



**Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua
Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua**



**Maestría Regional Centroamericana en Ciencias del Agua
Con énfasis en Calidad del Agua**

Trabajo de Tesis
Para optar al grado de
Máster en Ciencias del Agua

Causas del deterioro de la calidad del agua del río Pinula y evaluación de efectos en el agua de pozos cercanos, y la respuesta del fitobentos y macroinvertebrados durante la época seca del año 2012.

Autor:
Alan Humberto Herrera
Licenciado en Acuicultura

Tutor:
Doctor Francisco Picado Pavón

Asesores:
Maestra Thelma Salvatierra
Maestro Emilio Peña

Managua, junio de 2014.

Financiado por:



Hoja de aprobación

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a las autoridades competentes, como las municipalidades de Santa Catarina Pinula, Guatemala y San Miguel Petapa, para su uso como referencia de consulta, dentro de las oficinas administrativas del agua, para futuras investigaciones en busca de soluciones integrales para disminuir la contaminación actual de la microcuenca del río Pinula.

Dedicado a las personas que viven a orillas del río Pinula, sobre todo en los municipios de Guatemala y Petapa, para que tomen medidas precautorias, principalmente quienes actualmente poseen sistemas agropecuarios cercanos al río y quienes consumen agua de pozos cercanos al río.

Agradecimientos

El apoyo institucional de:

CIRA/UNAN Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.

FODECYT Fondo de Ciencia y Tecnología, del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

CEMA/USAC Instituto de Investigaciones Hidrobiológicas del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Municipalidad de Guatemala

Municipalidad de San José Pinula

Municipalidad de San Miguel Petapa

Autoridad para el Manejo Sostenible de la Cuenca del Lago de Amatitlán AMSA

Instituto Nacional de Electrificación INDE

Instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología INSIVUMEH

El apoyo profesional de:

Katherine Vammen, Lorena Pacheco, Valeria Delgado y Marjory Perez
Francisco Picado Pavón, Thelma Salvatierra, Emilio Peña, Yelba Flores
Jamiléth Levi, María José Zamorio, Marcia Estrada, Manuel Arriola, Dimas
García, Maynor Ruiz. María Elena López Blanco, Margarita González López
Laboratorios de Aguas Naturales y Aguas Residuales, Hidrobiología,
Contaminantes Metálicos y Contaminantes Orgánicos del CIRA/UNAN

El apoyo personal de:

Mi Madre Mavis I. Herrera Castillo, mi Abuela Lupercia Castillo Martínez, mis
Hermanas Ixmucané y Nicté Gatica Herrera. Mi padre Alan H. Gatica Paz,
que en paz descanse.

Sres.: Don Israel, Luis Reyes, personal del pozo Transurbano Villa Hermosa.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	16
II.	ÁREA DE ESTUDIO	20
2.1	Características Pluviales de la Microcuenca del Río Pinula	22
	Características Hidrográficas de la Microcuenca del Río Pinula	23
2.3	Características Geológicas del área de estudio	26
	Hidrogeología	28
III.	ANTECEDENTES HIDROQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
IV.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	34
4.1	Caracterización del Problema	34
	Delimitación del Problema	34
4.3	Formulación del Problema	35
	Objetivo General	36
	Objetivo Específicos	36
VI	Marco Teórico	37
6.1	Marco Conceptual	37
6.2	Causas del Deterioro de la Calidad del Agua (Enfoque de río continuo)	37
6.3	Condiciones Químico - Físicas de las Aguas	38
	Temperatura	38
	Oxígeno Disuelto	39
	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	40
	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	40
	Potencial de Hidrógeno (pH)	40
	Potencial de Óxido Reducción (Eh)	41
	Conductividad Eléctrica (CE)	42
	Sólidos Totales Disueltos (STD)	43
	Salinidad (S)	43
	Parámetros de Calidad del Agua medidos en Laboratorio	44
	Alcalinidad del Agua	44
	Color y Turbidez	50
	Nutrientes en el Agua	50
	Contaminación por Metales	52

Cromo	53
Plomo	54
Arsénico.....	54
Mercurio.....	55
Contaminantes Orgánicos.....	56
Hidrocarburo.....	59
Productividad Biológica de las Aguas.....	60
Flora Acuática.....	60
Macro Invertebrados Acuáticos del Bentos.....	62
6.4 Marco Legal.....	62
VII. METODOLOGÍA	64
7.1 Materiales y Métodos	66
Aforos, Medición de niveles piezométricos.....	67
Toma de muestras de agua (matrices río y pozos)	68
Toma de muestras de sedimentos.....	70
Toma de muestras de Fito bentos	71
Colecta de Macro Invertebrados Acuáticos del Bentos.....	72
7.2 Análisis de la información	73
Análisis Instrumental.....	73
7.3 Análisis de los Resultados.....	76
Parámetros de Calidad del Agua medidos en Campo.....	76
Carga de Contaminantes en Agua.....	77
Respuesta del Fito bentos y Fitoplancton a la calidad del agua	77
Respuesta de los Macroinvertebrados a la calidad del agua del río Pinula.....	78
VIII. RESULTADOS	79
8.1 Conductividad Eléctrica del agua del Río Pinula	79
8.2 Sólidos Totales Disueltos STD en agua del Río Pinula	80
8.3 Salinidad en el agua del río Pinula.....	81
8.4 Conductividad Eléctrica (CE) en agua de pozos.....	82
8.5 Sólidos totales disueltos(STD) y Salinidad	83
8.6 Sistema de Drenaje de la Micro Cuenca Hídrica.....	85
8.7 Tipo Hidroquímico en aguas de la Microcuenca del río Pinula	86

Agua de Pozos cercanos al río Pinula.....	89
8.7 Nutrientes en el agua del Río Pinula.....	92
8.8 Nutrientes en agua de Pozos cercanos al río Pinula.....	94
8.9 Recursos Hidrobiológicos	95
Fitoplancton	96
Fitobentos	98
Macroinvertebrados Acuáticos.....	102
8.10 Contaminantes en Agua y Sedimento	105
Contaminación Microbiológica	105
8.11 Metales pesados en agua del río Pinula	108
8.13 Plaguicidas Organoclorados	112
8.15 Gestión de la Calidad del agua del río Pinula	118
IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	120
X. CONCLUSIONES	131
XI. RECOMENDACIONES.....	134
ANEXO 1. Modelo conceptual del acuífero del Valle de Guatemala	138
ANEXO 2. Metodología del análisis instrumental Físico Químico, de las muestras de agua tomadas en el estudio, por Laboratorios del CIRA/UNAN.....	140
ANEXO 3 Pruebas Estadísticas	141
ANEXO 4 Índice del estado trófico de las aguas según (Toledo, Tolarico, & Chinez, 1984)	148
Anexo 5. Calidad del agua de acuerdo al estado trófico.	152
ANEXO 6 Fitoplancton reportado en los sitios de muestreo indicados.....	153
ANEXO 7 Composición del Fitobentos encontrado en el río Pinula.....	154
ANEXO 8. Resultado de los índices bióticos con que fue evaluado el fitoplancton en dos sitios de muestreo.....	158
ANEXO 9. Resultado de los índices bióticos con que fue evaluado el fitobentos en dos sitios de muestreo.....	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo topográfico de la Microcuenca del río Pinula (a. Cuenca alta, b. Cuenca media y c. Cuenca baja)	21
Figura 2.1 Polígonos Thiessen, ubicación de las estaciones metereológicas sobre el área de estudio, 2011.....	22
Figura 2.2 Polígonos de Frecuencia (Áreas del relieve) de la micro cuenca del Río Pinula. Fuente: Elaboración propia, con base al mapa topográfico del IGN.	25
Figura 2.4 Geología y Suelos dentro de la Microcuenca del Río Pinula.	26
Figura 2.5 Capacidad de uso del suelo en la Microcuenca del río Pinula según USDA.....	28
Figura 6.1 Relación entre el pH y el Eh en función de la naturaleza de las aguas.	42
Figura 7.1 Equipo de medición de parámetros de calidad de agua utilizados en campo (noviembre del 2011 – julio de 2012).	67
Figura 7.2 Sitios de monitoreo de Parámetros de campo de la Calidad del Agua en río y Pozos 2011 a 2012.	68
Figura 7.3 Ubicación de los pozos de monitoreo de calidad del agua, cercanos al río Pinula 2011 a 2012.....	69
Figura 7.4 Ubicación de sitios de monitoreo de Sedimentos, Zoobentos, Fitobentos y Fitoplancton en el río Pinula 2012.	70
Figura 7.5 Colecta de muestras de sedimento en el río Pinula (febrero a julio de 2012).....	71
Figura 7.6 Toma de muestras de sustratos para colecta de Fito bentos, en el río Pinula (febrero a julio de 2012).	72
Figura 7.7 Redes utilizadas para la colecta de MIAB en el río Pinula (febrero a julio de 2012).	72
Figura 7.8 Técnica de raspado de sustratos aplicada en la colecta de MIAB en el río Pinula (febrero a julio de 2012).	73
Figura 8.8 Diagrama del riesgo de alcalinización y salinización del suelo por el RAS & CE...88	
Figura 8.2 Conductividad eléctrica en el agua del río Pinula, valores expresados en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	80
Figura 8.3 Tendencia del contenido de Sólidos Totales Disueltos en agua del río Pinula $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	81
Figura 8.4Tendencia de los valores de Salinidad en agua del río Pinula $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	81
Figura 8.5 Interpolación de la Conductividad Eléctrica en el agua de pozos cercanos al río Pinula (Valores expresados en $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	83

Figura 8.6 STD Río Pinula (mapa izquierda) y pozos cercanos (mapa derecha), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	84
Figura 8.7 Hidrografía en la microcuenca del río Pinula.	86
Figura 8.9 Tipo Hidroquímico del agua del río Pinula en diversos puntos de muestreo.	89
Figura 8.10 Diagrama del riesgo de alcalinización y salinización del suelo por el RAS & CE.	91
Figura 8.11 Tipo Hidroquímico del agua de pozos cercanos al río Pinula	92
Figura 8.12 Presencia de Nutrientes en agua del río Pinula. (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	94
Figura 8.13 Presencia de Nutrientes en agua de pozos cercanos al río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	95
Figura 8.14 a. Índice trófico de diatomeas en fitoplancton del río Pinula (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012)	96
Figura 8.16 Abundancia de especies de fitoplancton, embalse de la planta de bombeo Hincapié, cuenca media del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	97
Figura 8.17 Representación gráfica de los indicadores biológicos utilizados en el análisis del fitoplancton, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	98
Figura 8.18 b. Resultado de análisis TDI en fitobentos del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	99
Figura 8.19 Abundancia relativa % de fitobentos en la cuenca alta del río Pinula (Muxnac arriba), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	100
Figura 8.20 Abundancia relativa % de fitobentos en la cuenca alta del río Pinula (Muxnac), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	100
Figura 8.22 Representación gráfica de los indicadores biológicos utilizados en el análisis del fitobentos	101
Figura 8.18c Resultado de análisis IBF-ES-2010 en zoobentos del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012)	102
Figura 8.22 Familias más abundantes de zoobentos en la cuenca media del río Pinula. (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012), Indicadores: %Abundancia:	104
Figura 8.23 Especies más abundantes de zoobentos en la cuenca media del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012). Indicadores % Abundancia:.....	104
Figura 8.24 Contaminación con Coliformes totales CT y <i>E.coli</i> en el área de estudio, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	106

Figura 8.24 a Relación entre DBO y DQO en el río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	107
Figura 8.29 Líneas de flujo subterráneo de acuerdo a la carga hidráulica medida en pozos cercanos al río Pinula, el diámetro de cada punto es proporcional a la profundidad del NEA.....	116
Figura 8.26 Contenido de metales pesados en sedimentos en los puntos de muestreo, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).....	111
Figura 8.27 Presencia de plaguicidas organoclorados en sedimentos del río Pinula y Dieldrín en agua (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	113
Figura 8.28 Contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos, materia orgánica y composición de sedimentos del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	114
Figura 8.30 Contexto observado de la calidad del agua en el Río Pinula.....	117
Figura 8.31 Contexto de la calidad del agua en el Río Pinula con medidas de gestión en acción	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Morfometría de la Micro Cuenca del Río Pinula	24
Tabla 2.2 Interpretación de la taxonomía del suelo dentro de la Microcuenca del río Pinula.	27
Tabla 2.3 Interpretación de los suelos dentro de la Microcuenca del río Pinula de acuerdo a la capacidad de uso.	28
Tabla 6.1 Principales iones presentes en aguas naturales, porcentaje medio en aguas dulces.	45
Tabla 7.4 Métodos, referencias y laboratorios de análisis de muestras de acuerdo a su matriz.	73
Tabla 8.1 Contenido de aniones y cationes en muestras de agua del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	87
.....	88
Tabla 8.2 Contenido de aniones y cationes en muestras de agua de pozos cercanos al río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	90
Tabla 8.3a Variables microbiológicas en el recorrido del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	105
Tabla 8.3b Variables microbiológicas en el recorrido del río Pinula (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	106

Tabla 8.4 Potencial de óxido reducción en el agua del río Pinula.....	110
---	-----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 6.1 Descripción general de la presencia de Aniones en el agua en orden de abundancia natural.....	46
Cuadro 6.2 Descripción general de la presencia de Cationes en orden de abundancia natural en el agua.	47
Cuadro 6.3 Descripción general de la presencia de Otros Cationes en orden de abundancia natural en el agua.	49
Cuadro 6.4 Descripción general del contenido de Nutrientes en Agua.....	52
Cuadro 6.5 Límites máximos permisibles estipulados en la norma COGUANOR.	57
Cuadro 6.6 Concentraciones Letales de plaguicidas organoclorados.	58
Cuadro 6.7 Valores de concentraciones de plaguicidas organoclorados recomendados por la Academia de ciencias americana de los Estados Unidos.	58
Cuadro 7.1 Parámetros químicos y físicos medidos en las matrices río y pozos.	66
Cuadro 7.2 Materiales y métodos para la toma, conservación y análisis de las muestras de agua.	69
Cuadro 7.3 Materiales y métodos para la toma, conservación y análisis de muestras de sedimentos.	70
Cuadro 8.1 Valores promedio de parámetros de campo antes y después de confluencia Guadrón-Pinula; Pinula – Villalobos (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).	82

RESUMEN

Este estudio se enfocó en identificar y señalar las causas de la contaminación del agua del río Pinula y determinar si la contaminación del mismo afecta la calidad del agua de los pozos cercanos. Evaluando la manera como responde a la contaminación, la biota asociada a los sedimentos del río.

La microcuenca del río Pinula, está conformada por los municipios de Santa Catarina Pinula, Ciudad de Guatemala, Villa Canales y Petapa y el río es un tributario perenne del río Villalobos, que desemboca en el hiper eutrofizado Lago de Amatitlán. El río Pinula nace en la parte alta de la cuenca del lago y atraviesa zonas densamente pobladas, recibiendo en su recorrido aguas crudas domiciliarias e industriales, así como la escorrentía de zonas urbanas y agrícolas asociadas a la zona sureste del valle de la ciudad de Guatemala. La contaminación del río se evidencia por el color y el olor de sus aguas, que muestran el estado de la calidad del río hasta su confluencia con el Villalobos.

Con el objeto de establecer una evaluación rápida al agua del río sin escorrentía y dilución pluvial, se evaluó durante la época seca (enero-junio) del año 2012 las condiciones físico químicas del agua del río Pinula, las cuales fueron monitoreadas desde la naciente hasta la desembocadura, así como las del agua de pozos cercanos al río para determinar los sitios de mayor contaminación, delimitar y cuantificar los contaminantes, determinar zonas críticas y evaluar la respuesta de la biota asociada a la calidad del agua (fitobentos, zoobentos). La calidad del agua del río y de los pozos cercanos también fue evaluada de acuerdo a su uso potencial para consumo, producción agrícola y pecuaria.

El contenido mineral del agua del río Pinula es más pobre en su naciente. Desde esta área, la contaminación del río es producida cuando sus aguas se mezclan con aguas residuales domiciliarias. La contaminación se manifiesta por la presencia de concentraciones anómalas de nutrientes como el Nitrógeno y Fósforo, así como por la presencia de bacterias. Los 250 m³ diarios de agua que fueron registrados en este estudio, y que llegan al embalse ubicado en la cuenca

media del río, incorporan a los sedimentos metales tóxicos como Cromo (Cr) y Mercurio (Hg) con valores de concentración que superan los valores límites establecidos para la protección de la vida acuática de las normas canadienses. Además se incorporan a los sedimentos moléculas orgánicas tóxicas de plaguicidas de uso restringido como son Lindano y DDT. En la cuenca media baja se incorpora al río el desfogue industrial de la zona franca de la z.12 capitalina, el cual aporta iones de Sodio (Na) y Sulfatos (SO_4) lo cual hace que los valores de la conductividad eléctrica, salinidad y sólidos totales disueltos en el agua aumenten significativamente, limitando el uso del río y pozos cercanos, como fuente de agua para irrigación agrícola. Además la calidad del agua de los pozos a partir de la cuenca media evidencia la influencia de la zona agrícola en el manto freático, ya que se incorporan iones como Nitratos (NO_3) y Arsénico (As), limitando su uso para consumo humano.

La influencia de la urbanización está reflejada por la presencia de moléculas tóxicas de hidrocarburos policíclicos aromáticos, detectados en los sedimentos en la cuenca media, con valores de concentración que sobrepasan los límites para la protección de la vida acuática. A partir de este sitio, el agua del río Pinula representa una fuente de contaminantes que podrían generar efectos carcinógenos en la salud en animales de crianza que están en contacto con el agua del río, así como aves que se alimentan de insectos y larvas del río.

En todos los puntos muestreados en el río Pinula se identificaron familias de fitoplancton, fitobentos y macro invertebrados indicadoras de polución orgánica y por nutrientes. El agua del río Pinula representa carga constante de contaminación que se incorpora al sistema de drenaje que confluye en el Lago de Amatitlán.

Este estudio evidencia inexistencia de manejo de las aguas residuales que llega hasta el río mostrándose como consecuencia de la falta de gestión integral con visión de cuenca hídrica de parte de los tres municipios que integran la microcuenca con zonas residenciales, densamente pobladas, agrícolas e industriales. La información publicada con los resultados de este estudio debe

ser aprovechada por las autoridades competentes para la elaboración de un plan de monitoreo y manejo de la microcuenca, enfocada a la mitigación del problema actual de contaminación.

Palabras clave: contaminación, calidad del agua, sedimentos, aguas, domiciliarias, industriales, naciente, desembocadura, pozos, zonas, críticas, biota, aguas residuales, embalse, plaguicidas, metales, hidrocarburos, carcinógenos, fitobentos, zoobentos.

ABSTRACT

The watershed of the Pinula River is a perennial tributary of Villalobos River, which flows into Lake Amatitlán, currently hyper eutrophicated. It covers a part of the municipalities of Santa Catarina Pinula, Guatemala City and Petapa. Pinula River rises in the upper basin of the lake and passes through densely populated areas, receiving on its way domiciliary and industrial raw sewage water and runoff from urban and agricultural areas associated with the south-east of the Valley of Guatemala City. The river shows evident pollution in the color and smell of the water, which demonstrate the status of quality of the river to its confluence with the Villalobos River. During the dry season (January-June) of 2012, there were monitored physico-chemical conditions of water from the river nascent to the river mouth, and there were also monitoring of water wells near the river to determine the sites of major pollution, to delimit contaminants and to quantify them, identifying critical areas and assessing the response of the biota associated with water (phytobenthos, zoobenthos). Thus, determining the physico-chemical difference between water that born in the river nascent and the water that flows out the river mouth, and establishing the causes of deterioration of the water quality for consumption, river water for crop and livestock and water wells near the watershed. Mineral content of water is poorer in the nascent but it receives domiciliary water pollution that is evident for the presence of nutrients such as nitrogen and phosphorus in organic forms and the presence of bacteria. The daily 250m³ of water reaching the reservoir located in the middle basin

incorporated Cr and Hg to the sediments with values that exceed the limits for the protection of aquatic life. It also incorporates toxic organic molecules derived from restricted pesticides use, such as Lindane and DDT. This causes that in the river sediments downstream, pollutants values are a threat to aquatic life. In the lower middle basin, the Pinula River carries 77% of the daily flow, onto which it has been incorporated the industrial vent of capital z.12, which causes that the values of electrical conductivity, salinity and total dissolved solids of water rise significantly, limiting the use of water for agricultural irrigation, by the addition of Na and SO₄ ions. Wells from the middle basin also give evidence of the influence of the agricultural area in the water table, because of the presence of NO₃ and As ions, limiting consumption of the water. The influence of urbanization is shown by toxic molecules such as polycyclic aromatic hydrocarbon (phenanthrene and pyrene), reported in sediments in the basin, with values that exceed the limits for the protection of aquatic biota. After this site, Pinula River water is a source of allochthonous contaminants that could generate chronic carcinogens effects in the health of animals that are in contact with the water of the river, such as cows, goats, horses, domestic animals and birds that feed on insects and larvae in the river. In all analyzed sampling points there were reported phytobenthos and zoobenthos species indicating organic and nutrients pollution. Pinula River water represents constant pollution load which is incorporated into the drainage system that flows into Lake Amatitlán, as a result of the lack of integral management from the three municipalities that integrate the watershed. Through the study results it is evident the lack of wastewater management that reaches the river from densely populated residential areas, agricultural and industrial areas. The information published with the results of this study can serve as base for developing a management and monitoring plan that can be applied to the watershed by the competent authorities, to mitigate the actual pollution problem.

I. INTRODUCCIÓN

Los ríos cumplen una función primordial que es conducir las aguas de una cuenca de drenaje hacia un punto de confluencia con otro cuerpo de agua dulce o el mar. Durante este recorrido el agua de un río cumple una serie de servicios ecosistémicos y puede ser aprovechada sosteniblemente, en dependencia de su calidad, para diversos usos entre los que sobresalen, agropecuarios, recreativos, industriales, pero también los ríos son explotados como canal para derivar aguas crudas de todos los usos antes mencionadas, esto es una causa muy común de contaminación de la mayoría de ríos en el país.

El río Pinula es un tributario de segundo orden y su microcuenca forma parte de la cuenca alta del río Villalobos, el cual desemboca en el Lago de Amatitlán, en condiciones de eutrofización. La microcuenca del río Pinula alcanza los 63 km² y su cauce principal de unos 16 km de longitud atraviesa tres municipios densamente poblados, Santa Catarina Pinula, el municipio de Guatemala, Villa Canales y Petapa. Los principales estresores de la calidad del agua del río Pinula lo constituyen zonas densamente pobladas en los tres municipios mencionados cuyas aguas residuales carecen de tratamiento y manejo adecuado y desembocan en el río de forma cruda.

La microcuenca del río Pinula, de acuerdo a la elevación sobre el nivel del mar está dividida en tres zonas, la cuenca alta o naciente de 1 600 – 1 900 m.s.n.m., la cuenca media (alta y baja) de 1 400 – 1 600 m.s.n.m., y la cuenca baja de 1 200 – 1 400 m.s.n.m. En la cuenca alta y en la cuenca baja del río se desarrollan actividades agrícolas, mientras que en la cuenca media se incorpora un drenaje proveniente de una zona industrial del sur del valle de la ciudad de Guatemala.

La contaminación del río Pinula se evidencia por medio de la coloración de sus aguas, a partir de la cuenca media se ven distintas tonalidades en un solo día

(café, pardo, gris, negro). En la cuenca alta este comportamiento se diferencia ya que las aguas son claras la mayor parte del tiempo, con presencia de espuma y olor.

La geología del lugar está representada por Piroclastos consolidados (cuenca alta y media) y zonas aluviales o sedimentarias (cuenca baja) (Herrera R Isaac, Orozco O Eugenio. 2010). El flujo de agua superficial y subterráneo de la cuenca de drenaje coincide con la geología estructural y direccionamiento de fallas locales. En las áreas urbanizadas una capa confinante de concreto y/o pavimento afectan el ciclo hidrológico pues impiden la infiltración y recarga sub-superficial potencial de agua en el suelo. Desviando la escorrentía en sistemas de alcantarillado público que llegan al río y aportan agua a la corriente principal del río con desechos sólidos y vertidos líquidos que encuentra a su paso.

La biota asociada a los sedimentos del río Pinula, responde con evidente impacto negativo, pues estas corrientes arrastran el sedimento y desplazan a las poblaciones. Estas condiciones no permiten el establecimiento permanente de poblaciones hidrobiológicas. El establecimiento es de tipo estacional (época seca/lluviosa), característico de un sistema lótico. En la temporada seca no se manifiestan estas corrientes de arrastre, y la presión a la que responde el establecimiento estacional de la biota asociada al río está directamente influenciada por la calidad del agua del río (Herrera A.,2012).

En la zona de estudio se localizan dos acuíferos, uno superior (hasta 200 m) y uno inferior (hasta de 300 m) (Herrera R Isaac, Orozco O Eugenio. 2010). El acuífero superior está siendo más explotado actualmente por medio de pozos municipales y privados perforados que abastecen la población de los tres municipios. Este acuífero podría estar asociado al río sobre todo en la cuenca baja, cuya formación sedimentaria tiene mayor potencial de infiltración de agua del río durante la estación lluviosa.

A través de infiltración secundaria, la calidad del agua de los pozos cercanos al río Pinula podría ser influida por el sistema de fallas que dan forma y dirección al río.

La presencia de contaminación en el agua del río se valoró, utilizando como variables de estudio aquellos parámetros que no tienen posible causa y origen natural de acuerdo a las características geológicas, tales como los iones Na^{++} , Cl^- , $\text{SO}_4^{=}$, NO_3^- , NH_4^+ . Considerando la capacidad de auto depuración de un sistema de corriente perenne, fue necesario realizar un monitoreo que dio lugar a información de campo asociada a los posibles contaminantes presentes, y esta acción pudo ser sistemáticamente organizada y realizada a manera de entender el comportamiento estacional del agua del río y las causas de su variación de calidad físico-química.

El río Pinula recibe descargas industriales y agrícolas que contribuyen a la manifestación de contaminantes que fueron identificados en muestras de agua y sedimentos durante la época seca del año 2012. Los resultados fueron analizados usando como criterio guía el valor de las normas canadienses de la calidad del agua y sedimentos para la protección de la vida acuática, además se tomaron muestras de agua de pozos cercanos al río, evaluando su calidad con el criterio de las normas guatemaltecas para aguas de consumo humano.

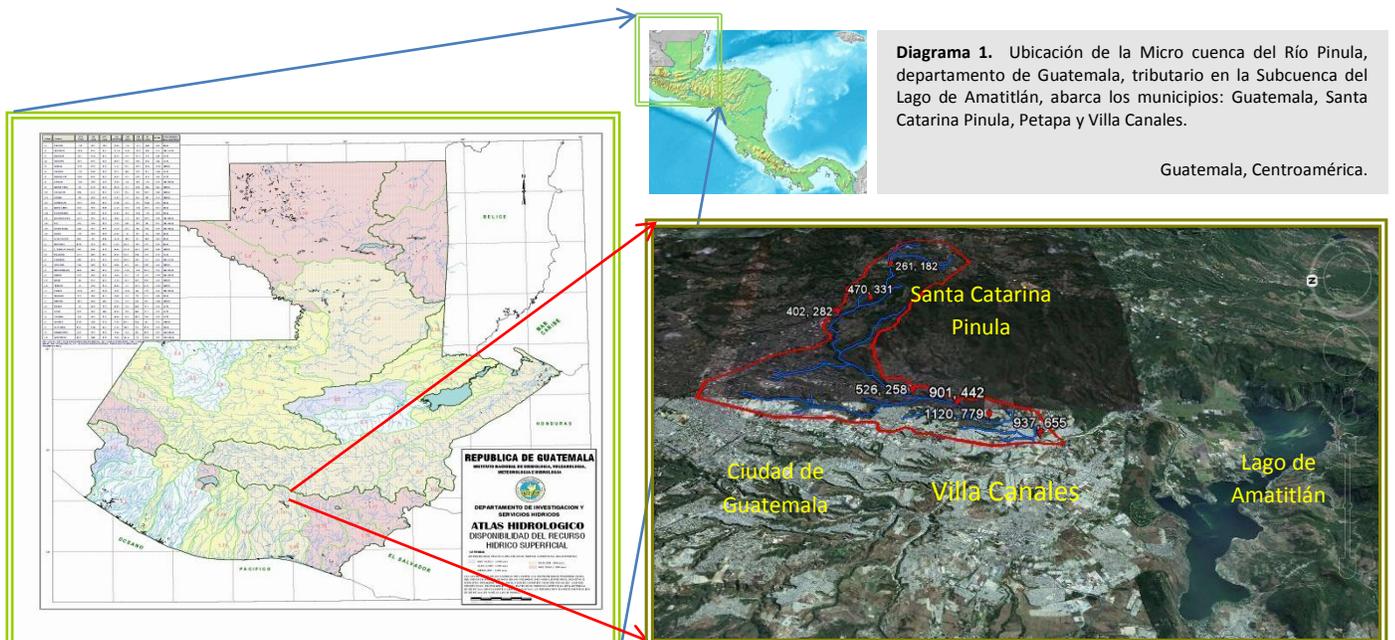
El estudio que a continuación se presenta está enfocado a señalar las causas de la contaminación del agua del río Pinula y la influencia que pueda tener sobre la calidad del agua de los pozos cercanos y la respuesta de la biota del río a la contaminación de sus aguas. Se interpretaron los resultados de los parámetros de calidad de las aguas del río medidos en campo durante 6 meses de monitoreo (de enero a junio 2012) y se analizaron los resultados de los parámetros de calidad de agua medidos en laboratorios especializados del Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua (CIRA-UNAN).

La información generada por este estudio es una herramienta para futuros estudios y un instrumento potencial para la toma de decisiones a nivel municipal, para el manejo adecuado de las aguas residuales enfocado a la reducción de la contaminación del río Pinula, el río Villa Lobos y el Lago de Amatitlán, así como la reducción de riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

II. ÁREA DE ESTUDIO

La Microcuenca del río Pinula se inscribe en la parte alta de la cuenca del Lago de Amatitlán sobre la vertiente del Océano Pacífico de Guatemala (diagrama 1). En esta microcuenca hidrográfica se ubican los Municipios: Santa Catarina Pinula, Guatemala, Villa Canales y San Miguel Petapa. La población total asociada a la microcuenca suma 342.739 personas. Siendo el municipio de Guatemala el que presenta mayor población, 203.388 habitantes y el municipio de Santa Catarina Pinula el de menor población con 38.109 personas (MARN, 2011).

Las municipalidades de San Miguel Petapa, Santa Catarina Pinula son los entes reguladores de los sistemas de abastecimiento público de agua potable y saneamiento. Estos servicios son cubiertos en el municipio de Guatemala, por medio de la Empresa Municipal de Agua (EMPAGUA). En estos municipios no hay cobertura total de sistemas de tratamiento de aguas pluviales y servidas. Actualmente es la Autoridad para el Manejo Sostenible del Lago de Amatitlán AMSA quien vigila la calidad de agua que drena el río Pinula hacia el río Villalobos, que desemboca en el lago de Amatitlán y recibe agua de tipo residual, industrial y doméstica (Herrera A., 2012).



La distribución de los municipios en la microcuenca del Río Pinula está bien definida territorialmente, es así que el municipio de Santa Catarina Pinula se ubica en la parte alta o nacimiento del río Pinula (1 900 m.s.n.m), el municipio de Guatemala en la parte media alta (1 600 – 1 750 m.s.n.m) y media baja (1 350 – 1 600 m.s.n.m) y el municipio de San Miguel Petapa y Villa Canales en la parte baja (1 250 m.s.n.m). En la parte media-baja, el río Pinula recibe descargas industriales que cambian la coloración del río varias veces durante un mismo día. Y durante todo su recorrido, incluso desde la nacimiento, el río recibe descarga de aguas domiciliarias; con cargas orgánicas y grises. El río Pinula desemboca en las aguas del río Villalobos en el municipio de San Miguel Petapa (Herrera A., 2012).

En la parte media alta de la microcuenca del río Pinula se localiza el sistema de tratamiento de agua El Cambray que es el más antiguo de la ciudad de Guatemala y distribuye agua para uso doméstico en zonas urbanas cercanas. Actualmente consta de:

- a) Presa de captación del río Pinula
- b) Estación de bombeo Hincapié, que incluye una presa de captación, un tanque de alimentación, desarenador y 4 unidades de bombeo, 2 de 200 Hp y 2 de 250 Hp.

En la figura 1.1 se muestra la configuración topográfica de la microcuenca del río Pinula, se han señalado tres círculos que indican la ubicación topográfica.

Figura 1.1 Modelo topográfico de la Microcuenca del río Pinula (a. Cuenca alta, b. Cuenca media y c. Cuenca baja)

Características Pluviales de la Microcuenca del Río Pinula

Cerca de la microcuenca del río Pinula se ubican 3 estaciones meteorológicas; SJPinula, GuateSur y Compuertas (figura 1.2), estas dos últimas, administradas por el Instituto Nacional de Electrificaciones INDE. Dentro de la microcuenca se encuentra la estación meteorológica del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH. No se reporta ninguna estación activa que cubra la parte alta de la microcuenca, se asume que los datos climáticos tomados en la estación INSIVUMEH, representan la parte alta y media alta de la microcuenca, abarcando los municipios de Santa

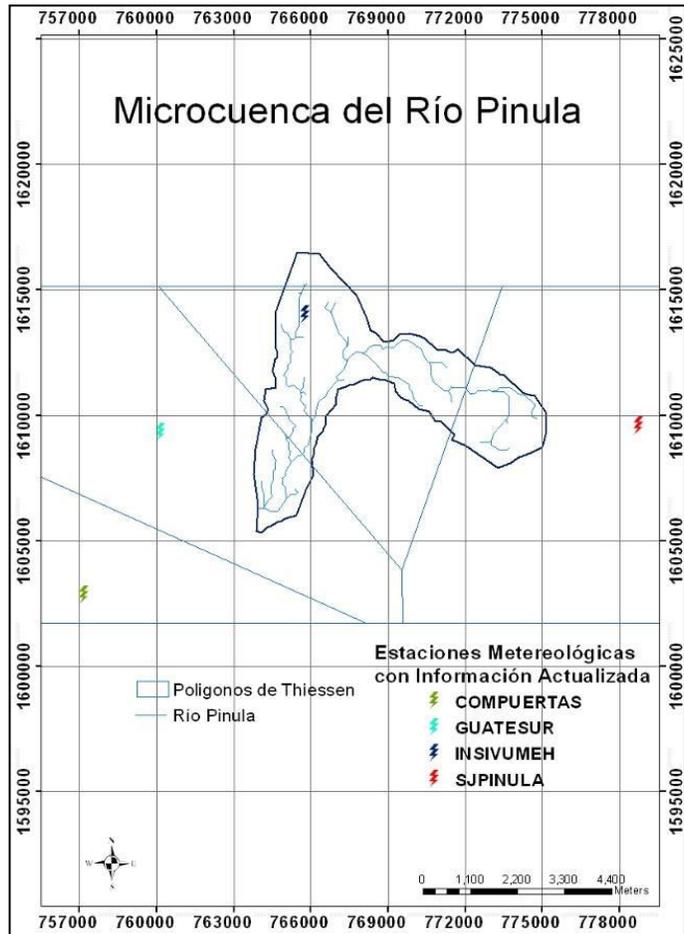


Figura 2.1 Polígonos Thiessen, ubicación de las estaciones meteorológicas sobre el área de estudio. 2011.

Catarina Pinula y Guatemala. La estación meteorológica Guatemala Sur, abarca la zona media baja y la zona baja de la microcuenca. La estación INSIVUMEH anualmente reporta un promedio de precipitación 1.275 mm., basados en la medición histórica de 20 años anteriores al 2011. Los años lluviosos han variado de 1.500 – 2.000 mm. El año 2011 presentó un total de 1.659,5 mm., ubicándose dentro de los cinco años más lluviosos, con en el tercer puesto. En dicho año, el 48% de la precipitación ocurrió en los meses de agosto y octubre, mientras que 49% se repartió en cinco meses (mayo, junio, julio, septiembre y noviembre) y en la época seca (diciembre – abril) la precipitación representó el 3% del total.

En la estación Guatemala Sur¹, se registró en el año hidrológico Mayo 2010 - Abril 2011 precipitación promedio de 2 076 mm. Siendo los meses más lluviosos mayo y julio de 2011 Mientras en la estación INSIVUMEH, el promedio para el mismo año hídrico Mayo 2010 - Abril 2011 fue de 2 004 mm. Siendo los meses más lluviosos, el mes de mayo y agosto del 2010 inclusive, valores mayores a los mismos meses en 2011. La temperatura anual promedio en la estación INSIVUMEH, es de 19,7 °C, la máxima 25,6 °C y la mínima 15,4 °C. Mientras que en la estación Guatemala Sur la temperatura anual promedio es de 21,76 °C, la máxima es de 30.1 y la mínima es de 12 C°. En el año 2012 se reportaron lluvias en la estación INSIVIMUMEH con promedio de 1 079 mm, y un acumulado de lluvia de 190,3 mm para los meses de enero a mayo, cuando fueron tomadas las muestras.

Características Hidrográficas de la Microcuenca del Río Pinula

La micro cuenca del río Pinula presenta índice de compacidad $Kg = 1,84$ que indica una forma alargada, la topografía del área se caracteriza por la presencia de hondonadas, cañones y barrancos. La pendiente media de la micro cuenca es de 0,25. La altura máxima y la altura mínima está sobre la curva de 1.900 m.s.n.m y sobre los 1.150 m.s.n.m. respectivamente.

La microcuenca presenta densidad de drenaje $Dd = 0,323$ con un orden máximo de corriente de 2. La relación de longitud de corrientes $Rl = 0,374$ muestra que la única corriente de orden 2, mide cerca del 40% de la longitud del resto de tributarios de orden 1.

La pendiente va de moderada a fuerte (21 - 41%), se han reportado inundaciones y crecidas repentinas producto de precipitaciones, esto pudiera estar asociado a trasvases pluviales de zonas de baja infiltración (asfalto y obras grises) generando crecidas repentinas (Herrera A., 2012). La micro cuenca presenta un factor de forma reducido $Kf = 0,45$, lo cual muestra su buena capacidad de drenaje ya que el río no presenta alta sinuosidad (tabla 2.1).

¹ Datos proporcionados por el Instituto Nacional de Electrificaciones INDE, Guatemala 2012.

Tabla 2.1. Morfometría de la Micro Cuenca del Río Pinula

VARIABLE	VALOR
Longitud Micro Cuenca	14,2 km
Longitud cauce Río Pinula	15,83 km
Pendiente media Microcuenca	25 - 41%
Densidad de Drenaje	0,323
Relación RI	0,374
Sinuosidad	1,12
Área Microcuenca	63,74 km ²
Índice Kg	1,84
Factor de Forma Ff	0,49
Long. Capp	41,1 km
Ancho medio	5,52 km
Perímetro	39,96 km

Fuente: Elaboración propia, con base al mapa topográfico del IGN.

La figura 2.2 presenta los polígonos de frecuencia que muestran que la mayoría del área de la microcuenca está contenida entre 1 400 – 1 600 m.s.n.m. De acuerdo con la clasificación de Nanía S., 2002, al graficar el comportamiento topográfico de la microcuenca, al Río Pinula le corresponde una forma de curva de un río maduro (figura 2.3).

Como lo afirma Ramirez L. 1996, la zona sur-este del valle de la ciudad está caracterizada por la existencia de cañones profundos en la planicie constituida por cenizas y tobas volcánicas, formando paredes de hasta 140 m de altura, representativas de las redes dendríticas que alimentan el río Pinula.

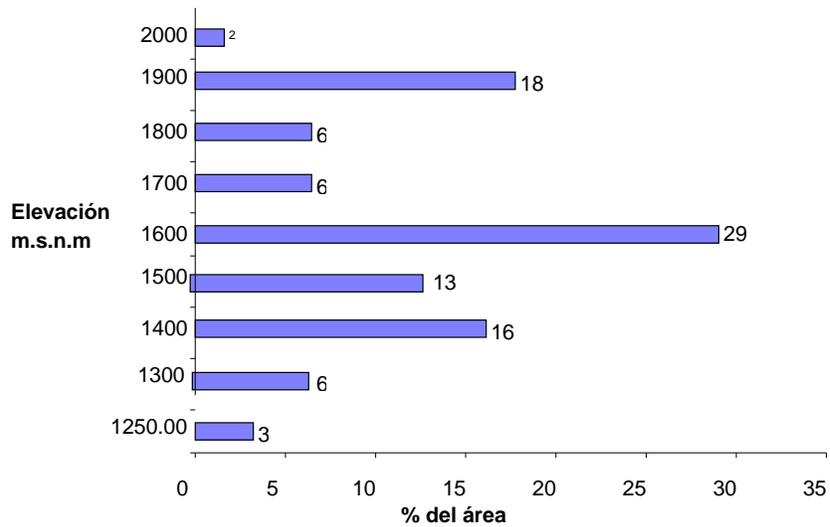


Figura 2.2 Polígonos de Frecuencia (Áreas del relieve) de la micro cuenca del Río Pinula.
Fuente: Elaboración propia, con base al mapa topográfico del IGN.

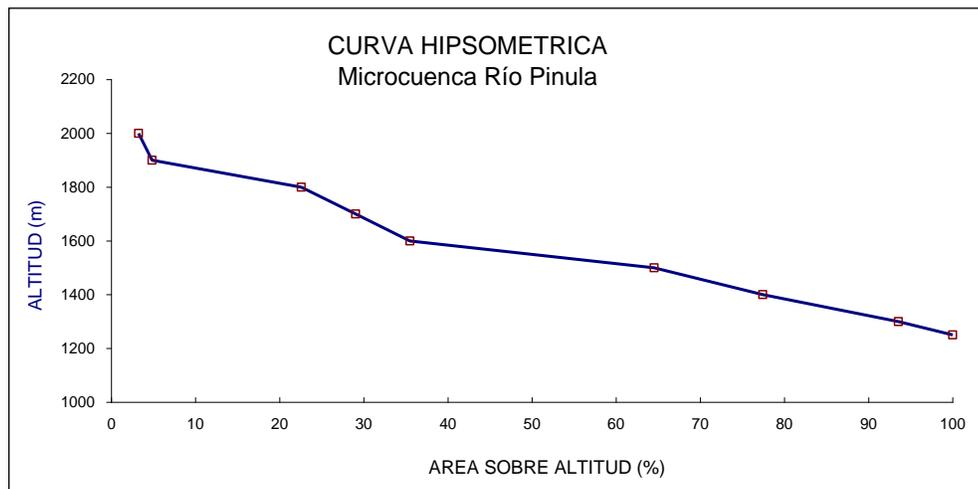


Figura 2.3 Curva Hipsométrica Microcuenca del río Pinula.
Fuente: Elaboración propia, con base al mapa topográfico del IGN.

