tabla 3.12 se presentan los valores de Cromo Hexavalente, los cuales fueron determinados en el Instituto del Agua de la Facultad Multidisciplinaria de Occidente de la Universidad de El Salvador.

Tabla 3.12. Resultados de Cromo Hexavalente.

Sitio de aforo	Cr⁺⁶ en mg/L	Sitio de aforo	Cr⁺⁶ en mg/L
A01SUQUI	0.02	A10SUQUI	0.01
A02VERTI	0	A11ZARCO	0
A03SUQUI	0.01	A12SUQUI	0
A04APANT	0.01	A13VERTI	0
A05SUQUI	0.01	A14SUQUI	0.01
A06SAUCE	0	A15PUENTE	0
A07CARCA	0	A16SUQUI	0.01
A08SUQUI	0.02	A17GUILGU	0
A09MOLIN	0.01	A18SUQUI	0.01

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.11 se muestra la gráfica de los valores de Cromo Hexavalente obtenidos para los 18 puntos muestreados. El límite del valor de concentración máxima permisible de Cromo Hexavalente no se muestra en dicha gráfica para una mejor apreciación de los datos de concentración.

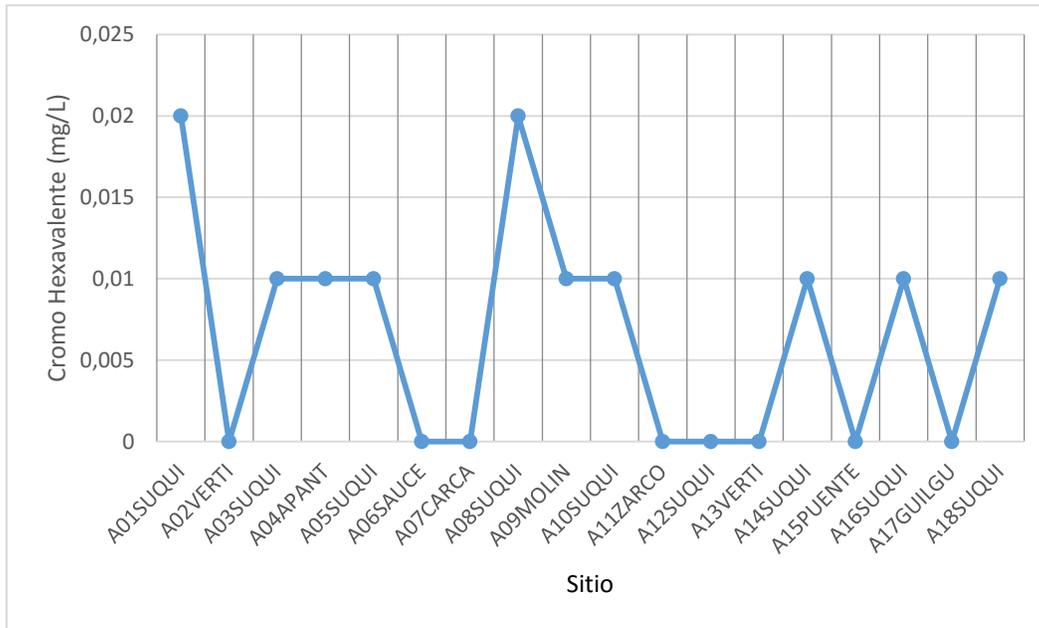


Figura 3.11. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente. Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resultados de la modelación del Cromo Hexavalente utilizando el WASP.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la calibración del *WASP*, a partir de la conductividad eléctrica y finalmente se presentan los resultados de la modelación del Cromo Hexavalente.

3.4.1. Calibración del software.

Es importante la calibración del *WASP*, haciendo uso de los datos de Conductividad Eléctrica, para una buena obtención de resultados.

En la Tabla 3.13 se presentan los valores de Conductividad Eléctrica, los cuales fueron determinados haciendo uso del equipo LabQuest Vernier.

Tabla 3.13. Resultados de conductividad eléctrica.

Sitio de aforo	Conductividad Eléctrica en $\mu S/cm$	Sitio de aforo	Conductividad Eléctrica en $\mu S/cm$
A01SUQUI	765	A10SUQUI	454
A02VERTI	414	A11ZARCO	426
A03SUQUI	666	A12SUQUI	460
A04APANT	363	A13VERTI	202
A05SUQUI	550	A14SUQUI	482
A06SAUCE	407	A15PUENTE	446
A07CARCA	438	A16SUQUI	363
A08SUQUI	530	A17GUILGU	158
A09MOLIN	513	A18SUQUI	475

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.12, se muestra la gráfica de los valores de Conductividad Eléctrica obtenidos para los 18 puntos muestreados, así como el límite superior permisible.

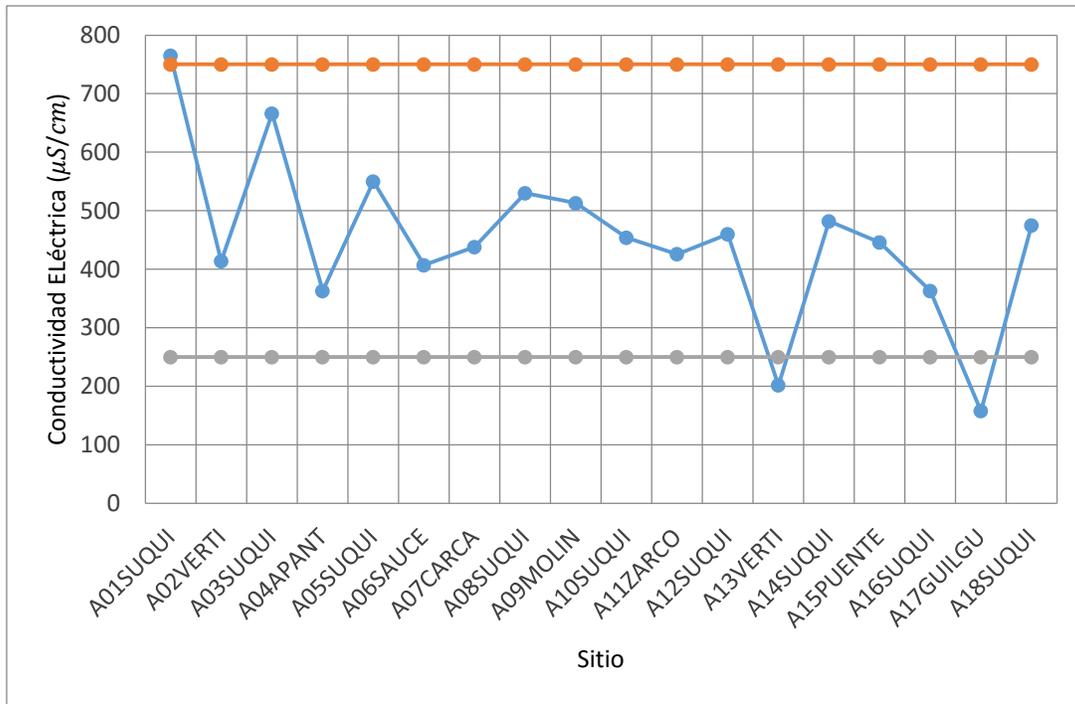


Figura 3.12. Gráfico de valores de conductividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.13, se presenta el gráfico de valores de Conductividad Eléctrica por segmento, obtenido haciendo uso del software WASP.

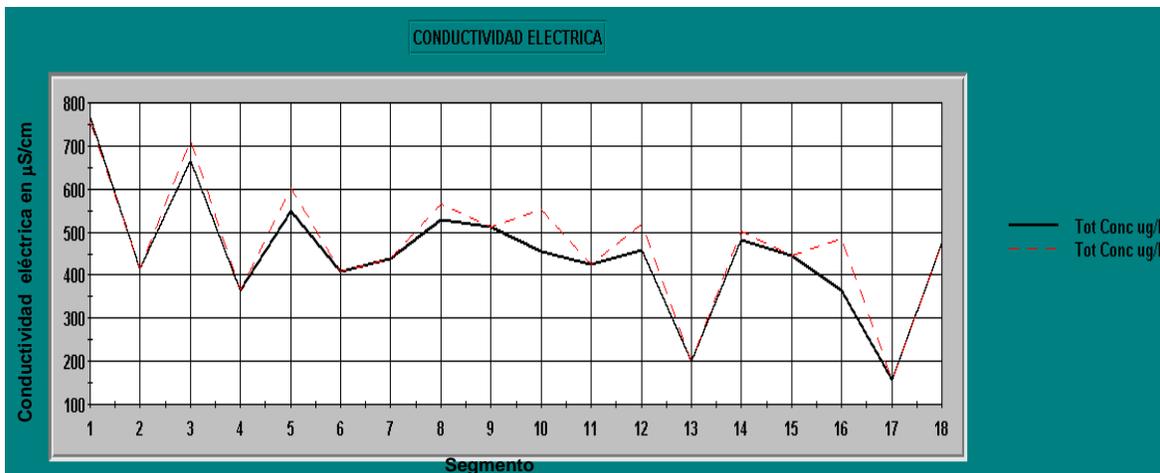


Figura 3.13. Gráfico de Conductividad Eléctrica por segmento en WASP. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.14, se presenta la gráfica de Conductividad Eléctrica versus tiempo, donde se pueden apreciar los nueve puntos de conductividad eléctrica que corresponden exclusivamente al tramo principal en estudio del Río Suquiapa. La utilidad de esta representación es la de calibrar el software y así poder tener una mejor perspectiva de cuál será el comportamiento del metal que será modelado, que para este caso es el Cromo Hexavalente.

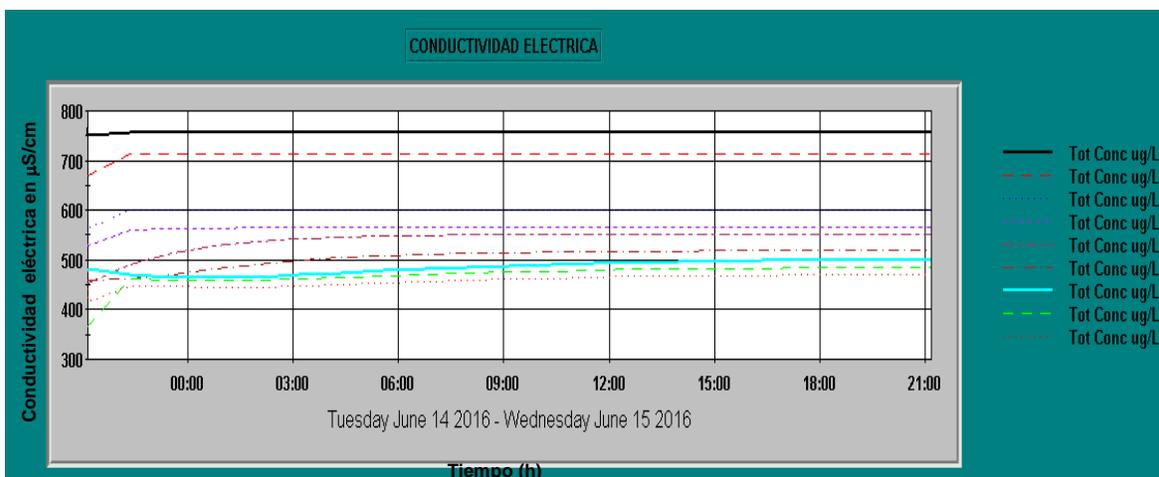


Figura 3.14. Gráfico de Conductividad Eléctrica versus tiempo en WASP.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Modelación del Cromo Hexavalente.

Haciendo una revisión de los resultados para Cromo Hexavalente, se puede observar que se obtuvieron diez puntos con presencia de dicho contaminante. Con los datos de concentración para Cromo Hexavalente mostrados en la Tabla 3.12 y el uso del WASP se obtiene un comportamiento representativo por segmentos de este contaminante en el río en estudio, dicho comportamiento se muestra en la Figura 3.15.

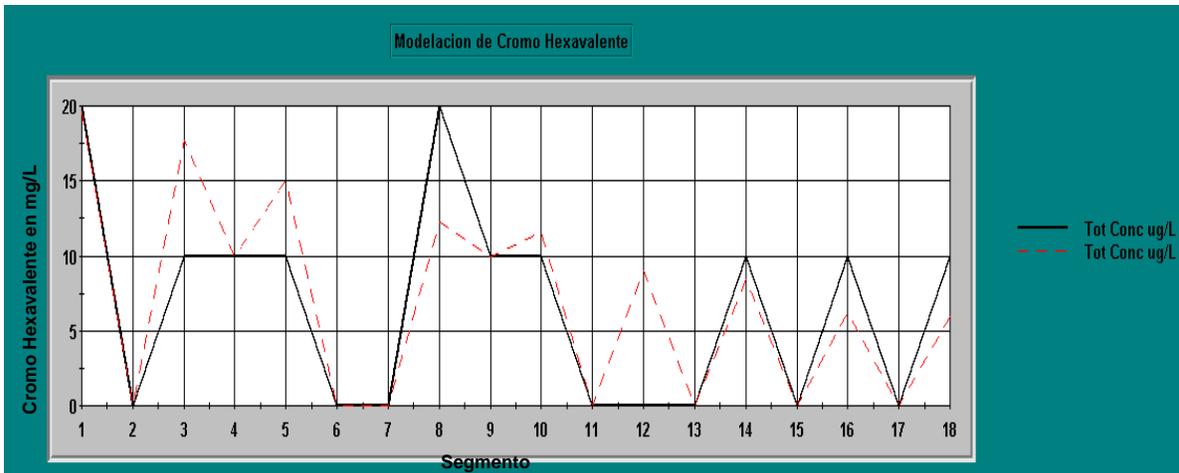


Figura 3.15. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por segmento en WASP. Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma se obtiene la predicción que hace el WASP, respecto al comportamiento del Cromo Hexavalente en el tiempo; tomando un rango de tiempo de 24 horas como parámetro de estudio. A continuación, en la Figura 3.16 se muestra la gráfica de modelación del Cromo Hexavalente versus tiempo.

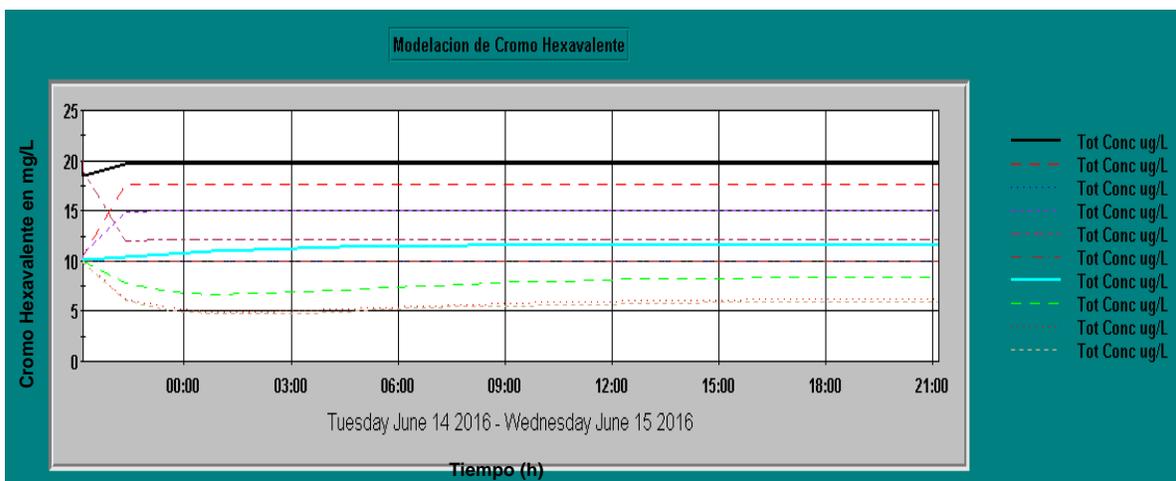


Figura 3.16. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por tiempo en WASP. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4.0. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTAS DE DESCONTAMINACIÓN.

En el Capítulo cuatro se analizan los resultados obtenidos a partir de los 18 puntos muestreados. Se inicia con el análisis de los parámetros necesarios para determinar el índice de calidad del agua propuesto por la Fundación de Sanidad Nacional de los EE.UU, entre estos parámetros se tienen el Potencial de Hidrógeno, la Demanda Bioquímica de Oxígeno, los Nitratos, los Fosfatos, el Cambio de Temperatura, la Turbidez, los Sólidos Disueltos Totales, el Oxígeno Disuelto y los Coliformes Fecales. Posteriormente, se analizan los resultados de la calidad del agua de cada punto de la región en estudio del Río Suquiapa y sus tributarios. Se presenta el análisis de aptitud de uso de cada uno de los puntos muestreados utilizando los parámetros determinados para el cálculo del índice, estos parámetros fueron comparados con los límites establecidos en el Decreto 51 y parámetros adicionales establecidos de acuerdo al MARN en un estudio realizado en el año 2013. Seguidamente, se examinan los resultados de concentración de Cromo Hexavalente en la zona de interés. Luego, se analizan los resultados de la modelación del Cromo Hexavalente, para por último, presentar las propuestas de descontaminación del río en estudio.

4.1. Análisis de parámetros del NSF-WQI.

A continuación se presentan los análisis de los resultados de los diferentes parámetros determinados en el tramo en estudio del Río Suquiapa.

4.1.1. Potencial de Hidrógeno.

Según el Decreto 51 del Reglamento sobre la Calidad del Agua, el Control de Vertidos y las Zonas de Protección, la norma para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento, especifica que el

valor de pH debe encontrarse entre los valores de 6.5 y 9.2, por lo que puede observarse, según la Figura 3.1, que todos los valores están dentro de los límites especificados.

4.1.2. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Según el Decreto 51 del Reglamento sobre la Calidad del Agua, el Control de Vertidos y las Zonas de Protección, la norma para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento, especifica que el valor de DBO_5 debe encontrarse entre 3.0 y 4.0 mg/L, por lo que puede observarse, según la Figura 3.2, que de los 18 puntos muestreados, 17 puntos quedan fuera de los límites especificados por la norma y el punto A15PUENTE queda justo sobre el límite superior permisible de DBO_5 . Como puede observarse en la Tabla 3.2, el punto A01SUQUI es el que posee el máximo valor de DBO_5 con 49 mg/L, para tener una mejor apreciación del gráfico este punto no se incluyó porque su valor es muy alto comparado con los demás valores. En general puede observarse que los puntos que poseen mayor valor de DBO_5 , son los pertenecientes al Río Principal, lo cual indica una alta contaminación con materia orgánica en este, debido a que esta se encarga de consumir el Oxígeno Disuelto para su degradación.

4.1.3. Nitratos.

El valor de la concentración de Nitratos debe ser menor de 45 mg/L según los rangos para parámetros de calidad de agua deseables para agua cruda para potabilizar adicionales a la normativa vigente con métodos convencionales de tratamiento de acuerdo al MARN. La Figura 3.3 no muestra el límite máximo permisible de Nitratos dado que los valores de concentración de todos los puntos muestreados son inferiores a este. Se pueden encontrar concentraciones de Nitratos en las aguas superficiales de los ríos de manera natural o de manera antropogénica, según Arauzo, Gutiérrez, Martínez y Valladolid (2006), debido a las

fertilizaciones excesivas con nitrógeno y prácticas de riego poco optimizadas en las zonas agrícolas, además, pueden ser debidas a vertidos de aguas residuales y excrementos animales en zonas de ganadería intensiva. La zona de Santa Ana donde se realizaron los muestreos es una zona ganadera.

4.1.4. Fosfatos.

En la Figura 3.4 se muestra el gráfico de valores de concentración de Fosfatos. Según la Norma Salvadoreña 13.49.01:09, para aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor, el límite aceptable de concentración de Fósforo total es de 15 mg/L. Según Ronzano y Dapena (1995), del 5 al 15% del total de Fósforo en las aguas residuales sedimenta, por lo que aproximadamente el 90% del total de Fósforo se encuentra como Fosfatos en suspensión, por lo que se tomó como concentración límite el valor de 13.5 mg/L. Como puede observarse en la Figura 3.4, todos los puntos muestreados poseen concentraciones de Fosfatos dentro de lo establecido por la norma consultada. El punto A03SUQUI es el que posee el mayor valor de concentración de Fosfatos. Según Lida y Shock (2009), el Fósforo que se encuentra en las aguas superficiales de los ríos puede provenir de las aguas residuales de un sistema municipal, de los sistemas sépticos residenciales, de sitios industriales, del estiércol, de la erosión de tierras cultivadas, de las aguas de escorrentía procedentes de tierras agrícolas y de las actividades de animales que pastan cerca de los ríos.

4.1.5. Cambio de Temperatura.

Según la Norma Salvadoreña 13.49.01:09, para aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor, el rango de temperaturas aceptadas va de 20 a 35°C. La Figura 3.5 muestra las temperaturas de los puntos muestreados, como puede observarse en dicha figura, todos los puntos muestreados están dentro del rango de temperaturas definido por la norma. Según Rocha (2011), la temperatura es un parámetro de suma importancia, cuando la temperatura aumenta provoca la

disminución de la concentración de Oxígeno Disuelto, lo que puede causar la muerte de muchos peces. La Figura 4.1 muestra el cambio de temperatura, entre la temperatura ambiente y la temperatura de la muestra, en los 18 puntos muestreados. Como puede observarse el punto A07CARCA es el que posee un mayor valor de cambio de temperatura, siendo este de 7°C. El punto A14SUQUI es el punto que posee un menor valor de cambio de temperatura. Se debe tomar en cuenta que los 18 puntos, fueron muestreados a diferentes horas del día.

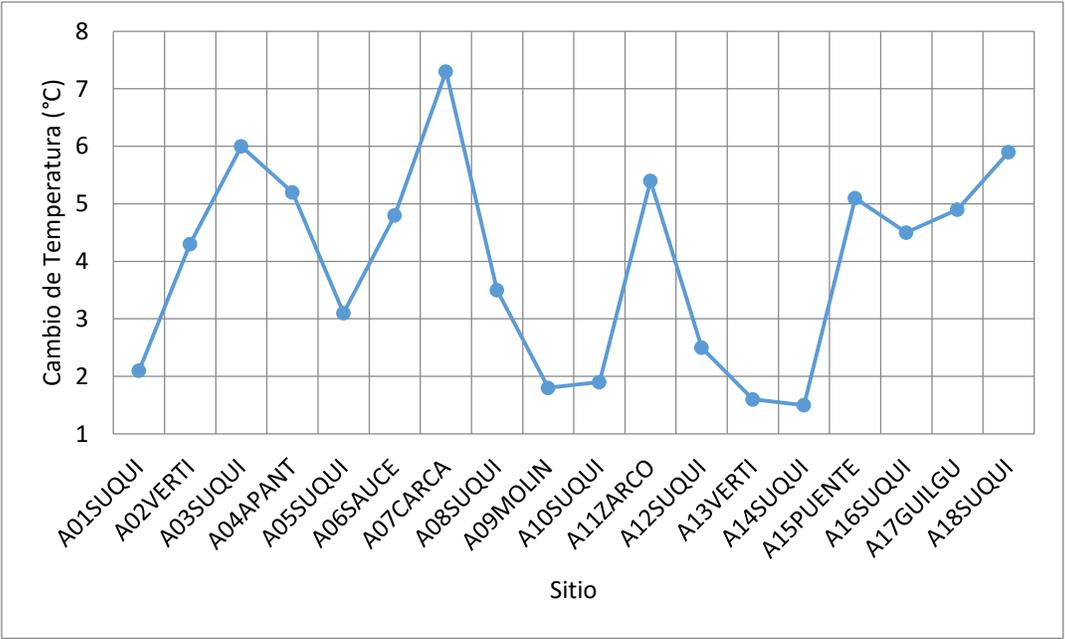


Figura 4.1. Gráfico de valores de Cambio de Temperatura. Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Turbidez.