Características Geológicas del área de estudio

La microcuenca del Río Pinula está compuesta por dos tipos de formaciones geológicas (Figura 2.4), siendo en la parte alta representada por rocas Terciarias (Tv) y la parte baja por rocas Cuaternarias (Qp). La parte alta la representan rocas volcánicas sin dividir, predominan rocas del Mio-Plioceno, incluye tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos. En la parte baja es predominante rellenos y cubiertas gruesas de cenizas pómez de origen diverso (IGN, mapa geológico 1:250.000).

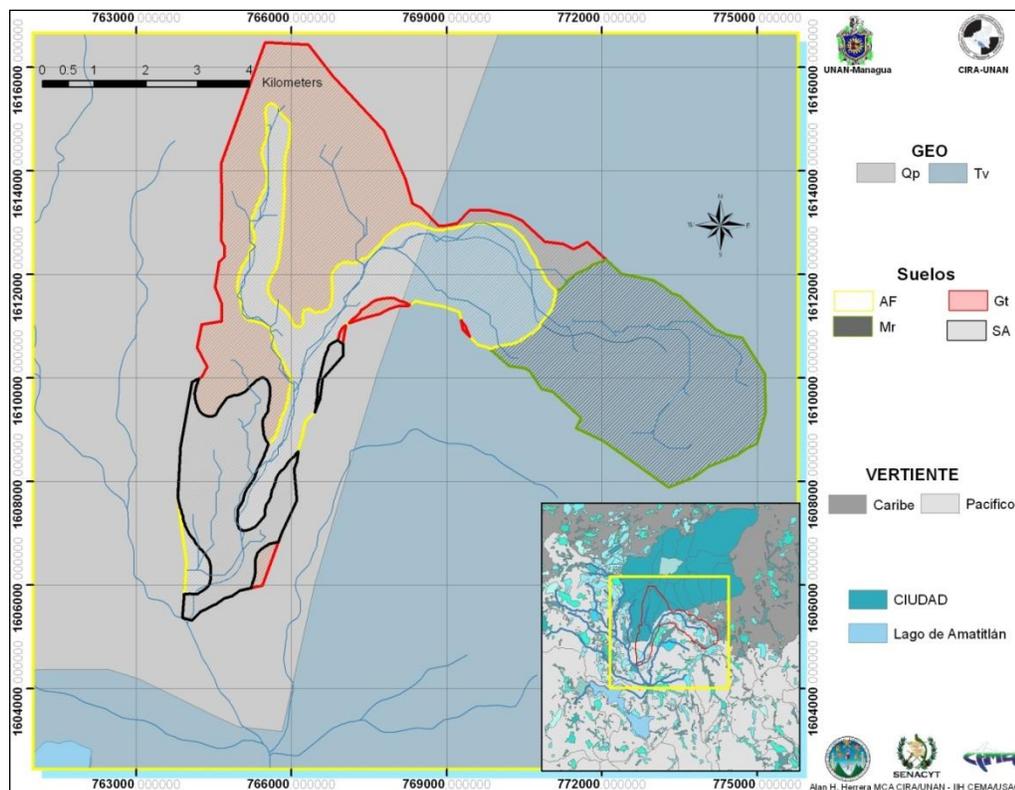


Figura 2.4 Geología y Suelos dentro de la Microcuenca del Río Pinula.

(Fuente: Instituto Guatemalteco de Geografía IGN, mapa geológico nacional).

De acuerdo a la clasificación realizada por Tobías H. y Lira E. 2002, los suelos que corta la cuenca hidrográfica del río Pinula se clasifican de acuerdo a Series como: Áreas Fragosas (AF), Morán (Mr), Guatemala (Gt) y Suelos Aluviales (SA).

Conforme a su taxonomía, los suelos de la microcuenca se identifican como se muestra en el la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Interpretación de la taxonomía del suelo dentro de la Microcuenca del río Pinula.

Serie	Taxonomía del Suelo	Orden	Características	Ubicación en la Microcuenca	Código
AF	Orthents	Entisol	Suelos con riesgo de erosión y/o deposición de materiales minerales y orgánicos y/o exceso de agua. Situados bajo zonas muy accidentadas en la parte alta y media de la microcuenca y en partes planas en el desfogue. Suelos poco profundos y áreas de pendiente baja, producto de deposición de material.	Cauce del río Pinula, desde la parte alta hasta la parte baja	Eo
Mr	Ustands-Ustalfs	Andisol – Alfisol	Suelos con déficit de humedad, pasan secos entre 90 a 180 d.a ⁻¹ presentes en la parte alta de la microcuenca	Parte Alta de la Microcuenca	Ds – Ls
Gt	Ustalfs	Alfisol	Suelos con déficit de humedad, pasan secos entre 90 a 180 d.a ⁻¹ presentes en la parte media de la microcuenca	Parte Media de la Microcuenca	Ls
SA	Ustolls – Fluvents – Ustepts- Psamments- Aqueuts- Fluvents	Entisol Inceptisol Mollisol	Los suelos Entisoles se ven principalmente en las laderas de los barrancos que están presentes en la parte media de la microcuenca, pueden tener una zona subterránea superficial con presencia de agua. Los suelos Psamments se ven principalmente en las zonas que corresponden a fincas agropecuarias en la parte media, con cultivos de frutales maíz y café. Los Fluvents representan la zona litoral del río Pinula que puede ser inundable en la época de lluvia.	Parte Baja de la Microcuenca	Ep – Eq – Ef

Fuente: Adaptación de datos publicados por Tobías H. y Lira E. 2002.

Conforme a la clasificación hecha por USDA 10ª Edición, (2006) la Microcuenca del río Pinula está dividida en tres zonas de acuerdo a la capacidad de uso (tabla 2.3) las cuales se describen a continuación:

Tabla 2.3 Interpretación de los suelos dentro de la Microcuenca del río Pinula de acuerdo a la capacidad de uso.

Clase de Capacidad	Capacidad	Aptitud de uso (IARNA, 2003)	Ubicación en la Microcuenca
III	Cultivos Agrícolas	Agricultura con limitaciones	Alta y media alta
VI	Cultivos Agrícolas no arables	Pecuuario y Forestal	Media baja y baja
VII	Cultivos no Agrícolas	Forestal	Alta y media alta

Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación MAGA, 2007.

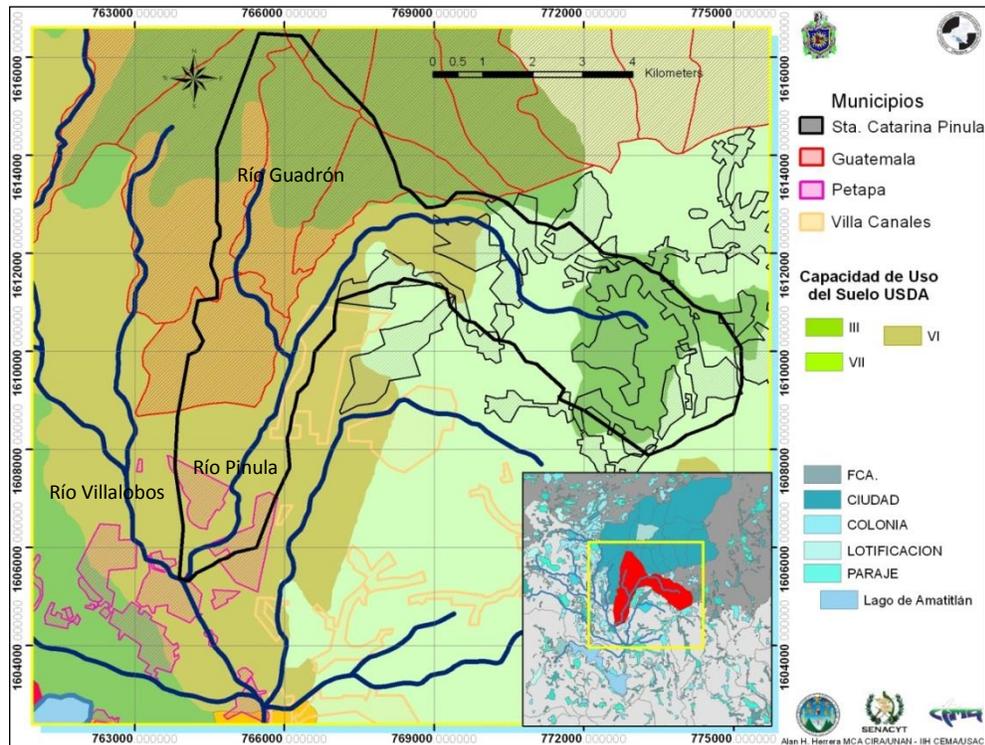


Figura 2.5 Capacidad de uso del suelo en la Microcuenca del río Pinula según USDA.
(Fuente: Mapa de uso del suelo, MAGA 1:250,000)

Hidrogeología

De acuerdo a lo que señala el estudio de Herrera y Orozco (2010) en el valle central del municipio de Guatemala se destacan dos tipos de formaciones: piroclastos y aluviones (fig. 1.1 b y c, respectivamente) que dan lugar a dos acuíferos, uno superior y otro inferior (anexo 1).

El acuífero superior es de origen aluvial y el inferior está formado por lavas volcánicas fracturadas que se extienden a más de 400 m de profundidad con un espesor superior a los 200 m. El acuífero en lavas volcánicas tiene mejores características hidrogeológicas (Transmisividades del orden de miles de $\text{m}^2.\text{d}^{-1}$). El acuífero explotado a través de pozos produce un total de 1 675 l.s^{-1} y presenta un descenso en los niveles de agua subterránea que han alcanzado valores de hasta 13 m en más de 20 años de explotación (Herrera y Orozco, 2010).

El acuífero superior alimenta a la mayor parte de pozos municipales de la zona. Tiene una profundidad hasta de 300m. Los piroclastos representan el 65% del área de la microcuenca Pinula. Los autores reportaron transmisividades (T) del orden $50 \leq T \leq 750 \text{ m}^2.\text{d}^{-1}$ en los piroclastos y del orden de $150 \leq T \leq 2\ 500$ en los aluviones (Herrera y Orozco, 2010).

III. ANTECEDENTES HIDROQUÍMICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

López Chuc F, (1999) reportó que la calidad física del agua de lluvia en una zona de estudio que corresponde a la parte media de la microcuenca del río Pinula, está dentro de los límites aceptables para agua potable. No se detectó la presencia de sustancias tóxicas (Cd, Cr y Pb), ni de contaminación bacteriológica. Por lo que se puede concluir que el agua de lluvia captada bajo las condiciones del estudio y las fechas indicadas puede utilizarse para recarga del acuífero. Sin embargo en el mismo estudio señala que las condiciones no son las mismas en la calidad del agua de escorrentía en los parámetros de Color, Turbidez y contenido de bacterias.

Rodas N., (2008) incluye un análisis quimiométrico de calidad del agua que toma en cuenta los parámetros medidos en dos puntos del río Pinula, combinados con otros tributarios del río Villalobos, completando un análisis de una base de datos de 6 años, sus resultados muestran que a excepción del contenido de bacterias, los demás parámetros de calidad del agua cumplen con las normas nacionales para aguas residuales y presentan alta variabilidad respecto a la época de muestreo, mostrando una tendencia de reducción de las grasas y aceites con el paso de años húmedos y el aumento de Cr, Cd y Pb, por escorrentía.

Por medio de la medición de los parámetros como nitrógeno, fósforo, demanda química y bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad, pH, oxígeno disuelto así como la medición del caudal en jornadas diurnas, se determinó que en horario de 9:00 a las 15:00 horas aumenta la carga de contaminación en un punto ubicado en la entrada del río Villalobos al Lago de Amatitlán. En horario nocturno disminuyen considerablemente los contaminantes reportando un caudal promedio en época seca de $0,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y de $4,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en época lluviosa (García G. H., 2002).

La Autoridad para el Manejo Sostenible del Lago de Amatitlán cuentan con una base de datos que data del 2004, en la que se expresa la calidad del agua durante varios meses de cada año hasta el 2011, dicha información ha sido recopilada en dos sitios, uno antes de la unión del principal tributario (Río Guadrón) y otro sitio luego de la confluencia del río Pinula y el Guadrón. En promedio hasta el 2011 la relación DBO_5 / DQO presenta un valor de 0,51; un valor máximo de 0,77 en febrero del 2009 (época seca) y un mínimo de 0,31 en mayo del 2010 mes más lluvioso del año. Se puede considerar de acuerdo a la caracterización de aguas residuales propuesta por Crites R. y Tchobanoglus G. 2000 que las condiciones van desde agua no tratada hasta aguas después de sedimentación primaria. El promedio del valor de la DBO_5 en los 7 años de monitoreo es de $265,5 \text{ mg.l}^{-1}$ presentando valores máximos de 650 mg.l^{-1} (AMSA, 2009) y mínimos de 70 mg.l^{-1} (AMSA, 2010). Dichos valores no rebasan el valor (700 mg.l^{-1}) que indica para antes del 2015 la Norma Guatemalteca para Aguas Residuales y Disposición de Lodos (AG 236-2006) pero están por encima en el caso del promedio y el máximo para la proyección de los valores de la norma para la reducción de DBO al año 2015 (250 mg.l^{-1}), de acuerdo al artículo 24 de la norma. De acuerdo a la clasificación propuesta por Margalef (1983), tomado de Ramírez G. y Viña V. 2003. el agua presenta condiciones de Polisaprobiedad y Eusaprobiedad que hacen referencia a ambientes contaminados y anóxicos.

En el caso del sitio antes de la confluencia del río Guadrón, el promedio de la relación DBO_5 / DQO es de 0,32 presentando un máximo de 0,60 y mínimo de 0,05. Presentando valores promedio de DBO_5 de $79,8 \text{ mg.l}^{-1}$, menor a la proyección de la norma Guatemalteca para Aguas Residuales y Disposición de Lodos (AG 236-2006) en su proyección para el 2015. Valores máximos (época seca) de 200 mg.l^{-1} (AMSA, 2004) y mínimos (época lluviosa) de 12 mg.l^{-1} (AMSA, 2008). En general se puede contrastar la carga de contaminación orgánica entre los dos sitios de monitoreo, siendo mucho más alta en la confluencia de los dos ríos que en el sitio antes de la confluencia.

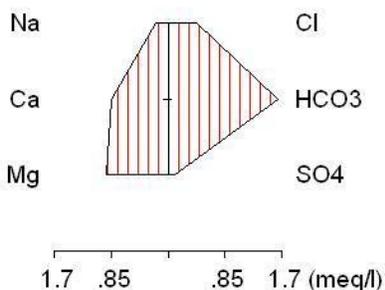
Los valores de los Sólidos suspendidos se pueden relacionar de acuerdo a la estación en que fueron tomados los datos, siendo los meses secos (febrero – abril del 2006) que presentan valores promedio de 731 mg.l^{-1} , muy por encima de la norma guatemalteca (AG 236-2006) que es de 300 mg.l^{-1} y se proyecta en 275 mg.l^{-1} para el año 2015. En la época seca desde diciembre del 2009 hasta abril del 2010 el promedio se redujo y fue de $224,3 \text{ mg.l}^{-1}$ y en la época lluviosa del año 2010 fue de $144,1 \text{ mg.l}^{-1}$, por debajo de la norma.

El valor del potencial de óxido reducción se diferencia entre ambos sitios de monitoreo, reportando un promedio de $Eh = -54,9 \text{ mV}$ en el punto antes de la confluencia y en el punto después de la confluencia de $Eh = -75,9 \text{ mV}$. Estos valores son relacionables con los valores de oxígeno disuelto (OD) para ambos puntos, de $4,6 \text{ mg.l}^{-1}$ de OD y $2,24 \text{ mg.l}^{-1}$ de OD respectivamente. Estas condiciones se corresponden con los resultados de los valores de DBO_5 y DQO en ambos sitios respectivamente.

El rango de variación de pH es mayor en el punto después de la confluencia con el río Guadrón, con valores que van desde pH de 6,96 (AMSA, 01/2005) a pH de 10,25 (AMSA, 2/2009). Mientras que en el sitio anterior a la confluencia reporta valores que van de pH de 7,15 (AMSA, 2/2005) a pH de 9,07 (AMSA, 7/2008).

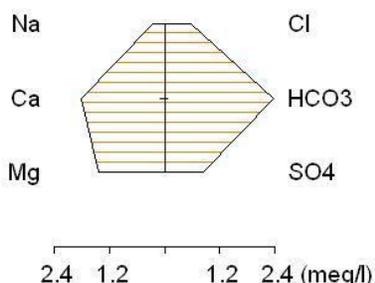
La calidad del agua de pozos municipales ubicados dentro del Municipio de Guatemala son monitoreados anualmente por las autoridades municipales. Se tuvo acceso a la información de 7 pozos municipales y la información de los parámetros de calidad de agua reportados en el año 2011. La distribución de los pozos en la Microcuenca es de 1 pozo en la parte media alta y 3 pozos de la parte media baja y 1 pozo en la parte media de la cuenca del Río Villalobos fuera de la microcuenca del río Pinula. De acuerdo a su distribución y el tipo hidroquímico, el agua de los pozos municipales consultados se presenta en el siguiente diagrama.

Pozo Las Américas



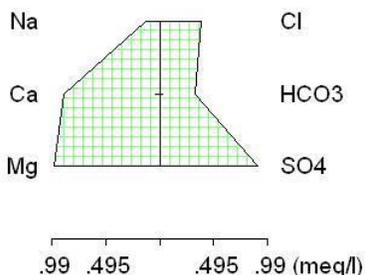
Presenta carga hidráulica sobre los 1.300 m.s.n.m. Las rejillas están ubicadas a una profundidad aproximada de 22 metros, hasta una profundidad de 65 metros. Las aguas son poco mineralizadas y del tipo Bicarbonatadas Magnésico – Cálcidas. El agua pertenece al acuífero superior y es de tipo reciente o agua joven. De acuerdo a las normas guatemaltecas del agua potable, cumple con las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas.

Pozo Justo3 grifo po



Presenta carga hidráulica sobre los 1.200 m.s.n.m. Opera durante 16 horas diarias. El contenido mineral es mayor, pero las aguas son de tipo Bicarbonatadas Cálculo-Magnésicas Sulfatadas. Aguas de carácter más antiguo y con dureza ($130 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) por encima del Límite Máximo Aceptable según las normas guatemaltecas ($100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, AG 236-2006). De acuerdo a la clasificación de aguas para riego, se presentan como aguas de tipo C2-S1, aguas aptas para riego a suelos con buenas condiciones de lavado. Es posible que el pozo reciba aporte de aguas sulfatadas más profundas, el pozo se ubica en el acuífero superior en una zona de fractura que coincide con la falla del río Pinula.

Pozo Villalobos



Presenta carga hidráulica sobre los 1.220 m.s.n.m. Opera 8 horas diarias en promedio. Son aguas Sulfatadas Magnésico Cálcidas Cloruradas. El nivel de la rejilla mide desde 200 – 300 metros de profundidad. Se presentan como aguas más antiguas que pueden estar alimentadas por el acuífero inferior, debido a la profundidad del pozo. Todos los parámetros se encuentran bajo el Límite Máximo Aceptable, de acuerdo a las normas guatemaltecas para agua potable (35 UPC, AG 236-2006).

De acuerdo a la clasificación FAO, 1987 para aguas de riego, los tres pozos presentan valores dentro de los rangos normales. De acuerdo al índice de saturación el agua de los tres pozos se presentan como aguas corrosivas de acuerdo a la clasificación propuesta por Trabarini M. en el año 2011².

² (Tabarini M., 2011).

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Caracterización del Problema

El deterioro de la Calidad del Agua del Río Pinula es evidente desde de la cuenca media hasta la confluencia con el Río Villalobos. El olor y el color del agua del río Pinula evidencian la presencia de contaminación de diversas fuentes ya que este río eventualmente muestra distintas tonalidades en pocas horas. En época lluviosa principalmente sus aguas se muestran turbias por efectos erosivos y de arrastre.

Los contaminantes presentes en el agua del río Pinula, pueden ser representativos de la industria textil, el arrastre de la escorrentía urbana que puede contener aguas crudas de pequeñas industrias de alimentos, bebidas, gasolineras, hoteles, restaurantes, pequeños comercios, entre otros, se encuentra dentro de su cuenca de drenaje, un aeropuerto internacional, en la cuenca baja recibe la influencia de agricultura. En la mayoría de los casos, los desagües de las colonias y zonas capitalinas no cuenta con tratamiento de sus aguas residuales aportando de forma constante aguas crudas a la corriente del río.

Delimitación del Problema

La cuenca del Río Pinula nace en la parte sur-este de la ciudad de Guatemala, a una elevación topográfica sobre los 2 000 m.s.n.m.

Desde la cuenca alta, el río muestra en su recorrido por zonas sub-urbanas y urbanas desagües de sus desechos domiciliarios sin tratamiento directamente hacia las aguas del río.

La parte baja de la microcuenca cuenta con terrenos actualmente de uso agropecuario que son vulnerables a la contaminación del río; debido a eventuales crecidas e inundación. A partir de este punto, el agua del río deja de

ser útil para la agricultura, la ganadería o cualquier otro uso, y podría poner en riesgo la calidad del agua de los pozos cercanos al río. El río Pinula constituye un canal contribuyente de constante aporte de contaminantes dentro de la cuenca del Lago de Amatitlán.

Formulación del Problema

Pregunta de Investigación (Rectora)

- ¿Cuál es la dinámica de variación que conlleva la calidad del agua y los recursos hidrobiológicos del río Pinula en su cauce, sus efectos y causas dentro de la microcuenca?
 - *Dinámica de variación = Cuánto, cómo, dónde y porqué se contamina y se pierde la buena calidad del agua.*

Preguntas Específicas

- ¿Cómo varía la calidad de los recursos durante el recorrido del río dentro de la micro-cuenca, antes de confluir con el río Villa Lobos?
- ¿Dónde se ubican los puntos de máxima variación de la calidad de agua y cuál es el motivo asociado a dicha variación?
- ¿Cuáles es la respuesta de la biota a la contaminación del río?
- ¿Qué medidas de mitigación y ordenamiento serían prioritarias para reducir el problema actual y acercarse a la solución?

V. Objetivos

Objetivo General

Determinar las causas de contaminación del agua en el recorrido del río Pinula hacia el río Villalobos, evaluando la respuesta del fitoplancton, fitobentos y macroinvertebrados acuáticos del bentos, a la contaminación del agua del río y determinar si esta, causa efectos negativos en la calidad de las aguas de los pozos cercanos al río.

Objetivo Específicos

- Conocer los valores máximos y mínimos de las concentraciones de los contaminantes (libres y fijados biológicamente y al sedimento), a lo largo del cauce del río Pinula.
- Identificar los puntos críticos de contaminación en el río Pinula y pozos cercanos así como las posibles causas de contaminación.
- Indagar los impactos ecológicos (abundancia/diversidad) sobre organismos bióticos indicadores de la calidad del agua del río a lo largo de su cauce.
- Proponer medidas de gestión integral en el manejo de la micro-cuenca y en el tratamiento del agua a las autoridades municipales.

VI Marco Teórico

Marco Conceptual

De acuerdo al enfoque de “río continuo” introducido por Vannote et al. (1980) se considera en el presente estudio, la variación natural de las condiciones tróficas del agua a medida que se baja de la parte alta o naciente del río hacia la zona media y baja de la cuenca de drenaje. También se presenta la relación de la abundancia-distribución de especies de Macro Invertebrados Acuáticos y Fito bentos, con la calidad del agua del río Pinula, que presenta alteraciones debido a la entrada de nutrientes (N:P) y polución orgánica, representada por la demanda de oxígeno.

La metodología para determinar la calidad del agua de acuerdo a parámetros medidos en campo, concuerda con la del Centro para la Investigación de los Recursos Acuáticos CIRA/UNAN. El punto de vista o criterio desde el cual se determinó la calidad del agua analizada en laboratorios surge de acuerdo a las normas establecidas para el agua potable y el agua para riego, según las normas utilizadas como referencia en la región las cuales son: Normas CAPRE, Normas de la EPA-OMS, para Guatemala; la Norma para la calidad del agua COGUANOR y el Reglamento de Descarga de Aguas Residuales y Disposición de Lodos, de otras regiones las Normas de la Comunidad Económica Europea, Normas Canadienses para la calidad del agua y sedimentos para la protección de la fauna y flora acuática de Canadá.

Causas del Deterioro de la Calidad del Agua (Enfoque de río continuo)

La naturaleza fisicoquímica de las aguas de una cuenca de drenaje (río) y su productividad biológica está en función de la naturaleza de sus suelos, el uso y su estado de conservación (G. Roldán, 1992). Vannote et al. (1980) Introducen el concepto de “río continuo” refiriéndose a los cambios que suceden en las

comunidades bióticas aguas abajo y cómo este cambio se nota a medida que se avanza desde la naciente hasta la desembocadura de un río, naturalmente y por definición, se esperaría que la calidad fisicoquímica del agua en la parte alta de la microcuenca o naciente sea menos alterada, con aguas oxigenadas, claras, pobres en nutrientes y de baja conductividad, muy baja productividad primaria, contenido de materia orgánica en dependencia del material alóctono que cae de los árboles y es arrastrado por escorrentía. A medida que el río baja por la microcuenca, la temperatura, la turbidez, la cantidad de nutrientes y la conductividad aumentan, pero la productividad primaria es aún baja. Teóricamente, en la parte baja de la cuenca es donde se acumula biomasa, pues las condiciones son más estables y hay más disposición de materia orgánica, la turbidez y la conductividad pueden ser mucho más elevadas en relación a la naciente.

Condiciones Químico - Físicas de las Aguas

A continuación se describen las características de los parámetros que son medidos directamente en un cuerpo de agua y que deben ser interpretados como una imagen instantánea de la cualidad químico – física que puede dar un indicio de la calidad del agua promedio, si se cuenta con registro de mediciones en determinado lugar.

Temperatura

La temperatura del agua constituye un factor de mucha importancia para la dinámica química y biótica del medio. En un río es normal encontrar variaciones naturales que están en dependencia de la elevación topográfica y la ubicación en el cauce del río. Las variaciones bruscas y altas de temperatura en un río se pueden asociar a las industrias establecidas en su cuenca y que utilizan el agua del río como un fluido refrigerante y luego lo desfogan en el drenaje natural sin tratamiento, pueden ser industrias textiles, eléctricas, químicas, metalúrgicas, entre otras, que no tengan control adecuado de sus efluentes.

Las propiedades del agua que pueden ser afectadas por un cambio en la temperatura son: la densidad y viscosidad; la tensión de vapor que afecta la evaporación; la solubilidad de gases como el Oxígeno; la velocidad de reacciones químicas y bioquímicas como la oxidación de sustancias contaminantes como el Nitrógeno Amoniacal NH_4 y Nitritos NO_2 . La reacción de oxidación se promueve con el aumento de temperatura y con ello la disminución en la disposición natural del oxígeno disuelto (R. Brémond, C. Perrodon, 1 979).

Oxígeno Disuelto

En un río con las características de drenaje del río Pinula, característico por la corriente permanente en todo su cauce debido a la pendiente topográfica. La fuente principal de Oxígeno disuelto en el agua lo constituye la difusión por medio de la corriente, el choque con rocas y caídas de agua y el intercambio gaseoso. De acuerdo a la topografía y su relación con la temperatura ambiental se esperaría encontrar valores de oxígeno disuelto mayores en la cuenca alta del río.

El contenido de oxígeno disuelto en aguas naturales está determinado principalmente por los siguientes factores; la respiración de organismos acuáticos, la oxidación y degradación de contaminantes, la actividad fotosintética de la flora, los cambios atmosféricos, así como la temperatura, la presión atmosférica y la salinidad (R. Brémond, C. Perrodon, 1979) y en el caso del río Pinula, la incorporación de aguas residuales al cauce, lo que compromete más la disponibilidad de Oxígeno disuelto en el agua por el ingreso de sustancias reductoras (materia orgánica) u oxidantes (detergentes y cloro).

En el caso de la temperatura, la solubilidad del Oxígeno aumenta cuando la temperatura disminuye. En el caso de la salinidad, el contenido de oxígeno disuelto disminuye con el aumento de salinidad. La cantidad de oxígeno que se diluye en el agua depende de la altura sobre el nivel del mar y la temperatura, siguiendo el modelo siguiente (Roldán, 1992):

$$[O_2]_{calculada} = 1,41(\text{factor de elevación}) \times [O_2]_{encontrada}$$

Siendo;

(O_2) encontrada = Concentración del Oxígeno disuelto en campo

(O_2) corregida = Concentración de Oxígeno disuelto corregida de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Puede estar asociada a la descarga de aguas residuales urbanas e industriales con altas cargas orgánicas. En ambientes aerobios los organismos dispersos en la superficie permiten la degradación de la materia orgánica con un consumo de oxígeno disuelto asociado. Siendo este último el efecto que cobra costo ambiental por competir con el desarrollo de la flora y fauna del medio (R. Brémond, C. Perrodon, 1979).

En Guatemala, según el Acuerdo Gubernativo 236 – 2006 de Aguas Residuales y Disposición de Lodos, el valor de la DBO antes del año 2015 debe ser menor de 700 mg.l^{-1} , a partir del 2015 deberá reducirse a 250 mg.l^{-1} y posteriormente a 100 mg.l^{-1} para el 2020.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno expresado en mg.l^{-1} que es consumido por los materiales oxidables en condiciones estándar en un litro de agua (R. Brémond, C. Perrodon, 1979). Se puede relacionar la variable DBO y DQO en aguas residuales sin que se aleje demasiado del siguiente modelo:

$$DQO = DBO \times \frac{1}{2}$$

Potencial de Hidrógeno (pH)

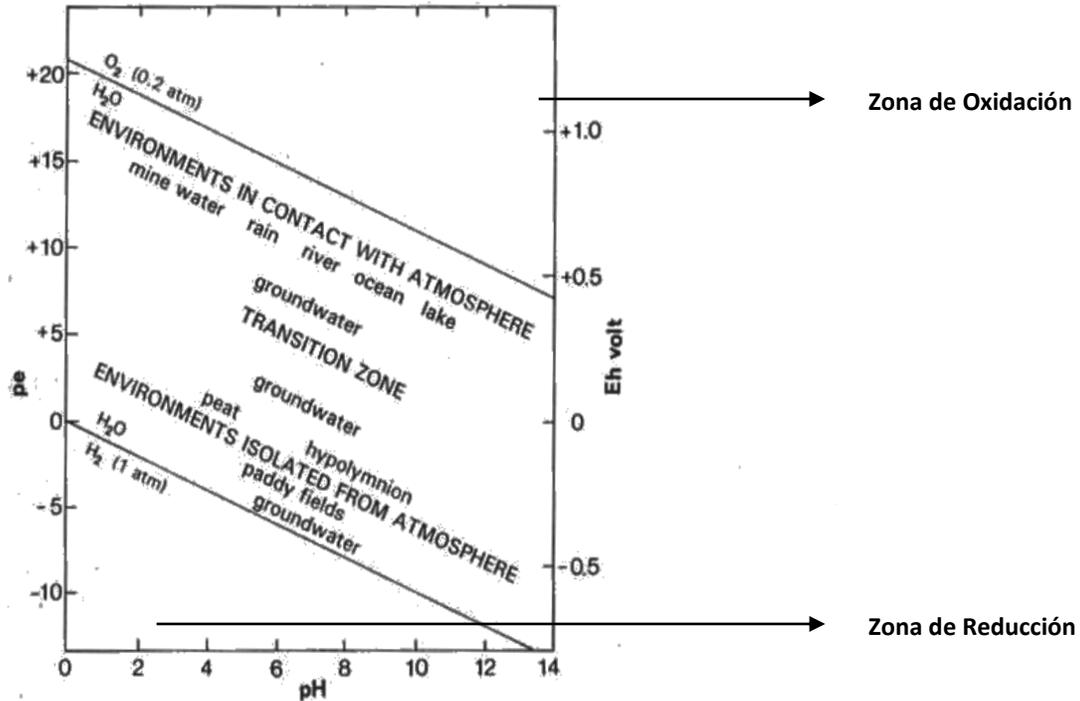
El valor numérico del pH es utilizado para designar el logaritmo base 10 del inverso de la concentración de iones H^+ de una solución de agua, expresado en moles por litro. En aguas naturales y no contaminadas, es el equilibrio del ácido carbónico en el agua el que determina el valor del pH (G. Roldán, 1992).

Los valores del pH condicionan de gran manera el equilibrio físico – químico de las aguas así como el equilibrio químico entre diversas sustancias tóxicas. En términos generales; los valores de pH comprendidos entre 5 y 9, permiten un desarrollo normal de la flora y fauna en condiciones naturales (R. Brémond, C. Perrodon, 1979).

Potencial de Óxido Reducción (Eh)

El Potencial Redox de una solución acuosa constituye un valor expresado en unidades eléctricas, generalmente mili Voltios (mV). Dicho valor, manifiesta la tendencia de las reacciones químicas que suceden en el medio. Pudiendo ser de Oxidación cuando el valor es positivo y de Reducción cuando el valor es negativo (C.W. Fetter, 2008). Por definición se dice que una sustancia que gana electrones se reduce y una sustancia que pierde electrones se oxida. Siendo la sustancia un agente oxidante al medio, cuando se reduce y un agente reductor al medio, cuando se oxida. Un agente oxidante se reduce cuando: disminuye el número de oxidación, si pierde átomos de Oxígeno, si gana átomos de Hidrógeno o si gana electrones (Ralph A. Burns, 1996).

Figura 6.1 Relación entre el pH y el Eh en función de la naturaleza de las aguas.



Fuente: Fetter, 2008.

Conductividad Eléctrica (CE)

En su nacimiento, los Ríos son oligotróficos, pero su conductividad y el contenido de iones aumentan por efectos de erosión, arrastre de sedimentos y escorrentía en época de lluvias. La conductividad eléctrica en el agua de un río puede aumentar drásticamente debido a la actividad agrícola y a la contaminación de origen industrial y doméstico (Roldan, 1992). Existe una relación estrecha entre las sales disueltas y el valor de conductividad eléctrica del agua; que significa el inverso de la resistividad eléctrica de una solución acuosa, medida en micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$). Este parámetro ejerce presión elevada sobre el aprovechamiento y uso de las aguas. Las aguas que tienen valores de conductividad eléctrica promedio $CE > 750 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} < 1500 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ son menos recomendables para irrigación, discriminando las aguas que sobrepasen los $1500 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ por el efecto residual de sales en el suelo. Además porque las aguas cargadas de sólidos ejercen un efecto negativo sobre

la presión osmótica en plantas y animales acuáticos, así pues valores $> 3\ 000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ generan condiciones muy desfavorables en peces de agua dulce. Los valores de criterio para consumo humano no están tan lejos de los valores anteriormente descritos, por razones de salud preventiva (R. Brémond, C. Perrodon, 1979).

Sólidos Totales Disueltos (STD)

Es una medida que hace alusión a la cantidad ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) de materiales minerales y orgánicos disueltos en el agua. Pueden afectar el valor de TDS el contenido de Calcio, Sodio, Potasio, Magnesio, Azufre y Sílice en cualquiera de sus formas ionizadas o no ionizadas. Es directamente proporcional a la Conductividad Eléctrica según el modelo $K_c = \text{STD}$, en donde K es la conductividad eléctrica y c es una constante asociada a la temperatura del agua. En términos generales se asume un valor global de STD en aguas de ríos de $120\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Aunque la Organización Mundial de la Salud OMS ha establecido un límite máximo aceptable LMA de $500\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ para el agua de consumo humano, el mismo que establece las normas guatemaltecas para agua potable y el límite máximo permisible LMP de $1\ 500\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Según el criterio de las normas de agua residual guatemaltecas, se comienza con un máximo de $3\ 500\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, con la proyección de reducir la concentración de TDS en efluentes a $600\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, para mayo del 2011 (Acuerdo Gubernativo 236 – 2006).

Salinidad (S)

El valor de la salinidad indica el peso ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) o el porcentaje del volumen de sales disueltas en el agua. La salinidad puede variar desde menos de $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en aguas dulces, de $3\ 000 - 10\ 000\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ aguas moderadamente saladas, y desde $10\ 000 - 35\ 000\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ aguas saladas y marinas. Las sales disueltas en el agua del río Pinula dependen de la naturaleza geológica de los suelos calcáreos (SiO_2 , FeO_2 , MgCO_3 , CaCO_3), de los drenajes industriales y domésticos y la escorrentía, los cuales tienden a aumentar la carga de sales

disueltas y con ello aumentan el valor de la salinidad en el agua. Aguas con alta salinidad y alta conductividad se presentan con mucha capacidad productiva, pero baja diversidad de especies. Algunos dípteros pueden adaptarse bien en ambientes salinos como representantes de las familias; *Culicidae*, *Ephidridae* y *Tabanidae* (Roldán, 1992).

Parámetros de Calidad del Agua medidos en Laboratorio

A continuación se describen las características de los parámetros que son determinados en laboratorio y que deben ser interpretados como una imagen característica de la cualidad químico – física que puede dar un indicio de la calidad del agua en determinada región.

Alcalinidad del Agua

Se define como la capacidad de un cuerpo de agua para neutralizar los ácidos. Expresa cuantitativamente la presencia de iones Bicarbonato y Carbonato presentes en el agua. El conocimiento del valor de alcalinidad de un cuerpo de agua permitiría entender la capacidad del mismo para mantener los procesos biológicos como respiración y metabolismo (Roldán, 1992). Debido a la solubilidad del Ácido Carbónico en el agua, los carbonatos son más comunes y abundantes en el agua dulce y pueden estar en forma de HCO_3 (Roldan, 1992).

Dentro de la Microcuenca del Río Pinula, los suelos son de origen volcánico con abundantes rocas calcáreas. Por lo que se esperaría un equilibrio estable en tres fases; gaseosa, líquida y sólida; representada por la presencia de minerales como Calcio y Magnesio. Líquido - gaseosa, mediante la acción del Dióxido de Carbono soluble en agua como Ácido Carbónico, liberando los minerales (Ca y Mg) y bicarbonatos solubles (HCO_3). Esta reacción puede suceder a la inversa, cuando se libera gas carbónico (CO_2) y se precipitan los carbonatos, producto de la elevación de temperatura. En el primer caso el agua se clasifica como agresiva y en el último caso, el agua se clasifica como incrustante. En los

medios naturales, la alcalinidad expresada como HCO_3 varía entre 10 mg.l^{-1} en el curso del agua por sustratos ácidos. En zonas calcáreas, Cretácicas y Terciarias como la región del río Pinula, la alcalinidad puede variar entre $100 - 250 \text{ mg.l}^{-1}$. Los aportes de polución de zonas urbanas se suman al valor de alcalinidad a través de los iones Fosfatos, Amoniaco y el aporte de Materia Orgánica (R. Brémond, C. Perrodon, 1979).

Tabla 6.1 Principales iones presentes en aguas naturales, porcentaje medio en aguas dulces.

Ion	Presencia (Porcentaje)
Aniones	
$\text{CO}_3^{=}$	33,4 %
SO_4	15,31 %
Cl^-	7,44 %
NO_3^-	1,15 %
$\text{PO}_4^{=}$	< 0,10 %
Cationes	
Ca^{++}	19,36 %
Mg^{++}	4,87 %
Na^+	7,46 %
K^+	1,77 %
Otros	
$(\text{Fe, Al})_2 \text{O}_3$	0,64 %
SiO_2	8,60 %

Fuente: Clarke, 1924. Tomado de Roldán, 1992.

La presencia de los principales cationes y aniones estará en dependencia del carácter de agresividad que posea el agua, es decir, del grado de disolución a los minerales. Las aguas que son de carácter agresivo, son pocas en contenidos de sales y altas en contenidos de carbono disuelto, en forma de Bicarbonato

(HCO₃), por lo tanto son aguas ligeramente ácidas. Esta agua podría ser de carácter corrosivo en los minerales y rocas del suelo e irse cargando de minerales a lo largo del cauce, conforme los procesos erosivos lo permiten (Beato, Otilio. comunicación personal, febrero 2011).

Cuadro 6.1 Descripción general de la presencia de Aniones en el agua en orden de abundancia natural.

Aniones	Agente Precursor	Efectos Naturales y Adversos	Valores Guía
CO ₃ ⁼	Disolución de Ácido Carbónico ambiental	Balance natural de la acidez en el agua, disponibilidad de carbono libre para el uso ecológico del medio.	-----
SO ₄ ⁼	Lluvia, dilución de Pirita (FeS ₂) y CaSO ₄ Actividad volcánica	Incorporación al protoplasma del tejido celular vegetal, producción de proteínas como Cistina, Cisteína y Metionina A pH = 8, la mayor parte del azufre está presente en forma de HS ⁻ y SO ₄ el H ₂ S es casi imperceptible A pH < 8 comienza a generarse H ₂ S a un punto máximo de pH = 5 generando problemas de olor y corrosión en tuberías. En algunos casos, el contenido de SO ₄ por encima del valor guía puede generar problemas de diarrea, principalmente en niños.	Normas Guatemaltecas COGUANOR : 100 mg.l ⁻¹ (LMA) 250 mg.l ⁻¹ (LMP) Valores guía de la OMS: 200 mg.l ⁻¹ (LMA) 400 mg.l ⁻¹ (LMP)
Cl ⁻	Por lo regular NaCl ⁻ Percolación en terrenos salinos Por infiltración de aguas marinas Desechos de animales (orina) Industrias extractivas	Ríos contaminados con excretas humanas (orina) aumentan considerablemente el contenido de cloruros. A menudo la presencia de cloruros es utilizada como indicador de contaminación, por ejemplo, si un pozo aumenta su contenido en 10 mg.l ⁻¹ en relación a un pozo vecino.	Normas Guatemaltecas COGUANOR: 100 mg.l ⁻¹ (LMA) 250 mg.l ⁻¹ (LMP) Valores guía de la OMS ³ : 200 mg.l ⁻¹ (LMA) 400 mg.l ⁻¹ (LMP)

³ Tomado de (R. Bremond, C. Perrodon.,1979).