De acuerdo al decreto No. 51 del Reglamento sobre la Calidad del Agua, el Control de Vertidos y las Zonas de Protección, la norma para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento, especifica que el valor de la Turbidez debe ser menor a 250 NTU, por lo que puede observarse, según la Figura 3.6 el valor más elevado es de 72.1 NTU para

el punto A01SUQUI, por lo tanto todos los puntos correspondientes al Río Suquiapa y sus tributarios están por debajo de este valor.

4.1.7. Sólidos Totales Disueltos.

El valor de Sólidos Totales Disueltos debe estar entre 300 y 600 mg/L según los rangos para parámetros de calidad de agua deseables para agua cruda para potabilizar adicionales a la normativa vigente con métodos convencionales de tratamiento de acuerdo al MARN. En la Figura 3.7 se puede observar que los puntos A01SUQUI Y A03SUQUI están arriba del límite inferior con valores de 380 y 330 mg/L respectivamente, mientras los demás puntos correspondientes al Río Suquiapa y sus tributarios se encuentran por debajo del límite inferior de 300 mg/L.

4.1.8. Oxígeno Disuelto.

Según la Normativa de Agua Cruda para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, Decreto No. 51, el rango para Oxígeno Disuelto es de 4.0 a 6.0 mg/L. En La Figura 3.8 se puede apreciar que existen cuatro puntos que no se encuentran dentro del rango establecido estos son: A01SUQUI, A03SUQUI, A04APANT y A11ZARCO, es decir son valores que se encuentran por debajo de 4.0 mg/L. Además existen dos puntos A06SAUCE y A10SUQUI que sobrepasan el límite superior de 6.0 mg/L. Según Rocha (2011), el Oxígeno Disuelto disminuye con el aumento de la temperatura.

4.1.9. Coliformes Fecales.

Según la Normativa de Agua Cruda para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, Decreto No. 51, el valor límite para Coliformes Fecales es de 1000 NMP/100 ml. En la Figura 3.9 se puede observar que todos los puntos en estudio del Río Suquiapa y sus tributarios se encuentran arriba de este valor, a excepción

del punto A02VERTI en el cual no se encontraron coliformes fecales. Los puntos con valores más elevados son: A03SUQUI con 1,275,584.25 NMP/100ml, A05SUQUI con 515,327.74 NMP/100ml, A08SUQUI con 776,472.77 NMP/100ml, A10SUQUI con 186,192.30 NMP/100ml y A14SUQUI con 193,918.49 NMP/100ml. Según Ramos, Saavedra, Vidal y Vilaridy (2008), la presencia de bacterias coliformes es un indicio de que el agua puede estar contaminada con aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición y generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo, lo que explicaría el porqué de los valores tan elevados en los resultados obtenidos.

4.2. Análisis de los resultados de la calidad del agua.

En la Figura 3.10 se muestran los resultados de la calidad del agua en los 18 puntos muestreados, de los cuales, los puntos A01SUQUI y A03SUQUI poseen una clasificación de calidad mala y los puntos restantes poseen una clasificación de calidad media.

4.2.1. Análisis de aptitud de uso de los ríos tributarios.

A continuación se presenta el análisis de la aptitud de uso de cada uno de los ríos tributarios del Río Suquiapa. Se analiza la aptitud de uso del agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento así como la aptitud de uso del agua para poder ser utilizada en actividades recreativas.

4.2.1.1 Análisis de aptitud de uso del punto A02VERTI.

En la Tabla 4.1 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A02VERTI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el valor de DBO₅ y Turbidez, se encuentran fuera de los

rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.1. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A02VERTI, de acuerdo al decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	0.57
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	0.00
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.0
pH	6.5 a 9.2	7.10
Turbidez (NTU)	10 a 250	0.50

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.2 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A02VERTI y los rangos de valores según la Norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y Turbidez se encuentran en los rangos especificados por la norma. El valor de OD está abajo del límite permisible. Sin embargo si se mejorará el nivel de oxígeno en este tributario a través de un método con económico como cascadas artificiales o molino de agua se podría utilizar para actividades recreativas.

Tabla 4.2. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A02VERTI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	0.00
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.0
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	0.50

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2 Análisis de aptitud de uso del punto A04APANT.

En la Tabla 4.3 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A04APANT con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el único parámetro que se encuentran en el rango especificados por la norma es el pH, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.3. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A04APANT, de acuerdo al decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	2.02
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	53,301.94
OD (mg/L)	4 a 6.5	3.8
pH	6.5 a 9.2	7.94
Turbidez (NTU)	10 a 250	0.80

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.4 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A04APANT y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el único parámetro que se encuentran en los rangos especificados por la norma es la Turbidez, por lo tanto el agua del punto A04APANT no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.4. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A04APANT, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	53,301.94
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	3.8
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	0.80

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.3 Análisis de aptitud de uso del punto A06SAUCE.

En la Tabla 4.5 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A06SAUCE con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.5. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A06SAUCE, de acuerdo al decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	1.52
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	3,166.86
OD (mg/L)	4 a 6.5	6.6
pH	6.5 a 9.2	7.34
Turbidez (NTU)	10 a 250	2.9

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.6 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A06SAUCE y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, los parámetros que se encuentran fuera del rango especificado por la norma son los Coliformes Fecales y OD. Sin embargo se podrían mejorar ambos parámetros utilizando fitorremediación con zacate vetiver, pues mejora el OD en un 800% y los Coliformes fecales los reduce en un 44%, según Vertivercol (2008) y ser utilizado este tributario para actividades recreativas.

Tabla 4.6. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A06SAUCE, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	3,166.86
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	6.6
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	2.9

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.4 Análisis de aptitud de uso del punto A07CARCA.

En la Tabla 4.7 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A07CARCA con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificado por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.7. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A07CARCA, de acuerdo al decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	2.82
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	6,257.34
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.1
pH	6.5 a 9.2	7.43
Turbidez (NTU)	10 a 250	3.1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.8 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A07CARCA y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el único parámetro que se encuentran en el rango especificado por la norma es la Turbidez, por lo tanto el agua del punto A07CARCA no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.8. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A07CARCA, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	6,257.34
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.1
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	3.1

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.5 Análisis de aptitud de uso del punto A09MOLIN.

En la Tabla 4.9 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A09MOLIN con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede

observar en dicha tabla, los parámetros que se encuentran en el rango especificado por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.9. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A09MOLIN, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	2,95
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	124,382.83
OD (mg/L)	4 a 6.5	5,4
pH	6.5 a 9.2	7,79
Turbidez (NTU)	10 a 250	0,6

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.10 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A09MOLIN y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el único parámetro que se encuentran en el rango especificado por la norma es la Turbidez, por lo tanto el agua del punto A09MOLIN no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.10. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A09MOLIN, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	124,382.83
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.4
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	0.6

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.6 Análisis de aptitud de uso del punto A11ZARCO.

En la Tabla 4.11 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A11ZARCO con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el valor de DBO₅, el valor de Coliformes Fecales, el valor de OD y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, el único valor que se encuentran dentro de la norma es el correspondiente al pH, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.11. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A11ZARCO, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	2.10
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	18,619.23
OD (mg/L)	4 a 6.5	3.6
pH	6.5 a 9.2	7.82
Turbidez (NTU)	10 a 250	3.4

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.12 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A11ZARCO y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, el único valor que se encuentra dentro del rango propuesto por la norma consultada, es el de Turbidez, por lo que el agua del punto A11ZARCO no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.12. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A11ZARCO, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	18,619.23
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	3.6
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	3.4

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.7 Análisis de aptitud de uso del punto A13VERTI.

En la Tabla 4.13 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A13VERTI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el valor de DBO₅, el valor de Coliformes Fecales y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, los únicos valores que se encuentran dentro de la norma son los correspondiente al OD y al pH, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.13. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A13VERTI, según el Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	8.00
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	14,756.14
OD (mg/L)	4 a 6.5	4.0
pH	6.5 a 9.2	6.52
Turbidez (NTU)	10 a 250	1.3

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.14 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A13VERTI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, el único valor que se encuentra dentro del rango propuesto por la norma consultada, es el de Turbidez, por lo que el agua del punto A13VERTI no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.14. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A13VERTI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	14,756.14
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	4.0
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	1.3

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.8 Análisis de aptitud de uso del punto A15PUENTE.

En la Tabla 4.15 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A15PUENTE con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, los valores que se encuentran dentro de la norma son los correspondiente al DBO₅, al OD y al pH, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.15. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A15PUENTE, según el Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	4.00
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	22,482.32
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.3
pH	6.5 a 9.2	7.57
Turbidez (NTU)	10 a 250	5.9

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.16 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A15PUENTE y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, el único valor que se encuentra dentro del rango propuesto por la norma consultada, es el de Turbidez, por lo que el agua del punto A15PUENTE no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.16. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A15PUENTE, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	22,482.32
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.3
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	5.9

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.9 Análisis de aptitud de uso del punto A17GUILGU.

En la Tabla 4.17 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A17GUILGU con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el valor de DBO₅, el valor de Coliformes Fecales y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, los valores que se encuentran dentro de la norma son los correspondiente al OD y al pH, por lo que el agua de este río tributario no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.17. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A17GUILGU, según el Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	2.00
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	7,026.95
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.7
pH	6.5 a 9.2	8.00
Turbidez (NTU)	10 a 250	2.0

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.18 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A17GUILGU y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, el único valor que se encuentra dentro del rango propuesto por la norma consultada, es el de Turbidez. Sin embargo se podrían mejorar ambos parámetros utilizando fitorremediación con zacate vetiver, pues mejora el OD en un 800% y los Coliformes fecales los reduce en un 44%, según Vertivercol (2008) y ser utilizado este tributario para actividades recreativas.

Tabla 4.18. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A17GUILGU, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	7,026.95
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.7
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	2.0

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Análisis de aptitud de uso de los puntos pertenecientes al Río Suquiapa.

A continuación se presenta el análisis de la aptitud de uso de los puntos pertenecientes al tramo en estudio del Río Suquiapa. Se evalúa la aptitud de uso del agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento así como la aptitud de uso del agua para ser utilizada en actividades recreativas.

4.2.2.1. Análisis de aptitud de uso del punto A01SUQUI.

En la Tabla 4.19 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A01SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el único parámetro que se encuentran en el rango especificados por la norma es el pH, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.19. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A01SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	49
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	113,566.17
OD (mg/L)	4 a 6.5	1,4
pH	6.5 a 9.2	7.40
Turbidez (NTU)	10 a 250	72.1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.20 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A01SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales, el valor de OD y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.20. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A01SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	113,566.17
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	1.4
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	72.1

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2. Análisis de aptitud de uso del punto A03SUQUI.

En la Tabla 4.21 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A03SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y la Turbidez, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.21. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A03SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	10.19
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	1,275,584.25
OD (mg/L)	4 a 6.5	3.2
pH	6.5 a 9.2	7.60
Turbidez (NTU)	10 a 250	15.3

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.22 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A03SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales, el valor de OD y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.22. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A03SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	1,275,584.25
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	3.2
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	15.3

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3. Análisis de aptitud de uso del punto A05SUQUI.

En la Tabla 4.23 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A05SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetro que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.23. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A05SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	6.06
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	515,327.74
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.7
pH	6.5 a 9.2	7.83
Turbidez (NTU)	10 a 250	6.4

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.24 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A05SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.24. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A05SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	515,327.74
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.7
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	6.4

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.4. Análisis de aptitud de uso del punto A08SUQUI.

En la Tabla 4.25 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A08SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.25. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A08SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	3,46
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	776,472.77
OD (mg/L)	4 a 6.5	4,5
pH	6.5 a 9.2	7,62
Turbidez (NTU)	10 a 250	9,1

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.26 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A08SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.26. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A08SUQUI, según la Norma OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	776,472.77
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	4.5
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	9.1

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.5. Análisis de aptitud de uso del punto A10SUQUI.

En la Tabla 4.27 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A10SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se

puede observar en dicha tabla, los parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.27. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A10SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	15
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	186,192.30
OD (mg/L)	4 a 6.5	6.5
pH	6.5 a 9.2	7.75
Turbidez (NTU)	10 a 250	6.6

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.28 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A10SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.28. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A10SUQUI según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	186,192.30
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	6.5
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	6.6

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.6. Análisis de aptitud de uso del punto A12SUQUI.

En la Tabla 4.29 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A12SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.29. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A12SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	13
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	93,478.10
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.4
pH	6.5 a 9.2	7.67
Turbidez (NTU)	10 a 250	4.9

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.30 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A12SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.30. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A12SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	93,478.10
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.4
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	4.9

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.7. Análisis de aptitud de uso del punto A14SUQUI.

En la Tabla 4.31 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A14SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.31. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A14SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	12
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	193,918.49
OD (mg/L)	4 a 6.5	5.9
pH	6.5 a 9.2	7.71
Turbidez (NTU)	10 a 250	6.7

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.32 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A14SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.32. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A14SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	193,918.49
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	5.9
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	6.7

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.8. Análisis de aptitud de uso del punto A16SUQUI.

En la Tabla 4.33 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A16SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.33. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A16SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	6
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	108,930.46
OD (mg/L)	4 a 6.5	4.7
pH	6.5 a 9.2	7.75
Turbidez (NTU)	10 a 250	8.6

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.34 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A16SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.34. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A16SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	108,930.46
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	4.7
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	8.6

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.9. Análisis de aptitud de uso del punto A18SUQUI.

En la Tabla 4.35 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el punto A18SUQUI con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se

puede observar en dicha tabla, los únicos parámetros que se encuentran en el rango especificados por la norma son el pH y el OD, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.35. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A18SUQUI, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	10
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	116,656.65
OD (mg/L)	4 a 6.5	4.9
pH	6.5 a 9.2	7.91
Turbidez (NTU)	10 a 250	4.7

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.36 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el punto A18SUQUI y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas, como puede observarse en dicha tabla, el valor de Coliformes Fecales y el valor de OD, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua de este punto no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.36. Comparativa de los valores obtenidos para el punto A18SUQUI, según la Norma de la OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	116,656.65
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	4.9
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	4.7

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Análisis de aptitud de uso del Río Suquiapa.

En la Tabla 4.37 se muestra una comparativa de los valores obtenidos para el Río Suquiapa con los rangos de valores según el Decreto 51 sobre Normativa de Agua para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento, como se puede observar en dicha tabla, el valor de DBO₅ y el valor de Coliformes Fecales se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, los valores que se encuentran dentro de la norma son los correspondiente al OD, pH y Turbidez, por lo que el agua del Río Suquiapa no puede utilizarse para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento.

Tabla 4.37. Comparativa de los valores obtenidos para el Río Suquiapa, de acuerdo al Decreto 51.

Parámetro	Rango de valores	Valor promedio obtenido
DBO ₅ (mg/L)	3 a 4	13.85
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000	375,569.66
OD (mg/L)	4 a 6.5	4.7
pH	6.5 a 9.2	7.69
Turbidez (NTU)	10 a 250	14.9

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.38 se muestra una comparativa entre los valores obtenidos para el Río Suquiapa y los rangos de valores según la Norma OMS para actividades recreativas. El valor de Coliformes Fecales, el valor de OD y el valor de Turbidez, se encuentran fuera de los rangos especificados por la norma, por lo que el agua del Río Suquiapa no puede ser utilizada para actividades recreativas.

Tabla 4.38. Comparativa de los valores obtenidos para el Río Suquiapa, según la Norma OMS.

Parámetro	Rango de valores	Valor promedio obtenido
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	Menor o igual a 1000 NMP/100ml	375569.66
OD (mg/L)	Mayor o igual a 7 mg/L	4.7
Turbidez (NTU)	Menor o igual a 10 NTU	14.9

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.39 se muestra una comparativa con los valores obtenidos en los 18 sitios muestreados y los límites establecidos para cada parámetro de acuerdo al Decreto 51, para agua cruda para potabilizar por métodos convencionales y los límites establecidos por OMS para actividades recreativas. Además se refleja si un sitio es apto o no para determinada aptitud de uso.

Tabla 4.39. Resumen de las aptitudes de uso evaluadas para en el Río Suquiapa y sus tributarios.

Parámetros evaluados	pH Unidades de pH	DBO5 mg/L	Oxígeno Disuelto mg/L	Turbidez UNT	Coliformes Fecales NMP/100ml	Nitratos mg/L	Sólidos Disueltos Totales mg/L	Aptitud de uso	
Agua cruda para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento	6.5-9.2	3.0- 4.0	4.0-6.5	10-250	1000	<45.0	300.00-600.00	POTABILIZAR POR METODOS CONVENCIONALES	ACTIVIDADES RECREATIVAS
Agua para actividades recreativas			>7.00	<10.00	<1000				
A01SUQUI	7.40	49.00	1.40	72.10	113566.17	2.01	380.00	No apto	No apto
A02VERTI	7.10	0.57	5.00	0.50	0.00	4.39	205.00	No apto	No apto
A03SUQUI	7.71	10.19	3.20	15.30	1275584.25	2.20	330.00	No apto	No apto
A04APANT	7.76	2.02	3.80	0.80	53301.94	4.55	232.00	No apto	No apto
A05SUQUI	7.83	6.06	5.70	6.40	515327.74	3.35	274.00	No apto	No apto
A06SAUCE	7.34	1.52	6.60	2.90	3166.86	4.24	203.00	No apto	No apto
A07CARCA	7.40	2.82	5.10	3.10	6257.34	4.38	219.00	No apto	No apto
A08SUQUI	7.62	3.46	4.50	9.10	776472.77	3.40	264.00	No apto	No apto
A09MOLIN	7.79	2.95	5.40	0.60	124382.83	1.96	256.00	No apto	No apto
A10SUQUI	7.75	15.00	6.50	6.60	186192.30	3.39	227.00	No apto	No apto
A11ZARCO	7.78	2.10	3.60	3.40	18619.23	4.19	220.00	No apto	No apto
A12SUQUI	7.67	13.00	5.40	4.90	93478.10	3.34	232.00	No apto	No apto
A13VERTI	6.52	8.00	4.00	1.30	14756.14	3.23	107.00	No apto	No apto
A14SUQUI	7.71	12.00	5.90	6.70	193918.49	4.07	238.00	No apto	No apto
A15PUENTE	7.57	4.00	5.30	5.90	22482.32	3.14	223.00	No apto	No apto
A16SUQUI	7.75	6.00	4.70	8.60	108930.46	3.31	182.00	No apto	No apto
A17GUILGU	8.00	2.00	5.70	2.00	7029.95	3.12	79.00	No apto	No apto
A18SUQUI	7.91	10.00	4.90	4.70	116656.65	3.50	238.00	No apto	No apto

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis de los resultados del Cromo Hexavalente.

A continuación se presenta el análisis de los resultados del Cromo Hexavalente, así como el análisis de su respectiva modelación.

4.3.1. Análisis de Cromo Hexavalente.

Según la norma mexicana NMX-AA-044-SCFI-2014, el Cromo Hexavalente en este estado es tóxico para los humanos, los animales y la vida acuática, ya que puede producir cáncer de pulmón cuando se inhala y fácilmente produce sensibilización en la piel. De acuerdo a la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) 13.49.01:09, el límite permisible máximo en aguas superficiales residuales es de 0.1 mg/L para este contaminante.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, se observan diez puntos que cuentan con la presencia de Cromo Hexavalente, no obstante, se puede apreciar que los puntos que cuentan con mayor concentración de Cromo Hexavalente son el A01SUQUI Y A08SUQUI, siendo esta de 0.02 mg/L, representando un valor bajo respecto al permisible por la norma, por lo que se puede considerar que hay una contaminación por este metal en una baja proporción; sin embargo, no se debe descuidar el control de contaminación para este parámetro, pues podría verse un incremento de esta concentración en el tiempo. En la Figura 3.11 se muestran los resultados de Cromo Hexavalente en los diferentes puntos muestreados.

4.3.2. Análisis de la modelación de Cromo Hexavalente en el Río Suquiapa.

En este apartado se lleva a cabo el análisis de los resultados presentados en el capítulo tres sobre la modelación con WASP, donde se han tomado en cuenta los aspectos de concentraciones del Cromo Hexavalente, el segmento o el punto del tramo en estudio del río y la variable tiempo, para poder así, estimar el comportamiento que tendrá el contaminante durante un lapso de tiempo de 24 h. Antes de realizar

el análisis para el Cromo Hexavalente, en la Figura 3.13 se presentan los resultados de la calibración utilizando la Conductividad Eléctrica.

Con la calibración del WASP se obtienen dos curvas, siendo la curva color negro el comportamiento de la Conductividad Eléctrica en el río, mientras que la curva roja punteada, representa el comportamiento de los valores estimados de la Conductividad Eléctrica, según el software WASP, transcurridas 24 h, de lo cual se obtiene que los puntos con mayor variación entre el resultado real y el estimado, son los puntos: A05SUQUI con una diferencia de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, A10 SUQUI con una diferencia de 96 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y A16SUQUI con una diferencia de 137 $\mu\text{S}/\text{cm}$, todas estas diferencias son aproximadas y están hechas en comparación del dato real obtenido en campo con el estimado, utilizando el software. Los puntos: A03SUQUI, A08SUQUI y A12SUQUI, presentan leves variaciones, con diferencias de 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 45 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, dichas variaciones están hechas por diferencia del valor real y el estimado. Finalmente, el punto A14SUQUI posee una diferencia de 18 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En la Figura 3.14 se presentan los resultados de Conductividad Eléctrica, para la generación de dicha gráfica se ha tomado el recorrido principal del río en estudio, tomándose específicamente los puntos SUQUI. Se presenta la leyenda de los puntos en estudio al lado derecho de la gráfica, que como ya se había mencionado, únicamente se toman en cuenta los puntos SUQUI, pues el comportamiento real se toma de los mismos, dando por ende una mejor predicción. El punto de partida de la modelación es el 14 de Junio de 2016 a las 21:10, finalizando el 15 de Junio de 2016 a las 21:10 y se puede apreciar que hay pequeñas variaciones en cada uno de los puntos, notándose de mejor manera en la gráfica por segmentos mostrada con anterioridad en la Figura 3.13. La utilidad de la modelación de la Conductividad Eléctrica radica en que de esta manera se tiene una mejor perspectiva de cuál será el comportamiento del río en el tiempo, por lo que con ello se logra la calibración del software. Habiendo realizado el análisis para la calibración del software

se prosigue con el análisis del metal pesado en estudio, para ello se analiza la gráfica presentada en la Figura 3.15.

De igual manera que para el gráfico por segmentos de Conductividad Eléctrica, se tiene que la línea negra presenta los valores reales obtenidos al inicio de las 24 h con las que trabaja el software y la línea punteada roja presenta los valores estimados según el software transcurridas las 24 h. Se observa en la Figura 3.15 que para el punto A03SUQUI se obtuvo una concentración de 0.01 mg/L referente al valor real y se espera que alcance un valor de aproximadamente 0.0175 mg/L, de igual manera los puntos en los cuales se espera una mayor variación son: el punto A05SUQUI del cual se estima un incremento de 0.005 mg/L y el punto A10SUQUI del cual se espera un incremento de 0.0025 mg/L, además, la gráfica muestra como en otros puntos se espera, no el aumento, sino un decrecimiento en los valores, como lo es en los puntos A08SUQUI, en el cual se espera una disminución desde 0.02 mg/L hasta 0.0125 mg/L de Cromo Hexavalente, en el punto A14SUQUI se espera una disminución desde 0.01 mg/L hasta 0.009 mg/L y finalmente en los puntos A16SUQUI y A18SUQUI se esperan disminuciones de concentraciones de 0.006 mg/L. En los puntos: A01SUQUI, A02VERTI, A04APANT, A06SAUCE, A07CARCA, A09MOLIN, A11ZARCO, A13VERTI, A15PUENTE y A17GUILGU, no se espera variación alguna, por lo que la medida de Cromo Hexavalente esperada es la misma a la del valor de inicio. En particular, el resultado obtenido en el punto A12SUQUI que según las mediciones en campo no presenta concentración de Cromo Hexavalente, según la modelación realizada, se estima que pasará de 0 mg/L a 0.009 mg/L.