NO_3^-	<p>Oxidación final del Nitrógeno Ambiental</p> <p>Aportes de las actividades humanas, lavado de aboneras, Nitrógeno de fertilización en zonas agrícolas, aguas domésticas e industriales</p>	<p>La presencia de Nitrógeno estimula el crecimiento de la flora acuática, en presencia de otros elementos. NO_3 puede actuar como un agente oxidante en condiciones anaeróbicas. El agua con que se preparan los alimentos y que rebase 50 mg.l^{-1} de NO_3 puede contribuir a la ingesta de Nitratos y estos en condiciones de reducción en el tracto digestivo, puede provocar Metahemoglobinemia.</p>	<p>Normas</p> <p>Guatemaltecas COGUANOR:</p> <p>----- (LMA)</p> <p>10 mg.l^{-1} (LMP)</p> <p>Valores guía de la OMS:</p> <p>45 mg.l^{-1} (LMA)</p> <p>50 mg.l^{-1} (LMP)</p>
Aniones	Agente Precursor	Efectos Naturales y Adversos	Valores Guía
PO_4^{--}	<p>Descomposición de Materia orgánica, lixiviado de minerales, abono agrícola, detergentes y jabones</p>	<p>La presencia de Fósforo en aguas subterráneas podría ser un indicador de contaminación. Son altamente reactivos e interactúan con los cationes para formar sales insolubles que se precipitan.</p>	<p>Agua de Irrigación < $65 \text{ mg.l}^{-1} \text{PO}_4$</p>

Fuente: Adaptado de: Roldán, 1992 y R. Brémond, *et al.*, 1979. LMA: Límite Máximo Aceptable, LMP: Límite máximo Permissible.

Cuadro 6.2 Descripción general de la presencia de Cationes en orden de abundancia natural en el agua.

Cationes	Agente Precursor	Efectos Naturales y Adversos	Valores Guía
Ca^{++}	<p>Presente en todas las aguas naturales dependiendo de las formaciones geológicas</p> <p>Representa el catión más abundante en zonas volcánicas</p> <p>Puede estar en forma de Carbonatos, Silicatos y Sulfatos,</p>	<p>Importancia en el metabolismo, formación de concha, huevo y dientes de organismos. Afecta directamente el valor de la dureza temporal e indirectamente el valor de la dureza total. En terrenos con medios ácidos los valores de calcio pueden ser de 2 a 8 mg/l mientras que en terrenos calcáreos, pueden situarse de 70 a 120 mg.l^{-1}. Existe una correlación directa entre la productividad de las aguas dulces y el contenido de sales de calcio y magnesio, disueltas. Royle (1949) ubica</p>	<p>Normas</p> <p>Guatemaltecas COGUANOR:</p> <p>75 mg.l^{-1} (LMA)</p> <p>150 mg.l^{-1} (LMP)</p> <p>Valores guía de la OMS:</p>

	<p>raramente como Cloruros.</p> <p>Representa el contenido mineral de alrededor del 50% de los TDS</p>	<p>el valor de $25 \text{ mg.l}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ como la división entre aguas blandas y aguas duras.</p>	<p>75 mg.l^{-1} (LMA)</p> <p>200 mg.l^{-1} (LMP)</p>
Mg^{++}	<p>Segundo catión más abundante</p> <p>Fuente principal es la dilución de silicatos MgSiO_4 con ácido carbónico</p> <p>El desarrollo de la vegetación depende de la proporción Mg/Ca y la disponibilidad de Mg depende de la presencia de mas o menos grande cantidad de Na.</p>	<p>Presente en el Núcleo de molécula de clorofila. La proporción Mg/Ca es cercana a 1. El aporte industrial lo representa principalmente la industria de hortalizas, en algunos sistemas productivos a una tasa de 19 toneladas de MgCl_2 y 2 toneladas de MgSO_4 por cada 100 toneladas de producción. Liberado al medio ambiente contribuye a la productividad de los medios acuáticos de forma similar como lo hace el Calcio. El aumento de la concentración ligado a la incorporación de aniones, puede representar riesgo para algunos peces como los salmónidos. Altas concentraciones pueden atribuirle un sabor amargo al agua, y provocar efectos laxantes principalmente en jóvenes y niños.</p>	<p>Normas</p> <p>Guatemaltecas COGUANOR:</p> <p>50 mg.l^{-1} (LMA)</p> <p>100 mg.l^{-1} (LMP)</p> <p>Valores guía de la OMS:</p> <p>50 mg.l^{-1} (LMA)</p> <p>150 mg.l^{-1} (LMP)</p>
Na^+	<p>En ambientes naturales de agua dulce es uno de los cationes menos abundantes. A pesar de ello es el catión de mayor mercado para uso industrial a nivel mundial por su abundancia en ambientes marinos.</p>	<p>Afecta la permeabilidad del suelo. No es considerado un factor limitante en la productividad de las aguas. Encontrado en forma de Silicatos como Albita y Nefelina, pero más abundantemente como Halita. Las concentraciones altas pueden generar una barrera osmótica para los organismos. Dependiendo de su uso, para agua potable es ideal una concentración menor de 115 mg.l^{-1} y cercana a 10 mg.l^{-1}. Por encima de 7 g.l^{-1} de Na, el ambiente es tóxico para peces de agua dulce. El agua de irrigación cargada de sodio puede afectar a largo plazo la permeabilidad y el pH del suelo. Para algunos organismos acuáticos la toxicidad de las sales de sodio depende del anión, siendo el Cromato más tóxico que el Sulfato.</p>	<p>Normas regionales no lo toman en cuenta, al igual que la norma COGUANOR.</p> <p>Normas Europeas</p> <p>$< 10 \text{ mg.l}^{-1}$ Agua de irrigación, el porcentaje de elementos alcalinos $(\text{Na} + \text{K}) / (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}) < 60\%$</p>
K^+	<p>Es menos abundante que el sodio,</p>	<p>La contaminación por potasio puede provenir de industrias extractivas (sal y</p>	<p>Dosis tóxica para <i>Chironomidae</i> = 700</p>

	presente en rocas como Leucita y volcánicas como Silvita. Está presente en todos los vegetales y en el estiércol de vegetarianos.	hortalizas), abonos, vidrio y materiales familiarizados. El consumo de aguas contenidas por encima de 1 g.l ⁻¹ de K pueden producir un efecto de purgante. El potasio es más tóxico para los peces y moluscos que el calcio, el magnesio y el sodio.	mg.l ⁻¹ <i>Trichopterae</i> = 1.000 mg.l ⁻¹
--	---	---	---

Fuente: Adaptado de: Roldán, 1992 y R. Brémond, *et al.*, 1979. LMA: Límite Máximo Aceptable, LMP: Límite máximo Permisible.

Cuadro 6.3 Descripción general de la presencia de Otros Cationes en orden de abundancia natural en el agua.

Otros Cationes	Agente Precursor	Efectos Naturales y Adversos	Valores Guía
(Fe) ₂ O ₃	<p>Origen tectónico, lavado de terrenos, polución mineral Generalmente como Oxido Ferroso (Fe₂O₃) en aguas oxigenadas y como Fe⁻ en condiciones anóxicas y en solución</p> <p>Industrias de colorantes pueden en sus desfogues presentar contenidos de sales de hierro</p>	<p>Las sales de hierro pueden influir en la fisiología de peces y macro invertebrados acuáticos, en su capacidad de colmatar las branquias y en algunos casos generar necrosis, en dependencia de la forma (ferrica o ferrosa) en que se encuentre el hierro y el pH. 50 mg.l⁻¹ es el límite de concentración de hierro en aguas para la sobrevivencia de peces. 10 mg.l⁻¹ para Truchas arcoíris. 0.9 – 2 mg.l⁻¹ en Carpas y Truchas a pH de 5,5 – 6,7. La presencia de Sulfato de Hierro en aguas de irrigación puede ocasionar acidificación por lavado de Calcio y Potasio y la deposición de Hidróxido Férrico Fe₂(OH)⁻</p>	<p>Por el sentido gustativo: 1 – 2mg.l⁻¹ de FeSO₄</p> <p>Normas Guatemaltecas COGUANOR: 0,1 mg.l⁻¹ (LMA) 1,0 mg.l⁻¹ (LMP)</p> <p>Valores guía de la OMS: 0,1 mg.l⁻¹ (LMA) 1,0 mg.l⁻¹ (LMP)</p>
(Al) ₂ O ₃	<p>Presente en todas las aguas naturales. En aguas ácidas o altamente alcalinas se puede encontrar en solución. Mayormente utilizado como agente</p>	<p>El contenido de las aguas representa cerca del 1% de la ingesta diaria. No se ha establecido por medio de la Comisión Económica Europea ni la Organización Mundial de la Salud ningún criterio que discrimine el agua con contenido de Aluminio como agente de riesgo para la salud humana.</p>	<p>Recomendaciones de la OMS para efluentes de plantas de tratamiento de agua: 0,1 mg.l⁻¹ (Pequeña)</p>

	floculante en el tratamiento de las aguas		0,2 mg.l ⁻¹ (Mediana)
SiO ₂	Cerca del 60% de las rocas de la corteza terrestre están compuestas por Sílice. Se esperaría encontrar altas concentraciones en la parte baja de los ríos.	<p>En forma reactiva o soluble es como se aprovecha por los organismos (Diatomeas)</p> <p>El crecimiento de Diatomeas puede limitar la disponibilidad en el medio acuático.</p> <p>En corrientes de montañas se puede encontrar < 1 mg.l⁻¹, mientras que en la parte baja de ríos > 3 – 7,5 mg.l⁻¹.</p>	<p>Agua potable</p> <p>20 mg.l⁻¹</p> <p>Crecimiento de Diatomeas:</p> <p>30 – 60 mg.l⁻¹</p>

Fuente: Adaptado de: Roldán, 1992 y R. Brémond, *et al.*, 1979. LMA: Límite Máximo Aceptable, LMP: Límite máximo Permisible.

Color y Turbidez

Las causas de la coloración del agua son numerosas, por el efecto Tyndall puede ser azul cuando es una masa grande. Es verde cuando presenta productividad rica en fitoplancton y es marrón, cuando contiene sustancias húmicas en suspensión o ciertas sales de hierro. Las partículas que le dan color al agua se pueden precipitar por centrifugación o por floculación. Los métodos de cuantificación de las unidades de color en el agua, pueden ser evaluadas por el método del Platino – Cobalto, así como por el método de comparación con discos de colores. Otro método es la medición tri-cromática, la cual puede ser determinada en campo o en laboratorio (R. Brémond y C. Perrodon, 1979).

Nutrientes en el Agua

Los nutrientes contenidos en el agua se pueden clasificar como macronutrientes y micronutrientes. Principalmente, el ingreso de materia orgánica determina la cantidad de nutrientes. Las fuentes de materia orgánica pueden ser alóctonas o autóctonas. El contenido de carbono disuelto con más antigüedad es el que se presenta más reactivo químicamente, y puede interactuar con otras sustancias en el medio acuático (Moreno, L. 2010, conversación personal).

Entre los nutrientes de gran importancia para todas las plantas destacan el N y el P, también llamados macronutrientes. El rango de concentración puede ser desde el orden de microgramos por litro en medios oligotróficos, hasta miligramos por litro en medios eutrofizados. Casi todo el Carbono orgánico en las aguas se encuentra en forma particulada y disuelta una relación que varía de 6 – 10 : 1.

El contenido de Nitrógeno Total en el agua puede ser de diversas maneras y por diversas causas, siendo las causas de elevados contenidos, la contaminación orgánica, industrial, agrícola y pecuaria. El Nitrógeno Total del agua está contenido de Nitrógeno en forma disuelta y particulada. Las formas disueltas pueden ser inorgánicas y orgánicas. Mientras que las formas particuladas son eminentemente orgánicas. Las formas orgánicas disueltas pueden ser fácilmente asimilables por productores primarios y bacterias. Aunque altos contenidos de amonio NH_4 pueden causar demandas altas de oxígeno por oxidación del ión amonio en amoniaco NH_3 altamente tóxico para peces en dependencia del pH.

El contenido de Fósforo Total en el agua puede ser de forma disuelta o particulada. En sus formas disueltas es muy común encontrarlo en forma de PO_4 de forma inorgánica. Mientras que en su forma orgánica particulada, una proporción está formada por formaciones coloidales disueltas, y otra porción mayoritaria como material orgánico particulado vivo (seston) o muerto (materia orgánica). Además del ortofosfato, de forma disuelta algunos compuestos que aportan fósforo al sistema son los polifosfatos originados de detergentes sintéticos, coloides orgánicos y coloides adsorbentes.

Cuadro 6.4 Descripción general del contenido de Nutrientes en Agua.

Nutrientes	Agente Precursor	Efectos Naturales y Adversos	Valores Guía
Nitrógeno Total	Nitrógeno orgánico particulado y disuelto, producto de desechos orgánicos de viviendas	Consumo de Oxígeno Disuelto en procesos de Oxidación	150 – 70 mg.l ⁻¹ Para el año 2020 ⁴
Fósforo Total	Fósforo Inorgánico disuelto, provenientes de productos sintéticos de limpieza y llegan al río como aguas grises	Reducción de la tensión superficial en el agua, consumo de Oxígeno Disuelto en Procesos de Oxidación, aumento en la disposición de energía para el desarrollo de las plantas y formación de lodos orgánicos	150 – 70 mg.l ⁻¹ Para el año 2020 ⁴

Contaminación por Metales

La presencia de metales en el agua puede ser debido al aporte natural de las rocas, por medio de la interacción con la precipitación pluvial, aportes atmosféricos naturales e inducidos por la industria, drenaje de actividades humanas, productivas, que generan residuos que contienen metales. De acuerdo a la magnitud medida en peso (ng.l⁻¹ y µg.l⁻¹) los metales pueden estar presentes en forma de trazas, o pueden estar presentes en cantidades más elevadas de hasta mg.l⁻¹.

Los metales más abundantes de forma natural como el Fe, están presentes en el agua en mayores cantidades. Pero otros metales menos abundantes en forma natural como el Arsénico (As), Aluminio (Al), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Oro (Au), Níquel (Ni), Mercurio (Hg), pueden estar presentes en forma de trazas. De no ser así se podría pensar en la contaminación ambiental, de forma industrial, minera, agrícola o por medio de hidrocarburos.

⁴ Según Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las Descargas y el Reuso de Aguas Residuales y la Disposición de los Lodos.

Los metales pueden ser tóxicos y en ocasiones letales a los humanos debido a la tendencia a acumularse en tejidos corporales. Se han encontrado correlaciones entre el contenido de metales como el Berilio (Be), el Cd, Plomo (Pb) y Ni en la ocurrencia de muertes por algunos cánceres (Patrick A Domenico, Franklin W Schwartz, 1998).

Los metales más comunes en lodos y potencialmente tóxicos son: Cd, Cr, Cobre (Cu), Hg, Ni, Pb y Zinc (Zn) (Felipó y Garau, 1987. Tomado de M. Juárez S. *et al.* 2006).

Cromo

No es un elemento normal en el agua, puede estar presente en las aguas en forma trivalente en forma de Cromitos, y hexavalente en forma de Cromatos y Dicromatos. Las sales (cloruro, nitrato y sulfato) de Cromo trivalente son totalmente solubles excepto el hidróxido y el carbonato de Cromo. Las sales hexavalentes son totalmente solubles, utilizadas en la industria del cuero, pintura, tintes, cerámica, etc. Los compuestos de Cromo trivalente muestran una tendencia particular a la oxidación, cambiando de Cr (III) a Cr (VI). La reducción es menos viable (R. Brémond y C. Perrodon, 1979).

En general, el Cromo hexavalente es soluble y móvil en el agua subterránea, el Cromo trivalente es insoluble e inmóvil. Un agente reductor utilizado para la reducción del Cromo hexavalente en trivalente, es el ión ferroso (Fe^{2+}) (C.W. Fetter, 2008).

Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 (Gobierno de la República), las aguas residuales deberían disminuir su contenido de Cromo hexavalente en las aguas de $1,0 \text{ mg.l}^{-1}$ (mayo 2011) a $0,5 \text{ mg/l}$ para mayo del 2015 y de $0,1 \text{ mg.l}^{-1}$ para mayo del 2020.

Plomo

Es un elemento que puede estar contenido en el agua de forma natural en cantidades traza. De forma general, los suelos urbanos tienen un contenido mucho mayor que los suelos rurales. En aguas naturales la solubilidad del Plomo está limitada a las condiciones Eh – pH. La forma soluble puede ser adsorbida por los suelos y su movilidad estaría limitada a la formación de sales insolubles (C.W. Fetter, 2008).

En aguas blandas, la toxicidad del Plomo aumenta, mientras que en aguas duras sucede lo contrario, debido a la capacidad de formar sales insolubles. De la misma manera, la toxicidad aumenta con valores críticos de oxígeno disuelto. Algunos microorganismos como las bacterias Nitrificantes y otras bacterias comprenden un límite de tolerancia que va de 0,5 – 1,0 mg.l⁻¹. En peces, los síntomas de intoxicación se manifiestan por la secreción excesiva de mucus. Algunas especies muy sensibles como la Trucha Arco iris (*Oncorhynchus mykiss*, tiene límites de tolerancia por debajo de 4,0 mg.l⁻¹ - 1,4 mg.l⁻¹ (R. Brémond y C. Perrodon, 1979).

Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, las aguas residuales deberían disminuir su contenido de Plomo de 4,0 mg.l⁻¹ (mayo 2011) a 1,0 mg.l⁻¹ para mayo del 2015 y de 0,4 mg.l⁻¹ para mayo del 2020.

Arsénico

No es un metal presente en estado natural como se podrían encontrar otro tipo de metales, pero puede presentarse como un subproducto de la manufactura de algunos otros metales como Oro, Plata, Plomo, Cobre, etc. Es utilizado en las industrias del metal, vidrio, cerámica, curtiembres, tinturerías y en la industria química, en la fabricación de plaguicidas. En cantidades excesivas en agua de irrigación puede causar deterioro del aparato clorofílico, desde 2 mg.l⁻¹ en Maíz, Arveja, Trigo y otros.

En la sangre la concentración de Arsénico puede variar entre 0,2 y 1,0 mg.l⁻¹ y se encuentra comúnmente presente en alimentos como frutas y legumbres. Una de las razones por las que es considerado muy peligroso para la salud humana es su efecto acumulativo en tejidos del cuerpo humano. En los casos de intoxicación lentos, se observan síntomas nerviosos y cutáneos (R. Brémond y C. Perrodon, 1979). Las normas internacionales limitan el contenido de Arsénico en las aguas de consumo, considerando la Concentración Máxima Deseable (LMA) en 0,05 mg.l⁻¹, y la máxima permisible (LMP) en 0,1 mg.l⁻¹ (OMS, 1972).

Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, las aguas residuales deberían disminuir su contenido de Arsénico de 1,0 mg.l⁻¹ (mayo 2011) a 0,5 mg/l para mayo del 2015 y de 0,1 mg.l⁻¹ para mayo del 2020.

Mercurio

El Mercurio está presente en el ambiente de forma natural, pero ha aumentado la concentración de 3 a 4 veces desde el comienzo de la era industrial. Es líquido en estado ambiental y puede estar presente en diversos productos de consumo común, como lámparas fosforescentes, termómetros, baterías, equipo médico. Puede combinarse con otros elementos como el Oxígeno (O₂), Cloro (Cl) y el Azufre (S) para formar sales o cristales blancos.

Puede sufrir transformación biológica por medio de bacterias y transformarse a la forma Metil Mercurio CH³ – Hg⁺, que es mucho más tóxica y puede ser persistente en el ambiente ya que puede ser acumulado por peces. Las fuentes naturales del Mercurio puede ser por erupciones volcánicas. Entre las fuentes antropogénicas está la producción de cemento, minería artesanal, vertederos municipales, entre otros.

El Fitoplancton puede concentrar el Mercurio presente en las aguas con un factor del orden de 1 000 y para los organismos de mayor rango en la cadena alimenticia los mecanismos de retención son más complejos, dependiendo de la longevidad y el metabolismo, la temperatura del agua y el oxígeno disuelto. En

peces el Mercurio se distribuye de forma diferente en los tejidos, fuertemente en el músculo, el hígado y los riñones. El ión Metil Mercurio es responsable de la inhibición del crecimiento y la fotosíntesis en fitoplancton a partir de concentraciones de $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$. De forma general se dice que los peces no son capaces de sobrevivir a fuertes concentraciones de Mercurio orgánico (2 – 16 mg.l^{-1}) no así cuando las exposiciones son durante tiempos cortos y afectan principalmente las branquias, causando muerte por asfixia. Mientras que en tiempos más prolongados, las concentraciones letales son del orden de $0,1 \text{mg.l}^{-1}$, afectando principalmente el hígado y los riñones y reduciendo la tasa de reproducción (R. Brémond y C. Perrodon, 1979).

Según el Acuerdo Gubernativo 236-2006, las aguas residuales deberían disminuir su contenido de Mercurio de $0,1 \text{mg/l}$ (mayo 2011) a $0,1 \text{mg.l}^{-1}$ para mayo del 2015 y de $0,02 \text{mg.l}^{-1}$ para mayo del 2020.

Contaminantes Orgánicos

En el presente estudio se le llaman contaminantes orgánicos a los compuestos clasificados en: Hidrocarburos Aromáticos y Plaguicidas Persistentes.

Plaguicida: de acuerdo a la FAO, este término agrupa cualquier sustancia química o mezcla química utilizadas para el control del crecimiento de ciertas plantas y animales indeseados y como regulador de crecimiento y desarrollo agrícola, como defoliante o desecante.

Los plaguicidas se clasifican como Insecticidas y Acaricidas (Organoclorados, Organofosforados, Organosulfurados, Carbamatos y otros grupos); Herbicidas (inorgánicos y orgánicos); Fungicidas (inorgánicos y orgánicos). Una vez son aplicados, dependen de muchas propiedades que determinan su solubilidad en agua, la capacidad de volatilizarse o bien adherirse al suelo y la materia orgánica e infiltrarse en el suelo y agua subterránea. Dependiendo en buena parte por el tiempo de vida medio o persistencia en el ambiente, de manera general, los plaguicidas que duran más de 2 – 3 semanas deben ser

cuidadosamente aplicados pues pueden contaminar los acuíferos (Morel y Candela, 1998).

Los plaguicidas organoclorados contienen un grupo químico caracterizado por la cadena de C – H – Cl y en algunos casos Oxígeno. Entre los más comunes se pueden citar el DDT, Lindano, Dieldrín, Aldrín, Endrine, Toxafeno, Metoxiclorano, Clorano, Heptacloro que son utilizados como insecticidas (Brémond y Perrodon, 1979).

Todos los contaminantes orgánicos persistentes que son bioacumulables como los plaguicidas organoclorados, están incluidos en la lista de la Convención de Estocolmo que contiene los contaminantes persistentes que a pesar de su prohibición, todavía siguen causando peligro en los ecosistemas por su alta persistencia en el ambiente (Bejarano F., 2004).

El transporte por medio de la Zona no Saturada, está influenciado por los siguientes factores: Contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, textura y estructura y porosidad del suelo, humedad e intensidad de las lluvias y temperatura, pH y Eh. El contenido de arcillas aumenta la capacidad de adsorción al suelo, la materia orgánica aumenta la bioactiviad, bioacumulación, biodegradación, lixivibilidad y volatilidad (Morel y Candela, 1998).

Cuadro 6.5 Límites máximos permisibles estipulados en la norma guatemalteca para aguas de consumo humano COGUANOR.

Compuestos	LMP ($\mu\text{g.l}^{-1}$)
DDT + TDE + DDE	1,0
Hexaclorobenceno	1,0
Aldrín	0,03
Dieldrín	0,03
Heptacloro	0,2
Heptacloro epóxido	0,1
Lindano	0,2

Endrín	0,2
Metoxicloro	20
Clordano	0,2
Toxafeno	3,0
Pentaclorofenol	1,0
Dinoseb	7,0

Fuente: Especificaciones agua potable, COGUANOR NGO 20 001:99

Cuadro 6.6 Concentraciones Letales de plaguicidas organoclorados.

Plaguicida	(CL ₅₀) en ng.l ⁻¹
DDT	1 ng.l ⁻¹
Aldrin	4 ng.l ⁻¹
Dieldrín	
Lindano	0.01 ng.l ⁻¹
Endosulfan	20 ng.l ⁻¹
Toxafeno	8 ng.l ⁻¹
Endrín	2,3 ng.l ⁻¹

Fuente: CCME, 1987 - 1997.

Cuadro 6.7 Valores de concentraciones de plaguicidas organoclorados recomendados por la Academia de ciencias americana de los Estados Unidos.

Plaguicida	(Concentración en la que el riesgo de toxicidad a la vida acuática es imperceptible) ng.l ⁻¹
DDT	2
DDE	6
Aldrin	10
Dieldrín	5

Heptacloro	10
Lindano	20
Endosulfan	3
Toxafeno	35

Fuente: Brémond y Perrodon, 1979.

Algunos autores afirman que las plantas o peces que son susceptibles de ser ingeridos por otros consumidores no deberían de sobrepasar 1mg.kg^{-1} de DDT total. Los factores de acumulación dependen de cada ecosistema, no existen recomendaciones universales que permitan generalizar las concentraciones límites en las aguas. La toxicidad para el ser humano puede ser de dos formas, aguda o crónica. La forma crónica puede suceder mediante la ingesta de organismos sometidos a contaminación en su medio de vida y a la fijación en tejido adiposo.

Hidrocarburo

En las zonas urbanas el consumo de hidrocarburos es un factor característico que depende principalmente de la densidad poblacional y el nivel de consumo promedio. En la Ciudad de Guatemala existe una cantidad muy grande de gasolineras, lo que indica un consumo constante debido a que es una ciudad densamente poblada. Dentro de la microcuenca del río Pinula, se encuentra la zona Franca y una parte de la zona Industrial además del Aeropuerto Internacional, con sus respectivas zonas de almacenaje de combustibles.

Los compuestos de hidrocarburos demandan una gran cantidad de oxígeno disuelto, son poco solubles y se presentan generalmente como emulsión. La constante de velocidad de reacción de estos productos a oxidación bioquímica es mucho más viable que la de los compuestos encontrados comúnmente en los efluentes urbanos. Por lo que la síntesis de estos compuestos en cuerpos de agua puede competir por la demanda de oxígeno con los procesos respiratorios

de algunas especies. Las concentraciones letales para peces dependen del tipo de hidrocarburo en cuestión.

En zonas de aguas calmas puede implicar un efecto negativo sobre la tensión superficial del agua, debido a la formación de una película superficial aceitosa que desplaza la producción primaria limitando la alimentación y la oxigenación por esta vía. Los hidrocarburos incrementan la toxicidad de ciertos componentes como los plaguicidas que pueden estar presentes en la corriente de agua (Brémond y Perrodon, 1979).

Los efectos negativos del contenido de hidrocarburos en agua se manifiestan en la salud de los consumidores, la cualidad gustativa y olfativa de las aguas de consumo y aspectos estéticos del agua. En general un aceite mineral puede ser detectado por ciertas personas en concentraciones de 1 mg.l^{-1} , aunque las esencias minerales le confieren un gusto y olor al agua a partir de $0,005 \text{ mg.l}^{-1}$, a partir de 10 mg.l^{-1} hay implicaciones en la fauna acuática (Brémond y Perrodon, 1979). Para la Organización Mundial de la Salud (1972) las concentraciones máximas permitida es de $0,01 \text{ mg.l}^{-1}$ y la máxima aceptable es de $0,3 \text{ mg.l}^{-1}$.

Productividad Biológica de las Aguas

El lecho de un río está formado por distintos tipos de sustratos, desde rocas, gravas a arenas finas y arcilla. Del tipo de lecho depende el establecimiento de flora y fauna bentónica (G. Roldán, 2008).

Flora Acuática

La comunidad vegetal que habita los cuerpos de agua es muy variada, puede presentarse como plantas acuáticas de superficie, plantas sumergidas, demersales, fitoplancton y fitobentos.

El fitoplancton se compone por organismos “errantes” o ausentes de la capacidad de movilidad, salvo excepciones como *Euglena sp.* este grupo de

organismos se caracteriza por su capacidad de realizar fotosíntesis, es por esta característica que se agrupan como autótrofos acuáticos.

El fitobentos está integrado por organismos autótrofos asociados a cualquier sustrato de fondo, con adaptaciones fisiológicas especiales que les permiten adherirse a diferentes tipos de sustratos y moverse en casos necesarios como adaptación ante condiciones del medio adversas, estas adaptaciones les permiten prevalecer sobre otras especies más sensibles. Dentro del Fitobentos se incluyen Cianobacterias, Perifiton, Macroalgas y Macrófitas. El Perifiton, incluye a bacterias, hongos y microalgas como las Diatomeas (Confederación Hídrica del Ebro, 2005).

El Perifiton es reconocido por los aportes ecológicos como la producción de metabolitos orgánicos para diversos organismos de la cadena alimenticia, permiten que los nutrientes sean reciclados y de acuerdo a la diversidad y abundancia como respuesta a las condiciones del medio, estas especies pueden dar un índice de la calidad del agua del medio en que se encuentran. Constituye la base alimenticia de algunos insectos, como algunas algas del grupo de las Diatomeas y en ambientes que presenten sustratos naturales o artificiales, pueden atribuir un efecto de productividad a la piscicultura, además han sido ampliamente utilizadas para caracterizar sitios de acuerdo a la calidad del agua (Roldán, 2008).

Se han desarrollado índices de clasificación como el Índice Trófico de Diatomeas, por sus siglas en inglés TDI el cual asigna valores de tolerancia a la polución (valores de 1-5) y valores del indicador (valores de 1-5) (Kelly, y otros, 2001)

En el caso del fitoplancton, existen numerosas experiencias en la clasificación de especies indicadoras de contaminación orgánica como el caso de *Euglena sp.* y *Senedesmus sp.* Algunos índices conocidos y empleados en la región son: Índice de polución orgánica OPI a nivel taxonómico de géneros (Palmer, 1969.

Tomado de Roldán, 2008). Otro índice utilizado es el de Nigaard (1949), para clasificar el estado trófico del agua evaluada.

Macro Invertebrados Acuáticos del Bentos

Bajo este término se agrupan los animales que viven en el fondo del río y que superan el tamaño de 0,5 mm, dichos animales engloban poríferos, hidrozoos, turbelarios, oligoquetos, hirudineos, insectos, arácnidos, crustáceos, gastrópodos y bivalvos. El uso de Macro Invertebrados como indicadores de calidad del agua se basa en las exigencias ambientales del nicho ecológico que habitan, por lo que cualquier cambio en el medio se manifiesta en las estructuras de las comunidades (Roldan, 2008).

El estudio de los Macroinvertebrados Acuáticos del Bentos requiere como primer paso, la identificación y conocimiento de la estructura taxativa, riqueza de especies, abundancia, densidad y biomasa. Identificación de las especies dominantes y su relación como indicadores de calidad del agua. Y la aplicación de Índices de Calidad del Agua.

Al igual que el fitobentos y fitoplancton, los macroinvertebrados acuáticos pueden ser utilizados como indicadores de calidad de acuerdo a valores de sensibilidad e importancia asignados, por medio del Índice Biótico de Familias, desarrollado y adaptado para El Salvador en el año 2010 (Sermeño, y otros colaboradores, 2010).

Marco Legal

En Guatemala, los mecanismos más importantes de coordinación entre las instituciones que están trabajando en manejo de cuencas son los siguientes:

Comité de Recursos Naturales, integrado por el **MARN** Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, **MAGA**, **INAB**, **CONAP** - **PAFG** (como secretaría). Fue creado para analizar y coordinar la ejecución de acciones encaminadas a la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales, así como para

reducir conflictos Interinstitucionales en materia de aplicación de sus marcos legales y planes de acción. **Consejo de Desarrollo Urbano y Rural** que integra a todas instituciones estatales y no gubernamentales que operan dentro del Municipio, Departamento (CODEUR) y Región (COREUR). **CONRED Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres** A nivel Nacional, está integrada por las diversas autoridades e instituciones relacionadas. En el ámbito municipal, también la integran las organizaciones locales. Desarrolla esfuerzos para introducir el componente de prevención al nivel de cuencas hidrográficas, ya que en la mayoría de los casos sus acciones son mitigadoras o de reconstrucción-rehabilitación en zonas de desastres.

La integración de las **Juntas Directivas** del INAB y del CONAP por representantes de gobierno, autoridades locales, organizaciones no gubernamentales ambientalistas, universidades y empresas privadas, permite que lo planificado, normado y actuado tenga el consenso de los diversos sectores. Así mismo,

Las Autoridades de Cuenca, AMSA, AMSCLAE Y AMASURLI de las cuencas de los Lagos: Amatitlán, Atitlán e Izabal respectivamente, están integradas por representantes de los diversos sectores incluyendo los pobladores de las cuencas. **COMUDE**, Concejos municipales de Desarrollo. Integrados por representantes de COCODES que son los concejos comunitarios de desarrollo. Integrados por organizaciones de la sociedad civil, comités de barrio y representantes de cada localidad.

El conjunto de normas que limita los valores de los parámetros de la calidad del agua destinada para el consumo humano, que es tomado en cuenta en Guatemala se nombra COGUANOR 202 9001. Mientras que la norma que regula los valores límites permisibles de los parámetros de calidad del agua residual de diversas fuentes y receptores, se nombra Acuerdo Gubernativo 236-2006. Se utilizan también como referencia, las normas canadienses para la protección de la vida acuática CCME, 1997.

VII. METODOLOGÍA

Para determinar las causas de contaminación del agua y sedimentos en el recorrido del Río Pinula se tomaron dos rutas de diagnóstico. La primera ruta correspondió a la evaluación de las condiciones físico – químicas del agua *in situ*, evaluadas directamente en el río y pozos, las cuales fueron comparadas con valores guía (normas canadienses para la protección de la vida acuática) e interpretadas como una imagen instantánea de la cualidad del agua y un indicio de la calidad temporal en cada punto de monitoreo.

La segunda ruta de diagnóstico, consistió en la toma de muestras de agua para el análisis de los Parámetros de Calidad que hacen referencia al tipo Hidroquímico, Contenido de Sales Disueltas, Nutrientes, Plaguicidas Organoclorados, Mercurio, Plomo, Cromo y Arsénico. Dichos análisis fueron realizados en Laboratorios especializados del Centro para la Investigación de los Recursos Acuáticos CIRA – de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN (<http://www.cira-unan.edu.ni/>), y laboratorio comercial *Soluciones Analíticas S.A.* en Guatemala (<http://www.solucionesanaliticas.com/>).

Los efectos de la contaminación del agua y sedimentos en la biota del río, fueron estimados mediante la exploración de la diversidad y abundancia de Macro Invertebrados Acuáticos del Bentos MIAB, el Fito Bentos y la variación espacial de ambos, de acuerdo a la variación de los parámetros de calidad del agua. Estos mismos resultados sirvieron para la estimación de índices bióticos de calidad del agua, como el Índice Biológico a nivel de Familias IBF y el Índice trófico de Diatomeas TDI, detallados más adelante.

VARIABLES	UBICACIÓN	ÍNDICES Y NORMAS
CAUDALES Y NIVELES PIEZOMÉTRICOS	5 puntos del río y 7 pozos (cuenca alta media y baja)	N.A.
PARÁMETROS DE CAMPO	11 puntos del río y 7 pozos (cuenca alta media y baja)	Sal., C.E., STD. Análisis de varianza, Prueba post host T3 de Dunnett, Prueba de diferenciación de varianzas post host de Scheffe
CONTENIDO DE IONES	5 puntos del río y 5 pozos (cuenca alta media y baja)	Recomendaciones FA0 para agua de riego Normas COGUANOR y CAPRE
CONTENIDO DE NUTRIENTES	5 puntos del río y 5 pozos (cuenca alta media y baja)	Índice OPI, Clasificación trófica de Wetzel, CCME, Normas COGUANOR y CAPRE
CONTAMINANTES INORGÁNICOS	3 puntos del río y 4 pozos (cuenca alta media y baja)	CCME, Normas canadienses para la protección de la vida acuática
CONTAMINANTES ORGÁNICOS	4 puntos del río (cuenca media y baja)	CCME, Normas canadienses para la protección de la vida acuática
CARGA ORGÁNICA	3 puntos del río (cuenca media y baja)	Acuerdo Gubernativo 236-2006
RESPUESTA DEL FITOBENTOS Y FITOPLANCTON	3 puntos de río (cuenca alta y media)	TDI, M. G. Kelly <i>et. al.</i> , 2001. OPI y el índice ID de Nigaard
RESPUESTA DEL ZOOBENTOS	3 puntos de río (cuenca alta y media)	IBF El Salvador, 2010.

Materiales y Métodos

- Medición de Parámetros Físicos y Químicos de agua *in situ*

La medición de los parámetros de calidad en el agua que se muestran (cuadro 7.1) en 12 puntos de monitoreo del río Pinula y en 7 puntos, se midieron en agua de pozos Municipales y privados cercanos. En adelante se diferenciará por matrices (agua del río, agua de pozos, sedimentos) para la descripción de los métodos utilizados para el análisis.

Cuadro 7.1 Parámetros químicos y físicos medidos en las matrices río y pozos.

Parámetro medido <i>in situ</i>	Dimensionales reportadas	Equipo Utilizado
pH	Unidades de pH	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> ® 4
Eh	Mili voltios (Mv)	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> ® 4
Temperatura	Grados Celsius (°C)	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> ® 4
Oxígeno Disuelto	Miligramos por litro (mg/l)	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> 5 Star
Elevación	Metros sobre el nivel del mar	GPS (Garmin Vista E-treck)
Conductividad Eléctrica	Micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> ® 4
Salinidad	Partes por millón (ppm, mg/l)	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> ® 4
Sólidos Disueltos Totales	Partes por millón (ppm, mg/l)	Multiparámetros de campo <i>ORION</i> ® 4



Figura 7.1 Equipo de medición de parámetros de calidad de agua utilizados en campo (noviembre del 2011 – julio de 2012).

Aforos, Medición de niveles piezométricos

Los aforos fueron realizados en 4 puntos del río Pinula (parte alta, parte media alta, media baja y desfogue) y en un canal pluvial que desagua en el río, la medición de niveles fue realizada en 7 pozos cercanos al río Pinula por medio de las técnicas que se describen a continuación:

- Medición de Nivel: por medio de una sonda de medición electro-acústica marca *Solinst* © Canada Ltd. Modelo 101 de 100 metros, escala milimétrica.
- Medición de Velocidad de la corriente del río por medio de un molinete marca *Scientific Instrument*© modelo 1220, con rango de detección desde 0,08 hasta 2,44 metros por segundo.
- Cálculo de Caudal: por medio de la técnica de sección transversal y en algunos casos se utilizó el método de Trazador, utilizando sal como indicador, los resultados se reportan en $m^3 \cdot d^{-1}$.

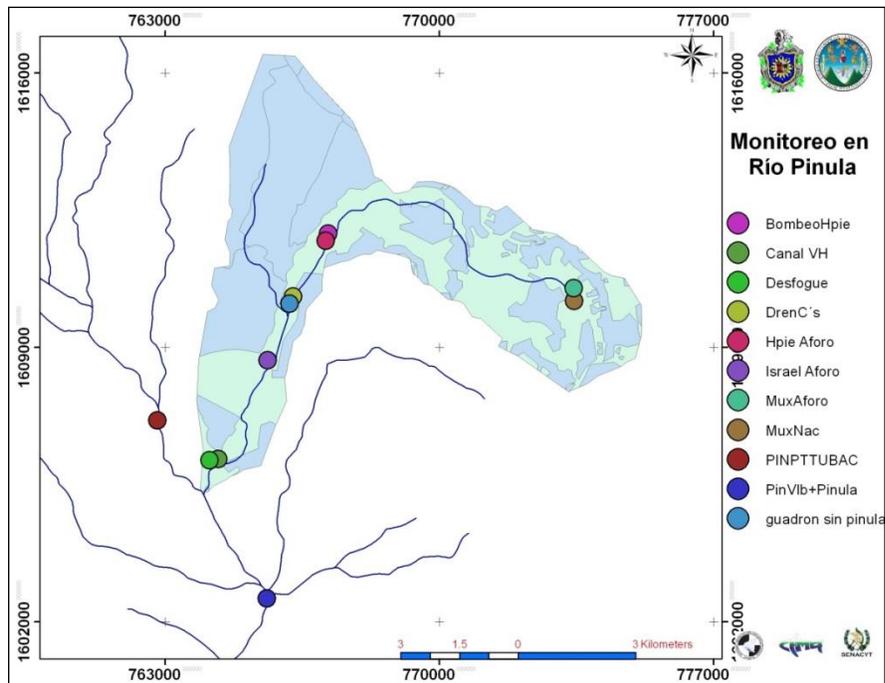


Figura 7.2 Sitios de monitoreo de Parámetros de campo de la Calidad del Agua del río Pinula 2011 a 2012.

Toma de muestras de agua (matrices río y pozos)

La toma de muestras de agua fue realizada en 5 puntos del río Pinula, de los 11 utilizados como sitios de monitoreo (figura 7.2) y en 6 pozos (figura 7.3), la toma de muestras se realizó de acuerdo a la metodología estipulada por el Centro para la Investigación en Recursos Hídricos (CIRA/UNAN), basados en Standard Method 21th Edition y en los respectivos protocolos establecidos por los laboratorios especializados del CIRA/UNAN.