En la Figura 3.16, se presenta el comportamiento del Cromo Hexavalente durante las 24 h de estudio, iniciando igual que para la Conductividad Eléctrica, el 14 de Junio de 2016 a las 21:10 y finalizando el 15 de Junio de 2016 a las 21:10. La Figura 3.16 muestra con más detalle lo que ocurre al transcurrir el tiempo, específicamente durante las 24 h que son la base del estudio. La gráfica muestra las variaciones respecto a los aumentos y decrecimientos de la concentración de

Cromo Hexavalente durante las horas de modelación del software, además, este gráfico muestra únicamente los puntos que poseen concentraciones de Cromo Hexavalente, que son los siguientes: A01SUQUI, A03SUQUI, A04APANT, A05SUQUI, A08SUQUI, A09MOLIN, A10SUQUI, A14SUQUI, A16SUQUI y A18SUQUI, por tanto, para la mejor interpretación y comprensión del presente gráfico, se debe revisar el análisis del gráfico por segmentos, presentado en la Figura 3.15.

4.4. Medidas de descontaminación del Río Suquiapa.

En las siguientes secciones se presentan medidas preventivas para evitar la contaminación de la subcuenca del Río Suquiapa, así como, medidas correctivas de descontaminación de dicha subcuenca.

4.4.1. Medidas preventivas para evitar la contaminación del Río Suquiapa.

Según Iida y Shock (2009), en las aguas superficiales, un exceso de Fósforo y Nitrógeno, en combinación con temperaturas altas y luz solar, estimula el crecimiento de las algas. Si las actividades humanas permiten que un exceso de Fósforo y Nitrógeno alcance los cuerpos de agua dulce, estos nutrientes pueden provocar un gran aumento en la producción de algas, el cual se conoce como florecimiento de algas. Ya que el Fósforo y Nitrógeno enriquecen al suelo y promueven un buen crecimiento de las plantas, se deben tomar precauciones y aprender a manejarlo de manera que se logren los mayores beneficios, sin causar consecuencias adversas. La zona de la subcuenca del Río Suquiapa se caracteriza por ser una zona agrícola y ganadera, por lo que se deben de tomar medidas preventivas para evitar que los niveles de Fósforo y Nitrógeno sobrepasen la normativa salvadoreña. De acuerdo a Iida y Shock (2009), diseñar sistemas de riego y manejarlos adecuadamente para minimizar el escurrimiento de agua y reducir las pérdidas de Nitrógeno y Fósforo, además, utilizar métodos que atrapen los sedimentos y protejan el suelo para disminuir la pérdida de estos nutrientes,

también, incentivar el cultivo en hilera irrigada y por último, realizar operaciones concentradas de alimentación de animales. Con respecto a los residuos provenientes de la ganadería, se propone tratarlos en un biodigestor artesanal para la producción de metano.

De manera preventiva se recomienda ubicar los puntos donde hay descargas de aguas residuales que contienen materia orgánica. Durante los muestreos, se identificaron algunos de estos puntos, los cuales se encuentran ubicados en las cercanías del Río Molino y del Río Zarco, las fotografías de estos lugares que fueron identificados, se pueden apreciar en el Anexo A.9 y en el Anexo A.10, respectivamente. Posteriormente a la ubicación de los puntos de descarga de materia orgánica, se debe hacer un monitoreo, para de esta manera garantizar que se está cumpliendo con la normativa respectiva. En el caso que el agua descargada no cumpla con la normativa salvadoreña, se debe realizar un tratamiento que garantice que todos los parámetros se encuentren dentro de los límites establecidos por esta, dicho tratamiento se explica con más detalle a continuación.

Según Carrascal, Matiz, Pedroza, Rojas, Salcedo y Sánchez (2010), se puede aplicar un tratamiento de lagunaje facultativo para la disminución de la concentración de Coliformes Fecales, dicho método consiste en un pretratamiento con rejillas de cribado, un tratamiento primario con desarenadores y trampa de grasa y lagunas biológicas, con un tiempo de retención de 24 horas, posteriormente un tratamiento con Cloro Gaseoso o con Hipoclorito de Sodio, el cual se aplica en un decantador. Al final del proceso, los residuos del decantador se trasladan a los patios de secado y el agua tratada se descarga a un cuerpo de agua receptor. Se propone que este tratamiento se aplique en las comunidades que actualmente se encuentran descargando sus aguas negras al río, debido a que poseen sistemas de fosas sépticas conectadas a la subcuenca, además se recomienda que este sistema se implemente en las granjas cercanas a la zona del Río Suquiapa. Durante el muestreo se pudo observar la presencia de fosas sépticas como se muestra en

el Anexo A.11, además, de la presencia del ganado en el tramo en estudio, como se muestra en el Anexo A.12 y en el Anexo A.13.

4.4.2. Medidas correctivas de descontaminación del Río Suquiapa.

De acuerdo a la FAO (2006), los dispositivos de filtración de agua se usan generalmente para mejorar la calidad del agua, reduciendo su turbidez y eliminando parte de la materia orgánica, por lo que se propone instalar rejillas filtrantes horizontales en la subcuenca del Río Suquiapa para separar la materia orgánica y posteriormente enviar esta materia a un biodigestor artesanal. Según Vetivercol (2008), se pueden hacer uso de la fitorremediación por hidroponía utilizando Vetiver para el tratamiento de aguas residuales, este tipo de tratamiento es capaz de disminuir los niveles de Nitrógeno Total en un 94%, Fósforo Total en un 90% y Coliformes Fecales en un 44%, además ayuda a mejorar los niveles de OD, por lo que se propone la implementación de la fitorremediación a lo largo de la subcuenca en estudio, instalando balsas flotantes, a las cuales se les sembraría la cantidad necesaria de plantas de Vetiver, para que absorban los contaminantes mencionados con anterioridad por medio de su sistema radicular que los atrapa en sus tejidos y los utiliza para su crecimiento. De acuerdo a Vetivercol (2008), este tipo de sistema no necesita mantenimiento ni consumo de energía eléctrica (Ver Figura 4.2).

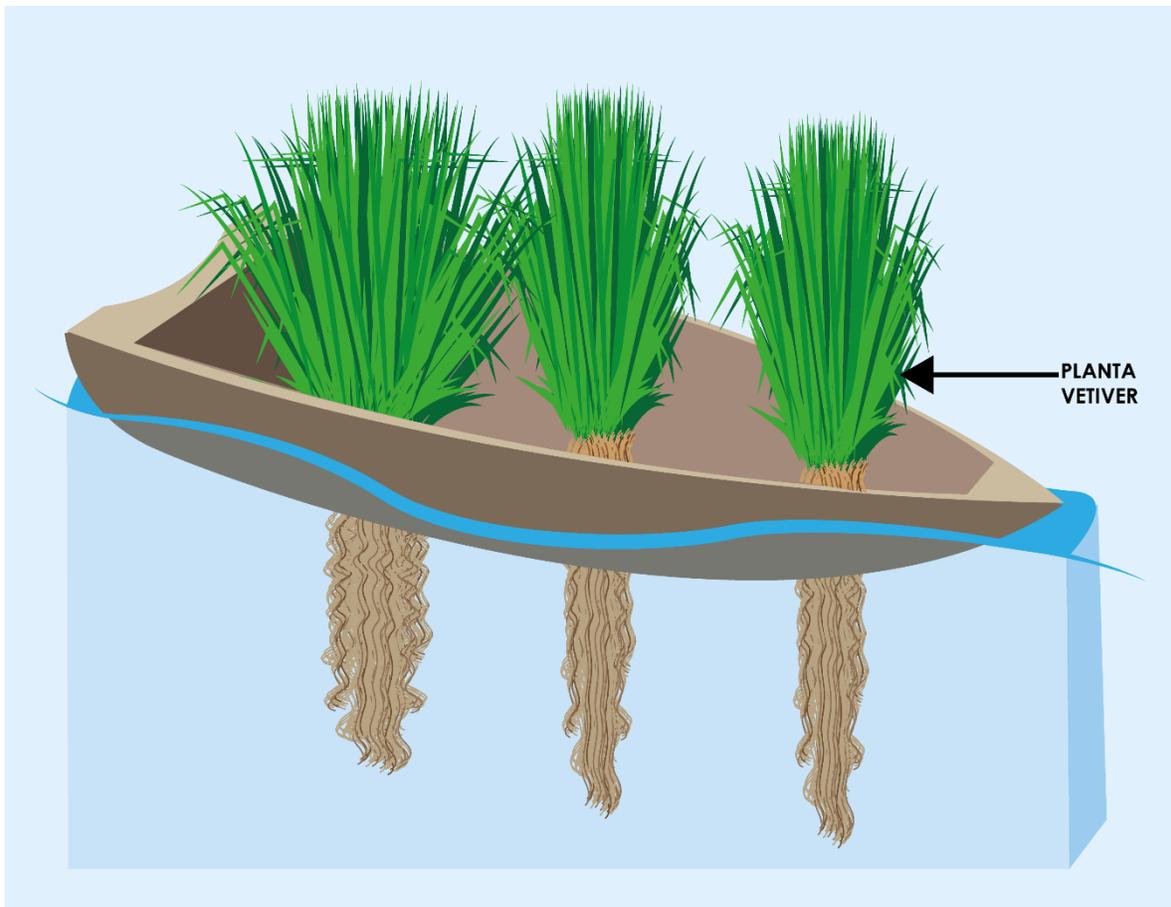


Figura 4.2. Esquema de disposición de Vetiver en balsas. Fuente: Elaboración propia.

Según la FAO (2006), el gas más importante disuelto en el agua es el oxígeno. El OD es esencial para la respiración de la mayoría de los organismos vivos y es también necesario para la desagregación de la materia orgánica muerta durante el proceso de descomposición. El OD en el agua proviene de dos fuentes: del oxígeno atmosférico y del oxígeno producto de la fotosíntesis. Según la FAO (2006), si se desea aumentar el OD por medio de la fotosíntesis, se debe incrementar la cantidad de luz solar disponible, a través de un control riguroso de los árboles que dan sombra y de los vegetales acuáticos, además, para mejorar el OD se puede hacer uso de la aireación por gravedad, por medio de la instalación de cascadas artificiales construidas con rocas y a través de molinos de agua.

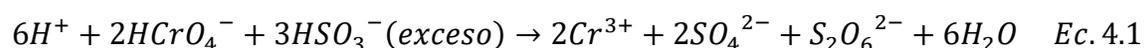
4.4.3. Escenario de remoción de Cromo Hexavalente y su respectiva propuesta de descontaminación.

A continuación se presenta una propuesta de tratamiento que podrían aplicarse a las aguas contaminadas con Cromo Hexavalente en el Río Suquiapa, para lograr una remoción de dicho contaminante, de ser necesaria la aplicación de tales métodos, debido a que actualmente, se ha determinado en la presente investigación que las concentraciones de Cromo Hexavalente son mucho menores a las permitidas por la NSO 13.49.01:09.

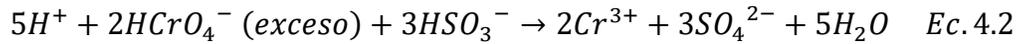
De las tecnologías actuales más acertadas, comprobadas para el tratamiento de remoción de Cromo Hexavalente, para el ambiente de aguas superficiales de un río, se establece la técnica de fijación química.

Según Roig (2006), el objetivo de la tecnología de fijación química, es el de reducir el Cr^{6+} de las tierras y aguas contaminadas con cromo, a su forma más termodinámicamente estable Cr^{3+} , este cromo reducido se espera que quede fijo en los sólidos del acuífero.

En primer lugar se extrae el agua contaminada, se le añade la dosis del agente reductor, después se reinyecta el agua tratada en el acuífero, produciéndose la reducción del Cr^{6+} . Esta técnica reduce la concentración de cromo en aguas subterráneas por debajo de los 50 $\mu\text{g/L}$. La eficacia de esta técnica depende de la capacidad de actividad del agente reductor para reducir el Cr^{6+} y de la capacidad del Cr^{3+} para fijarse en el acuífero sólido. La cantidad total de cromo en el acuífero no disminuye, sino que el cromo es precipitado e inmovilizado en el acuífero sólido en forma de Cr^{3+} . Se utilizan compuestos de azufre como el sulfito para reducir el Cr^{6+} . Cuando se usa el sulfito es necesario la presencia de Fe^{2+} para actuar como catalizador. En presencia de exceso de sulfito se produce la Ecuación de reacción 4.1.



El metabisulfito ($S_2O_6^{2-}$) que se forma en la reacción, puede reducir el Fe^{3+} oxidado a Fe^{2+} , esto permite la reducción del Cr^{6+} por Fe^{2+} . En presencia de exceso de Cr^{6+} , la reducción a Cr^{3+} utilizando sulfito como reactivo, se produce según la Ecuación de reacción 4.2.



Para usar este método, es necesario que haya suficientes zonas de adsorción de hierro y óxido de manganeso, dónde el Cr^{3+} pueda quedar retenido. Esta tecnología consiste por lo tanto en la extracción del agua contaminada, su posterior tratamiento con reactivos químicos que reducen el Cr^{6+} a Cr^{3+} y por último la reinyección del agua tratada a lo largo del perímetro de la pluma contaminada. La inyección se realiza en las zonas donde la concentración de cromo es más elevada, además que una importante ventaja de esta técnica es que reduce considerablemente hasta el 75% de la concentración del metal.

En la Figura 4.3 se presentan los comportamientos que se tendrían al aplicar la tecnología descrita con anterioridad, simbolizando la línea negra la concentración hasta la cual sería reducido el contaminante y la línea punteada roja la concentración a la cual llegaría el Cromo Hexavalente al cabo de las 24 h de modelación del software. Se puede apreciar que la tendencia se mantiene respecto a los incrementos y decrementos obtenidos con las concentraciones actuales en campo, por lo que esta gráfica permite visualizar hasta donde se reduciría el Cromo Hexavalente.

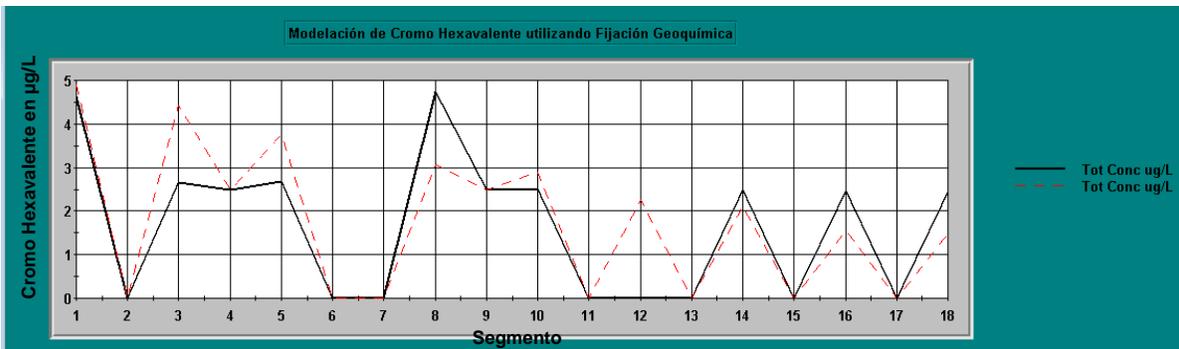


Figura 4.3. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por segmento en WASP aplicando remediación. Fuente: Elaboración propia.

Se puede realizar un análisis similar al realizado para la modelación de Cromo Hexavalente, con la diferencia que en este caso se ha aplicado la técnica de remoción del metal en estudio, por lo tanto se puede observar en la gráfica que para el punto A03SUQUI se obtuvo una concentración de 0.0025 mg/L referente al valor aplicando la remoción y se espera que alcance un valor de aproximadamente 0.0045 mg/L. Los puntos en los cuales se espera una mayor variación de concentración de Cromo Hexavalente son: el punto A05SUQUI, del cual se estima un incremento de 0.0011 mg/L y el punto A10SUQUI, del cual se espera un incremento de 0.0005 mg/L, además, la gráfica muestra como en otros puntos se espera, no el aumento, sino un decremento en los valores, como en los puntos A08SUQUI, en el cual se espera una disminución desde 0.005 mg/L hasta 0.003 mg/L de Cromo Hexavalente, el punto A14SUQUI, en el cual se espera una disminución desde 0.0025 mg/L hasta 0.002 mg/L y finalmente los puntos A16SUQUI y A18SUQUI, en los cuales se espera que las concentraciones lleguen hasta un valor de 0.0015 mg/L. En los puntos: A01SUQUI, A02VERTI, A04APANT, A06SAUCE, A07CARCA, A09MOLIN, A11ZARCO, A13VERTI, A15PUENTE y A17GUILGU, no se espera variación alguna, por lo que la medida de Cromo Hexavalente es la misma a la del valor inicial. El resultado obtenido en el punto A12SUQUI, que según las mediciones en campo no presenta concentración de Cromo Hexavalente, según la modelación realizada, se estima que pasará de 0 mg/L a 0.0021 mg/L, no obstante cabe señalar que con la aplicación de la tecnología de fijación

geoquímica se esperarían concentraciones menores a las que se pueden tener en la actualidad en el río en estudio.

En la Figura 4.4 se presenta las variaciones de las concentraciones de Cromo Hexavalente durante el tiempo con aplicación de la tecnología de remoción de fijación geoquímica, además, en dicha figura, se pueden apreciar con más detalle los incrementos y decrementos durante los diferentes intervalos de tiempo, que va sufriendo el contaminante hasta llegar a ciertas horas en las que la concentración se mantiene constante.

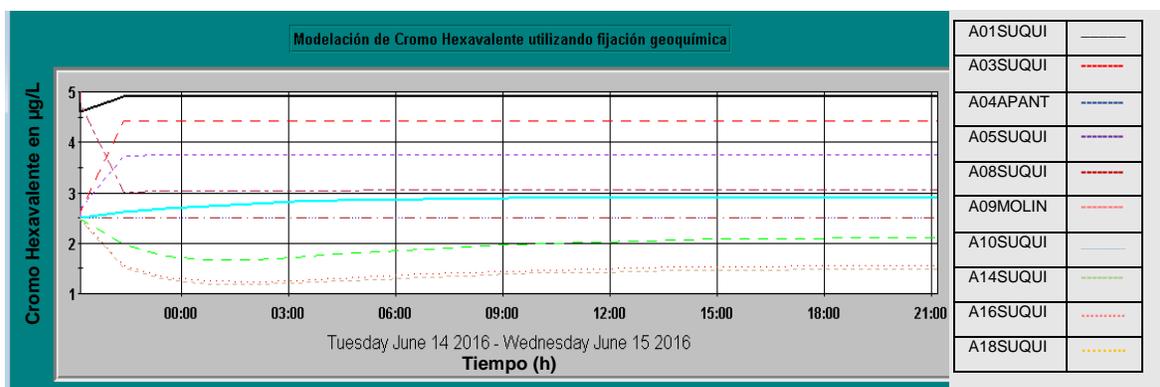


Figura 4.4. Gráfico de valores de Cromo Hexavalente por tiempo en WASP aplicando remediación. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES.

- De acuerdo al cálculo del índice de calidad del agua NSF, de los 18 puntos muestreados en la parte alta de la subcuenca del Río Suquiapa, el 11.11% poseen calidad mala, siendo estos puntos el A01SUQUI y el A03SUQUI y el 88.89% poseen calidad media. El NSF-WQI promedio para el Río Suquiapa posee un valor de 50.35, clasificándose su calidad como media.
- En los puntos A01SUQUI, A03SUQUI, A04APANT, A05SUQUI, A08SUQUI, A09MOLIN, A10SUQUI, A14SUQUI, A16SUQUI y A18SUQUI, se detectó concentración de Cromo Hexavalente, siendo los puntos A01SUQUI y A08SUQUI los que poseen mayores concentraciones con un valor de 0.02 mg/L, sin embargo, estos valores no exceden los límites establecidos por la NSO 13.49.01:09. Con respecto a la modelación, se obtuvo que las concentraciones de algunos de los puntos muestreados incrementarán sus valores, como en el caso de los puntos A03SUQUI, A05SUQUI y A10SUQUI, para los puntos A08SUQUI, A14SUQUI, A16SUQUI y A18SUQUI, la concentración presentará un decremento.
- De los 18 puntos muestreados ninguno es apto para que sus aguas superficiales sean potabilizadas por métodos convencionales de tratamiento ni utilizadas con fines recreativos, según el Decreto 51 y la norma de la OMS.
- Con la realización de este trabajo se logró definir una metodología de investigación, la cual puede ser utilizada para estudios que busquen determinar la calidad de las aguas superficiales en diferentes ríos. En esta investigación se determinaron las concentraciones de Cromo Hexavalente en las aguas superficiales del Río Suquiapa y sus tributarios, las cuales servirán de línea base para posteriores estudios.

RECOMENDACIONES.

- Para actualizar las fuentes contaminantes del Río Suquiapa, ya sean puntuales o no puntuales, se deben identificar las descargas actuales provenientes de tenerías, beneficios de café, comunidades aledañas, ganadería, agricultura, balnearios, piscicultura, entre otros.
- Se deben analizar los sedimentos en la parte alta de la subcuenca del Río Suquiapa para verificar la presencia de metales pesados tales como: Pb, Cr y As y de esta manera, ampliar el conocimiento sobre dichos contaminantes en la zona en estudio.
- Se recomienda realizar estudios de metales pesados, tales como Pb, Cr, As y Hg, en los alrededores de la parte alta de la subcuenca en estudio, verificando su presencia en aire, cultivos y suelo.
- Se deben realizar estudios que incluyan la evaluación de otros parámetros fisicoquímicos y bióticos diferentes a los analizados en la presente investigación y así poder evaluar la aptitud de uso del agua para irrigación, para propagación piscícola, entre otros.
- Dado que la presente investigación solo involucró la determinación de los parámetros necesarios para el cálculo del índice de calidad del agua NSF para la evaluación de la aptitud de uso del agua superficial del Río Suquiapa, para ser potabilizada por métodos convencionales o ser utilizada en recreación, si se desea tener un mejor criterio sobre la aptitud de uso de dicho río, se deben considerar los análisis de todos los parámetros fisicoquímicos presentes en la normativa salvadoreña.
- Explorar nuevas tecnologías de descontaminación que puedan ser implementadas en la subcuenca del Río Suquiapa y que sean factibles tanto económicamente como operacionalmente.

- De las tecnologías estudiadas tanto para la descontaminación como para la prevención de esta, una planta de tratamiento de aguas residuales que utilice métodos convencionales podría ser implementada para la prevención del aumento de carga orgánica, Coliformes Fecales, entre otros contaminantes. Se recomienda la instalación de biodigestores artesanales en las comunidades que generan mayores desperdicios orgánicos para el tratamiento de estos, además, estos residuos permiten la generación del gas Metano, el cual puede ser utilizado en cocinas, lo que se traduce en ahorros energéticos para las comunidades. En el río en estudio se recomienda aplicar la técnica de fitorremediación con zacate Vetiver, dado que permite una buena absorción de contaminantes como: Nitrógeno Total, Fósforo Total y Coliformes Fecales, además, ayuda a mejorar los niveles de OD. La instalación de cascadas artificiales y molinos de agua contribuyen a mejorar el OD en ríos, por lo que se recomienda su implementación.
- Se recomienda utilizar los resultados obtenidos de la calidad del agua por medio de la determinación del NSF-WQI y los resultados de concentración de Cromo Hexavalente, en los puntos de muestreo del Río Suquiapa y sus tributarios, como línea base para llevar a cabo un monitoreo en dichos cuerpos de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Aguirre, C., González, E. y Guerrero, H. (2015). Elaboración y aplicación de metodologías analíticas e instrumentales para la cuantificación de parámetros fisicoquímicos en agua y su aplicación en el laboratorio de Ingeniería Química, FIA/UES. Universidad de El Salvador.
- Amaya, Á. (2015). Evaluación hidrogeoquímica e hidroquímica de la subcuenca del Río Arranchacal. Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Amaya, L., Arriola, D. y Cerna, Z. (2015). Modelación de la calidad fisicoquímica de las aguas del Río Suquiapa. Universidad de El Salvador, San Salvador.
- APHA. (1992). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (18.^a ed.). Washington, D. C.: American Public Health Association.
- Barragán, B., Cristiani, E., Netzahuatl, A. y Pineda, G. (2010). Remoción de cromo hexavalente y cromo total por la corteza de *Pyrus communis*. CENIC, 41, 1-10.
- Bedoya, J. (2007). Modelo de simulación de transporte de metales pesados en la cuenca baja del Río Tunjuelo. Universidad de La Salle, Bogota D.C.
- Blarasin, A., Cabrera, A., Damilano, G., Giuliano, A. y Matteoda, E. (2009). Cromo en aguas subterráneas y superficiales en el entorno de una curtiembre, relación con valores de fondo natural. Elena, Córdoba. Argentina.
- Carrascal A., Matiz A., Pedroza A., Rojas N., Salcedo J. y Sánchez A. (2010). Evaluación de tres métodos para la inactivación de coliformes y *Escherichia coli* presentes en agua residual doméstica, empleada para riego.
- Cuberos, E., Prieto, E. y Rodríguez, A. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de salud en una población expuesta a las actividades de curtiembres en Bogotá, Colombia. Revista de Salud Pública.
- Cubillos, J. (2013). Transporte de contaminantes en sistemas fluviales y evaluación de la aplicabilidad del modelo WASP en las cuencas de los ríos Elqui y Choapa, Región de Coquimbo, Chile. Universidad de La Serena, Chile.