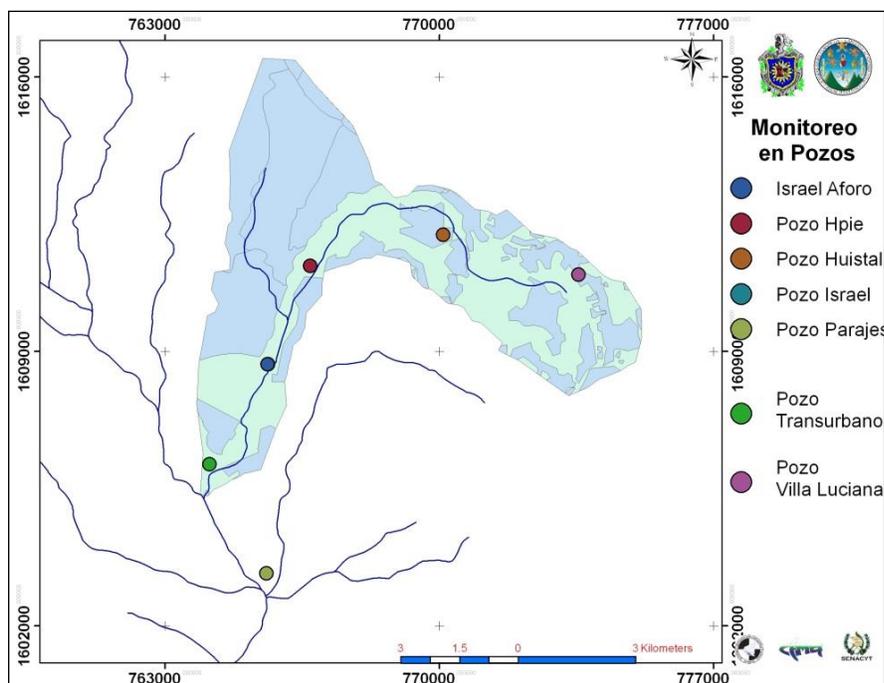


Figura 7.3 Ubicación de los pozos de monitoreo de calidad del agua, cercanos al río Pinula 2011 a 2012.

Cuadro 7.2 Materiales y métodos para la toma, conservación y análisis de las muestras de agua.

Análisis	Materiales y/o Reactivos	Preservación
Físico – Químico	Recipiente plástico de 1galón	A temperatura 4 °C
Contenido de Nutrientes (Nitrógeno total y Amoniacal)	Recipiente plástico 1litro Ácido Sulfúrico Concentrado	A temperatura 4 °C
Contenido de Plaguicidas	Recipiente de Vidrio 5 litros Hexano	Botella oscura A temperatura 4 °C
Contenido de Hidrocarburos	Recipiente de vidrio 2,5 litros	Botella oscura 4 °C
Contenido de Metales	Recipiente de plástico 1litro Ácido Nítrico	A temperatura 4 °C

Toma de muestras de sedimentos

El muestreo de sedimentos en 4 puntos del río Pinula (figura 12). Fue realizado con una draga *Van Been* de acero inoxidable. Siguiendo el procedimiento de captación de la muestra desarrollado por el Centro para la Investigación en Recursos Hídricos CIRA-UNAN basados en los métodos regionales aceptados.

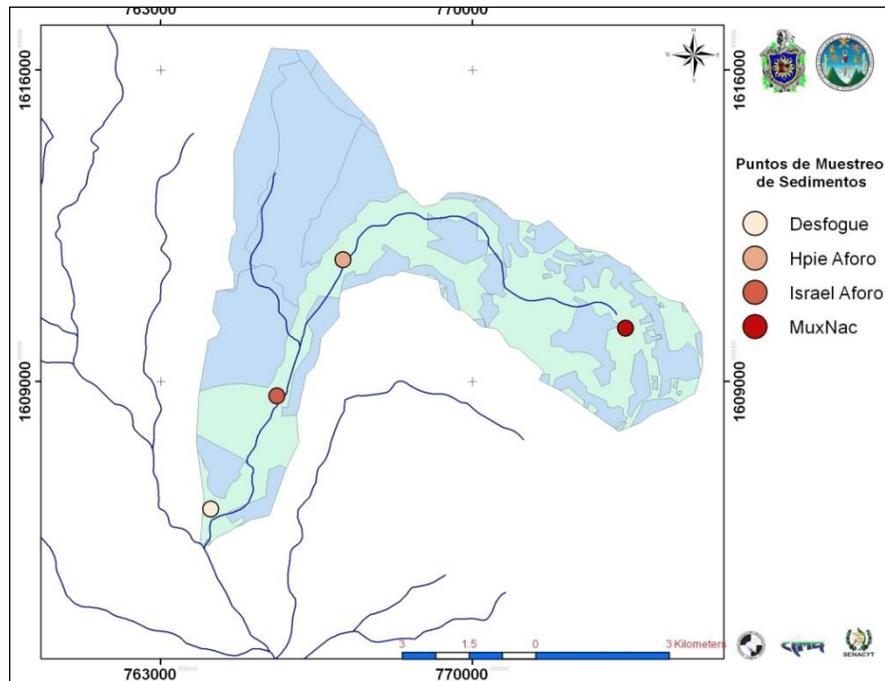


Figura 7.4 Ubicación de sitios de monitoreo de Sedimentos, Zoobentos, Fitobentos y Fitoplancton en el río Pinula 2012.

Cuadro 7.3 Materiales y métodos para la toma, conservación y análisis de muestras de sedimentos.

Análisis	Materiales y/o Reactivos	Medio de preservación
Contenido de Metales, Materia Orgánica, Textura	Recipientes y utensilios de recolección plásticos	A temperatura 4 °C
Contenido de Plaguicidas	Recipiente de vidrio	A temperatura 4 °C



Figura 7.5 Colecta de muestras de sedimento en el río Pinula (febrero a julio de 2012).

En enero, abril y mayo del 2012 se realizaron muestreos en la parte alta, media y baja del río Pinula. Con el objeto de evaluar el grado de alteración de las comunidades del fitoplancton, fitobentos y macroinvertebrados acuáticos en los puntos definidos en las figuras 8.14 de a-c.

Toma de muestras de Fito bentos

Fue colectado en 3 puntos del río Pinula tomando como sustratos rocas color pardo, ubicadas en la región semi sumergida y en la orilla, en zonas iluminadas. Los sustratos fueron raspados con un cepillo y las muestras fueron preservadas con Formalina al 4% en recipientes plásticos de rosca y posteriormente refrigeradas hasta su análisis en laboratorios especializados. Siguiendo la metodología de muestreo que es aplicada por el CIRA – UNAN conforme a métodos estandarizados.



Figura 7.6 Toma de muestras de sustratos para colecta de Fito bentos, en el río Pinula (febrero a julio de 2012).

Colecta de Macro Invertebrados Acuáticos del Bentos

Se tomaron muestras en los meses de enero – abril en diferentes sitios ubicados desde la cuenca alta o naciente, hasta la parte media baja. Durante la época seca del año 2012, antes de la entrada de la época lluviosa.

Los macroinvertebrados acuáticos fueron colectados en 3 puntos del río Pinula utilizando técnicas de raspado de piedras y hojas, arrastre de bentos con red de pantalla y red triangular, en cada sitio de monitoreo. Dichas técnicas fueron implementadas en la naciente, en la parte media y baja del río, con el objeto de diferenciar los ecosistemas del bentos de acuerdo a la variación de las condiciones de calidad del agua. Siguiendo la metodología de muestreo aplicada por el CIRA – UNAN.



Figura 7.7 Redes utilizadas para la colecta de MIAB en el río Pinula (febrero a julio de 2012).



Figura 7.8 Técnica de raspado de sustratos aplicada en la colecta de macroinvertebrados acuáticos en sedimentos y rocas del río Pinula (febrero a julio de 2012).

Análisis de la información

Análisis Instrumental

Tabla 7.4 Métodos, referencias y laboratorios de análisis de muestras de acuerdo a su matriz.

Análisis	Método	Matriz	Referencia	Laboratorio	Límite de Detección
Físico Químico	Ver anexo 2	Agua del río y pozos	APHA, 2005. Standard Methods, 21st. edition. Thermo Orion, 2001. ROSS Sodium Electrodes Instruction Manual. Model B6-11BN USA Thermo Orion	Laboratorio de Aguas Naturales y Aguas Residuales CIRA/UNAN (2012)	Ver anexo 2
Físico Químico	Ver anexo 2	Agua del río y pozos	Ver anexo 2	Soluciones Analíticas	Ver anexo 2
Nutrientes	4500-P.B.E	Agua del río y pozos	Ver anexo 2	Laboratorio de Aguas Naturales y Aguas Residuales CIRA/UNAN (2012)	Ver anexo 2
Arsénico Total, Mercurio Total	E. Rothery. et al, 1984	Sedimento, Río Pozo	PON-CM-02; PON-CM-03; PON-CM-16; PON-CM-17;	Manual de Procedimientos Operativos Normalizados en el Laboratorio de	(<i>sedimento</i>) As: 0,01 $\mu\text{g.g}^{-1}$

				Contaminantes Metálicos CIRA/UNAN (2012)	Hg: 0,002 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ <i>(agua)</i> As 2,02 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Hg: 0,09 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Cromo Total, Plomo Total	E. Rothery. et al, 1988	Sedimento, Río Pozo	PON-CM-11; PON-CM-12; PON-CM-2; PON-CM-22;	Manual de Procedimientos Operativos Normalizados en el Laboratorio de Contaminantes Metálicos CIRA/UNAN (2012)	(sedimento) Cr: 0,05 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Pb: 0,50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ <i>(agua)</i> Cr: 0,71 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ Pb: 4,64 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
Plaguicidas	CIRA/UNA N 2010	Sedimento y agua	Manual de Procedimientos Operativos Normalizados del Laboratorio de Contaminantes Orgánicos, PON – CO - 09	Laboratorio de Contaminantes Orgánicos CIRA/UNAN (2012)	Ver anexo 2
Análisis	Método	Matriz	Referencia	Laboratorio	Límite de Detección
Hidro – Carburos	CIRA/UNA N 2010	Agua	Manual de Procedimientos Operativos Normalizados del Laboratorio de Contaminantes Orgánicos, PON – CO - 09	Laboratorio de Radioquímica Ambiental CIRA/UNAN (2012)	Ver anexo 2
Granulometría	N- Austriaca, L-1061-88	Sedimento	L-1061-88	Laboratorio de Radioquímica Ambiental CIRA/UNAN (2012)	
Materia	Oxidación	Sedimento	López, R. 1990. El diagnóstico de suelo y planta, Método de	Laboratorio de Radioquímica	

Orgánica Total	Húmeda		campo y laboratorio, 4ta edición, Madrid España.	Ambiental CIRA/UNAN (2012)	
Macro Invertebrados Acuáticos del Bentos	Clasificación Taxonómica	Sedimento	Ver anexo 2	Laboratorio de Hidrobiología CIRA/UNAN (2012)	N.A.
Fito bentos	Clasificación Taxonómica		Ver anexo 2	Laboratorio de Hidrobiología CIRA/UNAN (2012)	N.A.
Conteo de Bacterias Aerobias	SM 9215	Agua del río y pozos	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 21th ed. 2005.	Soluciones Analíticas	< 10 UFC.ml ⁻¹
Coliformes Totales	SM 9221 B	Agua del río y pozos	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 21th ed. 2005.	Soluciones Analíticas	< 2 NMP/100ml
Coliformes Fecales	SM 9221 E	Agua del río y pozos	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 21th ed. 2005.	Soluciones Analíticas	< 2 NMP/100ml
<i>E. coli</i>	SM 9221 F	Agua del río y pozos	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 21th ed. 2005.	Soluciones Analíticas	< 2 NMP/100ml
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SM 5210 B 4500 C	Agua del río y pozos	Standard Methods for the examination of water and wastewater APHA, AWWA, WEF 21th ed. 2005.	Soluciones Analíticas	6 mg.l ⁻¹ O ₂

7.3 Análisis de los Resultados

Parámetros de Calidad del Agua medidos en Campo

Con los resultados registrados de la Conductividad Eléctrica, Salinidad y Sólidos Totales Disueltos medidos durante los meses de julio del 2011 hasta junio del 2012 se elaboró una base de datos que fue analizada a través del análisis de varianza de una vía para confirmar diferencias significativas entre los valores de campo de los puntos de muestreo de acuerdo a su ubicación en la cuenca (alta, media o baja). Aplicando de forma previa, una prueba de normalidad (Shapiro Wilks, con el software *Infostat 1.1*) a los valores de los parámetros: Conductividad Eléctrica, Salinidad y Sólidos Totales Disueltos, en cada punto de muestreo durante el tiempo de la investigación. Se eligieron estos tres parámetros porque, así como el color y olor, expresan de forma apreciablemente definida, el cambio de la calidad del agua en el río Pinula.

Se establecieron siete puntos abarcando la parte alta, media y baja de la microcuenca para ser comparados por medio de una prueba de diferenciación de varianzas, en el caso de la variable CE se efectuó a través de una prueba post host T3 de Dunnett⁵ (Anexo 3), utilizando el software SPSS15. Los STD y la Salinidad fueron analizados por medio de una prueba de diferenciación de varianzas post host de Scheffe (varianzas homogéneas) (Anexo 3), utilizando el software SPSS 15.

El resto de variables analizadas en campo (Oxígeno disuelto, pH, Eh, Temperatura) no fueron analizados estadísticamente aunque se reportan los promedios y desviaciones observadas en el capítulo de resultados.

Parámetros Físico-Químicos de las aguas medidos en Laboratorios

El contenido de iones en el agua del río Pinula y en pozos cercanos fue comparado con los valores de las variables de campo para relacionar el grado de mineralización expresado con las condiciones de salinidad del medio, como un indicador de cambio de calidad en el agua que puede estar asociado a uno o

⁵ Se utilizó esta prueba debido a que algunos sitios no presentaron homogeneidad de varianzas, ver anexo 3.

más iones. Esto permitió determinar la naturaleza del cambio de calidad en el agua confirmando sus posibles causas por la incorporación de aguas residuales ordinarias y especiales, tomando como referencia los iones mayoritarios.

Carga de Contaminantes en Agua

Expresado en Micro-gramos de contaminante por metro cúbico y kilogramos de contaminante al día ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y $\text{Kg}\cdot\text{d}^{-1}$). Los valores de parámetros como DBO, DQO, metales pesados, plaguicidas y sales disueltas fueron comparados con valores guía de uso regional (Normas CAPRE, OMS) y nacional (COGUANOR) para establecer las condiciones del estado actual del agua del río, para uso agrícola y el agua de pozos para consumo humano.

Respuesta del Fito bentos y Fitoplancton a la calidad del agua

De acuerdo a los resultados del laboratorio de Hidrobiología del CIRA/ UNAN, se analizó la información por medio de índices que asignan valores de acuerdo a la tolerancia y adaptación de diferentes familias, géneros y especies, basados en la metodología de evaluación, en el caso del fitobentos se utilizó el Índice Trófico de Diatomeas TDI publicado en 2001 por R & D (Technical Report E2/TR2), elaborado por M. G. Kelly *et. al.*, 2001. Con el que se estimó el nivel de eutrofización del agua por el contenido de nutrientes y en el caso del fitoplancton utilizando los índices de polución orgánica OPI y el índice ID de Nigaard para estimar el estado trófico de acuerdo al contenido de nutrientes.

$$TDI = \frac{\sum a_j s_j v_j}{\sum a_j v_i}$$

Dónde: a_j es la abundancia de valvas de la especie j ; s_j indica la sensibilidad a la polución y v_j es el valor del indicador.

$$OPI = \sum \text{valor del índice para cada género}$$

$$ID = \text{número de valvas centrales} / \text{número de valvas pennales}$$

Respuesta de los Macroinvertebrados a la calidad del agua del río Pinula

Para medir los efectos de la contaminación en la abundancia y diversidad de macroinvertebrados acuáticos, los resultados de los laboratorios de Hidrobiología del CIRA/UNAN fueron analizados tomando como referencia la clasificación propuesta por Hilsenhoff (1987) y adaptada por José M. Sermeño Chicas *et. al.*, 2010, en Índice Biótico a nivel de Familias de Invertebrados Acuáticos para El Salvador IBF-SV-2010 en el cual se le asignan valores de importancia ecológica a los individuos colectados de acuerdo a la familia de macroinvertebrados a la que pertenecen y es ponderado a nivel de población de acuerdo a un modelo matemático.

$$IBF = \frac{1}{N} * \sum_{i=0}^n (ni * ai)$$

Donde:

n_i = Número de Individuos en la familia i

a_i = Valor asignado a la familia i (anexo 8)

N = Número total de individuos de la muestra

VIII. RESULTADOS

Conductividad Eléctrica del agua del Río Pinula

Los valores de la conductividad eléctrica CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) del agua del río Pinula mostraron diferencias significativas de acuerdo a la ubicación de los sitios en donde se realizaron las mediciones (figura 8.1). Los sitios 1, 2 y 3 se ubican en la parte alta de la microcuenca del río Pinula con valores de CE $< 300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Las CE de las aguas en el resto de sitios muestran diferencias significativas ($\alpha=0.05$) respecto a las CE de las aguas de la parte alta o nacimiento y corresponden a los puntos ubicados de la parte media baja con valores de $327 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \leq \text{CE} \leq 4236 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, y la parte baja con valores de $645 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \leq \text{CE} \leq 861 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (sitios 4-7). Siendo el sitio 4 (Israel río) el que presenta en promedio mayor valor de conductividad eléctrica en el agua y mayor variación en el período evaluado, de noviembre del 2011 – junio del 2012.

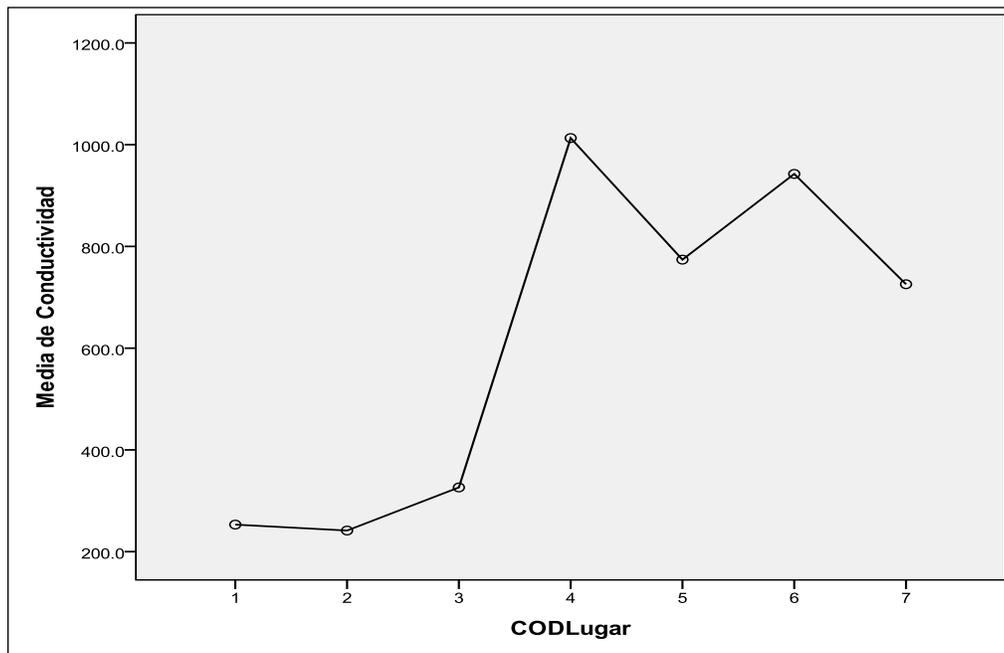


Figura 8.1 Tendencia espacial de la Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) Eléctrica en el agua del río Pinula (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

CODLugar =código del lugar; 1= Muxnac; 2= Muxaforo; 3= HpieAforo; 4= Israel río; 5= Canal VH; 6= Desfogue; 7= Vibosdp.

Los valores de CE observados en las aguas del río, limitan su uso para producción agrícola según la clasificación propuesta por la FAO (Ayers & Wescot, 1897). El sitio que reportó aguas con mayor CE está ubicado cerca de un desagüe proveniente de la zona franca en la zona 12 de la ciudad de Guatemala (fig. 8.2).

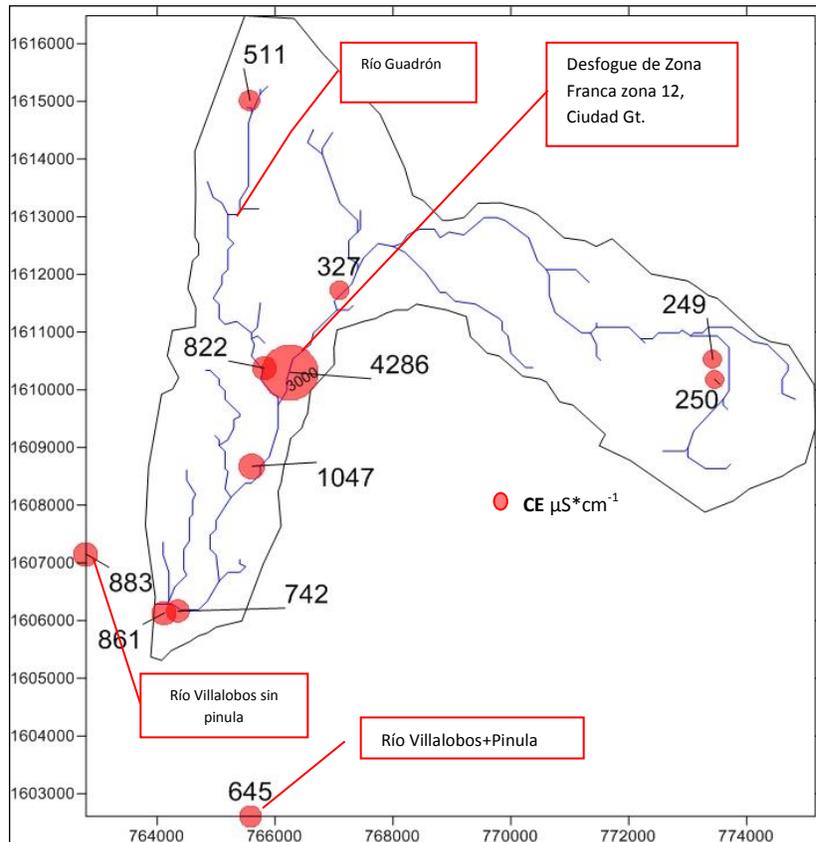


Figura 8.2 Conductividad eléctrica en el agua del río Pinula, valores expresados en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
(Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Sólidos Totales Disueltos STD en agua del Río Pinula

Al igual que los valores de Conductividad Eléctrica, las pruebas estadísticas revelaron significancia ($\alpha=0.05$) entre los valores observados del contenido de STD en aguas del río de la parte alta de la microcuenca (sitios 1-3) y los valores observados en la parte media y baja (sitios 4-7). Siendo el agua del río en el sitio 4 (Israel río) donde se observó mayor variación y valores de STD ($\mu\text{S}\cdot\text{l}^{-1}$) por encima de los demás sitios (figura 8.3).

Salinidad en el agua del río Pinula

Según el análisis estadístico se encontró significancia ($\alpha=0.05$) entre los valores de salinidad de las aguas en los sitios monitoreados en la parte alta (1-3) con respecto a los valores observados en la parte media y baja del río Pinula (4-7). Al igual que los parámetros de Conductividad Eléctrica y TDS, en el sitio 4 (Israel río) la Salinidad (figura 8.4) presentó los valores promedios más altos.

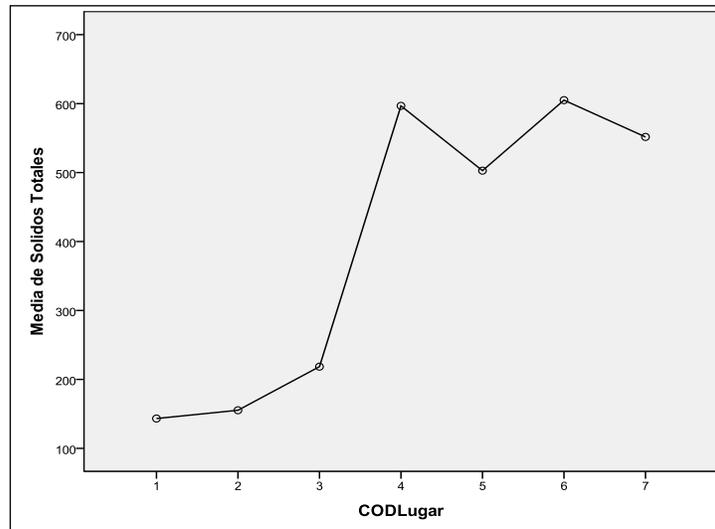


Figura 8.3 Tendencia espacial del contenido de Sólidos Totales Disueltos en agua del río Pinula mg.l^{-1} (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

CODLugar = código del lugar; 1= Muxnac; 2= Muxaforo; 3= HpieAforo; 4= Israel río; 5= Canal VH; 6= Desfogue; 7= Vlbosdp.

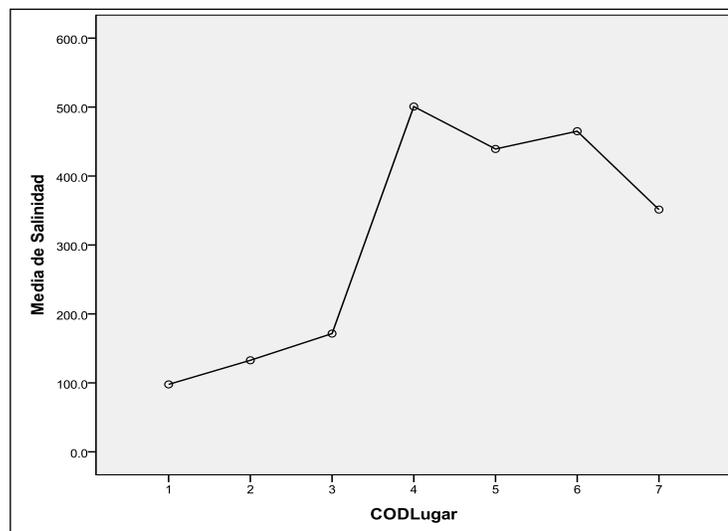
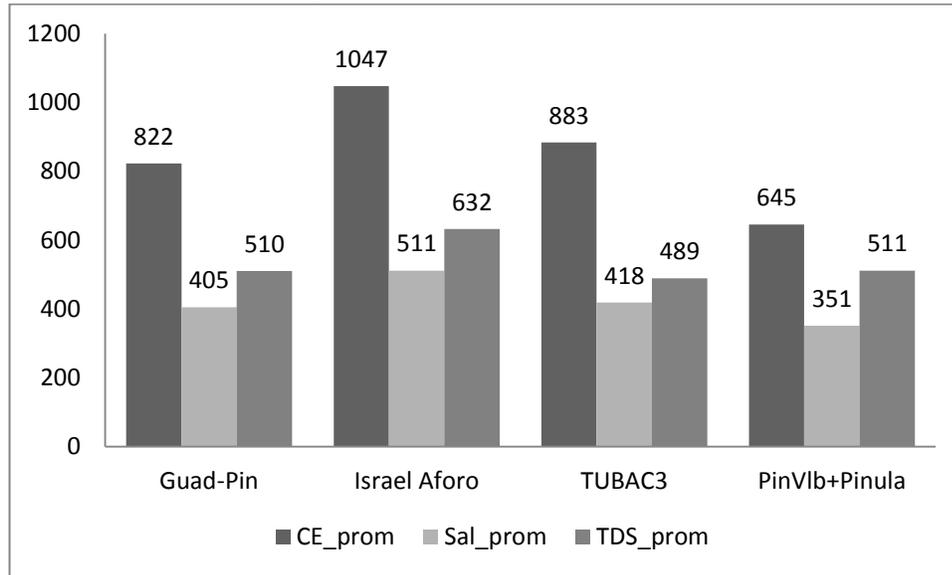


Figura 8.4 Tendencia espacial de los valores de Salinidad en agua del río Pinula mg.l^{-1} (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

CODLugar = código del lugar; 1= Muxnac; 2= Muxaforo; 3= HpieAforo; 4= Israel río; 5= Canal VH; 6= Desfogue; 7= Vlbosdp.

Cuadro 8.1 Valores ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) promedio de parámetros de campo antes y después de confluencia Guadrón-Pinula; Pinula – Villalobos (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).



Guad-Pin= río Guadrón antes de confluencia; Israel Aforo= Después de confluencia Guadrón con Pinula; TUBAC3= Antes de confluencia Villalobos con Pinula; PinVlb+Pinula= Después de confluencia Pinula con Villalobos

Conductividad Eléctrica (CE) en agua de pozos

Las aguas de todos los pozos presentaron valores de CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) por debajo de la norma para agua de consumo humano COGUANOR 2029001 (LMP $< 1500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Las mediciones de CE revelaron la existencia de tres pozos con valores promedios superiores a los valores guía de las normas CAPRE ($400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y el valor recomendado por la Comisión Económica Europea, CEE ($400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) para aguas de consumo humano. Dichos pozos se ubican, uno en la parte alta (CE = $472 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), parte media (pozo Israel, CE = $574 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y la parte baja (Parajes, CE = $1\ 065 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Se puede observar que la mayor parte de los pozos presentan valores de CE en el rango de $250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1} \geq \text{CE} \leq 400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (figura 8.5).

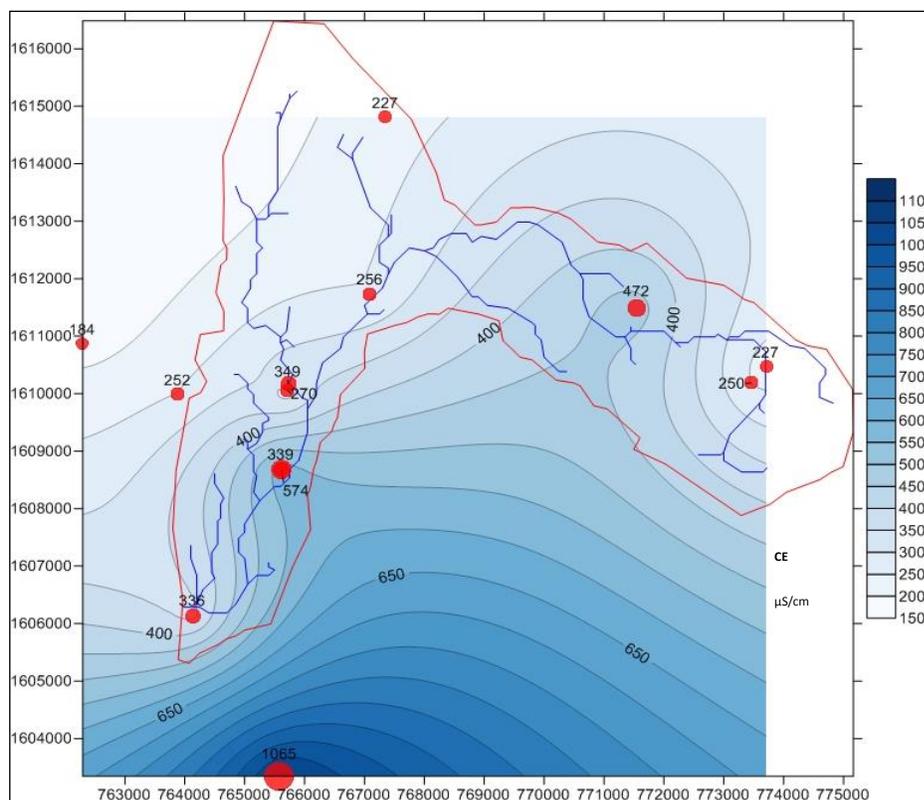


Figura 8.5 Interpolación de la Conductividad Eléctrica en el agua de pozos cercanos al río Pinula (Valores expresados en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Sólidos totales disueltos(STD) y Salinidad

Los valores de la Salinidad (S) y de los Sólidos Totales Disueltos (STD) presentaron correlación ($r^2 = 0,875$) conforme a la Conductividad Eléctrica. De acuerdo con la clasificación de agua para riego propuesta por FAO (Ayers & Wescot, 1897), el río Pinula presenta valores de STD que restringen su uso de forma ligera a moderada ya que presentó valores por encima de $450 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ desde la parte media, hasta el desfogue (Fig. 8.6 A) $489 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1} \leq \text{STD} \leq 2\,770 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

De acuerdo al contenido de STD el agua de la mayor parte de los pozos monitoreados presentó valores por debajo del límite máximo aceptable LMA = $500 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de la norma guatemalteca de agua para consumo humano COGUANOR 2029001, exceptuando un pozo en la parte media (Israel Pozo) que presentó en promedio $697 \text{ mg}/\text{l}$ de STD.

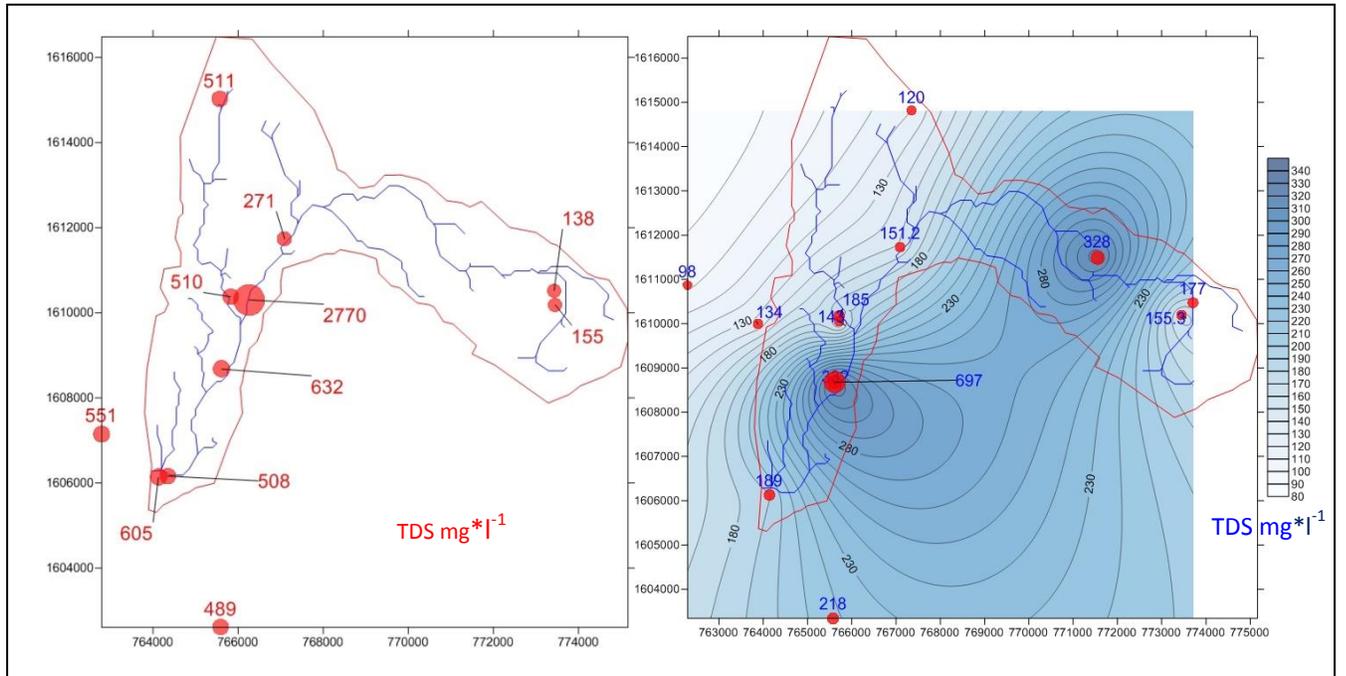


Figura 8.6 Sólidos Totales Disueltos ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) Río Pinula (mapa izquierda) y pozos cercanos (mapa derecha), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Sistema de Drenaje de la Micro Cuenca Hídrica

Caudal del río Pinula, Isolíneas y Flujo subterráneo

El caudal del río Pinula fue medido en cuatro puntos y estimado en el desfogue. Durante el período de enero a junio 2012, el promedio diario es aproximadamente 2,3 millones de litros (fig. 4.7A), siendo menos que 38% lo que corresponde al caudal en la cuenca alta o naciente del río.

Las líneas de flujo (figura 8.7B) fueron elaboradas en base a la información recopilada de enero a junio del 2012 de los niveles de pozos municipales y privados. Las líneas de dirección de flujo subterráneo muestran un desplazamiento de Norte a Sur y responden a la topografía del terreno y fallas locales, siendo los pozos ubicados en la cuenca baja los que presentaron niveles estáticos más cercanos al nivel del suelo.

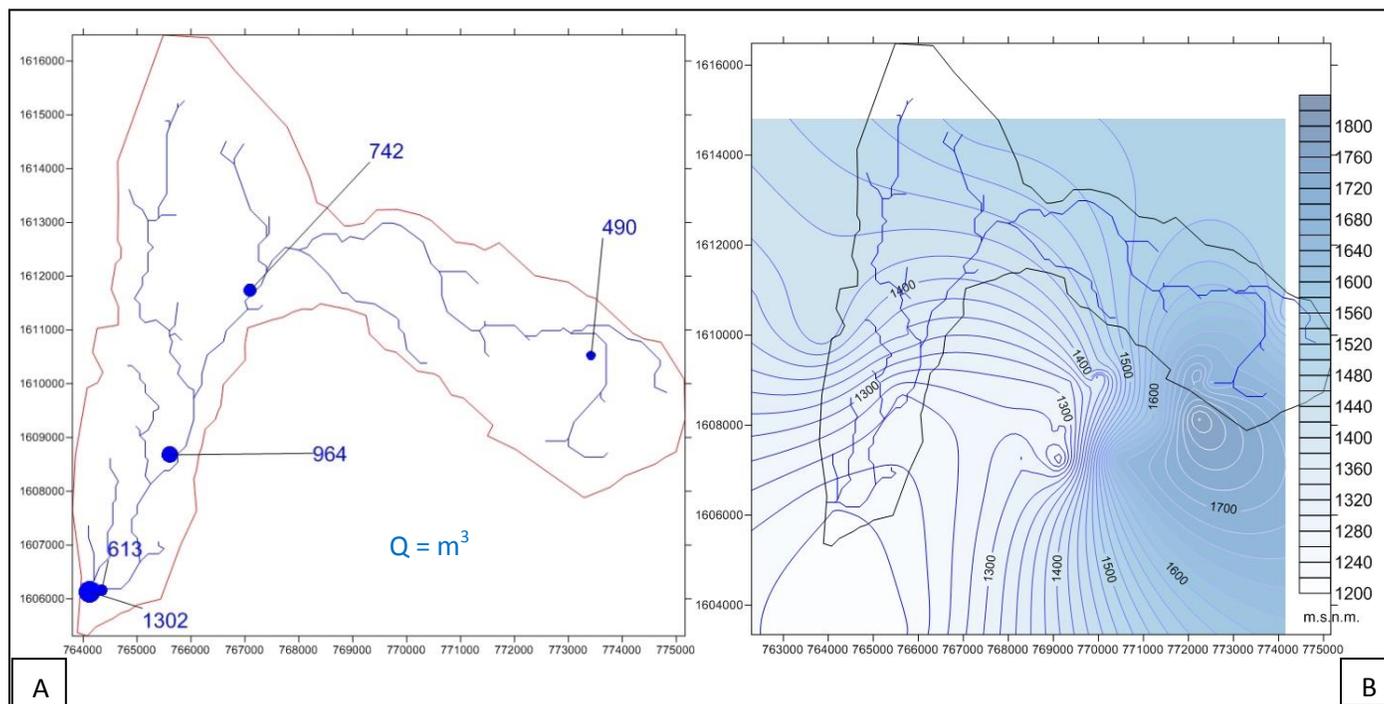


Figura 8.7 Hidrografía en la microcuenca del río Pinula. A. Caudal superficial del río (miles de litros diarios). B. Niveles piezométricos promedio (m) y líneas de flujo subterráneo (msnm), (Valores promedio de noviembre del 2011 a junio del 2012).

En la parte media y baja de los ríos Pinula y Villalobos se registran transmisividades del acuífero superior que pueden variar de 50 – 750 m² por día (Herrera & Orozco, 2010). Conforme a la ecuación de flujo de Darcy se estimó un caudal subterráneo que varía de 170 mil a 2,5 millones de litros diarios, en el área que encierra la cuenca media del río Pinula.

Tipo Hidroquímico en aguas de la Microcuenca del río Pinula

Aguas del río Pinula

El resultado del análisis físico químico efectuado a 6 muestras de agua tomadas en el río Pinula durante el mes de enero y abril del 2012 tiene coherencia con los resultados de la evaluación de parámetros de calidad del agua medidos en campo. Los resultados que se muestran en la tabla 8.1 evidencian que los primeros puntos de muestreo ubicados en la cuenca alta (Muxnac, MuxAforo y HpieAforo) presentan menor contenido mineral en comparación al resto de sitios en la cuenca media, baja y desfogue que presentan valores más elevados (meq.l⁻¹). El punto Israel río fue

muestreado dos veces, en el mes de enero y abril del 2012 mostrando poca variación entre los dos muestreos.

Tabla 8.1 Contenido de aniones y cationes en muestras de agua del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

	MuxNac	MuxAforo	HpieAforo	Israel Río	Israel Río	Desfogue
aniones (meq/l)	Meq.l ⁻¹					
HCO ₃ ⁻	1,52	2,40	2,75	5,43	4,87	6,66
SO ₄ ⁼	0,07	0,22	0,46	4,79	2,10	3,13
Cl ⁻	0,12	0,33	0,31	0,96	1,11	1,44
CO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO ₃ ⁻	0,16	0,19	0,07	0,27	0,01	0,29
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻	0,28	0,52	0,38	1,23	1,12	1,73
sum aniones	1,87	3,14	3,59	11,45	8,09	11,51
cationes(meq/l)	Meq.l ⁻¹					
Na ⁺ + K ⁺	0,16	1,11	1,64	11,71	4,73	9,69
Na ⁺	0,06	0,95	1,43	11,09	4,43	9,00
K ⁺	0,10	0,15	0,21	0,62	0,29	0,69
Ca ⁺⁺	0,75	1,31	1,70	2,65	1,60	3,05
Mg ⁺⁺	0,56	0,80	0,73	1,24	1,16	1,49
sum cationes	1,47	3,21	4,07	15,60	7,49	14,22

INDICE SAR	0,1	0,9	1,3	8,0	3,8	6,0
------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Estos resultados confirman la variación cualitativa del agua del río, perceptible por medio de la Salinidad, TDS y CE. Confirman además que el agua muestreada en la parte baja y el desfogue del río presentan cualidades que limitan el uso para fines agrícolas, basados en el valor del Radio de Absorción de Sodio (RAS) y la Conductividad Eléctrica del agua, considerando los riesgos de alcalinización y salinización de suelos irrigados (fig. 8.8).