- DES. (2003). Fecal Coliform as an Indicator Organism. Department of Environmental Services.
- Dygestic. (2008). Densidad Poblacional. Dirección General de Estadísticas y Censos.
- Eliggi, M., Gilli, M., Lermann, B. y Zerbato, M. (2007). Oxígeno disuelto.
- Espinoza, R., Vinicio, A. y Zavaleta, R. (2013). Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del Río Suquiapa, Santa Ana.
- FAO. (2006). Mejora de la calidad de agua en los estanques. Food and Agriculture Organization. Obtenido de ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_training/FAO_training/general/x6709s/x6709s02.htm
- Fuentes, F. y Massol, A. (2002). Manual de laboratorios: Ecología de microorganismos.
- Hernán, C., Patiño, P. y Torres, P. (2009). Índices de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8, 79-94.
- Hernández, W. y Rivas, J. (2013). Verificación preliminar de la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua cruda y tratada de la planta de tratamiento ubicada en la Ciudad de Suchitoto. Universidad de El Salvador, San Salvador.
- lida C. y Shock C. (2009). El dilema del fósforo. OSU Extension. Oregon State University.
- Jaime, M. (2008). Determinación de la curva de calibración en la demanda bioquímica de oxígeno por el método de la azida sódica modificada. Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Jenkins, D. (2000). Química del agua. Limusa.
- Jiménez, M. y Vélez, M. (2006). Análisis comparativo de indicadores de la calidad de agua superficial.
- MARN. (2011). Informe de la calidad de agua de los ríos de El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

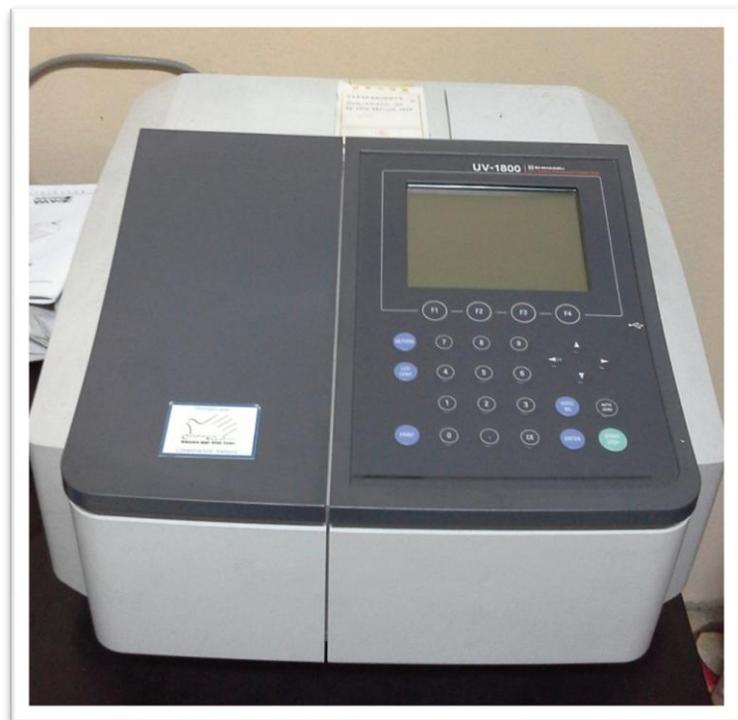
- MARN. (2013). Informe de la calidad del agua de los ríos de El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MARN. (2016). Informe climatológico de Santa Ana, El Palmar. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- NMX-AA-044-SCFI-2014 (Norma Oficial Mexicana). "Análisis de Agua", medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.
- NSO 13.49.01:09 (Norma Salvadoreña Obligatoria). Agua. Aguas residuales descargadas a un cuerpo receptor. Diario oficial, Tomo N° 382.
- Ojeda, R. (2005). Evaluación preliminar del impacto sobre las aguas subterráneas y superficiales del área de influencia directa del vertedero de residuos sólidos del municipio de Arauca y propuesta de recuperación paisajística del mismo. Universidad Nacional de Colombia Sede Arauca, Colombia.
- Ordoñez, J. (2011). ¿Qué es cuenca hidrológica?
- Poonam, T., Sukalyan, C. y Tanushree, B. (2013). Water Quality Indices - Important Tools for Water Quality Assessment: A Review. International Journal of Advances in Chemistry, 1.
- Pütz, P. (2008). Eliminación y determinación de fosfato.
- Roig, B. (2006). Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Química.
- SNET. (2002). Propuestas de descontaminación de los ríos Acelhuate, Sucio y Suquiapa. Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
- SNET. (2005). Balance hídrico integrado y dinámico componente evaluación de recursos hídricos. Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
- SNET. (2012). Índice de calidad del agua general «ICA». Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
- WHO. (2003). Total dissolved solids in drinking-water. World Health Organization.

Semana	25-29/04/2016					02-06/05/2016					09-13/05/2016					23-27/05/2016					
Día de la semana	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	L	M	M	J	V	
Día de toma de muestras	■					■		■						■	■	■		■			

A.2. Calendarización de toma de muestras. Fuente: Elaboración Propia.



A.3. Equipo medidor de pH, EC/TDS y temperatura HI 98129.



A.4. Equipo utilizado para la determinación de Nitratos.



A.5. Equipo utilizado para la determinación de Fosfatos y Cromo Hexavalente.



A.6. Equipo utilizado para la determinación de la Turbidez.



A.7. Equipo utilizado para la determinación del Oxígeno Disuelto.



A.8. Equipo utilizado para la determinación de los Coliformes Fecales.



A.9. Descarga de aguas residuales cercana al Río El Molino.



A.10. Descarga de aguas residuales cercana a la zona del Río Zarco.



A.11. Fosa séptica cercana al punto A18SUQUI.



A.12. Presencia de ganado en las cercanías al Río Suquiapa.



A.13. Establo en las cercañas del Río Zarco.

B. Procedimiento de calibración de los equipos utilizados.

B.1. Calibración del Medidor HI 98129 para la determinación del pH (Aguirre, González y Guerrero , 2015).

Para limpiar la calibración previa, presionar el botón MODE después de entrar en el modo de calibración. La parte baja del LCD mostrará ESC por un segundo y el instrumento retornará al modo normal de operación. El símbolo CAL en el display desaparecerá. El medidor será reseteado a la calibración por defecto.

- Sets de Buffers de Calibración.
 - Desde el modo de medición de pH presionar y mantener el botón MODE hasta que aparezca TEMP y la temperatura actual se desplegará en el display secundario.
 - Presionar nuevamente el botón MODE, se mostrará el actual set de buffers: pH 7.01 BUFF (para 4.01/7.01/10.01).
 - Presionar el botón SET/HOLD para cambiar el valor del buffer.
 - Presionar el botón MODE para retornar al modo normal de operación.
- Calibración.

Desde el modo de medición, presionar y mantener el botón MODE hasta que el símbolo CAL sea desplegado en el LCD inferior. Soltar el botón. El LCD desplegará pH 7.01 USE. El símbolo Cal pestañeará en el display.

- Colocar el electrodo el buffer 7.01. El medidor reconocerá el valor del buffer y mostrará pH 4.01 USE.
- Enjuagar el electrodo cuidadosamente para eliminar contaminación.
- Colocar el electrodo en el segundo buffer (pH 4.01 o pH 10.01).

- Cuando el segundo buffer sea reconocido, el LCD mostrará OK por un segundo y el medidor retornará al modo normal de operación. El símbolo CAL indica que el equipo está calibrado.

B.2. Calibración del Labquest Vernier/Sensor TRB-BTA para la determinación de la turbidez (Aguirre, González y Guerrero , 2015).

Pulsar SETUP para la selección principal. Pulsar CALIBRATE y luego CALIBRATE NOW.

- El primer punto de calibración.
 - Tomar la cubeta que contiene el patrón de turbidez (100 NTU) y suavemente invertir cuatro veces para mezclar cualquier partícula que pueda haberse adherido a la parte inferior. Importante: No agitar el estándar. Sacudiendo se introducen pequeñas burbujas de aire que afectan las lecturas de turbidez.
 - Limpiar el exterior de la cubeta con un paño suave y sin pelusa o tejido.
 - Sosteniendo el estándar por la tapa, colocarlo en el sensor de turbidez. Alinear la marca de la cubeta con la marca en el sensor de turbidez. Importante: Estas marcas deben alinearse cada vez que se toma una lectura.
 - Cerrar la tapa.
 - Introducir 100 como el valor de NTU.
 - Retirar el estándar.
- Segundo punto de calibración.
 - Preparar un blanco enjuagando la cubeta vacía con agua destilada, a continuación, llenándolo hasta la parte superior de la línea con agua destilada. Importante: La parte inferior del menisco debe ser en la parte superior de la línea para cada medición a lo largo de esta prueba. Este nivel de volumen es fundamental para obtener los valores de turbidez correctos.

- Enroscar la tapa de la cubeta. Limpiar el exterior con un paño suave y sin pelusa o tejido.
- Sosteniendo la cubeta por la tapa, colocarla en la ranura del sensor de turbidez. Asegurarse de que las marcas estén alineadas. Cerrar la tapa. Ingresar 0 como el valor en NTU.
- Pulsar OK. Ahora está listo para recoger los datos de turbidez

B.3. Procedimiento de calibración del Medidor HI 98129 para la determinación de los SDT (Aguirre, González y Guerrero , 2015).

Para cambiar el factor de conversión (CONV) y el coeficiente de temperatura β (Beta) en EC/TDS.

- Desde el modo medición, presionar y mantener el botón MODE hasta que aparezca TEMP y la temperatura actual será desplegada en la parte inferior del display.
- Presionar el botón MODE nuevamente para mostrar el factor de conversión actual. Ej.: 0.50 CONV.
- Presionar el botón SET/HOLD para cambiar el factor de conversión
- Presionar el botón MODE para mostrar el actual coeficiente de temperatura β (Beta).
- Presionar el botón SET/HOLD para cambiar el coeficiente de temperatura β (Beta).
- Presionar el botón MODE para retornar al modo normal de medición.
- Calibración.

Desde el modo de medición, presionar y mantener el botón MODE hasta que el LCD muestre CAL.

- Soltar el botón y sumergir la sonda en la solución de calibración apropiada: HI7031 (1413 μ S/cm).

- Una vez que la calibración se efectúe automáticamente, el display mostrará OK por 1 segundo y retornará al modo normal de medición.
- Desde aquí, es conocida la relación entre EC y TDS, por lo que no se requiere calibración en TDS.
- El símbolo CAL indica que el equipo está calibrado.

B.4. Calibración del Labquest Vernier para la determinación del OD (Aguirre, González y Guerrero , 2015).