Los aniones predominantes son Bicarbonato (HCO₃⁻) y Sulfato (SO₄⁼) Mientras que los cationes predominantes son Calcio (Ca⁺⁺), Magnesio (Mg⁺⁺) y Sodio (Na⁺)

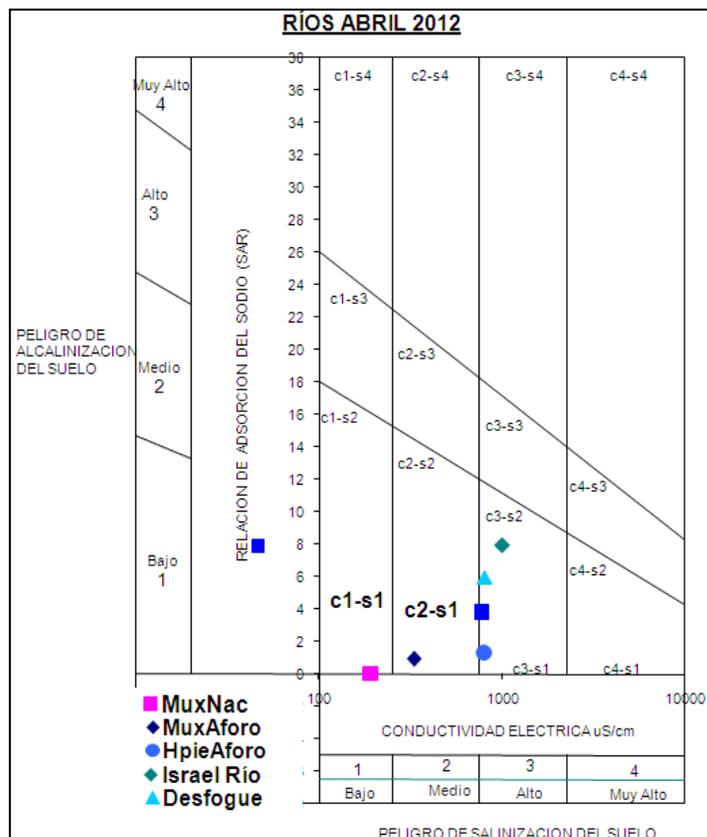


Figura 8.8 Diagrama del riesgo de alcalinización y salinización del suelo por el RAS & CE.

El aumento de la salinidad del agua y de la conductividad eléctrica está asociado al cambio de tipo hidroquímico, aumentando cuando predomina el sodio Na^+ , catión mayoritariamente responsable de la alteración en los parámetros medidos en campo (Sal, CE, TDS) a partir de la cuenca media hasta el desfogue del río (fig. 8.9).

Por medio de la comparación del contenido de iones predominantes (Figura 8.9 B) se ha determinado que las aguas se diferencian entre la cuenca alta, cuenca media y baja. Las aguas de la cuenca alta se caracterizan por ser del tipo Bicarbonatadas cálcico magnésicas $\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$; las de la cuenca media y baja del tipo Bicarbonatadas sulfatadas sódico cálcicas $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{--} / \text{Na}^+ / \text{Ca}^{++}$ presentando los iones sulfato en proporciones similares al bicarbonato y mayor contenido de sodio, diferenciándose de las aguas del río en la cuenca alta o naciente. La incorporación de estos iones, sugiere la presencia de aguas residuales de tipo ordinario y especial.

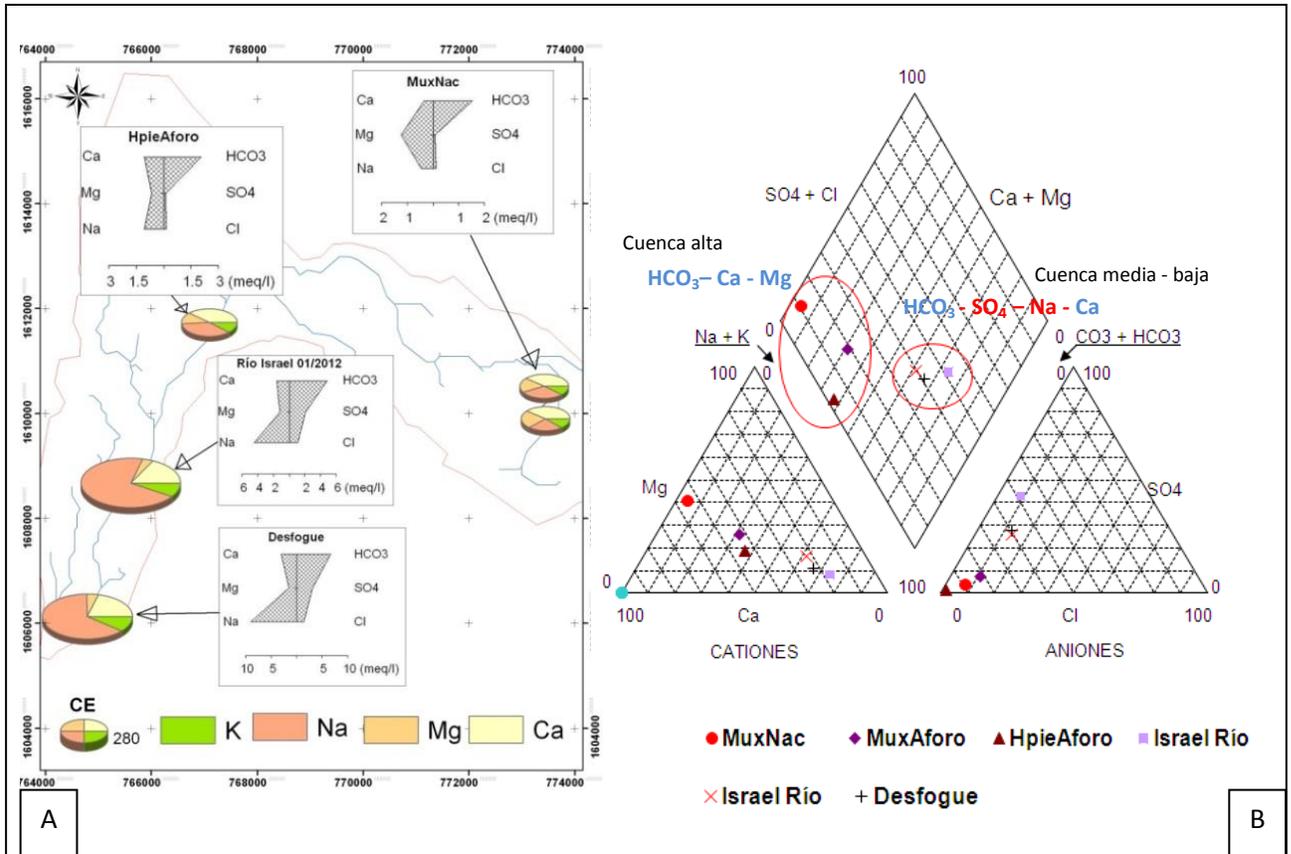


Figura 8.9 Tipo Hidroquímico del agua del río Pinula en diversos puntos de muestreo. A. Especiación de Cationes predominantes. B. Diagrama Piper y tipo hidroquímico de las muestras de agua. (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Agua de Pozos cercanos al río Pinula

El resultado del análisis físico químico efectuado a las muestras de agua tomadas durante el mes de abril del 2012 en 5 pozos correspondiente al acuífero superior (≤ 300 m de profundidad), cercanos al río Pinula, se muestran en la tabla 8.2 donde se evidencia que los primeros puntos de muestreo ubicados en la cuenca alta y media (Muxnac, Hpie) presentan menor contenido mineral en comparación al resto de sitios en la cuenca (Pozos, Israel, Transurbano, Parajes) que presentan valores más elevados (meq.l^{-1}).

Los aniones predominantes son los HCO_3^- en primer lugar y los SO_4^- y Cl^- en segundo lugar a partir de la cuenca media. Los cationes que predominan son, en la

naciente el Ca^{++} , de la cuenca media hasta la zona de descarga del acuífero predomina el Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} en orden de abundancia.

Tabla 8.2 Contenido de aniones y cationes en muestras de agua de pozos cercanos al río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

aniones (meq/l)	Meq.l ⁻¹					
HCO ₃ ⁻	1,52	2,12	2,81	2,52	3,80	7,44
SO ₄ ⁼	0,07	0,13	1,30	1,11	0,05	1,58
Cl ⁻	0,12	0,18	1,16	1,03	0,09	1,51
CO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NO ₃ ⁻	0,16	0,07	0,88	0,82	0,02	1,72
Cl ⁻ +NO ₃ ⁻	0,28	0,25	2,04	1,85	0,11	3,24
sum aniones	1,87	2,49	6,15	5,48	3,96	12,26
cationes(meq/l)	Meq.l ⁻¹					
Na ⁺ + K ⁺	0,55	1,11	2,37	2,29	2,40	3,18
Na ⁺	0,45	1,04	2,30	2,23	2,32	3,02
K ⁺	0,10	0,07	0,07	0,06	0,09	0,15
Ca ⁺⁺	0,75	1,05	2,16	1,94	1,15	4,68
Mg ⁺⁺	0,56	0,67	1,45	1,43	0,48	3,66
sum cationes	1,86	2,83	5,98	5,66	4,03	11,52
INDICE SAR	0,6	1,1	1,7	1,7	2,6	1,5

De acuerdo a la clasificación del uso de agua para fines agrícolas todos los pozos presentaron aguas que al ser usadas como fuente de riego generan bajo riesgo de alcalinización del suelo, mientras que de acuerdo a la conductividad eléctrica los pozos ubicados en la parte baja presentan aguas con riesgo de salinizar el suelo, de grado medio y alto (figura 8.10).

Al igual que los sitios de muestra de agua del río Pinula, los pozos ubicados cerca del río presentaron variación del tipo hidroquímico, incorporando los iones (SO_4^- y Na^-) a partir de la cuenca media. En menor proporción se detectó la presencia de potasio K^+ en un manantial en la naciente del río (Muxnac) lo que podría ser evidencia de la influencia agrícola desde dicha zona. La incorporación del catión Na^+ en los últimos tres pozos (figura 8.11) hace que la conductividad eléctrica del agua de los pozos aumente. La presencia de este catión en el pozo Israel coincide con la del agua del río Pinula en ese mismo punto y en el pozo Transurbano, ubicado cerca del desfogue del río. Los valores que fueron reportados de los Aniones y Cationes

están por debajo de los límites que establecen las normas nacionales para agua de consumo humano COGUANOR 2029001.

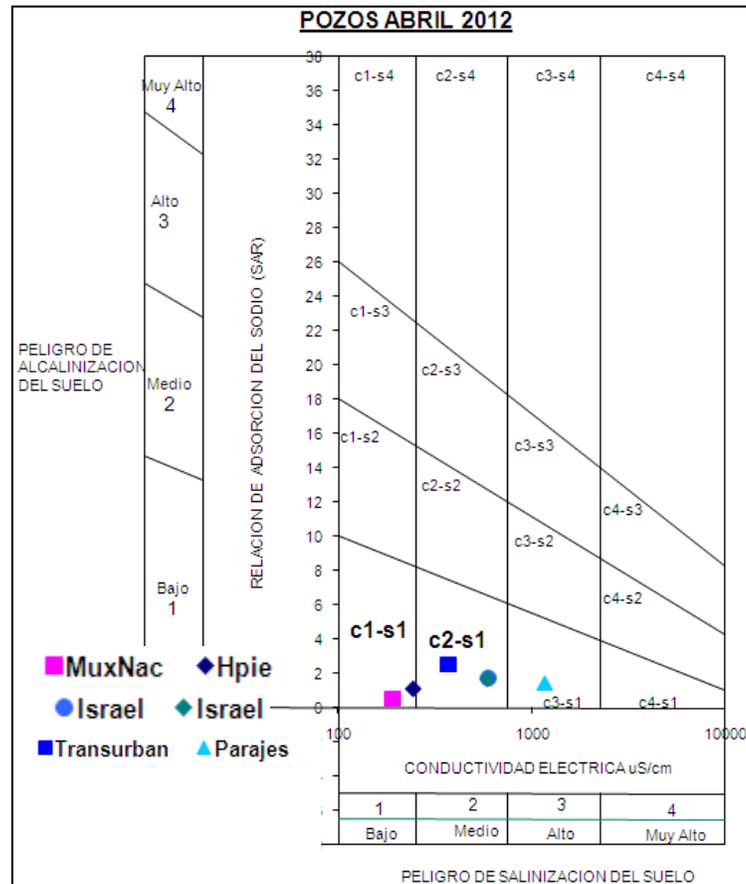


Figura 8.10 Diagrama del riesgo de alcalinización y salinización del suelo por el RAS & CE.

En la zona de estudio no existen fuentes naturales que aporten de forma significativa los iones sulfatos y sodio ($SO_4^{=}$ y Na^{\sim}) al sistema de drenaje del río Pinula. Por lo tanto se sospecha que los aportes que generan la modificación del tipo hidroquímico y la calidad al agua del río, son de origen antropogénico.

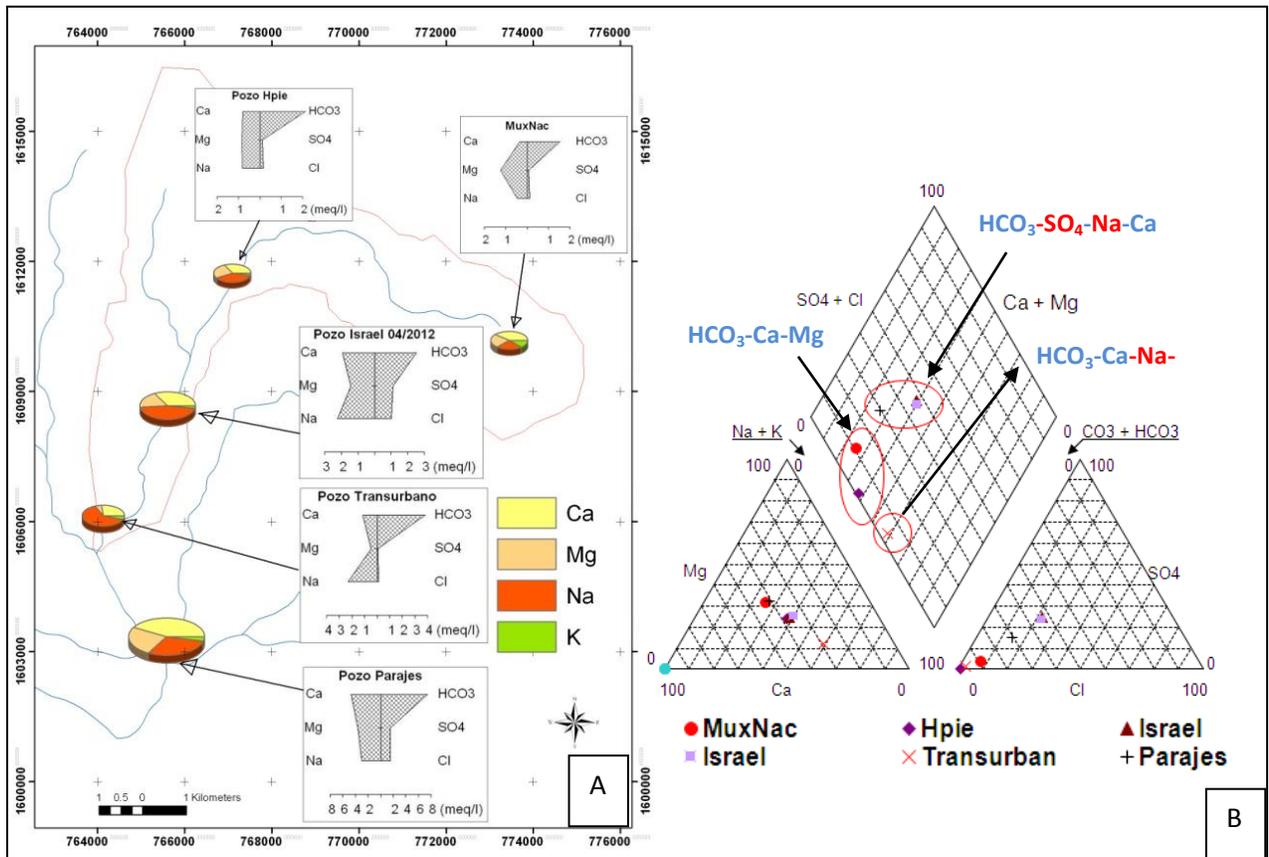


Figura 8.11 Tipo Hidroquímico del agua de pozos cercanos al río Pinula. A. Especiación de Cationes predominantes. B. Diagrama Pípper y tipo hidroquímico de las muestras de agua. (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Presencia de Nutrientes en agua del río Pinula y pozos cercanos

Nutrientes en el agua del Río Pinula

El contenido de nutrientes (N:P) y la clasificación de acuerdo al contenido de cada una de las formas químicas en que se encuentra el nitrógeno en el agua del río, muestra diferenciación entre los resultados obtenidos en los sitios de la cuenca alta o naciente, respecto de los puntos ubicados en la parte media al desfogue (fig. 8.12).

El contenido de Nitrógeno total (N-tot) en los puntos de muestreo varía (en mg.l^{-1}) de $3,6 \geq \text{N-tot} \leq 63$, aumenta conforme se avanza en el recorrido del río. El mismo fenómeno se observó en el caso del contenido de Fósforo total (P-tot) que varía (en

$\mu\text{g.l}^{-1}$) de $136 \geq \text{P-tot} \leq 10\ 000$, reportando los valores más bajos en la naciente y los más altos en el desfogue del río Pinula.

Conforme el Índice trófico para aguas de embalses tropicales basado en el contenido de fósforo total ppm (Toledo, Tolarico, & Chinez, 1984) (anexo 4) se le atribuye cualidades de Hiper-eutrofización al agua del río Pinula en todos los puntos de muestreo ($67 \geq \text{valor del índice} \leq 129$). De acuerdo a dicha evaluación utilizando el parámetro P- PO_4 , el agua del río Pinula presenta condiciones de eutrofización en las aguas de la naciente (valor del índice = 55,6).

Se observa que la forma que predomina del Nitrógeno en el agua del río en todos los puntos es la forma orgánica o Nitrógeno – Kjendhal, a excepción de la cuenca alta o naciente, en donde predominan los Nitratos en el punto Muxnac. La presencia de Nitritos es mayor en la cuenca media y el punto de aforo de la cuenca alta ($0,12 - 0,4 \text{ mg.l}^{-1}$).

El agua del río Pinula presenta características de calidad de agua Hipereutróficas en todos los puntos de acuerdo al contenido de Nitrógeno total N-tot, según la clasificación propuesta por (Wetzel, 1981), ya que presenta valores en $\mu\text{g.l}^{-1}$ que van $3\ 500 \leq \text{N-tot} \leq 63\ 000$ (ver anexo 5).

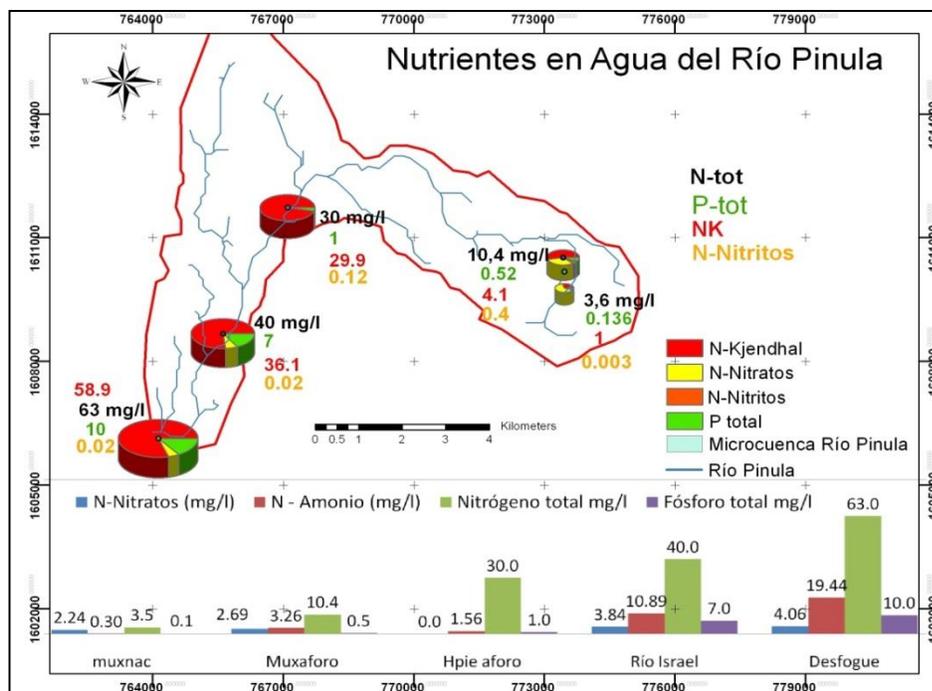


Figura 8.12 Presencia de Nutrientes en agua del río Pinula. (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Nutrientes en agua de Pozos cercanos al río Pinula

El contenido de nutrientes en el agua de pozos debería ser un indicador de contaminación, ya que no es común que las aguas subterráneas presenten contenidos significantes de Fósforo y/o Nitrógeno. Pero en el caso de los pozos más someros, cercanos al río, estos pueden ser susceptibles a infiltración de aguas de escorrentía cargadas en materia orgánica.

Las formas que prevalecen de los nutrientes en los pozos cercanos al río corresponden a Fósforo total (P-tot), Nitrógeno Kjendhal (NK) y N-NO₃ (N-Nitratos) (Fig.8.13). El sitio que presenta mayor contenido de P-tot es el río Israel, mientras que el de mayor contenido de N-NO₃ es Pozo Parajes, aunque ambos pozos tienen restricción de uso de acuerdo a las normas para agua potable COGUANOR, CAPRE, Normas Canadienses (CCREM, 2008), ya que contienen más de 10 mg.l⁻¹ de N-NO₃. La presencia del NK en el agua de los pozos cercanos al río Pinula puede ser un indicador de infiltración de vertidos con alta carga orgánica originados por infiltración de agua del río Pinula, sistemas de drenajes con fugas en zonas urbanas

cercanas, etc. El pozo Israel presenta los mayores valores registrados (NK = 7,7 mg.l⁻¹).

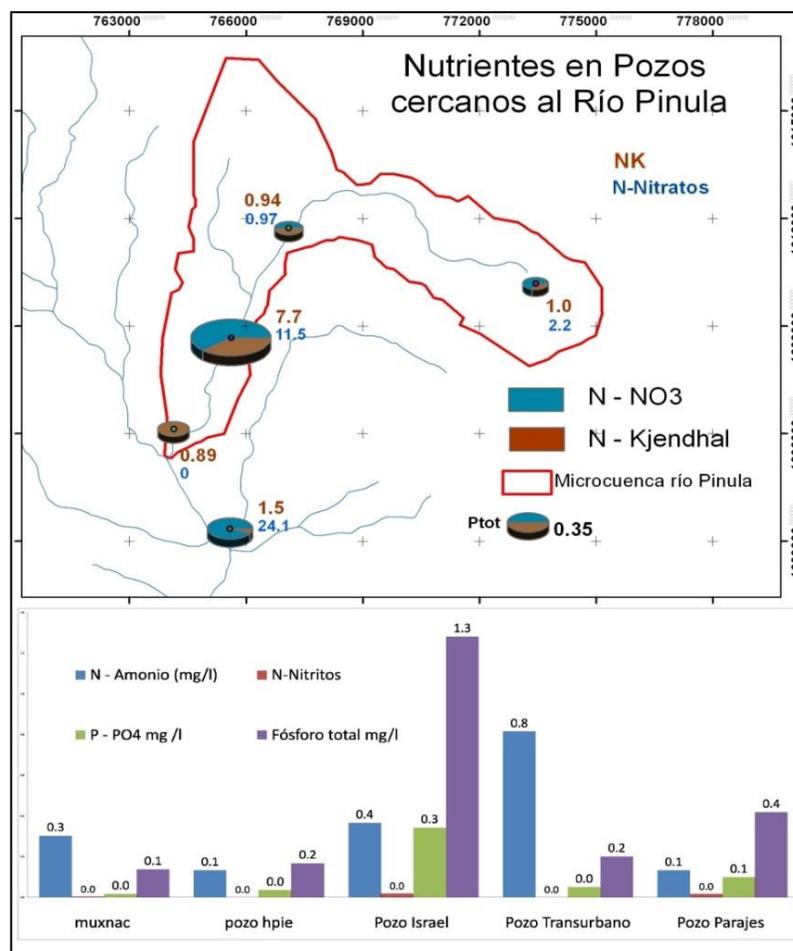


Figura 8.13 Presencia de Nutrientes en agua de pozos cercanos al río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Recursos Hidrobiológicos

Se observan diferentes figuras y colores, de acuerdo al tipo de análisis y matriz hidrobiológica (fitoplancton, fitobentos, macroinvertebrados acuáticos) y respecto a la calificación propuesta por dicho análisis.

Fitoplancton

Las muestras de fitoplancton fueron tomadas en dos sitios del recorrido del río Pinula. El primer sitio ubicado en un pequeño embalse construido alrededor de un manantial de la cuenca alta o naciente (Mux.Nac Tanque), el segundo sitio (Hpie. Bombeo) ubicado en un embalse construido de donde se extrae agua del río Pinula para tratamiento y distribución pública (fig. 4.5a). De acuerdo al análisis TDI (Índice Trófico de Diatomeas) (Enviromental Agency, 2001), el primer punto de muestreo indica contaminación evidente y el segundo sitio está muy contaminado (fig. 8.14a).

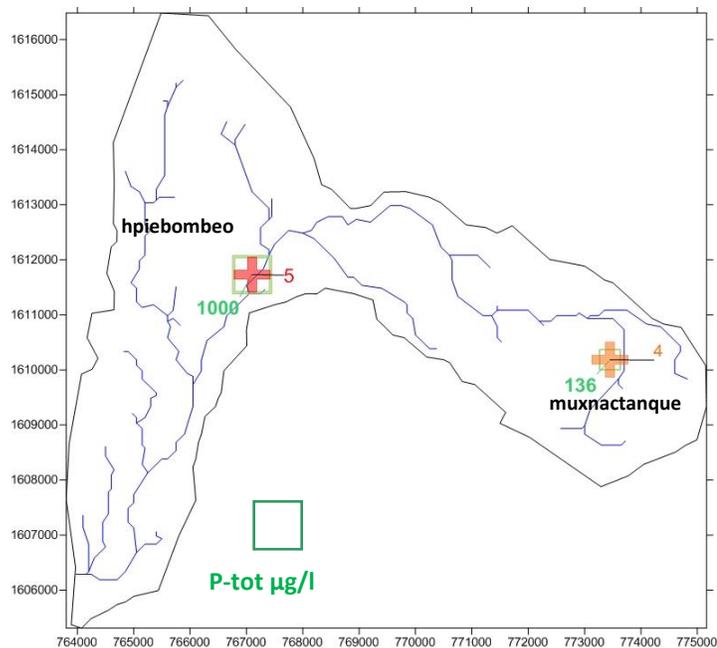


Figura 8.14 a. Índice trófico de diatomeas en fitoplancton del río Pinula (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012),  Muy contaminado;  Contaminado

En la figura 8.15 se observa paridad entre el porcentaje de valvas móviles (50%) y se evidencia la presencia del género *Euglena sp.* cuya abundancia (1%) no refleja valores alarmantes, pero su presencia es un indicador de contaminación (ver anexo 7). De acuerdo a la clasificación propuesta por Nygaard (1949) (tomado de Roldán & Ramirez, 1998) denominada OPI (índice de polución orgánica) que le transfiere a dicho género el máximo valor de polución 5 (anexo 8).

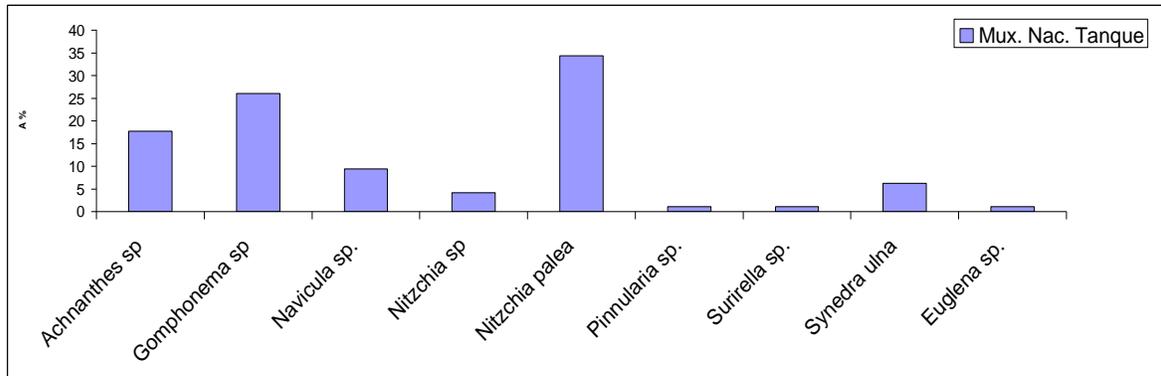


Figura 8.15 Abundancia de especies de fitoplancton, embalse del manantial, cuenca alta o naciente del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

En el sitio Hpie.Bombeo, (figura 8.16) aumenta el porcentaje de abundancia de las valvas móviles (64,3%) indicando la proliferación de especies tolerantes a ambientes contaminados.

La presencia de *Scenedesmus sp.* se considera un indicador de polución orgánica (grado 4) de acuerdo con la clasificación OPI Nygaard (1949) (tomado de Roldán & Ramirez, 1998). Cabe resaltar además la abundancia de *Gomphonema parvulum* & *Nitzschia palea* que han sido categorizadas como “valvas tolerantes a polución orgánica” (Environmental Agency, 2001).

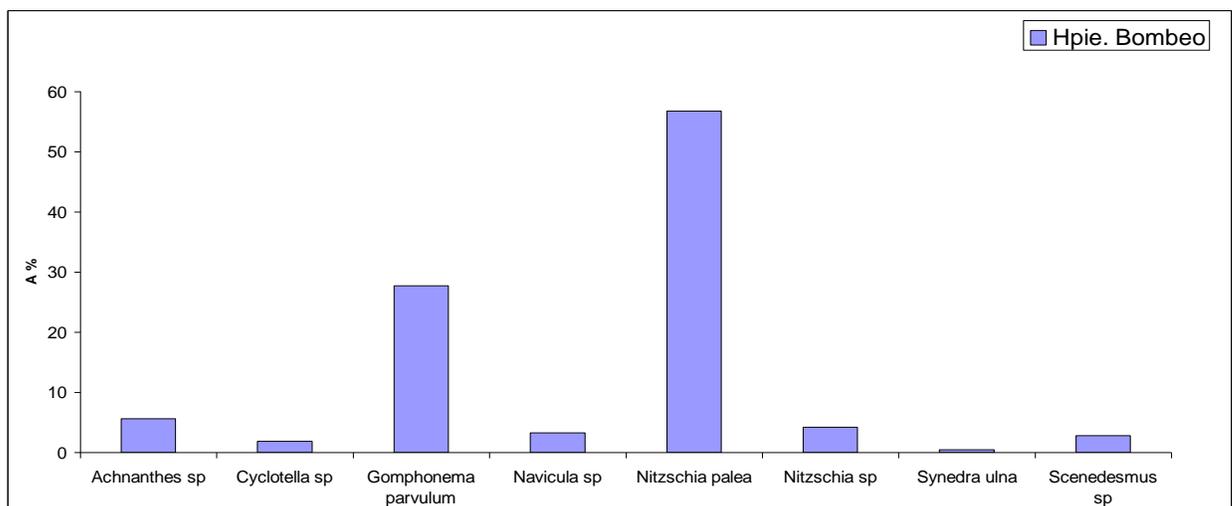


Figura 8.16 Abundancia de especies de fitoplancton, embalse de la planta de bombeo Hincapié, cuenca media del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

La figura 8.17 muestra el desplazamiento horizontal de acuerdo a la variación en el % de valvas móviles, lo cual puede ser indicador de contaminación orgánica, así como el desplazamiento o cambio vertical debido al aumento en el valor de TDI que es asociado al aumento del contenido de nutrientes, conforme a la evaluación propuesta por Environmental Agency, (2001).

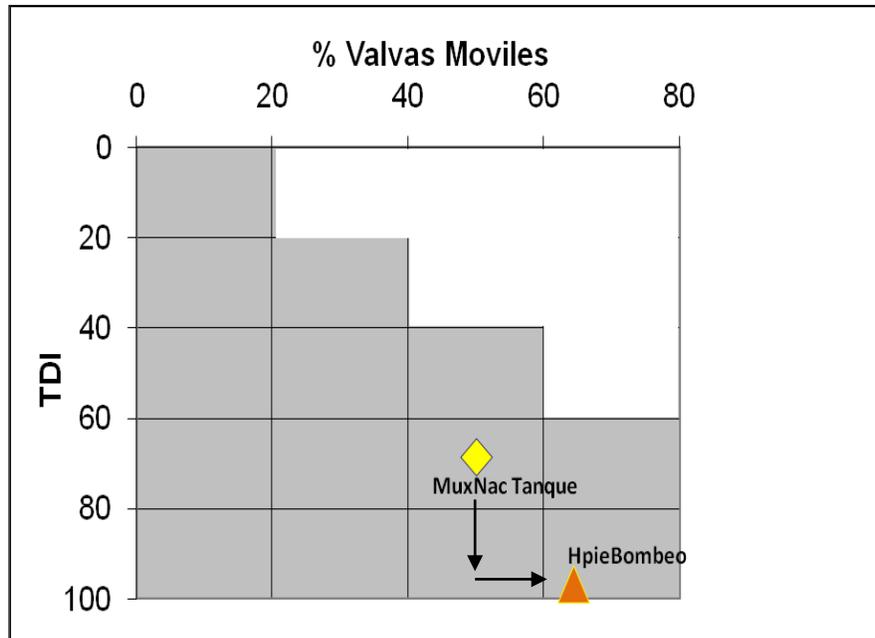


Figura 8.17 Representación gráfica de los indicadores biológicos utilizados en el análisis del fitoplancton, (Valores promedio de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Fitobentos ●

De acuerdo a lo que muestra el gráfico 8.18 los puntos de muestreo ubicados en la parte alta, están representados por organismos indicadores de mala calidad en lo que corresponde al Fitobentos, evaluado mediante la técnica propuesta por Environmental Agency of US (Kelly, MG 2001) (Anexo 7).

En forma de círculos de color amarillo y naranja se observa el deterioro de la calidad del agua entre dos puntos de corta inter-distancia (< 2 km). El punto Muxnac arriba, ubicado sobre el manantial de la naciente (muxnac) presenta condiciones evidentes de contaminación, menores al punto de aforo de la cuenca alta.

Esta diferenciación a corta distancia, contrario a razones naturales es evidencia de contaminación antropogénica que se corresponde con el contenido de fósforo total P-tot y nitrógeno total N-tot, representado por Nitrógeno Kjendall NK y por Nitrogeno de Nitratos N-NO₃ de las muestras de agua del río Pinula en dichos puntos.

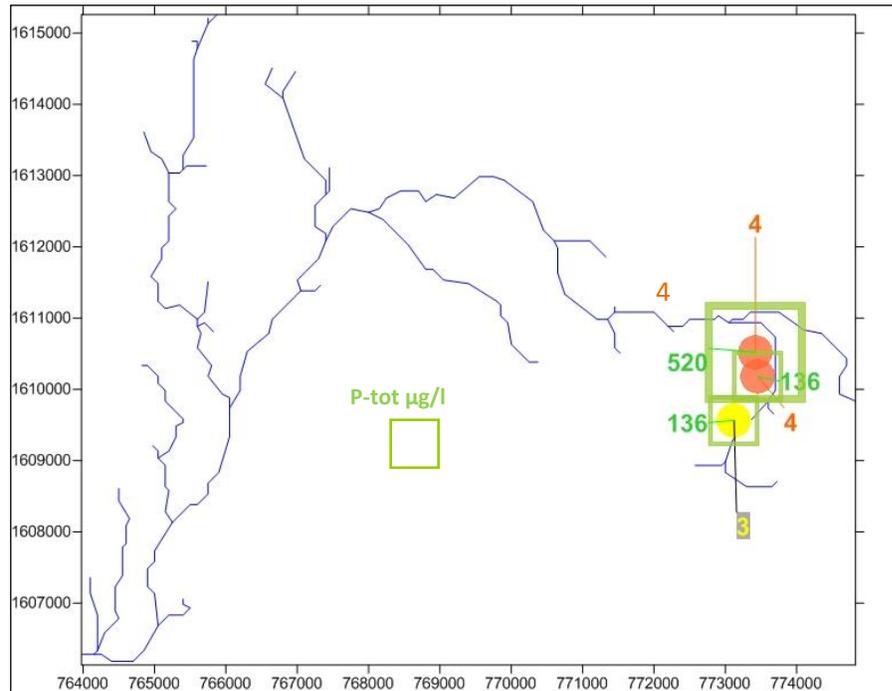


Figura 8.18 b. Resultado de análisis TDI en fitobentos del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012). ■ Muy contaminad; ■ Contaminado; ■ Contaminación evidente;

En el sitio ubicado en la cuenca alta, arriba del manantial de la naciente (Muxnac arriba) se puede observar la predominancia de dos especies indicadoras de mala calidad (fig. 8.19) que representan el 90% de la abundancia total de fitobentos, tales son *Nitzscia palea* & *Gomphonema parvulum*. En este punto se recolectaron mayor cantidad de organismos en relación a los otros dos puntos.

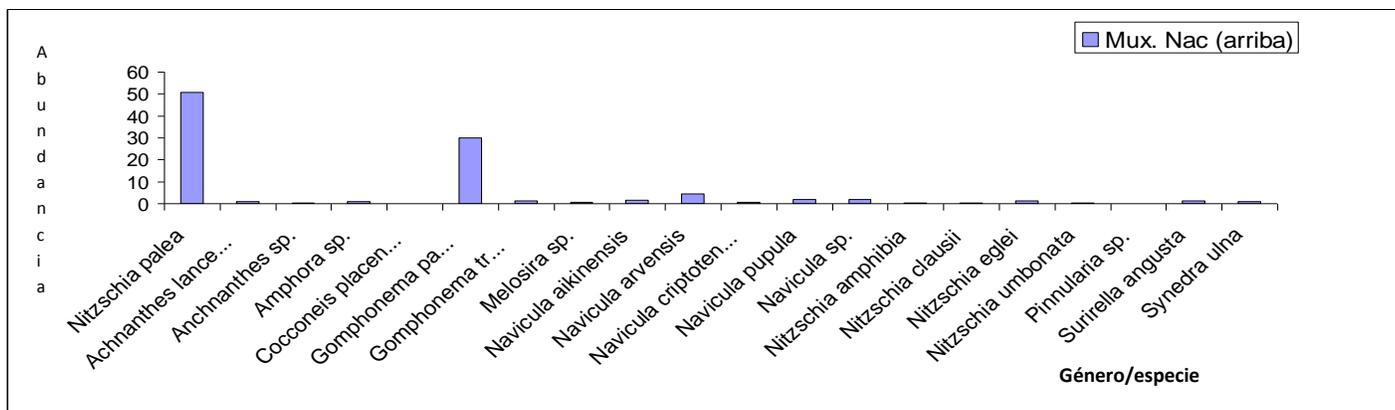


Figura 8.19 Abundancia relativa % de fitobentos en la cuenca alta del río Pinula (Muxnac arriba), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

En el sitio Muxnac el % de abundancia se distribuye de una manera más heterogénea (fig. 8.20) presentando especies del género *Nitzschia* y *Gomphonema* con menor cantidad de valvas que en el sitio anterior (ver anexo 7).

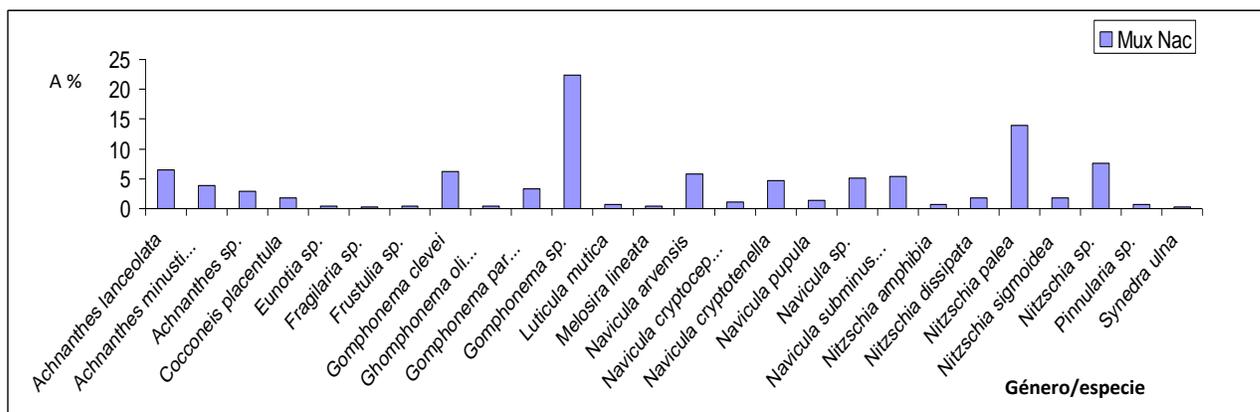


Figura 8.20 Abundancia relativa % de fitobentos en la cuenca alta del río Pinula (Muxnac), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

La proliferación del género *Gomphonema* en el sitio Muxaforo (fig. 4.21) puede ser indicador de efectos ocasionados a la velocidad de flujo superficial de agua y la abundancia de lecho rocoso, ya que esta familia presenta adaptaciones especiales. Se presentan además especies indicadoras de polución orgánica como *Nitzschia* y *Navicula*.

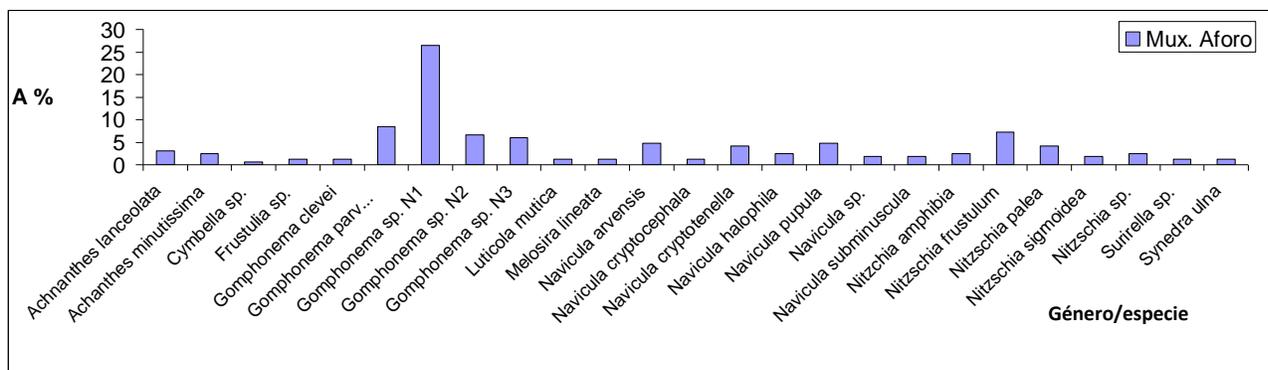


Figura 8.21 Abundancia relativa % de fitobentos en la cuenca alta del río Pinula (Muxaforo), (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

El desplazamiento que se manifiesta en el gráfico (fig. 8.22) ilustra una disminución en el contenido de valvas móviles desde el sitio muxnac arriba hacia el sitio muxaforo y el desplazamiento vertical, como efecto mostrado por el fitobentos a cambios en el contenido de materia orgánica del agua del río Pinula en comparación con el agua del manantial muxnac tanque, conforme a la evaluación propuesta por Kelly MG y otros colaboradores, 2001.

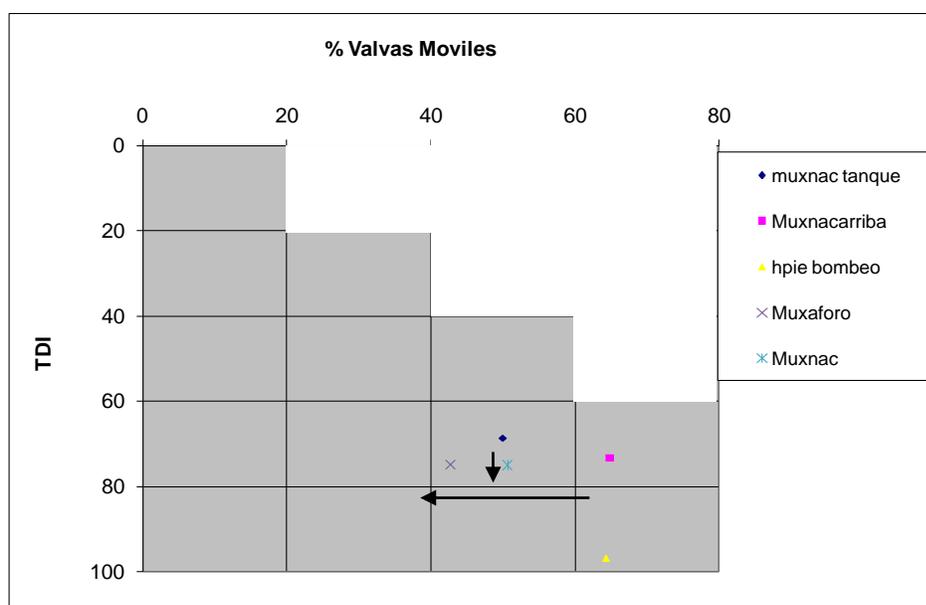


Figura 8.22 Representación gráfica de los indicadores biológicos utilizados en el análisis del fitobentos.

Aunque se aprecia un desplazamiento horizontal, los valores de fitobentos no alcanzaron rangos de TDI tan altos como el caso del fitoplancton en el punto (hpie bombeo). Lo cual es indicación de polución por el contenido de nutrientes y polución orgánica, lo cual se refleja mejor en la parte media de la cuenca. Estos resultados coinciden con los análisis hechos a los resultados obtenidos de los parámetros de campo y del contenido de nutrientes en el agua del río Pinula.

Macroinvertebrados Acuáticos

Los valores encontrados se presentan de forma gráfica en la figura 8.18 c donde se puede observar que todos los puntos presentaron indicadores de contaminación, siendo los sitios ubicados en la cuenca media los que presentaron indicadores con valores más elevados de contaminación respecto a la evaluación hecha a través del índice biótico por familia IBF-SV-2010, propuesto por Sermeño Chicas, y otros colaboradores (2010).

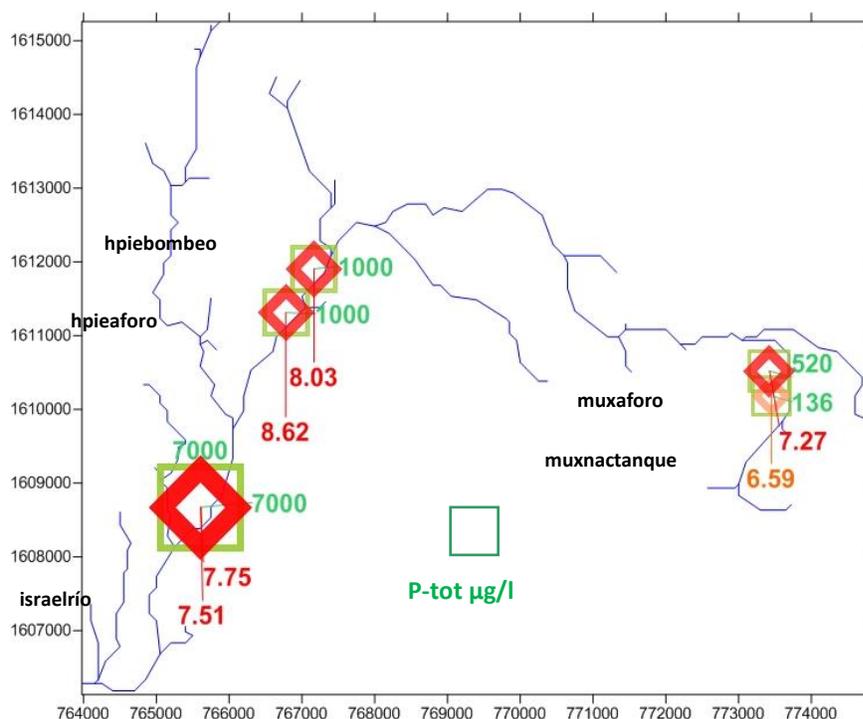


Figura 8.18c Resultado de análisis IBF-ES-2010 en macroinvertebrados acuáticos del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012) ■ Muy contaminad; ■ Contaminado;

En cada sitio se muestreó dos veces durante el tiempo de estudio. Conforme al contenido de fósforo total mostrado en la figura 4.18c, los resultados del muestreo de macroinvertebrados acuáticos son coherentes al contenido elevado de fósforo. Mostrando predominancia en la presencia de familias indicadoras de polución orgánica y por nutrientes. Además en la figura 4.12 se identifican los mismos sitios con elevados contenidos de nitrógeno, en forma orgánica (NK) e inorgánica (NO₂ y NO₃).

La figura 8.21 expresa la abundancia de las especies y el color hace referencia a la característica del medio en una escala trófica determinada conforme la metodología establecida en El Salvador, llamado índice biótico por familias, IBF-SV-2010. En (A) los organismos predominantes corresponden a *Simuliidae sp.* que puede ser un vector de enfermedades que afectan al ser humano. En (B) lo son organismos del género *Physa sp.* lo que le transfiere un carácter contaminado al ecosistema lótico.

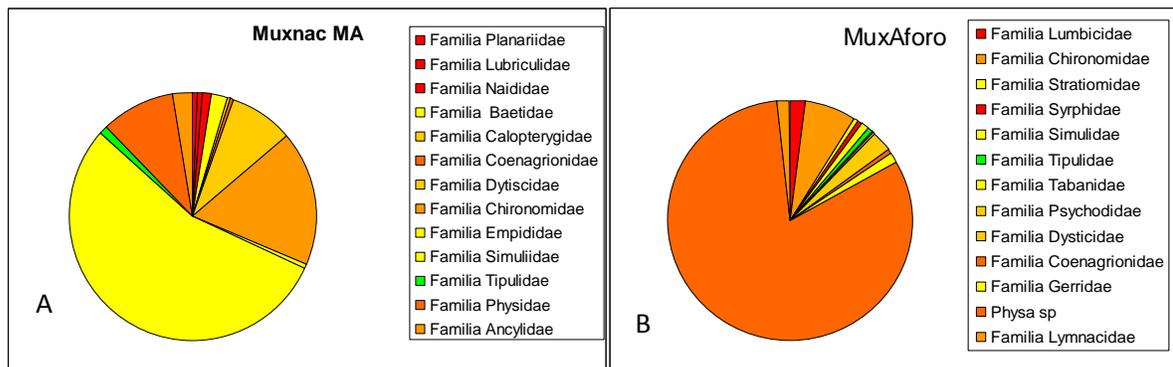


Figura 8.21 Familias más abundantes de macroinvertebrados acuáticos en la cuenca alta del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012). Indicadores: ■ Muy contaminado; ■ Contaminado; ■ Contaminación evidente; ■ Condiciones Alteradas

En la cuenca media del río Pinula se muestrearon dos puntos, uno ubicado posterior al embalse de bombeo del río Pinula (A) y el otro ubicado 2 km río abajo en el punto de aforo de la parte media alta (B). En ambos sitios predomina la familia Chironomidae y en el sitio de aforo la familia Simuliidae es la segunda familia en abundancia. Estos resultados dan prueba de malas condiciones de la calidad de agua, referente al contenido de nutrientes y materia orgánica, y esto es coherente con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos y nutrientes.

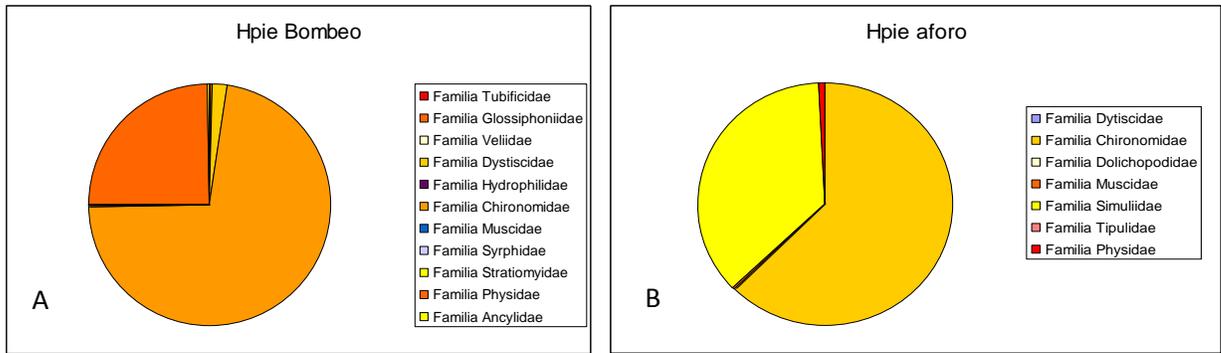


Figura 8.22 Familias más abundantes de macroinvertebrados acuáticos en la cuenca media del río Pinula. (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012), Indicadores: ■ Contaminado; ■ Contaminación evidente

La parte baja del río Pinula presentó algunas familias que no se presentaron en el resto de puntos de muestreo (Fig. 8.23) como la familia Muscidae y Syrphidae. En (A) el muestreo se efectuó en el mes de enero y en (B) en el mes de febrero del 2012. En ambos momentos la calidad que representan las especies encontradas va de contaminado a muy contaminado.

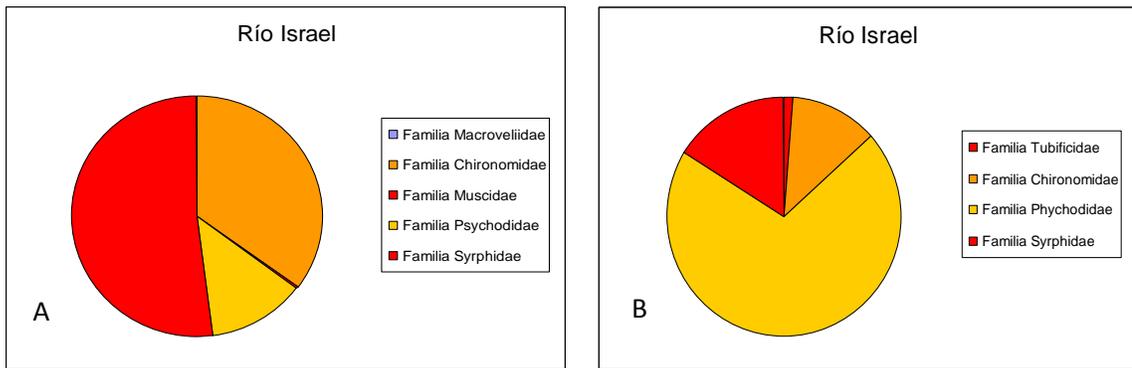


Figura 8.23 Especies más abundantes de macroinvertebrados acuáticos en la cuenca media del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012). Indicadores: ■ Muy contaminado; ■ Contaminado; ■ Contaminación evidente

Contaminantes en Agua y Sedimento

Contaminación Microbiológica

En el agua del río Pinula se manifiesta la presencia de coliformes fecales desde la naciente 170 NMP/100ml, este valor aumenta en la cuenca media (Israel-río) en el orden de 50 veces y disminuye en el sitio de desfogue al orden de 8,8 veces los valores de la naciente. El contenido de *E. coli* (fig. 8.24) es mayor en la naciente y en el desfogue, en el orden de 3 veces más que en la cuenca media 40NMP/100ml. Estos resultados sugieren que el valor de coliformes totales en la cuenca media se atribuye principalmente a actividades ganaderas que se desarrollan a orillas del río. Los resultados ponen en evidencia la integración de efluentes domésticos a la corriente del río, provenientes de zonas urbanas en la cuenca alta o naciente. Dichos efluentes también se manifiestan a través del contenido de nutrientes nitrogenados como nitritos en el mismo sitio, así como fósforo total. Se relacionan además con los resultados puestos en evidencia por medio del monitoreo de los macroinvertebrados acuáticos, fitobentos y fitoplancton, ya que prevalecieron familias indicadoras de polución orgánica y nutrientes (N:P).

Tabla 8.3a Variables microbiológicas en el recorrido del río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Punto de muestreo	Matriz	CBAUFC/ml	CT _{NMP/100ml}	CF _{NMP/100ml}	<i>E. coli</i> _{NMP/100ml}
Pozo Villa luciana	pozo	810	1	1	0
Pozo Israel	pozo	7 100	1 600	46	2
Pozo Transurbano	pozo	65	4	4	4
Pozo Parajes	pozo	240	350	4	0

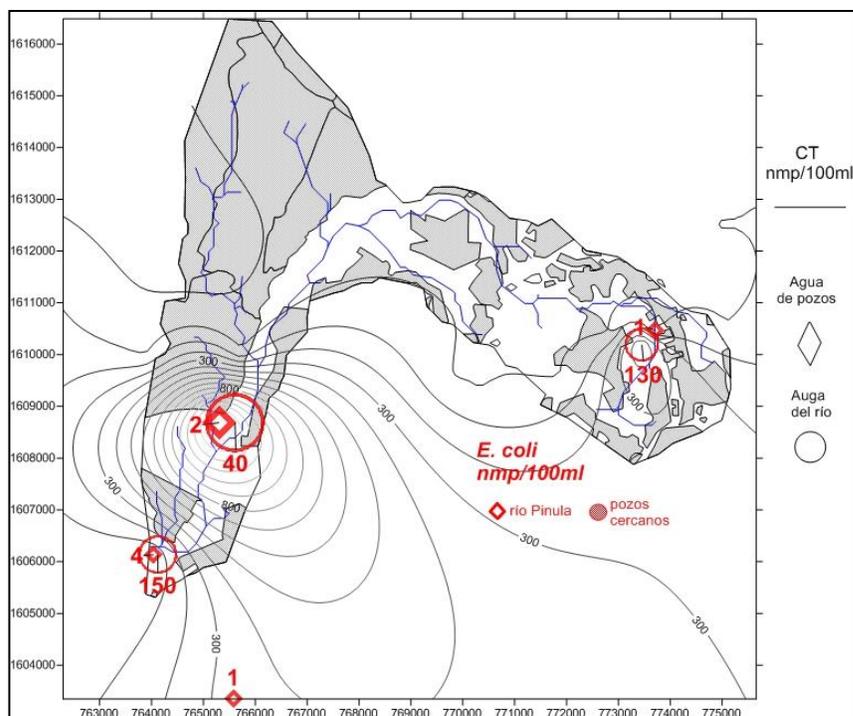


Figura 8.24 Contaminación con Coliformes totales CT y *E.coli* en el área de estudio, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

La carga orgánica del agua del río Pinula a partir de la naciente es de 0.5 Kg de O₂ al día. Mientras que en el sitio de mayor contaminación orgánica, en la cuenca media el río lleva una carga orgánica de 119,5 Kg de O₂ al día y en el desfogue 106,8 Kg de O₂ al día.

Tabla 8.3b Variables microbiológicas en el recorrido del río Pinula (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Punto de muestreo	Matriz	CBAUFC/ml	CTNMP/100ml	CFNMP/100ml	<i>E. coli</i> NMP/100ml	DBO _{mg/l} O ₂	DQO	Q	CO Kg de O ₂ /día
muxnac	rio	10 000	540	170	130	0	23	490	0,5
Río Israel	rio	10 000	240 000	7 500	40	161	307	742	119,5
desfogue	rio	57 000	240 000	1 500	150	82	487	1 302	106,8

Los valores de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se corresponden con el aumento de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), esto además se corresponde con el aumento de bacterias y de caudal. El río Pinula en la parte media hacia el desfogue presenta calidad de agua con cargas orgánicas que generan corrientes anóxicas en la cuenca media (fig. 8.24a), recuperando algo de oxígeno hasta el desfogue, como producto de la dinámica de la corriente de flujo y el intercambio gaseoso de las aguas, que aporta oxígeno disuelto al agua. Estas condiciones generan muy mal contexto para el desarrollo de organismos acuáticos, como fitoplancton, fitobentos y macroinvertebrados acuáticos. Se generan condiciones que muy pocas especies oportunistas de bacterias pueden aprovechar, interfiriendo con procesos químicos que interactúan con otros contaminantes.

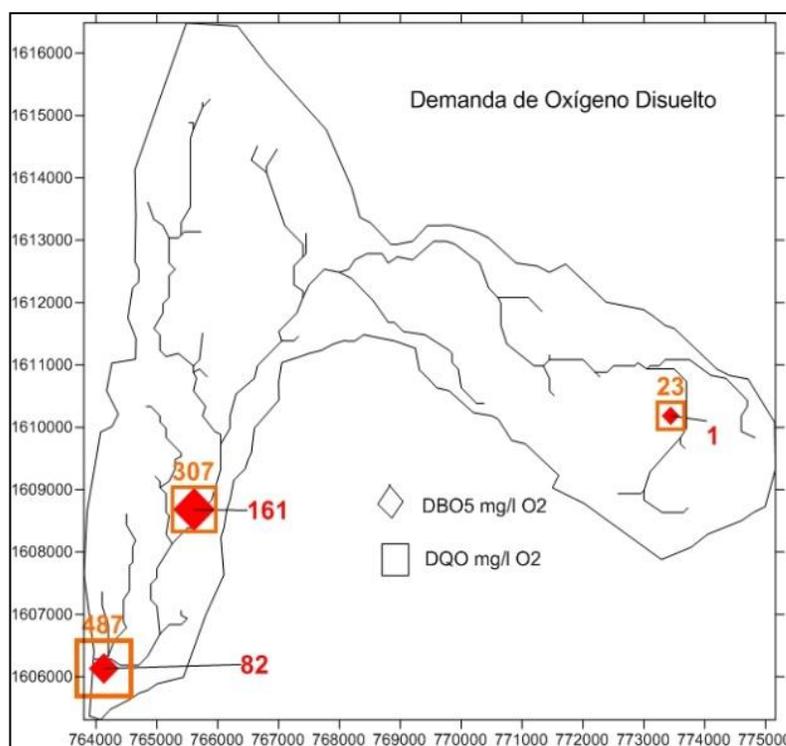


Figura 8.24 a Relación entre DBO y DQO en el río Pinula, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

Metales pesados en agua del río Pinula

En el río Pinula, desde la naciente hasta la desembocadura prevalecieron en el agua, Arsénico total (As), Cromo total (Cr) y Mercurio total (Hg). El metal que prevalece es el Cromo, aunque en la cuenca media no se reportó contenido de este metal (fig. 8.25).

Ninguno de los sitios de muestreo presentó agua con valores que fueran mayores al valor guía de $20 \mu\text{g.l}^{-1}$ para la protección de los peces, aunque en el desfogue se alcanzan valores cercanos.

Las condiciones reductoras (tabla 8.3 y 8.4) que presenta el agua en el punto medio (Israel) pueden ser responsables de la reducción a Cromo (III), el cual es precipitado al sedimento debido a la abundancia de minerales álcali presentes en el agua del río Pinula, esto podría provocar que no se presente en forma disuelta el Cromo en el agua en este punto de muestreo.

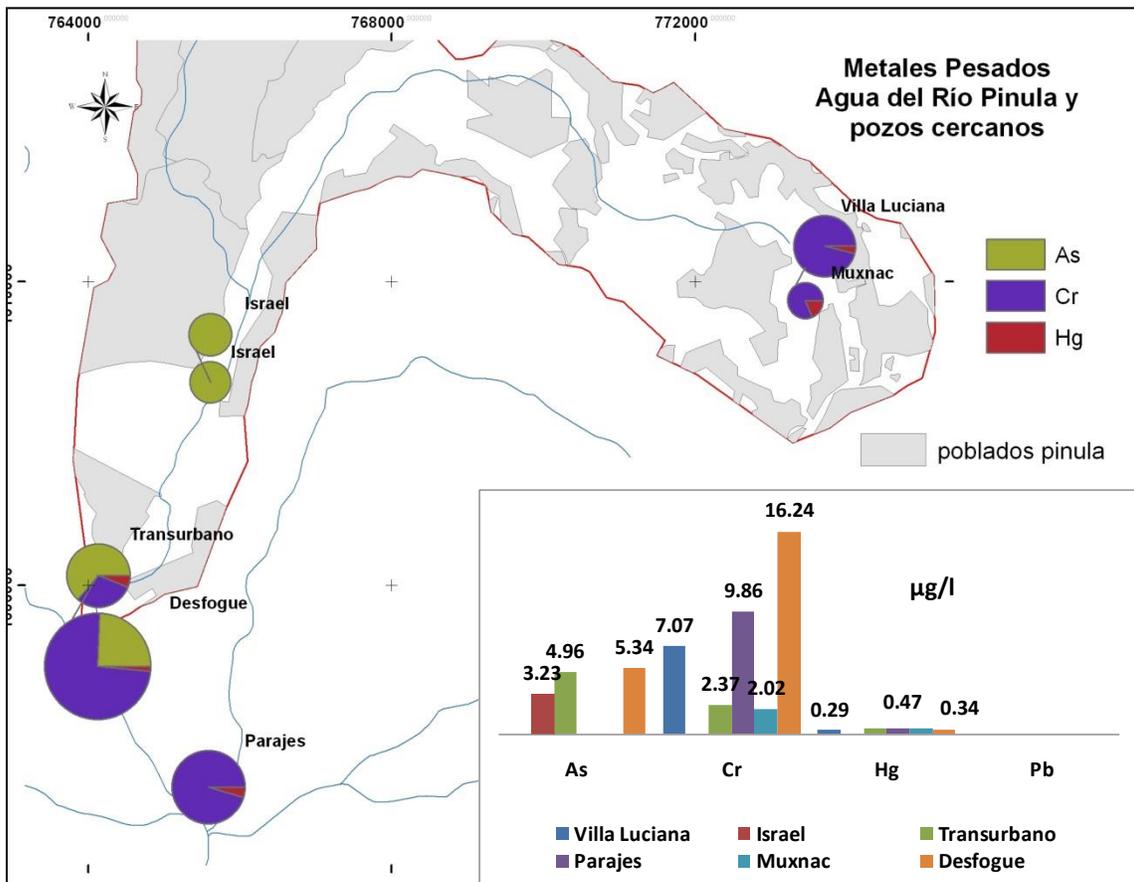


Figura 8.25 Contenido de Metales pesados en los sitios de muestreo, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012). Pozos: Villa Luciana, Israel, Transurbano y Parajes

El Arsénico se hace presente en el agua del río Pinula a partir de la cuenca media. El mayor valor se reportó en la desembocadura sin mayor diferencia que en la cuenca media.

Tabla 8.4 Potencial de óxido reducción en el agua del río Pinula.

Sitios de Monitoreo	Eh mV
muxnac	125,3
muxaforo	188,3
Hpie Aforo	85,1
PinsinDrenC's	-0,9
DrenC's	-44,7
ConflPin	-83,0
GuadsnPin	-66,0
Pin+Guad	-60,0
Israel	-39,3
Canal VH	27,2
Desfogue	43,2
TUBAC3	23,4
Vlbdespin	56,0

El Mercurio fue reportado en la cuenca alta, en el agua de la naciente del río Pinula y en el agua del desfogue. El valor mayor observado en la naciente $0,47 \mu\text{g.l}^{-1}$ es superior al valor guía que proponen las normas canadienses para la protección de la vida acuática de $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$. El agua en condiciones reductoras de la cuenca media no presentó Mercurio disuelto (fig. 8.25) mientras que en el agua del desfogue se presentaron valores menores que la naciente $0,34 \mu\text{g.l}^{-1}$ y superiores a la norma guía.

Todos los pozos presentaron valores de metales pesados menores a los límites establecido por las normas guatemaltecas para agua de consumo humano, además de las normas canadienses para consumo humano.

En sedimentos del río Pinula, los metales que fueron reportados son el Cr y el Pb (fig. 8.26).

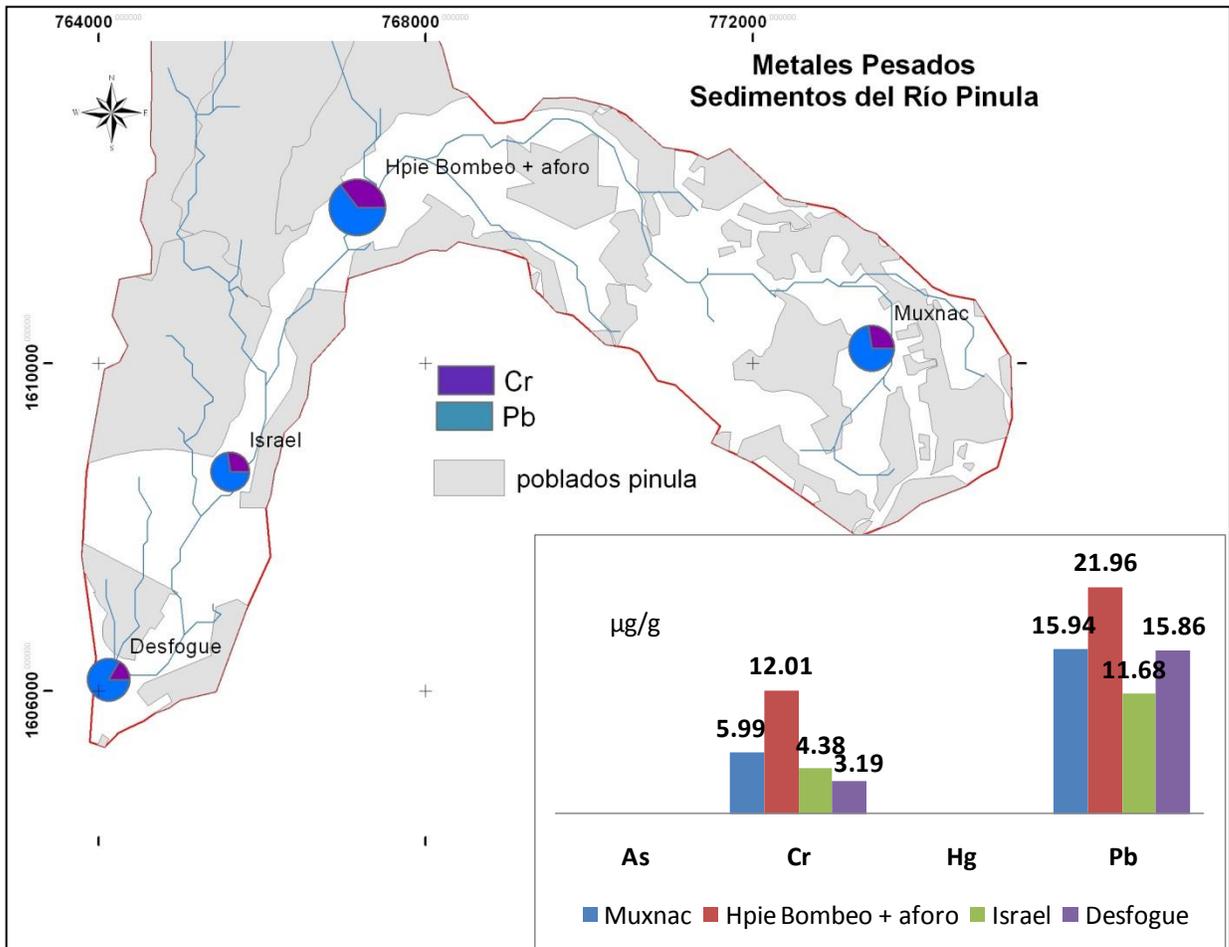


Figura 8.26 Contenido de metales pesados en sedimentos en los puntos de muestreo, (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

El sitio de muestreo de sedimentos en el desfogue del río Pinula presenta 35% mayor contenido de Cromo (ppm) con relación al contenido de Cromo en agua en el mismo sitio.

La muestra de sedimento tomada en el sitio de muestreo Hpie Bombeo + aforo, consiste en una muestra compuesta entre sedimento del fondo del embalse Hincapié y sedimento del río cauce abajo del embalse. En este sitio se reportó mayor contenido de Plomo y Cromo en los sedimentos. De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede considerar que el sedimento arrastrado desde la cuenca alta es

depositado y acumulado anualmente en el embalse de la cuenca media, siendo liberado en época lluviosa, y pueden provocar mezcla y liberación de sedimentos que luego son depositados cuenca abajo como se observa en los resultados gráficos.

La concentración de Cromo en sedimento en la naciente ($6,0 \text{ mg.kg}^{-1}$) y en la cuenca media ($12,0 \text{ mg.kg}^{-1}$) media baja y el desfogue ($4,4$ y $3,2 \text{ mg.kg}^{-1}$, respectivamente) muestran valores menores a los valores interinos de las normas canadienses para la protección de la vida acuática, que es de $37,3 \text{ mg.kg}^{-1}$.

En el caso del plomo, la naciente muestra $15,9 \text{ mg.kg}^{-1}$ al igual que en el desfogue. El mayor valor alcanzado en la cuenca media 22 mg.kg^{-1} es el más cercano al valor guía de las normas canadienses para sedimentos de 35 mg.kg^{-1} , para la protección de la vida acuática.

Plaguicidas Organoclorados

Dieldrín

El Dieldrín estuvo presente en las aguas del río en el sitio del desfogue con una concentración de $1,32 \text{ ng.l}^{-1}$, aunque esta concentración no supera el valor guía de 4 ng.l^{-1} para la protección de la vida acuática, propuesto por las normas canadienses.

En los sedimentos prevalece el plaguicida gHCH (Lindano), el cual está dentro de los plaguicidas prohibidos en el país. En los sedimentos del embalse (Hpie Bombeo + aforo) este contaminante se presenta en mayor concentración reflejando que el plaguicida es utilizado cuenca alta del embalse. En este sitio, al sumar el valor de la concentración en los sedimentos de los isómeros de Hexaclorociclohexano HCH (gHCH, aHCH, bHCH) el contenido ppm en sedimentos es menor al valor guía propuesto por las normas canadienses en ppm para agua, el cual es de 10 ng.l^{-1} (fig. 4.27).

Los valores guía propuestos por las normas canadienses para evaluar el contenido de lindano en sedimentos, van de $0,94 \text{ mg.kg}^{-1}$ (valor interino) a $1,38 \text{ mg.kg}^{-1}$ (PEL efecto letal probable), los valores encontrados en la cuenca media y baja $4,38$ y $2,33 \text{ mg.kg}^{-1}$ están por encima del valor guía. En el desfogue los valores son menores $0,71 \text{ mg.kg}^{-1}$ cercano, por debajo de los valores interinos de las normas.

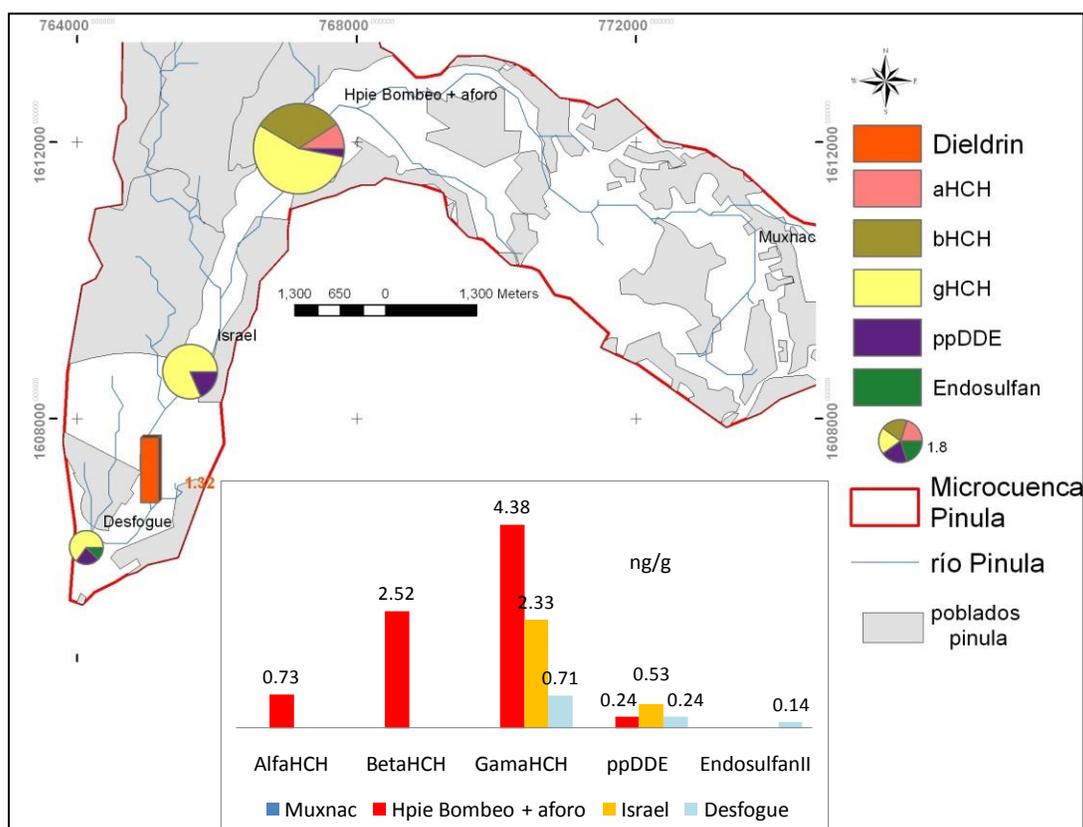


Figura 8.27 Presencia de plaguicidas organoclorados en sedimentos del río Pinula y Dieldrin en agua (Valores promedios de noviembre del 2011 a junio del 2012).

El plaguicida pp-DDE fue detectado en los sedimentos de todos los sitios muestreados excepto en la naciente, este indica el uso del plaguicida DDT que también está prohibido a nivel nacional. El sitio que reportó mayor concentración de pp-DDE se ubica en la cuenca media, en el sitio Israel río. Dicho sitio también presentó evidencias de contaminación por plaguicidas arsenicales. El valor que las normas canadienses aportan como valor guía para la protección de la vida acuática es de 1 ng.l^{-1} en agua.

Ninguno de los tres sitios muestreados rebasó el valor interino de las normas canadienses sobre el contenido de pp-DDE en sedimentos, el cual es 2.07 mg.Kg^{-1} .

La presencia de Endosulfan no es en cantidades significantes, por lo que no representa importancia. Además que es un plaguicida permitido en el país.

En dos puntos de muestreo en el sedimento del río Pinula se reportaron hidrocarburos policíclicos aromáticos, siendo el desfogue el sitio en el que se detectaron más cantidad y en la cuenca media donde se reportaron más diversidad (fig. 8.28).

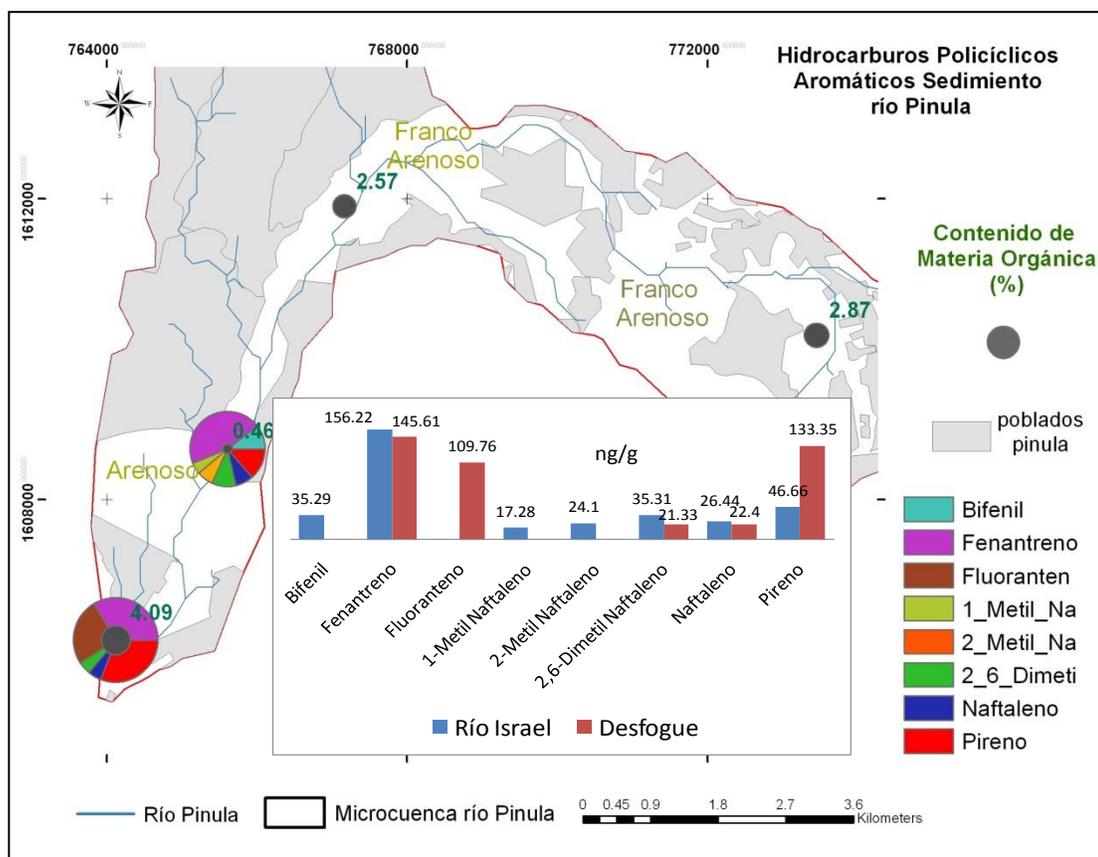


Figura 8.28 Contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos, materia orgánica y composición de sedimentos del río Pinula, (Valores promedio de noviembre del 2011 a junio del 2012).

De los 8 hidrocarburos encontrados, abundan el Fenantreno, Pireno, Fluoranteno en orden de importancia. El Fenantreno se presenta en mayor cantidad en ambos sitios de muestreo con valores $\pm 150 \text{ mg.Kg}^{-1}$, los cuales están por encima del valor

interino de las normas canadienses para la protección de la vida acuática (41,9 mg.Kg⁻¹) y por debajo del valor que provoca efecto letal probable PEL (515 mg.Kg⁻¹).

El Pireno se muestra por encima del valor interino de la norma (53 mg.Kg⁻¹) solamente en el desfogue con valor de 133 mg.Kg⁻¹. En la cuenca media el valor es cercano (47 mg.Kg⁻¹). El Fluoranteno presenta en el desfogue valores de 146 mg.Kg⁻¹, por encima del valor interino de la norma (111 mg.Kg⁻¹). A diferencia del desfogue, en la cuenca media se encontraron mayor cantidad de hidrocarburos, en menores proporciones que los tres hidrocarburos predominantes. De los cuales el más abundante es el Bifenil seguido de 2,6 Dimetilnaftaleno, 1 y 2 MetilNaftaleno y Naftaleno. Solamente en la cuenca media se reportó 2 Metilnaftaleno (24,1 mg.Kg⁻¹) mayor que el valor interino de la norma 20.2 mg•kg⁻¹.