- a) Acceder al software de DataPro.
- b) **Primer punto de calibración.** Remover la tapa azul del sensor y colocarlo en la solución de calibración de Sulfato de Sodio.
- c) Cuando la lectura del medidor de voltaje se estabilice, colocar cero que es el valor conocido de Oxígeno Disuelto para esa solución en mg/L.
- d) **Segundo punto de calibración.** Agregar agua destilada al sensor y secar con cuidado.
- e) Desenroscar la tapa de la botella transparente y colocar el sensor hasta la marca indicada.
- f) Agregar agua destilada a la botella transparente hasta un cuarto de su tamaño. Importante: no tocar la membrana y asegurar que este seca. Mantener el sensor de esta manera alrededor de un minuto.
- g) Cuando la lectura del medidor de voltaje se estabilice agregar el valor de Oxígeno Disuelto en mg/L. Utilizar la Tabla B.1 para encontrar el valor de presión barométrica, posteriormente, utilizar la Tabla B.2, para encontrar el valor de OD.

Tabla B.1. Presión barométrica a diferentes alturas.

Elevación (ft)	Presión (mm Hg)	Elevación (ft)	Presión (mm Hg)	Elevación (ft)	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: (Aguirre, González y Guerrero , 2015).

Tabla B.2. Oxígeno Disuelto en mg/L en agua destilada a valores de temperatura y presión distintos.

	770 mm	760 mm	750 mm	740 mm	730 mm	720 mm	710 mm	700 mm
0°C	14.76	14.57	14.38	14.19	13.99	13.80	13.61	13.42
1°C	14.38	14.19	14.00	13.82	13.63	13.44	13.26	13.07
2°C	14.01	13.82	13.64	13.46	13.28	13.10	12.92	12.73
3°C	13.65	13.47	13.29	13.12	12.94	12.76	12.59	12.41
4°C	13.31	13.13	12.96	12.79	12.61	12.44	12.27	12.10
5°C	12.97	12.81	12.64	12.47	12.30	12.13	11.96	11.80
6°C	12.66	12.49	12.33	12.16	12.00	11.83	11.67	11.51
7°C	12.35	12.19	12.03	11.87	11.71	11.55	11.39	11.23
8°C	12.05	11.90	11.74	11.58	11.43	11.27	11.11	10.96
9°C	11.77	11.62	11.46	11.31	11.16	11.01	10.85	10.70
10°C	11.50	11.35	11.20	11.05	10.90	10.75	10.60	10.45
11°C	11.24	11.09	10.94	10.80	10.65	10.51	10.36	10.21
12°C	10.98	10.84	10.70	10.56	10.41	10.27	10.13	9.99
13°C	10.74	10.60	10.46	10.32	10.18	10.04	9.90	9.77
14°C	10.51	10.37	10.24	10.10	9.96	9.83	9.69	9.55
15°C	10.29	10.15	10.02	9.88	9.75	9.62	9.48	9.35
16°C	10.07	9.94	9.81	9.68	9.55	9.42	9.29	9.15
17°C	9.86	9.74	9.61	9.48	9.35	9.22	9.10	8.97
18°C	9.67	9.54	9.41	9.29	9.16	9.04	8.91	8.79
19°C	9.47	9.35	9.23	9.11	8.98	8.86	8.74	8.61
20°C	9.29	9.17	9.05	8.93	8.81	8.69	8.57	8.45
21°C	9.11	9.00	8.88	8.76	8.64	8.52	8.40	8.28
22°C	8.94	8.83	8.71	8.59	8.48	8.36	8.25	8.13
23°C	8.78	8.66	8.55	8.44	8.32	8.21	8.09	7.98
24°C	8.62	8.51	8.40	8.28	8.17	8.06	7.95	7.84
25°C	8.47	8.36	8.25	8.14	8.03	7.92	7.81	7.70
26°C	8.32	8.21	8.10	7.99	7.89	7.78	7.67	7.56
27°C	8.17	8.07	7.96	7.86	7.75	7.64	7.54	7.43
28°C	8.04	7.93	7.83	7.72	7.62	7.51	7.41	7.30
29°C	7.90	7.80	7.69	7.59	7.49	7.39	7.28	7.18
30°C	7.77	7.67	7.57	7.47	7.36	7.26	7.16	7.06
31°C	7.64	7.54	7.44	7.34	7.24	7.14	7.04	6.94
32°C	7.51	7.42	7.32	7.22	7.12	7.03	6.93	6.83
33°C	7.39	7.29	7.20	7.10	7.01	6.91	6.81	6.72
34°C	7.27	7.17	7.08	6.98	6.89	6.80	6.70	6.61
35°C	7.15	7.05	6.96	6.87	6.78	6.68	6.59	6.50

Fuente: (Aguirre, González y Guerrero , 2015).

C. Fichas técnicas de los sitios de estudio.

C.1. Ficha técnica de punto A01SUQUI.

<p>Ficha técnica: A01SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N 14°00'48.7" W089°32'37.0"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>765 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>380 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>72.1 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>4.72 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>2.01 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.40 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>1.4 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>49.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>2.1°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>113,566.17 NMP/100ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.02 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>47.92</p>

C.2. Ficha técnica de punto A02VERTI.

<p>Ficha técnica: A02VERTI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'47.7" W089°32'34.4"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>414 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>205 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>0.5 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.78 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>4.39 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.10 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.0 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>0.57 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>4.3°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>0.00 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>63.71</p>

C.3. Ficha técnica de punto A03SUQUI.

<p>Ficha técnica: A03SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'45.2" W089°32'30.5"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>666 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>330 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>15.3 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>6.35 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>2.20 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.60 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>3.2 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>10.19 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>6.0°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>1,275,584.25 NMP/100ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>44.52</p>

C.4. Ficha técnica de punto A04APANT.

<p>Ficha técnica: A04APANT</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'43.6" W089°32'29.3"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>363 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>232 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>0.8 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.93 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>4.55 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.94 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>3.8 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>2.02 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>5.2°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>53,301.94 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>58.00</p>

C.5. Ficha técnica de punto A05SUQUI.

<p>Ficha técnica: A05SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'44.2" W089°32'27.3"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>550 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>274 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>6.4 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>3.76 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.35 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.83 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.7 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>6.06 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>3.1°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>515,327.74 NMP/100ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>58.03</p>

C.6. Ficha técnica de punto A06SAUCE.

<p>Ficha técnica: A06SAUCE</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'44.9" W089°32'24.4"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>407 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>203 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>2.9 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.70 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>4.23 mg/L</p>
<p>Ph:</p>	<p>7.34Ph</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>6.6 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>1.52 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>4.8°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>3,166.86 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>67.69</p>

C.7. Ficha técnica de punto A07CARCA.

<p>Ficha técnica: A07CARCA</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'43.2" W089°32'23.2"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>438 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>219 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>3.1NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.16 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>4.38 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.43 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.1 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>2.82 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>7.3°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>6,257.34 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>64.39</p>

C.8. Ficha técnica de punto A08SUQUI.

<p>Ficha técnica: A08SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'46.3" W089°32'17.9"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>530 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>264 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>9.1 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>2.64 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.40 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.62pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>4.5 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>3.46 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>3.5°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>776,472.77 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.02 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>56.19</p>

C.9. Ficha técnica de punto A09MOLIN.

<p>Ficha técnica: A09MOLIN</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'49.8" W089°32'13.2</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>513 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>256 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>0.6 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>5.75 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>1.96 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.79 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.4 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>2.95 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>1.8°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>124,382.83 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>61.55</p>

C.10. Ficha técnica de punto A10SUQUI.

<p>Ficha técnica: A10SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°01'06.7" W089°31'10.9"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>454 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>227 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>6.6 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>2.40 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.39 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.75 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>6.5 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>15.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>1.9°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>186,192.30 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>58.31</p>

C.11. Ficha técnica de punto A11ZARCO.

<p>Ficha técnica: A11ZARCO</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°01'08.1" W089°31'16.4"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>426 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>220 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>3.4 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.93 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>4.19 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.82 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>3.6 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>2.10 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>5.4°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>18,619.23 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>56.40</p>

C.12. Ficha técnica de punto A12SUQUI.

<p>Ficha técnica: A12SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°01'17.5" W089°30'19.8"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>460 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>232 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>4.9 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>1.56 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.34 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.67 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.4 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>13.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>2.5°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>93,478.10 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>57.37</p>

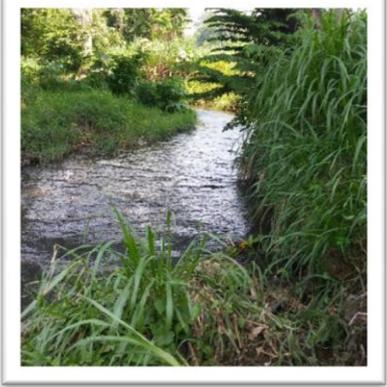
C.13. Ficha técnica de punto A13VERTI.

<p>Ficha técnica: A13VERTI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°01'26.1" W089°30'16.7"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>202 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>107 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>1.3 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.32</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.23 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>6.52 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>4.0 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>8.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>1.6°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>14,756.14 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>59.23</p>

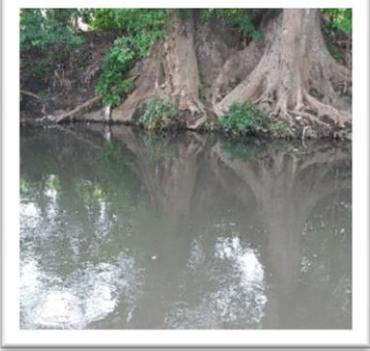
C.14. Ficha técnica de punto A14SUQUI.

<p>Ficha técnica: A14SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'26.4" W089°29'32.9"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>482 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>238 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>6.7 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>2.27 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>4.07 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.71 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.9 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>12.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>1.5°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>193,918.49 NMP/100ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>57.60</p>

C.15. Ficha técnica de punto A15PUENTE.

<p>Ficha técnica: A15PUENTE</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'26.6" W089°29'38.9"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>446 µS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>223 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>5.9 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.16 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.14 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.57 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.3 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>4.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>5.1°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>22,482.32 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>66.14</p>

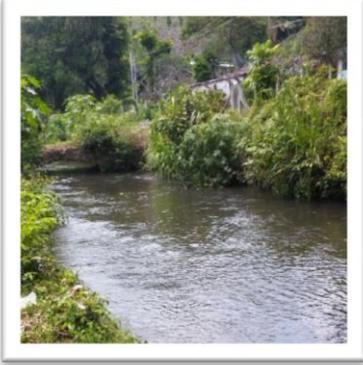
C.16. Ficha técnica de punto A16SUQUI.

<p>Ficha técnica: A16SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N14°00'07.6" W089°29'14.5"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>363 µS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>182 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>8.6 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>1.67 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.31 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.75 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>4.7 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>6.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>4.5°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>108,930.46 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>56.69</p>

C.17. Ficha técnica de punto A17GUILGU.

<p>Ficha técnica: A17GUILGU</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N13°59'43.5" W089°29'07.1"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>158 μS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>79 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>2.0 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>0.33 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.12 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>8.00 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>5.7 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>2.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>4.9°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>7,026.95 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.00 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>68.69</p>

C.18. Ficha técnica de punto A18SUQUI.

<p>Ficha técnica: A18SUQUI</p>	
<p>Coordenadas:</p>	<p>N13°59'42.6" W089°28'53.2"</p>
<p>Conductividad eléctrica:</p>	<p>475 µS/cm</p>
<p>Sólidos Disueltos Totales</p>	<p>238 mg/L</p>
<p>Turbidez:</p>	<p>4.7 NTU</p>
<p>Fosfatos:</p>	<p>1.48 mg/L</p>
<p>Nitratos:</p>	<p>3.50 mg/L</p>
<p>pH:</p>	<p>7.91 pH</p>
<p>Oxígeno Disuelto:</p>	<p>4.9 mg/L</p>
<p>DBO₅:</p>	<p>10.00 mg/L</p>
<p>Cambio de Temperatura:</p>	<p>5.90°C</p>
<p>Coliformes Fecales:</p>	<p>116,656.65 NMP/100 ml</p>
<p>Cr⁺⁶:</p>	<p>0.01 mg/L</p>
<p>NSF-WQI:</p>	<p>54.33</p>