En ambos sitios, río Israel en la cuenca media y el desfogue, se encontraron valores de Naftaleno menores al valor interino de la norma canadiense 34,6 mg.Kg⁻¹.

Pozos cercanos al río Pinula

Los pozos que presentaron mayores profundidades del nivel estático están ubicados en la cuenca alta y media. Los pozos cercanos al río mostraron las menores profundidades. De acuerdo a la piezometría durante enero – junio del 2012 se construyó el modelo de isolineas que se presenta en la figura 8.29.

NEA (m)	Carga Hidráulica (m.s.n.m.)	POZO	NEA (m)	Carga Hidráulica (m.s.n.m.)	POZO
161	1 418	Huisital	142	1 651	Puente acatan
134	1 318	Estadio	169	1 504	Iglesia catolica
106	1 426	El Rastro	70	1 623	Lote425
212	1 328	La Ceiba	10	1 220	Transurbano
176	1 657	San Miguel	18	1 213	Pozo parajes
68	1 291	Lote 19	9	1 258	Sector 1
73	1 301	Larboleda	131	1 397	Villa Lobos
152	1 221	Latomatera	137	1 358	Justo 1
158	1 285	Sector4	133	1 365	Justo 2
194	1 272	El Jordan	44	1 436	Nima 1
171	1 611	Muxbal	125	1 513	Las Americas
54	1 807	Villa Luissiana	8	1 340	Hpie
			14	1 280	Israel

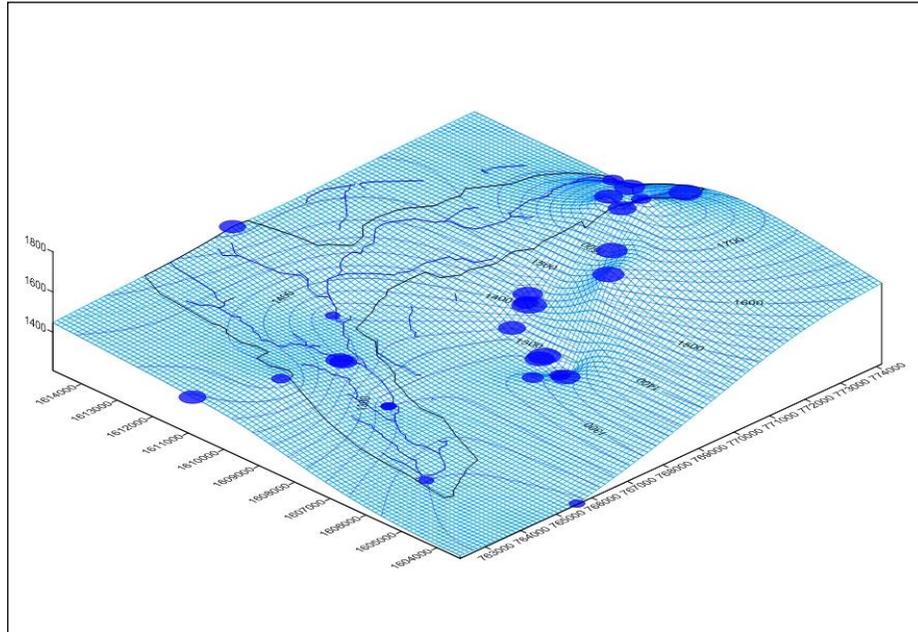
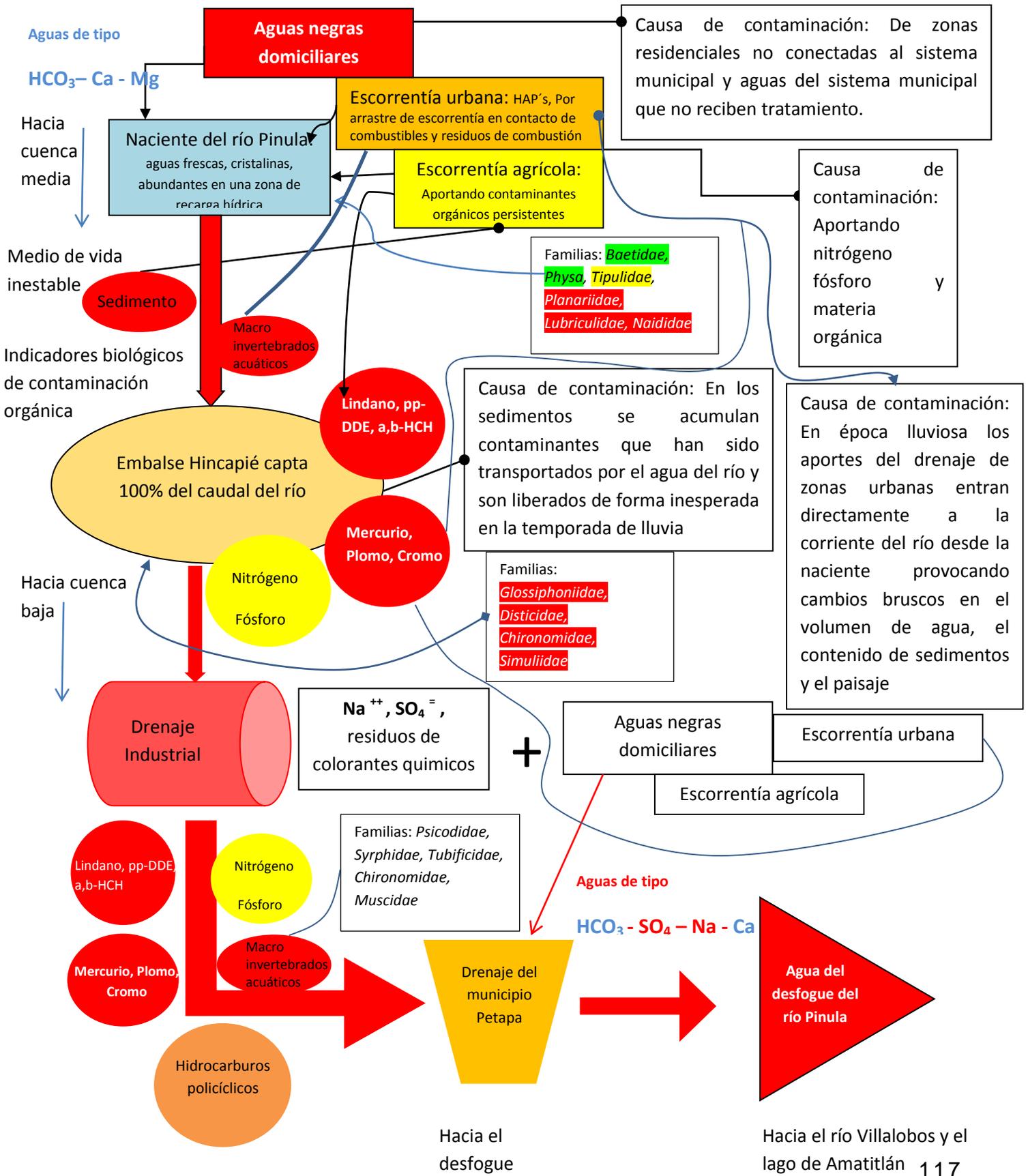


Figura 8.29 Isolíneas piezométricas de acuerdo a la carga hidráulica medida en pozos cercanos al río Pinula, el diámetro de cada punto es proporcional a la profundidad del NEA.

Conforme a la profundidad del nivel piezométrico los resultados muestran que la mayoría de los pozos que fueron tomados en cuenta en la evaluación presentaron baja vulnerabilidad. Esta condición cambia en la cuenca baja y los pozos cercanos a la corriente del río Pinula. La figura 8.29 muestra gráficamente los pozos con mayor vulnerabilidad debido a la cercanía del nivel piezométrico a la superficie topográfica, como los círculos de menor tamaño.

Figura 8.30 Contexto observado de la calidad del agua en el Río Pinula

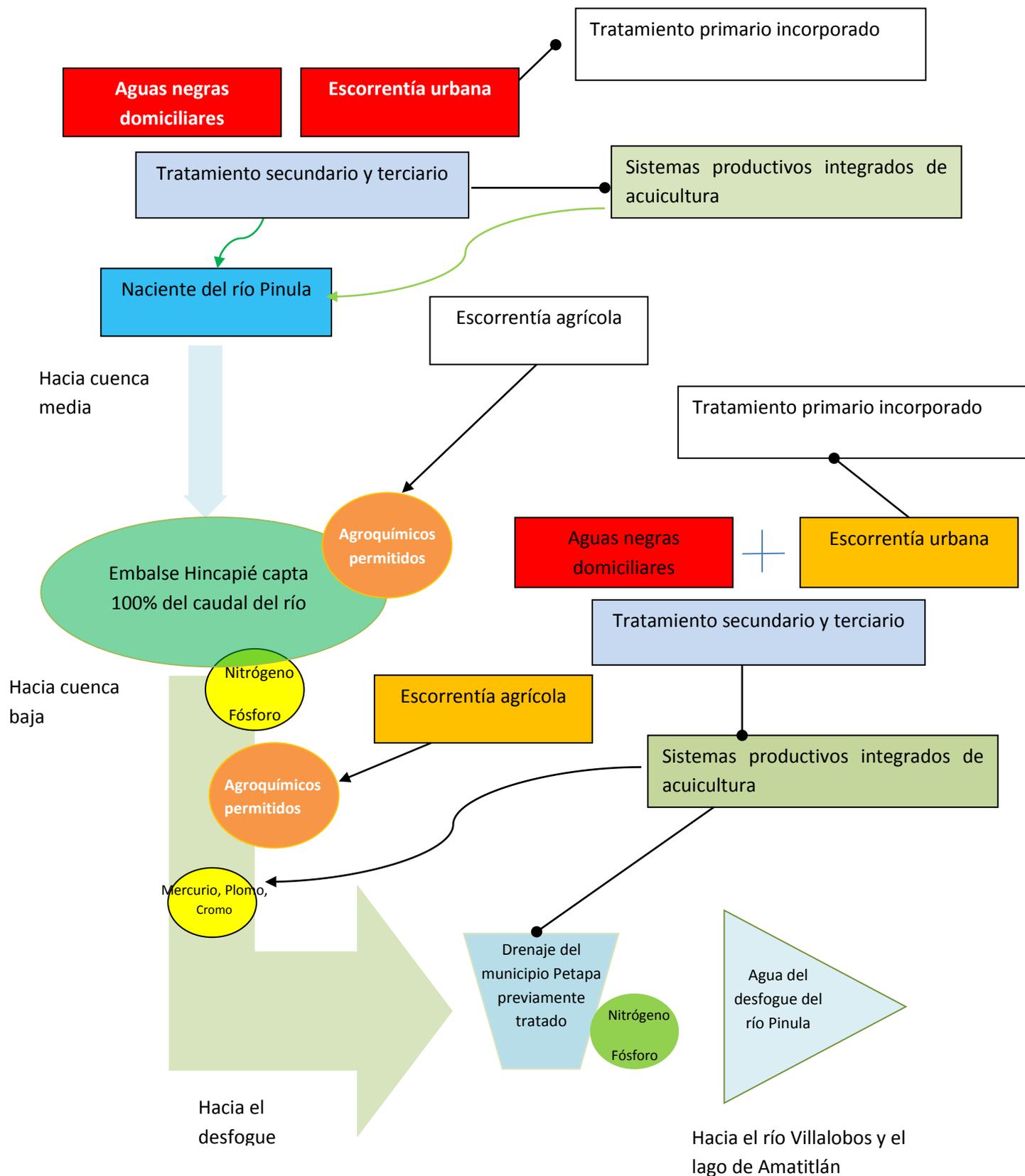


Gestión de la Calidad del agua del río Pinula

De acuerdo a las condiciones del río Pinula y el contexto que influye en la alteración de la calidad de sus aguas como medio de vida para fauna y flora, como recurso renovable para la irrigación y la producción pecuaria, se proponen las siguientes medidas de gestión que pueden contribuir a la disminución de la problemática actual del río Pinula.

- Renovación del sistema de alcantarillado y canales pluviales incorporando sedimentadores y rejillas como un pre tratamiento antes de llegar al río.
- Aplicar tratamiento secundario y terciario al agua de procedencia urbana y habitacional antes que lleguen al río en los tres municipios, para reducir la DBO₅, el contenido de bacterias. Además se debe aplicar un sistema de remoción de nutrientes (N:P) el cual podría incorporarse a través de sistemas productivos integrados de acuicultura utilizando como fuente de abastecimiento el agua tratada.
- Generar campañas de sensibilización a la población de la microcuenca en donde se ponga de manifiesto todos los factores que pueden afectar el agua del río Pinula, para que la información sea divulgada y se pongan en práctica acciones de reducción de los factores y remediación de zonas más contaminadas.
- Poner en evidencia ante el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación la presencia de plaguicidas de uso y distribución prohibida para que se establezcan medidas de acción en las zonas de producción agrícola que puedan constituir una fuente posible de contaminación.
- Establecer vínculos institucionales entre las autoridades encargadas de la administración y la gestión del agua, entre las tres municipalidades (Santa Catarina Pinula, Guatemala y Petapa) con la autoridad que administra el embalse Hincapie y con la Autoridad para el manejo sostenible de la cuenca del Lago de Amatitlán AMSA. Vínculos que permitan la inter cooperación y elección de actores responsables del monitoreo de la calidad del agua y el cumplimiento de las normativas estipuladas en la legislación nacional que respecta al manejo de las cuencas hídricas y normas internacionales que protegen la biota asociada a recursos acuáticos.
- Establecer un programa de vigilancia de la calidad de los sedimentos del embalse Hincapie y planificar de forma coordinada la limpieza y recambio sistemático.
- Impedir que drenajes industriales ingresen al río sin haber tenido un tratamiento previo que disminuya los valores de los parámetros establecidos en la normativa nacional para aguas residuales hacia cuerpos de agua receptores.

Figura 8.31 Contexto de la calidad del agua en el Río Pinula con medidas de gestión en acción



IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de CE, STD y Salinidad confieren al agua una mineralización relativamente baja en la naciente del río Pinula (*muxnac*), pero conforme se avanza de la naciente hacia el desfogue, el volumen de agua aumenta y su contenido mineral aumenta (Tabla 8.1). Estos cambios se manifiestan más a partir de la cuenca media, en donde la calidad de las aguas está significativamente diferenciada de la calidad del agua de la naciente, restándole calidad al agua del río y dejando sin oportunidad de aprovechamiento como recurso natural renovable para irrigación las aguas del río en la cuenca baja, por el alto contenido de Sodio (Figura 8.8 y 8.9).

El volumen de agua que escurre de la naciente al primer punto de aforo (*muxaforo*) representa el 38% del volumen promedio de agua diario ($55 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), registrado en el río Pinula durante el tiempo de investigación (Figura 8.7). En este sitio la mayoría de las variables indicadoras de la calidad del agua medidas en campo y laboratorio, se manifestaron por debajo de los límites establecidos por normas nacionales e internacionales (Norma Guatemalteca de Aguas Residuales y Normas Canadienses para la Protección de la Vida Acuática).

Estas observaciones podrían indicar la buena calidad de las aguas del río Pinula, sin embargo, el contenido de nutrientes (Nitrógeno:Fósforo) N:P (Figura 8.12) expresa condiciones de eutrofización e hiper eutrofización en el agua, lo cual reduce significativamente las condiciones para el desarrollo de especies indicadoras de ambientes prístinos, en el caso del río Pinula, esto se manifiesta en la respuesta de la biota asociada a rocas y sedimentos en la naciente del río, representados en mayor abundancia por perifiton (*Gomphonema*, *Nitzchia* y *Navicula*) y macroinvertebrados acuáticos (*Physidae*, *Symuliidae*, *Baetidae*, *Chironomidae*), indicadores de contaminación orgánica.

Cuando el agua del río alcanza la cuenca media alta en el sitio de aforo *HpieAforo*, ha recorrido el 30% del cauce total, se han incorporado al volumen de agua de la naciente aproximadamente 250 m^3 que corresponden a 19% del total. Esta pequeña fracción provoca cambios menores en la mineralización del agua, pero incorpora

gran cantidad de nitrógeno y fósforo principalmente en forma orgánica, alcanzando valores del orden de 1 mg.l^{-1} de P_{total} y de 30 mg.l^{-1} de N_{total} . Esto puede atribuirse a las aguas domésticas crudas que recibe el río desde la naciente hasta este punto en la cuenca media. La flora y fauna asociadas a rocas y sedimentos del río, resienten este cambio de calidad de agua ya que expresan diversidades y abundancias que corresponden a especies indicadoras de polución orgánica y nutrientes (*Nitzchia sp.*, *Gomphonema parvulum*, *Nitzchia palea*, familias *Chironomidae*, *Physidae*, *Simuliidae*, *Stratyomidae*) (Figuras 8.14 – 8.22).

Conforme a la clasificación que ofrecen las Normas canadienses (CCREM, 2008) para la protección de la vida acuática, los valores de $N\text{-NO}_2$ exceden la norma ($0,06 \text{ mg.l}^{-1}$) en dos sitios ubicados en la cuenca media – alta (Figura 8.12). Ambos sitios están influenciados por la descarga de aguas domiciliarias (grises) en múltiples puntos a lo largo del transcurso del río en dicha zona. La misma norma recomienda concentraciones de Amonio (NH_4) en el agua por debajo de los $1,37 \text{ mg.l}^{-1}$ ($\text{pH}=8$). Dicho valor es superado en todos los puntos de muestreo a excepción de la naciente (*Muxnac*) (Figura 8.12).

La concentración de Nitritos reportada en la cuenca alta supera los demás sitios de muestreo, esto puede suceder a causa de la carga considerable de materia orgánica que se observa a partir de la cuenca media. Los valores encontrados en la cuenca alta ($0,4 \text{ mg.l}^{-1}$) podrían originar problemas de intoxicación aguda manifestada como anoxia e hipoxia, en peces y macroinvertebrados (Figura 8.2 y 8.23). Coherentemente los valores del Nitrógeno de Amonio disuelto en el agua fue mayor en los puntos de muestreo en la cuenca baja, coincidentemente con el aumento de carga orgánica.

A partir de la cuenca media, los valores de Amonio encontrados en el agua del río se complementan con la baja concentración de Oxígeno disuelto y aumento de los Sólidos totales disueltos (Figura 8.6), para generar condiciones de toxicidad aguda para peces.

En el caso del Arsénico (As), los valores de la concentración en agua no rebasaron los valores guía de las normas canadienses para la protección de la vida acuática, la cual recomienda valores de concentración menores a $50 \mu\text{g.l}^{-1}$ de As (CCME, 2088). Conforme al estado de óxido-reducción del agua del río Pinula, el arsénico podría presentarse mayoritariamente de forma oxidada trivalente como Ácido Arsenioso (H_3AsO_3) de la cuenca media alta hacia la naciente del río. Esta forma química tiene mayor solubilidad en lípidos (Besaure, 2005).

En los 250 mil litros de agua diarios que son aportados desde la cuenca alta al sitio *HpieBombeo* están presentes metales como Mercurio (Hg) y Cromo (Cr). Los valores de la concentración de Cr encontrados desde el agua de la naciente del río Pinula superan al valor guía establecido por las normas canadienses para la protección de la vida acuática ($< 2 \mu\text{g.l}^{-1}$ de Cr) (CCME, 2088). Estas concentraciones podrían afectar el desarrollo del zooplancton y el fitoplancton. Altas concentraciones de Cr son indicadores de contaminación antropogénica, que se origina en la cuenca alta y la presencia de este metal puede estar asociada a las industrias de tratamiento y confecciones de pieles, tintura de telas, a la industria de acabados de metales y a la industria de tabaco, distribuidas dentro de la microcuenca.

La concentración de Cr ($16,24 \mu\text{g.l}^{-1}$) en el agua del río Pinula en el punto de muestreo del desfogue presenta un valor que supone según USEPA (1985) amenaza de contaminación aguda para el cladóceros *Daphnia magna*, pero el valor reportado es más bajo que límite de tolerancia para peces ($< 0.02 \text{mg.l}^{-1}$). En aguas blandas, como la naciente del río, el Cromo (III) puede ser más tóxico mostrando efectos comparables en peces y macroinvertebrados (CCME, 2088).

El Mercurio, cuyo valor límite es de $0,1 \mu\text{g.l}^{-1}$ para la protección de la vida acuática (CCME, 2088), fue rebasado por los valores de concentración observados en las aguas del río Pinula. Contrariamente al caso del Cromo, el contenido de Mercurio en el agua del río puede ser un factor de contaminación mucho más sensible para los animales que para las plantas. El efecto de estos metales en el Río Pinula puede estar reflejado en la pérdida de las poblaciones de perifiton, macroinvertebrados y

peces. Los organismos acuáticos que se alimentan en el fondo del río son más susceptibles que aquellos que lo hacen en la columna de agua.

De acuerdo con los resultados observados, los metales se están acumulando en los sedimentos de la presa de bombeo Hincapie (Figura 8.26), la cual sirve como reservorio de estos elementos y otras sustancias consideradas como contaminantes ambientales. La acumulación de materiales húmicos y materia orgánica contribuye con lo anterior. La presa Hincapie capta el 100% del agua que drena el río Pinula a esa altura de la cuenca y administra la salida del agua que fluye hacia la cuenca media baja y el desfogue por medio del dique de rebalse de la represa.

Los sedimentos pueden ser liberados en época lluviosa y con los sedimentos algunas moléculas tóxicas que se acumulan en ellos, tal como los isómeros de Hexaclorociclohexano HCH (*Lindano* $gHCH$ $4,38 \mu g.kg^{-1}$, *bHCH* $2,52 \mu g.k g^{-1}$ y *aHCH* $0,73 \mu g.k g^{-1}$); e isómeros de DDT (*pp-DDE* $0,24 \mu g.k g^{-1}$), con valores de concentración que superan los límites establecidos para la protección de la vida acuática, según las guías canadienses interinas de calidad de sedimentos marinos (*Lindano* $gHCH$ $0,32 \mu g.k g^{-1}$) y el nivel de efecto probable (*Lindano* $gHCH$ $0,99 \mu g.kg^{-1}$) (CCME, 2008). Estos plaguicidas de uso agrícola que actualmente están prohibidos a nivel nacional y regional (Cáceres Vinicio R. 2004), son altamente persistentes en los sedimentos con valores elevados de materia orgánica y humus. Estas sustancias presentan solubilidad en lípidos lo que hace que sean acumulables por tejidos biológicos como larvas de insectos y peces.

Es posible que una fracción de los contaminantes acumulados en los sedimentos del embalse Hincapié sea liberada en momentos de limpieza del embalse (época lluviosa), y una pequeña fracción de estos sea liberada de forma constante, ya que el agua del río Pinula converge con el embalse, para continuar su cauce natural.

En la cuenca media baja, en el sitio de muestreo Israel, fluyen $964 m^3$ de agua diarios (*74% del volumen total*), caudal al cual se ha incorporado el agua del río tributario "río Guadrón" ($300 m^3$) mayor tributario perenne de cauce natural (Figura 8.7). El agua de este río presenta valores de las variables de campo (CE, STD,

Salinidad) menores que las del agua de la corriente principal del río Pinula, en la cuenca media-baja. (Figura 8.1). Luego de la confluencia del Guadrón con el Pinula (IsraelAforo) los valores de las variables de calidad del agua utilizadas como indicadores observados en el río Pinula, son menores que antes de la confluencia (Cuadro 8.1), lo que podría resultar como efecto de dilución del agua contaminada del río Pinula, con agua menos contaminada de su tributario. Lo mismo se observa con el agua del río Villalobos, en este caso, la contaminación del agua del río Pinula se diluye con el agua del río Villalobos.

Según las observaciones de campo, anterior a la confluencia del río Guadrón, la calidad del agua es alterada por las descargas de contaminantes en la cuenca media que provienen de un efluente industrial de la zona franca, principalmente aguas teñidas que posiblemente sean procedentes de los efluentes de industrias textiles. Además, a lo largo del cauce se incorporan a la corriente del río efluentes domésticos que en conjunto hacen cambiar los parámetros de calidad del río sin que recupere las condiciones para aprovechamiento del recurso cuenca abajo, la contaminación es tan alta que el río pierde su capacidad de autodepuración.

La conductividad eléctrica promedio del agua de la descarga industrial es mayor a $4\ 000\ \mu S.cm^{-1}$. Este valor de conductividad eléctrica en el agua se corresponde con el cambio de coloración del agua en diferentes horas del día y se observa una carga iónica diferenciada, con abundancia de Na^{+} lo cual, hace suponer incorporación de aguas residuales del proceso de teñido de telas. Puede haber una posibilidad muy alta de encontrar en dicha agua residual contenidos de moléculas tóxicas derivadas de colorantes Azoicos, los cuales no están restringidos en el país, dichos colorantes están fuera del mercado desde hace tiempo en otros países porque se ha comprobado su efecto carcinógeno y recalcitrante (Estrada D. 2000).

Se estimó el caudal de la descarga de agua residual industrial en $24\ m^3$ por día (1,8% del total del río). Esta descarga experimenta dilución cuando se mezcla con el agua que baja desde la naciente y se suma a la cuenca media alta con $742\ m^3$, que equivalen al 77% del volumen de agua del río, que fluye diariamente en el sitio de muestreo "Israel río"(Figura 8.1). En este sitio de muestreo, abajo del sitio de

descarga industrial, el agua manifiesta cambios significativos ($\alpha=0,05$) en la conductividad eléctrica ($1\ 047\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) respecto al agua de la naciente, debido a la incorporación mineral principalmente del catión Sodio (Na) ($11,71\ \text{meq Na+K}$) que contrasta con el Calcio (Ca) ($1,24\ \text{meq Ca}$) y la incorporación del anión Sulfato (SO_4) ($4,79\ \text{meq SO}_4$) (Figura 8.9 B) solamente 10% menor al bicarbonato. La incorporación de estos iones supone contaminación humana, una parte por materia orgánica (proteínas) y en el caso del Sodio podría ser por aguas residuales especiales de industrias textiles de la zona.

Esto hace que el tipo hidroquímico del agua cambie del tipo $\text{HCO}_3 - \text{Ca} - \text{Mg}$ de la naciente, a $\text{SO}_4 - \text{Na} - \text{Ca}$ en la cuenca media y baja. Esta alteración en la composición iónica natural, le cuesta a la población de los municipios de Guatemala y Petapa, la oportunidad de uso del agua del río Pinula como bien natural renovable para la Agricultura y Acuicultura en todo lo que resta de su cauce hasta el desfogue.

En el sitio *Israel_río* (Figura 8.27) en los sedimentos del río fueron detectados en mayor variedad y cantidad plaguicidas organoclorados, entre estos, plaguicidas prohibidos por la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA), según el documento presentado por la Red de Agricultura Sostenible. 2011, moléculas como gHCH (Lindano) y DDT por su metabolito pp-DDE.

La principal ruta de contaminación resulta ser la alimentación, como esta detectado en los sedimentos las bacterias y los macroinvertebrados acuáticos serían los primeros en sentir los efectos tóxicos, los organismos superiores en la cadena trófica estarían consumiendo presas vulnerables de contaminación, aunque el río Pinula no presenta peces de gran tamaño, si presenta cangrejos que pueden ser alimento de pobladores más cercanos al río.

La concentración reportada de Lindano, supera el valor guía propuesto por las normas canadienses para la calidad de sedimentos, para la protección de la vida acuática ($2,33\ \mu\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ *ríolsrael*; $4,38\ \mu\text{g}\cdot\text{Kg}^{-1}$ *HpieBombeo*). Los valores encontrados

exceden tanto el criterio de las guías interinas, como el nivel de efecto probable. Aunque los organismos que habitan en los sedimentos del río Pinula (bacterias y larvas) tienen posibilidad de bio-concentrar estos isómeros, los peces presentan pobres posibilidades de bio-acumulación, debido a la alta tasa de depuración (Rodgers et al. 1983, tomado de CCME, 2008).

Por otra parte, metales como el Plomo y Cromo se encuentran en concentraciones bajas en los sedimentos ($11,68 \mu\text{g.Kg}^{-1}$; $4,38 \mu\text{g.Kg}^{-1}$, respectivamente). La presencia del Plomo puede estar asociada al contenido de hidrocarburos policíclicos aromáticos en los sedimentos, principalmente Fenantreno ($156,22 \mu\text{g.Kg}^{-1}$), Benzopireno ($47 \mu\text{g.Kg}^{-1}$), Metilnaftaleno ($24,1 \mu\text{g.Kg}^{-1}$), cuyas concentraciones son superiores a los valores límites de concentración establecidos en sedimento para la protección de la vida acuática. Cabe destacar que la presencia de PAHs en aguas residuales de la industria textil, ha sido reportado tradicionalmente como consecuencia del uso de aceites minerales para el proceso de hilado de las fibras (Walters, 2005).

Este sitio presentó mayor cantidad de coliformes fecales en el agua ($7\ 500\ \text{NMP en } 100\text{ml}$) y menor cantidad de *E. coli* ($40\ \text{NMP en } 100\text{ml}$) con respecto a la naciente y el desfogue. El origen de las bacterias puede estar asociado a la presencia de aguas residuales ordinarias que en abundancia se mezclan con la corriente principal. Estos niveles de bacterias afectan directamente la salud del río y tiene implicaciones que limitan su uso como insumo agrícola, pecuario y piscícola.

En este sitio se detectaron especies que no se reportaron aguas arriba en la cuenca media y alta y que son indicadoras de mala calidad de agua (*familias Muscidae, Psychodidae, Syrphidae, Tubificidae*). No se tomaron muestras de fitobentos ya que no se encontraron evidencias de rocas pobladas con diatomeas.

El agua del río Pinula, en su cuenca media baja, transporta contaminantes alóctonos que podrían generar efectos crónicos en la salud, sobre todo en animales que están más cerca y en contacto con el agua del río, como vacas, cabras, caballos y otros animales domésticos y también aves que se alimentan de insectos y larvas del río.

Antes del desfogue del río Pinula se integra al último tramo de su cauce, el canal que drena de forma perenne aguas domésticas y de forma estacional, las aguas pluviales de una zona urbana del municipio de Petapa. Dicho canal puede transportar hasta 600 m³ diarios de agua, cuyos valores de conductividad eléctrica (743 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y salinidad (426 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), son elevados en el orden de más de 3 veces los valores observados en la naciente del río.

En la desembocadura del río Pinula, el agua tiene mayor concentración de Cobre (16,24 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) y de Arsénico (5,34 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) lo que supone que el otro 26% del caudal promedio total diario del agua que circula en el último tramo del río, también es responsable del aporte de dichos metales. En menor concentración que la naciente, se reportaron 0,34 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ de Mercurio. En el sitio de muestreo del desfogue (Tabla 8.3), la presencia de una mayor cantidad de *E. coli* (150 NMP en 100ml) podría ser atribuida a la carga de aguas crudas domésticas que son aportadas por el canal de drenajes del municipio Petapa. La presencia de Plomo (15,86 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) en los sedimentos podría relacionarse con la presencia de Pireno (133 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), Fluoranteno (111 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) y Fenantreno (+/- 150 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) reportados en este punto de muestreo, aunque no se descartan residuos de tuberías antiguas en mal estado.

El agua de los pozos cercanos al río Pinula muestra señales de contaminación asociables a la calidad del agua del río, sobre todo el sitio *Pozo Israel* que se ubica en la cuenca media. Este pozo, ubicado a 20m del río (NEA: 13,7m), es el que presentó mayor contenido de bacterias coliformes, posiblemente por su ubicación cercana al punto en que la calidad del agua del río se deteriora significativamente de acuerdo a los valores de las variables de calidad del agua en la naciente (CE, STD, Salinidad). Este pozo presentó *E. coli* en cantidades que sobrepasan las COGUANOR NGO 29 001 para agua de consumo humano. El *pozo Israel* además presentó contenido de Arsénico que se corresponde con el contenido del agua del río Pinula (3,2 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$). Estas concentraciones pueden estar asociadas al uso agrícola del suelo en esta zona. En la cuenca media se intensifica la zona agrícola con variedades de cultivos como café, maíz, flores de exportación, plantas ornamentales, pasto para ganado, entre otros. El uso de plaguicidas arsenicales no está prohibido

en Guatemala según el listado del Ministerio de Agronomía, que proporciona Cáceres P., (2004). Por lo que se podría atribuir la presencia de Arsénico en las aguas como efecto residual del uso de plaguicidas arsenicales en el área de estudio. También se podría relacionar la presencia de algunos plaguicidas persistentes y arsenicales, con los procesos de lavado de fibras naturales como el algodón en la industria textil (IFC, 2007), que tiene un desfogue de aguas crudas al río pínula en su cuenca media.

Este pozo presenta la segunda conductividad eléctrica en orden de magnitud ($574 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) y al igual que el río, representa riesgo de salinización a suelos que fueran irrigados con su agua. Se puede pensar que el pozo tiene conexión con el río, tomando en cuenta que de todos los pozos analizados este pozo es el más cercano al río Pinula y de mayor similitud en la calidad de su agua.

El agua del pozo perforado *Villa Luciana*, ubicado en la naciente (NEA: 54m) contiene Cromo y Mercurio en concentraciones de $2,02 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ y $0,47 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, respectivamente. Aunque los valores no superan el límite establecido por normas de calidad para aguas de consumo humano, la presencia de los metales en el pozo *Villa Luciana* es motivo de investigaciones futuras.

El agua del pozo municipal *Parajes* (NEA: 17,65 m) ubicado en la zona de descarga del acuífero local “Ojo de Agua”, cercano a la confluencia del río Pinula con el Villalobos, presentó en su agua los mayores valores de CE de todos los pozos ($1065 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

El pozo perforado Transurbano (NEA: 10,35 m) ubicado a 25 m del punto de muestreo antes de la desembocadura del río Pinula (Figura 8.5), presenta conductividad eléctrica ligeramente mayor a los valores del agua de pozos ubicados en la naciente (38% mayor que *Villa Luciana*) y este cambio está relacionado con la presencia de sodio al igual que en el *pozo Israel*, aunque el contenido mineral sea menor ($\text{meq}\cdot\text{l}^{-1}$). El contenido de *E. coli* en el agua es más elevado en este pozo (4 NMP en 100 ml) (Figura 8.24). El agua de los pozos, antes de ser distribuida municipalmente, lleva proceso de cloración o potabilización. Los resultados muestran

que este pozo presenta $0,89 \text{ mg.l}^{-1}$ de nitrógeno orgánico, del cual $0,8 \text{ mg.l}^{-1}$ corresponden a la forma amoniacal N-NH_4 lo que podría ser consecuencia de la infiltración de sistemas de drenajes urbanos y la infiltración de agua del río. El agua de este pozo presentó la mayor concentración de Arsénico ($4,96 \text{ }\mu\text{g.l}^{-1}$) y el mayor contenido de Cromo con respecto al pozo ubicado en la naciente ($2,37 \text{ }\mu\text{g.l}^{-1}$). La presencia de Arsénico podría ser causada por la infiltración del metal contenido en insecticidas arsenicales utilizados en la cuenca media y baja, en las zonas agrícolas cercanas al río. La presencia de Cromo en el agua del *pozo Transurbano* se corresponde con la concentración de este metal en el agua del río en dicho punto. Ambos son residuos identificados como contaminantes contenidos en aguas residuales de diversos procesos en la industria textil, como el lavado y la tinción (IFC, 2007).

El pozo perforado *Parajes* ubicado en la cuenca baja (*NEA: 17,65 m*) presentó mayor contenido de minerales disueltos en el agua. Presentando también la mayor conductividad eléctrica ($1\ 065 \text{ }\mu\text{S.cm}^{-1}$). La presencia de nitratos N-NO_3 ($24,5 \text{ mg.l}^{-1}$) limitan el uso del agua de este pozo para fines de consumo humano al igual que el pozo Israel en la cuenca media, ubicados en una zona de producción agrícola de cultivos anuales y de flores de exportación. La presencia de nitrógeno inorgánico puede ser consecuencia de la infiltración de nutrientes utilizados como abono agrícola. Esto puede causar enfermedades tal como Metahemoglobinemia principalmente en menores, en el caso del consumo. El agua de este pozo tiene los valores de concentración más elevados de Cromo en comparación al resto del agua de otros pozos ($9,83 \text{ }\mu\text{g.l}^{-1}$) y presenta valores similares de Mercurio que la naciente ($0,47 \text{ }\mu\text{g.l}^{-1}$).

Acciones concretas entorno a resolver las causas que generan contaminación del agua del río Pinula:

Una primera acción es la denuncia de los acontecimientos registrados (presencia de sustancias altamente tóxicas y prohibidas) la recomendación de sitios de monitoreo para el control de las descargas de aguas residuales ordinarias y especiales al río Pinula (todas las industrias, colonias, residenciales y aguas pluviales).

Generar una comisión inter-municipal de evaluación ambiental (del río Pinula), que se base en las concentraciones de los parámetros de calidad de agua citados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Aguas Residuales y Disposición de Lodos como “estudio técnico” para comparar los valores encontrados en los sitios de monitoreo elegidos por la comisión, con los valores sugeridos de acuerdo con la proyección actual de la norma (año 2015 - 2025). En caso de encontrar entes emisores de aguas residuales crudas, poner a disposición de las autoridades las acciones a tomar.

Además la comisión debe tener principal atención con las industrias agrícolas y textiles. Se sugiere dar seguimiento a la evaluación de plaguicidas persistentes en lodos y agua del río. Este seguimiento debe incluir una fase de acercamiento y concientización entre el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Autoridades Municipales, Industrias textiles, Empresarios agro-exportadores, medianos y pequeños agricultores (as) en las cercanías del río Pinula, con la intención de llegar a acuerdos de reducción sistemática del uso de agroquímicos no permitidos.

Es importante iniciar cuanto antes investigaciones integrales, sobre el análisis del contenido de sustancias químicas derivadas de industrias textiles, como colorantes del grupo Azoico, gestionar capacidades locales y/o regionales para la detección instrumental de dichos contaminantes en agua, tejidos orgánicos y sedimentos. Con capacidades analíticas gestionadas y generadas, iniciar un rastreo intenso de estos contaminantes en las matrices orgánicas (leche de vaca), sedimentos y agua del río en zonas cercanas a las descargas de dichas aguas residuales. En el mediano plazo, evaluar la necesidad de incluir dichos contaminantes dentro de los parámetros regulados por la norma actual de aguas residuales 236-2006 así como el contenido de ciertos contaminantes de origen agroquímico.

Lotificaciones, residenciales privados, asentamientos humanos, deberán de considerar dentro de sus ofertas, en cuanto a las condiciones de vivienda, un sistema de tratamiento de aguas residuales acorde a la densidad poblacional proyectada a 25 años. Si no tienen la capacidad de ofrecerlo, deberán solicitarlo a la

(s) Empresa (s) Municipal (es) y el costo del tratamiento de las aguas, así como la infraestructura, será trasladado a los usuarios del sistema.

Especial monitoreo requerirán los rellenos de ripio y basureros clandestinos ubicados en los barrancos y laderas que rodean el río Pinula. La comisión deberá plantear alternativas viables para la reducción y eliminación de dichas prácticas, pondrá en marcha acciones para evaluar el estado actual y el avance y riesgos en función al Estudio de Impacto Ambiental asignado a la actividad. Así como pequeñas industrias informales no conectadas al sistema, que drenan hacia el sistema de alcantarillas públicas. Deberá fijarse un plazo mínimo para tomar medidas correctivas inmediatas de parte de los entes emisores de aguas residuales. Las acciones correctivas pueden definirse como; sistemas de tratamientos primarios y secundario.

CONCLUSIONES

1. La presencia de nitrógeno orgánico y fósforo en agua del río Pinula desde la cuenca alta o naciente, así como la presencia abundante de bacterias en todo el tramo del río reflejan ausencia de manejo y de tratamiento de aguas residuales generadas en los municipios de Santa Catarina Pinula, Guatemala y Petapa, y que son descargadas al río. Esto constituye una causa de fondo en el deterioro de la calidad del agua del río.
2. La presencia de moléculas orgánicas persistentes y altamente tóxicas, como plaguicidas, hidrocarburos (HAPs; Lindano, Dieldrín y DDT) y metales (Pb, As, Cr) en los sedimentos del río Pinula, que provienen de la cuenca alta, confirman el uso de sustancias prohibidas en la producción agrícola y confirman la influencia de actividades urbanas que generan contaminantes derivados de la combustión de hidrocarburos asociadas a los tres municipios.
3. La presencia de sustancias tóxicas en sedimentos es menos acentuada en la naciente que en el embalse Hincapié, en la cuenca media y que en el desfogue del río, en donde las concentraciones y la diversidad de la contaminación en los sedimentos es más notoria, lo cual confirma la hipótesis planteada.
4. Algunos puntos críticos principales que ocasionan el deterioro de la calidad del agua del río los constituyen: a) el embalse Hincapié que es un reservorio en donde se acumulan moléculas tóxicas entre plaguicidas (POC) y metales (Cr, Pb), b) un drenaje industrial en la cuenca media baja, y c) la zona agropecuaria en la cuenca media y baja. En el caso de pozos cercanos al río, los puntos críticos también se ubican en la cuenca media y baja.
5. Las características hidroquímicas del agua en el pozo Israel, sugieren que sus aguas han recibido influencia por infiltración del agua del río Pinula, confirmando que la influencia de la calidad del agua del río hacia pozos cercanos, representa un factor de vulnerabilidad para el acuífero local.

6. La respuesta de las familias y géneros de fitoplancton, fitobentos y macroinvertebrados acuáticos reportados de acuerdo a la clasificación IBF-ES-2010 indican el deterioro de la calidad del río Pinula en todos los puntos muestreados. El río Pinula no mostró indicadores de condiciones prístinas en ningún punto de muestreo.

7. El agua del río Pinula luego del punto Hpiebombeo no puede ser utilizada para actividades productivas como la agricultura o piscicultura y el pastoreo en áreas cercanas al cauce, el agua del río pone en riesgo la salud de los animales por ingesta de agua y sedimentos con sustancias tóxicas, a partir de la cuenca media hasta el desfogue.

8. Los contaminantes que causan mayor impacto negativo en el río Pinula lo constituyen aquellos con un nivel de persistencia mayor (bacterias, carga orgánica, contaminantes orgánicos derivados de plaguicidas y derivados del petróleo), pues suponen un esfuerzo mayor en el proceso de remediación, remoción y atenuación, natural y controlada.

9. La contaminación orgánica proveniente de aguas residuales ordinarias evidencian la falta de control y manejo de estas aguas de parte de las autoridades municipales sobre lotificaciones, colonias, barrios, residenciales, así como de las aguas residuales especiales que se manifiestan de la zona franca en la zona 12 capitalina, y en actividades agrícolas en toda la microcuenca, mostrando evidencia del uso de agroquímicos prohibidos a nivel nacional.

10. La contaminación del río Pinula deben ser de alta prioridad en materia de gestión (Municipalidades y Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales) de acciones para su mitigación tomando como punto de partida el monitoreo de los puntos propuestos en el presente estudio como sitios de remediación.

RECOMENDACIONES

1. De acuerdo a la información generada en esta investigación se ha llegado a considerar que el manejo y tratamiento de aguas residuales en los municipios Santa Catarina Pinula, Guatemala y Petapa, ubicados dentro de la cuenca hídrica del río Pinula, debe constituir una medida de gestión prioritaria en el manejo integral del agua en la microcuenca y en la disminución de la contaminación aportada hacia el río Villalobos y el Lago de Amatitlán.
2. La presencia de sustancias tóxicas de alto riesgo para la salud humana y animal como moléculas asociadas a plaguicidas prohibidos sugiere más investigación y ordenamiento.
3. En la investigación se menciona un drenaje industrial en la cuenca media, el cual representa el desfogue de industrias textiles que operan en la zona 12 de la ciudad de Guatemala. Estos desfogues podrían contener moléculas tóxicas del grupo azoico, representativas de algunos colorantes utilizados. La presencia de estos contaminantes no ha sido determinada en el presente estudio, debido a que no se encontró un laboratorio que tuviera la metodología montada. Se recomienda darle seguimiento al presente estudio y ampliar el número de análisis de contaminación en el agua, incluyendo los contaminantes azoicos en agua y sedimento.
3. Evaluar el contenido de contaminantes persistentes en agua del embalse Hincapié y en el agua que es distribuida a nivel municipal.
4. Realizar un muestreo para determinar los contaminantes en agua de río y pozos en época de lluvia, evaluar el grado de dilución de algunos contaminantes y el ingreso de otros.
5. Es necesario realizar un estudio profundo que permita visualizar la dinámica hidrogeológica actual dentro de la micro-cuenca así como valorizar su vulnerabilidad en torno a la cercanía de aguas superficiales contaminadas (río Rinula), aguas residuales, fugas de tanques de almacenamientos, etc.

6. Realizar bio monitoreos constantes en forma integral dentro de la cuenca, para representar cambios estacionales en cuanto a la abundancia y diversidad de familias indicadoras de contaminación, y asociarlo a la carga de contaminantes en el agua del río.

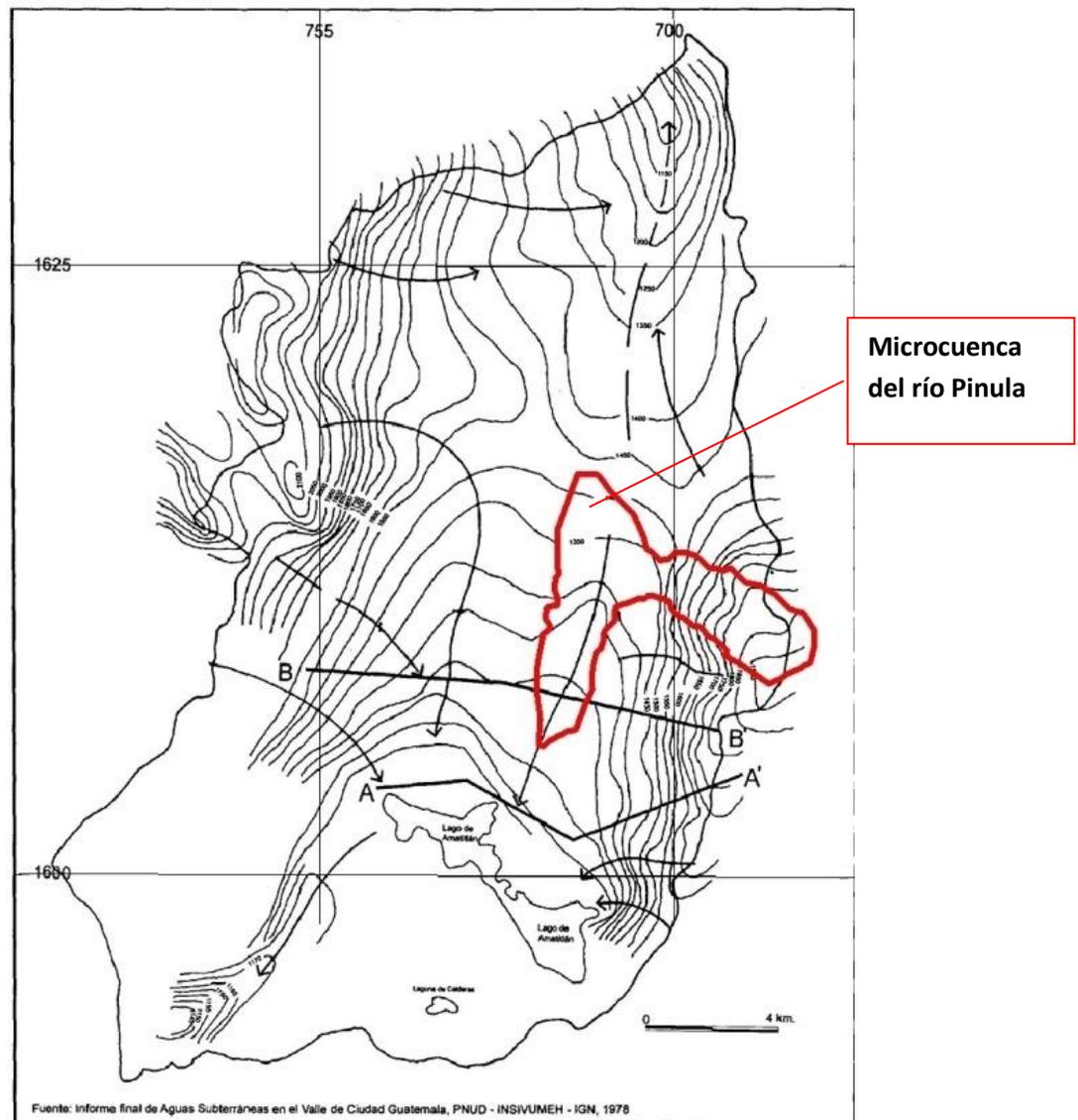
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayers, R.S. y Westcot, D.W. (1985). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1, Roma, 174 p.
- Bejarano G Fernando. (2004). Guía ciudadana para la aplicación del Convenio de Estocolmo. Primera edición. México.
- Burns Ralph A. 1996. Fundamentos de Química. Segunda edición. ISBN 968-880-628-5
- Cáceres P Vinicio R. 2004. Análisis de los plaguicidas prohibidos o restringidos en países miembros de la unión aduanera centroamericana. Instituto de Fitosanidad. Texococo, Mx.
- Canadian Council of Ministers of Environment CCME. 2008. Canadian Water Quality Guidelines.
- CCME. 2001. Canadian Sediment Quality Guidelines for Protection of Aquatic life . Quebec, Canada.
- COGUANOR NGO 29 001. 1985. Normas de las especificaciones para el agua potable. Diario de Centroamérica 18/octubre/1985.
- Comisión guatemalteca de normas COGUANOR, primera revisión. Ministerio de Economía 1 999.
- Domenico Patrick A, Schwuartz Franklin W. 1998. Physical and Chemical Hydrogeology. 2th edition. ISBN 0- 471-59762-7.
- Estrada M. Dina L. 2000. Caracterización y eliminación de colorantes residuales que provienen de las aguas de lavado de la industria textil que tiñe hilo de algodón. FCCQQF USAC, Guatemala.
- Fetter Charles W. 2001. Applied Hydrogeology. 4th edition, USA. ISBN-013-0088239-9.
- García García Hayro Oswaldo, 2002 Cuantificación de la calidad del agua del río Villalobos en época seca y lluviosa en un periodo de 24 horas 2 veces al mes en un punto previo a la entrada al lago de Amatitlan. Escuela regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos –ERIS. USAC.
- Herrera R Isaac, Orozco O Eugenio. 2010. Hidrogeología de Ojo de Agua cuenca sur de la ciudad de Guatemala. Rev. Geol. América Central, 42: 85-98.
- IFC, C. F. (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad, Fabricación de textiles*. Banco Mundial.
- Ignacio Morell, Lucía Candela (Eds) Castelló de Plans: Publicacions de la Universitat Jaume I, cop. 1998. ISBN 84-8021-240-3.)
- Instituto de Incidencia Ambiental, Universidad Rafael Landivar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Agrícolas, Estado del Uso Actual de la Tierra en Guatemala, Guatemala, agosto del 2003, (IARNA, 2003).
- Kelly, M. G., Adams, A. C., Jamieson, J., Krokowski, J., Lycett, E., Murray-Bligh, J., y otros. (2001). *The trophic diatom index: a user's manual. Revised edition , Revised Edition*. (R. a. Development, Ed.) Almondsbury, Aztec West, Reino Unido: Environment Agency.

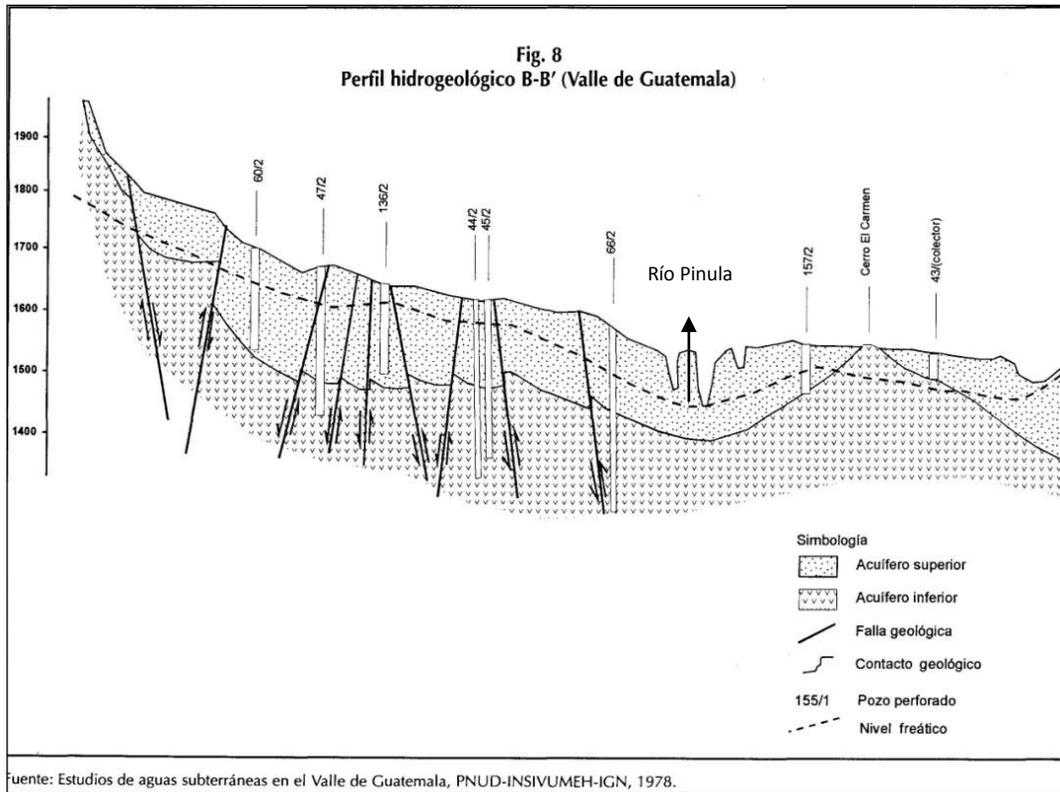
- Lopez C. Fernando. 1999. Diseño adecuado de drenajes y recarga de acuíferos en el valle de la ciudad de Guatemala. Programa de investigación de los recursos hídricos Escuela Reginal de Ingeniería Sanitaria. ERIS/EMPAGUA/INSIVUMEH.
- Ministerio de ambiente y recursos naturales MARN. 2011. Cuencas hidrográficas de Guatemala. SIA/DGPEA.
- Morell Ignacio, Candela Lucila. 1998. Plaguicidas, aspectos ambientales, analíticos y toxicológicos. Universitat Jaume 1. ISBN 84-8021-240-3.
- Organización Mundial de la Salud OMS. 2008. Guidelines for Drinking Water Quality. 3rd edition. Geneva 2008. ISBN 978-92-4-154761-1.
- Ramírez mejía, Lilian Leonor. *Estudio sobre la calidad del Agua Subterránea en el noreste del valle de la ciudad capital de Guatemala*. Facultad de Ingeniería USAC. Guatemala, 2003.
- Red de Agricultura sostenible. 2011. Lista de Plaguicidas Prohibidos. San José Costa Rica. Disponible en: http://www.imaflora.org/downloads/biblioteca/RAS_Lista_de_Plaguicidas_Prohibidos_Noviembre_2011.pdf
- Rodas de C Norma E. 2008. Interpretación quimiométrica de afluentes del río Villalobos, principal tributario del Lago de Amatitlán. Facultad de Ingeniería. USAC.
- Roldán P Gabriel A, Ramírez R Jairo J. 2008. Fundamentos de Limnología neotropical. Universidad Católica de Oriente UCO. Colombia. ISBN 978-958-714-144-3.
- Sermeño Chicas, J. M. *et. al.* 2010. Determinación de la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando invertebrados acuáticos: índice biológico a nivel de familias de invertebrados acuáticos en El Salvador (IBF-SV-2010). *En:* Formulación de una guía metodológica estandarizada para determinar la calidad ambiental de las aguas de los ríos de El Salvador, utilizando insectos acuáticos. Proyecto Universidad de El Salvador (UES) - Organización de los Estados Americanos (OEA). Editorial Universitaria UES, San Salvador, El Salvador. 43 pág.
- Suarez B, Gustavo A. Cuencas Hidrográficas de Guatemala. MARN, SIA, DGPEA. Guatemala, enero 2011. disponible en [http:// www.sia.marn.gob.gt](http://www.sia.marn.gob.gt) / Documentos / Cuencashidrograficas.pdf.
- Tobias H, Lira E. 2000. Primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la república de Guatemala a escala 1:250,000. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación MAGA. Guatemala.
- Toledo AP, Talarico M, Chinez SJ, Agudo E. 1983. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processos de eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. XIX Congresso Interamericano de Engenharia e ambiental. Camboriú.
- Vannote, R.L., G. W. Minshall, K. W. Cummins, J.R. Sedell, y E. Gushing. 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 130-137.
- R. Bremond, C. Perrodon. Parametres de la qualité des eaux. Ministerio del ambiente y medios de vida. Paris, Francia. 1979.)
- Walters, A. S. (2005). *El tratamiento de textiles y sus repercusiones ambientales*. Reino Unido: GREENPEACE.

ANEXO 1. Modelo conceptual del acuífero del Valle de Guatemala

Dentro de dicho acuífero se inscribe la microcuenca del río Pinula. Con este antecedente se refieren las condiciones hidrogeológicas que se describen en el modelo conceptual de una zona que atraviesa la microcuenca de estudio. Ubicación de la Microcuenca Pinula sobre el transecto del modelo conceptual B - B.



Líneas de flujo subterráneo del acuífero del Valle de Guatemala. Fuente: (Losilla, Rodríguez, Schosinsky, Stimson, & Bethune, 2001)



Modelo Conceptual del perfil B – B el cual se encuentra en una franja que atraviesa la cuenca media baja. Figura, Fuente: (Losilla, Rodríguez, Schosinsky, Stimson, & Bethune, 2001)

ANEXO 2. Metodología del análisis instrumental Físico Químico, de las muestras de agua tomadas en el estudio, por Laboratorios del CIRA/UNAN.

Parámetros	Método	Límite de detección	Rango de detección
Turbidez	2130.B (1)		0,0 – 999
pH a 25°C	4500-H.B		0,0 – 14,0
CE 23,3 °C	2510.B (1)		1,0 – 1.0e7
STD	1030.E (1)		
Color Verdadero	2120.B (1)		5,0 – 70,0
Calcio	3500.Ca.D (1)	0,08	
Magnesio	3500-Kg.E (1)	0.2	
Sodio	Electrodo IS-Na (2)	0.1	
Potasio	3500-K.D (1)	0,1	
Cloruros	4110.B (1)	0,25	
Nitratos	4110.B (1)	0,05	
Sulfatos	4110.B (1)	0,25	
Carbonatos	2320.B (1)	2,0	
Bicarbonatos	2320.B (1)	0,75	
Dureza total CaCO ₃	2340.C (1)	0,13	
Alcalinidad total	2320.C (1)	0,62	
Alcalinidad a la Fenolftaleína	2320.B (1)	1,67	

Sílice reactivo disuelto	4500-SIO2.C (1)	0,2
Nitritos	4500-NO2.B(1)	0,003
Hierro total	3500-Fe.D(1)	0,02
Fluoruros	4110.B(1)	0,03
Amonio	Azul de Indofenol (3)	0,005
Balance iónico de la muestra	1030.F(1)	

Fuente: Laboratorios del CIRA/UNAN.

ANEXO 3 Pruebas Estadísticas

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk

LUGAR		Pruebas de normalidad			Pruebas de normalidad		
		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Conductividad	Canal VH	.268	4	.	.824	4	.153
	Desfogue	.241	4	.	.912	4	.496
	Hpie Afo	.229	5	.200*	.868	5	.259
	Israel r	.210	4	.	.965	4	.813
	Muxaforo	.255	4	.	.895	4	.406
	Muxnac	.193	5	.200*	.977	5	.919
	Vlbosdp	.229	3	.	.981	3	.739

a. Corrección de la significación de Lilliefors

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Como el estadístico es mayor al nivel de significancia, se asume que las muestras se comportan normalmente.

Prueba de homogeneidad de varianzas

Conductividad

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
3.228	6	22	.020

Como el estadístico de Levene (Sig.) es menor que el nivel de significancia se asume que las varianzas no son homogéneas.

ANOVA

Conductividad

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2803649.674	6	467274.946	56.842	.000
Intra-grupos	180851.579	22	8220.526		
Total	2984501.252	28			

El valor Sig. del ANOVA indica que existe significancia entre la conductividad eléctrica del agua en los sitios muestreados

Variable dependiente:Conductividad

(I) CODLugar		Sig.						
		(J) CODLugar						
		1	2	3	4	5	6	7
Tamhane	1		1.000	.499	.050	.002	.000	.253
	2	1.000		.997	.011	.012	.013	.065
	3	.499	.997		.054	.001	.000	.277
	4	.050	.011	.054		.728	1.000	.599
	5	.002	.012	.001	.728		.167	1.000
	6	.000	.013	.000	1.000	.167		.774
	7	.253	.065	.277	.599	1.000	.774	
T3 de Dunnett	1		1.000	.325	.019	.001	.000	.074
	2	1.000		.912	.006	.006	.005	.033
	3	.325	.912		.022	.001	.000	.091
	4	.019	.006	.022		.409	.997	.350
	5	.001	.006	.001	.409		.080	.999
	6	.000	.005	.000	.997	.080		.332
	7	.074	.033	.091	.350	.999	.332	

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk

Tests of Normality

LUGAR		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Solidos Totales	Canal VH	.293	4	.	.905	4	.456
	Desfogue	.216	4	.	.933	4	.610
	Hpie Afo	.257	4	.	.952	4	.726
	Israel r	.310	4	.	.877	4	.326
	Muxaforo	.300	4	.	.909	4	.479
	Muxnac	.372	3	.	.781	3	.070
	Vlbosdp	.260	2	.			
Salinidad	Canal VH	.307	4	.	.752	4	.040
	Desfogue	.167	4	.	.987	4	.940
	Hpie Afo	.142	4	.	.997	4	.989
	Israel r	.254	4	.	.945	4	.682
	Muxaforo	.261	4	.	.949	4	.708
	Muxnac	.355	3	.	.819	3	.160
	Vlbosdp	.260	2	.			

Prueba de normalidad Shapiro-Wilk

Tests of Normality

LUGAR		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Solidos	Canal VH	.293	4	.	.905	4	.456
Totales	Desfogue	.216	4	.	.933	4	.610
	Hpie Afo	.257	4	.	.952	4	.726
	Israel r	.310	4	.	.877	4	.326
	Muxaforo	.300	4	.	.909	4	.479
	Muxnac	.372	3	.	.781	3	.070
	Vlbosdp	.260	2	.			
	Salinidad	Canal VH	.307	4	.	.752	4
Desfogue		.167	4	.	.987	4	.940
Hpie Afo		.142	4	.	.997	4	.989
Israel r		.254	4	.	.945	4	.682
Muxaforo		.261	4	.	.949	4	.708
Muxnac		.355	3	.	.819	3	.160
Vlbosdp		.260	2	.			

a. Lilliefors Significance Correction

Como el estadístico es mayor al nivel de significancia, se asume que las muestras se comportan normalmente.

Solidos Totales

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					1	3		
2	5	155.26	38.633	17.277	107.29	203.23	103	196
3	4	218.50	27.635	13.817	174.53	262.47	181	247
4	4	596.75	170.918	85.459	324.78	868.72	450	842
5	4	502.75	85.430	42.715	366.81	638.69	382	581
6	4	605.00	96.329	48.165	451.72	758.28	475	693
7	3	551.67	91.090	52.591	325.39	777.95	447	613

Solidos Totales

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					1	3		
2	5	155.26	38.633	17.277	107.29	203.23	103	196
3	4	218.50	27.635	13.817	174.53	262.47	181	247
4	4	596.75	170.918	85.459	324.78	868.72	450	842
5	4	502.75	85.430	42.715	366.81	638.69	382	581
6	4	605.00	96.329	48.165	451.72	758.28	475	693
7	3	551.67	91.090	52.591	325.39	777.95	447	613
Total	27	390.86	217.057	41.773	304.99	476.72	103	842

Test of Homogeneity of Variances

Solidos Totales

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.241	6	20	.081

Como el estadístico de Levene (Sig.) es mayor que el nivel de significancia se asume que las varianzas son homogéneas.

ANOVA

Solidos Totales

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1060916.421	6	176819.404	21.558	.000
Within Groups	164039.145	20	8201.957		
Total	1224955.567	26			

El valor Sig. del ANOVA indica que existe significancia entre la conductividad eléctrica del agua en los sitios muestreados

Solidos Totales
Scheffe

(J) CODLugar	Sig.						
	(I) CODLugar						
	1	2	3	4	5	6	7
1		1.000	.974	.000	.005	.000	.003
2	1.000		.979	.000	.002	.000	.001
3	.974	.979		.001	.021	.001	.010
4	.000	.000	.001		.896	1.000	.998
5	.005	.002	.021	.896		.854	.997
6	.000	.000	.001	1.000	.854		.996
7	.003	.001	.010	.998	.997	.996	

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Descriptives

Salinidad

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
					1	3		
2	4	132.750	27.8014	13.9007	88.512	176.988	100.0	168.0
3	4	171.500	23.3024	11.6512	134.421	208.579	145.0	200.0
4	4	500.750	75.5309	37.7654	380.563	620.937	409.0	594.0
5	4	439.250	74.2445	37.1223	321.110	557.390	375.0	507.0
6	4	465.000	32.4859	16.2429	413.308	516.692	424.0	500.0
7	3	351.333	42.7122	24.6599	245.230	457.436	303.0	384.0
Total	26	314.785	166.7874	32.7097	247.418	382.152	86.8	594.0

Test of Homogeneity of Variances

Salinidad

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
2.246	6	19	.083

Como el estadístico de Levene (Sig.) es mayor que el nivel de significancia se asume que las varianzas son homogéneas.

ANOVA

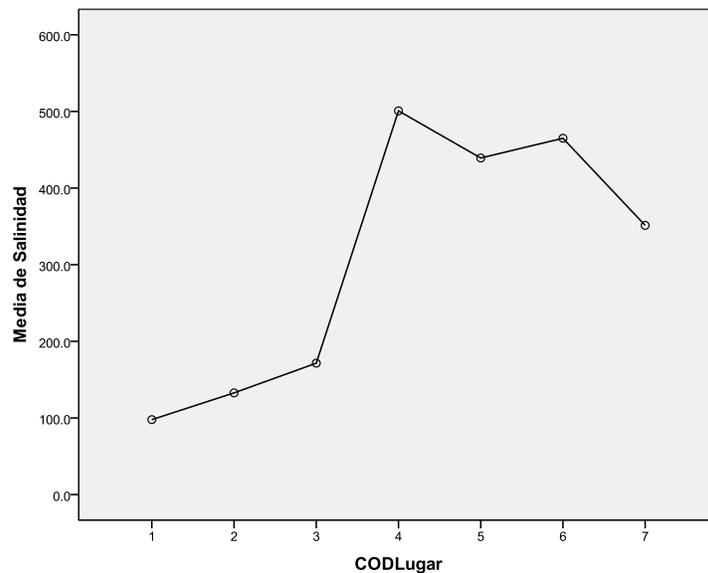
Salinidad

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	650480.397	6	108413.400	45.804	.000
Within Groups	44970.797	19	2366.884		
Total	695451.194	25			

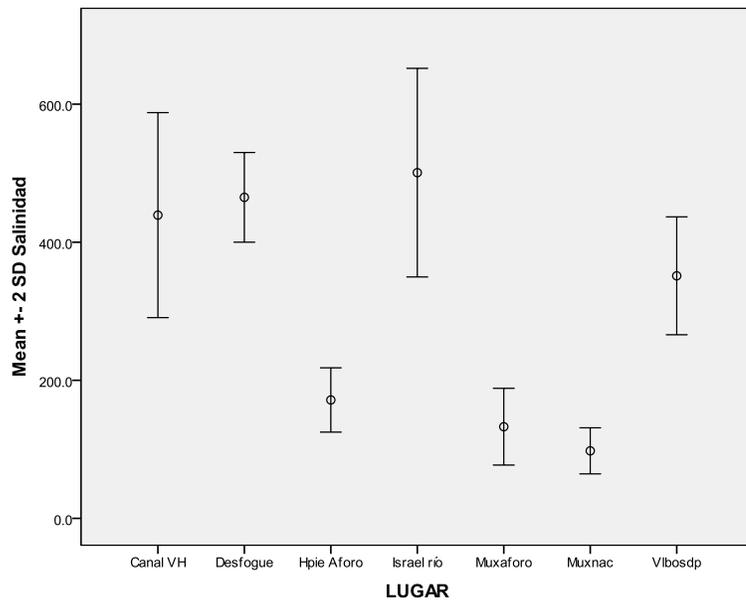
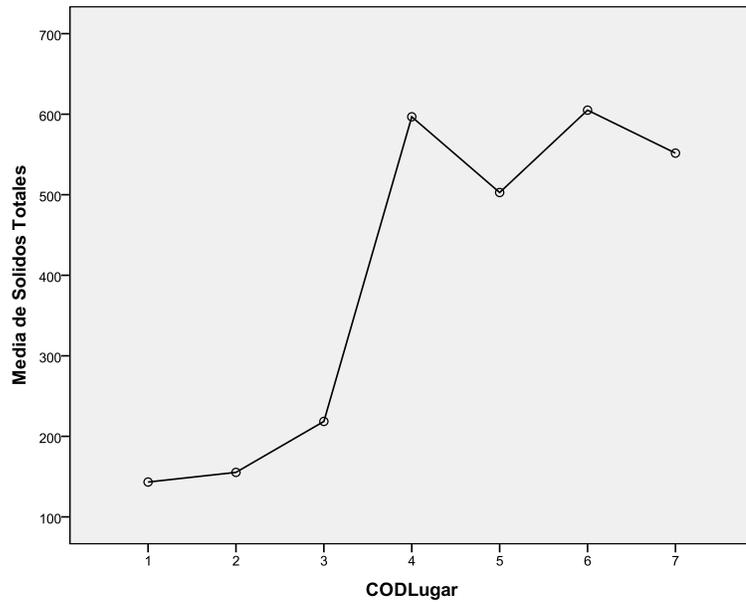
El valor Sig. del ANOVA indica que existe significancia entre la conductividad eléctrica del agua en los sitios muestreados

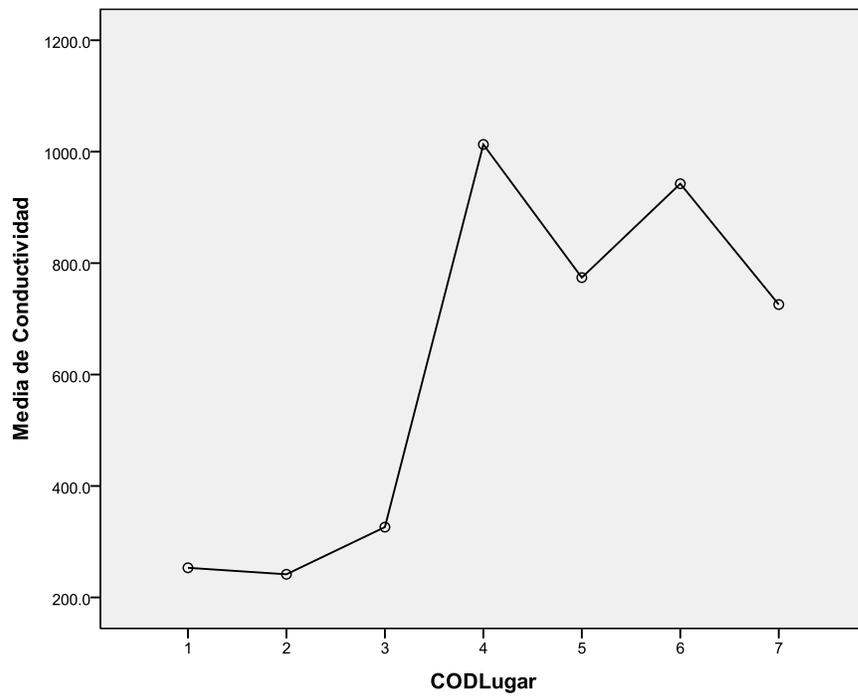
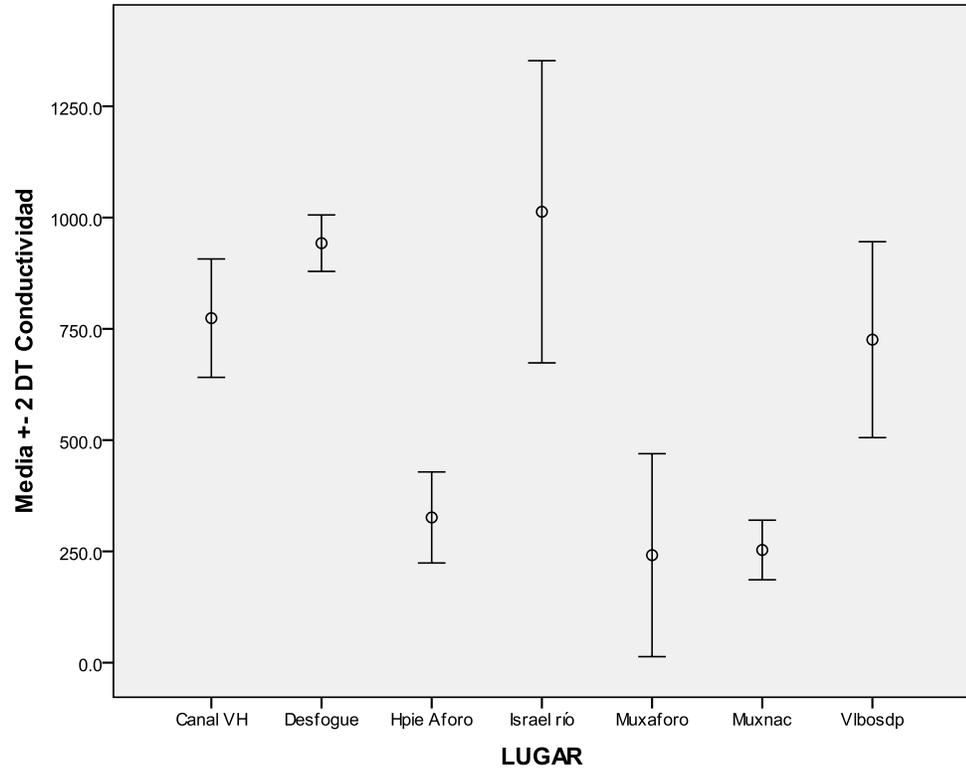
(I) CODLugar	Sig.						
	(J) CODLugar						
	1	2	3	4	5	6	7
1		.987	.686	.000	.000	.000	.001
2	.987		.969	.000	.000	.000	.001
3	.686	.969		.000	.000	.000	.010
4	.000	.000	.000		.777	.979	.046
5	.000	.000	.000	.777		.996	.494
6	.000	.000	.000	.979	.996		.213
7	.001	.001	.010	.046	.494	.213	

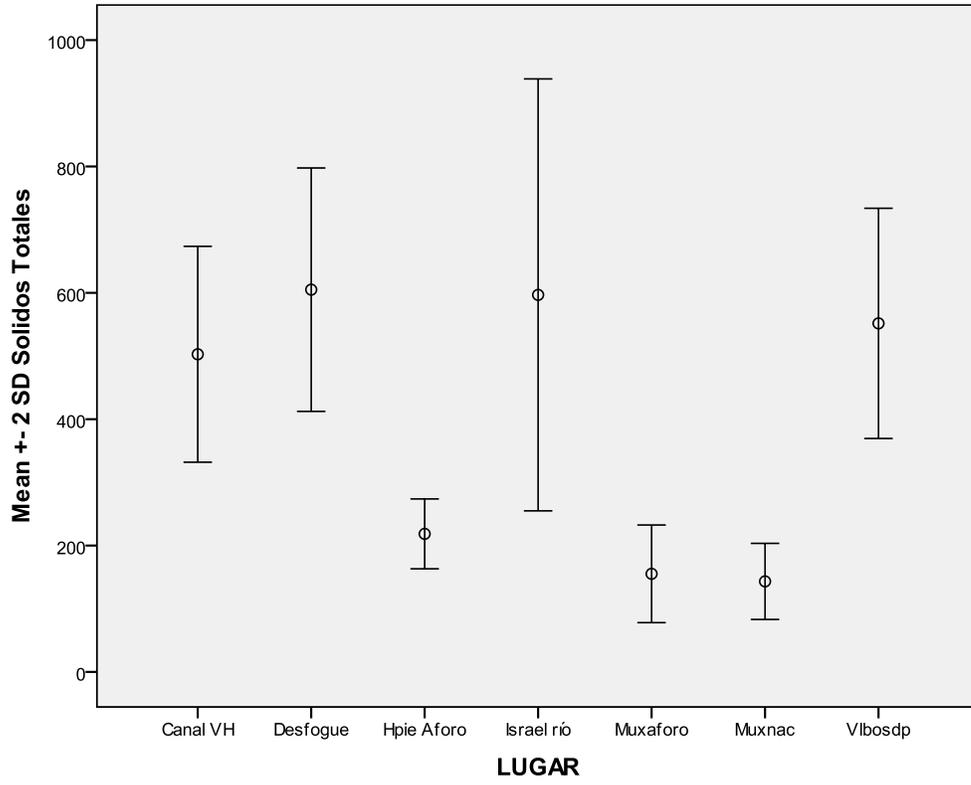
*. The mean difference is significant at the 0.05 level.



ANEXO 4. Gráficas de la Conductividad Eléctrica en distintos puntos de monitoreo del agua del río Pinula







ANEXO 5 Índice del estado trófico de las aguas según (Toledo, Tolarico, & Chinez, 1984)

	Nitrógeno total	Fósforo total	Ortofosfato	Nitrógeno Total	Toledo et. al. 1984	
	µg/l	µg/l	µg/l	Wetzel, 1981	Pt	PO ₄
muxnac 04012	3549,821256	30136,00	15,98	Hipereutróficas	67,6	55,6
Muxaforo 04012	10420,99455	520,00	150,35	Hipereutróficas	86,96	87,9
Hpie aforo 04012	30000	1000,00	sd	Hipereutróficas	96,4	
Río Israel 4/2012	40000	7000,00	sd	Hipereutróficas	124,5	
Desfogue 03012	63000	10000	sd	Hipereutróficas	129,6	

Tabla de resultados del contenido de Nutrientes en agua del río Pinula.

Fuente: Resultados de análisis de muestras.

Funciones aplicables para determinar el Estado Trófico ET en el agua

Variables	Funciones ET por variables
Fósforo total Pt (µg.l ⁻¹)	$= 10 * \{6 - [\ln(80.32 / PT) / \ln 2]\}$
Ortofosfato P-PO ₄ (µg.l ⁻¹)	$= 10 * \{6 - [\ln(21.67 / P-PO_4) / \ln 2]\}$

Fuente: (Toledo, Tolarico, & Chinez, 1984)

Rangos propuestos Toledo et al, 1984	Estado Trófico	Color según estado
< 44	Oligotrófico	
44 - 54	Mesotrófico	
55 - 74	Eutrófico	
> 74	Hipereutrófico	

Anexo 5. Calidad del agua de acuerdo al estado trófico.

Nivel general de productividad	Fósforo total $\mu\text{g.l}^{-1}$	Nitrógeno total $\mu\text{g.l}^{-1}$
Ultra-oligotrófico	< 5	< 200
Mesotrófico	5 – 10	200 – 400
Meso-eutrófico	10 – 30	300 – 650
Eutrófico	30 – 100	500 – 1 500
Hipereutrófico	> 100	> 1 500

Fuente: (Wetzel, 1981)

ANEXO 6 Fitoplancton reportado en los sitios de muestreo indicados.

Sitio	Mux. Nac. Tanque		
fecha	17/04/2012		
TAXA	densidad Poblacional	unidades	a
División Bacillariophyta		ind/l	%
<i>Achnanthes sp</i>	85453	ind/l	18
<i>Gomphonema sp</i>	125667	ind/l	26
<i>Navicula sp.</i>	45240	ind/l	9
<i>Nitzschia sp</i>	20107	ind/l	4
<i>Nitzschia palea</i>	165880	ind/l	34
<i>Pinnularia sp.</i>	5027	ind/l	1
<i>Surirella sp.</i>	5027	ind/l	1
<i>Synedra ulna</i>	30160	ind/l	6
<i>Subtotal</i>	482561	ind/l	100
División Euglenophyta			
<i>Euglena sp.</i>	5027	ind/l	1
TOTAL	487588	ind/l	

Sitio	Hpie. Bombeo		
fecha	17/04/2012		
TAXA	densidad Poblacional	unidades	a
División Bacillariophyta	a	ind/l	%
<i>Achnanthes sp</i>	150800	ind/l	6
<i>Cyclotella sp</i>	50267	ind/l	2
<i>Gomphonema parvulum</i>	741434	ind/l	28
<i>Navicula sp</i>	87967	ind/l	3
<i>Nitzschia palea</i>	1520567	ind/l	57
<i>Nitzschia sp</i>	113100	ind/l	4
<i>Synedra ulna</i>	12567	ind/l	0
<i>subtotal</i>	2676702	ind/l	
División Chlorophyta			

Scenedesmus sp	75400	ind/l	
Total	2752102	ind/l	

ANEXO 7 Composición del Fitobentos encontrado en el río Pinula

1. Muxnac Arriba

Sitio	Mux. Nac (arriba)								
fecha	17/04/2012								
TAXA		a	s	v	a*s*v	a*v			
<i>Nitzschia palea</i>	477	51	5	1	254	51	movil	Centrales	
<i>Achnanthes lanceolata</i>	9	1	5	2	10	2	movil	Pennales	
<i>Achnanthes sp.</i>	4	0	3	1	1	0		Pennales	
<i>Amphora sp.</i>	9	1	5	1	5	1		Pennales	
<i>Cocconeis placentula</i>	1	0	5	1	1	0		Pennales	
<i>Gomphonema parvulum</i>	281	30	3	2	179	60		Pennales	
<i>Gomphonema truncatum</i>	12	1	3	1	4	1		Pennales	
<i>Melosira sp.</i>	7	1	4	2	6	1		Pennales	
<i>Navicula aikinensis</i>	15	2	4	1	6	2	movil	Pennales	
<i>Navicula arvensis</i>	43	5	4	1	18	5	movil	Pennales	
<i>Navicula criptotenella</i>	5	1	5	2	5	1	movil	Pennales	
<i>Navicula pupula</i>	18	2	4	1	8	2	movil	Pennales	
<i>Navicula sp.</i>	18	2	4	1	8	2	movil	Pennales	
<i>Nitzschia amphibia</i>	2	0	5	3	3	1	movil	Centrales	
<i>Nitzschia clausii</i>	2	0	4	1	1	0	movil	Centrales	
<i>Nitzschia eglei</i>	13	1	4	1	6	1	movil	Centrales	

<i>Nitzschia umbonata</i>	4	0	4	1	2	0	movil	Centrales
<i>Pinnularia sp.</i>	1	0	1	3	0	0	movil	Pennales
<i>Surirella angusta</i>	11	1	3	1	4	1	movil	Pennales
<i>Synedra ulna</i>	8	1	3	1	3	1		Pennales
TOTAL	940				522	133	65	

2. MuxNac

Sitio	Mux Nac							
fecha	30/05/2012							
TAXA	organismos	a	s	v	a*v	a*s*v		ORDEN
<i>Achnanthes lanceolata</i>	29	7	5	2	13	65		Pennales
<i>Achnanthes minustissima</i>	17	4	3	1	4	11		Pennales
<i>Achnanthes sp.</i>	13	3	3	1	3	9		Pennales
<i>Cocconeis placentula</i>	8	2	3	2	4	11		Pennales
<i>Eunotia sp.</i>	2	0	1	3	1	1		Pennales
<i>Fragilaria sp.</i>	1	0	2	1	0	0		Pennales
<i>Frustulia sp.</i>	2	0	1	2	1	1	movil	Pennales
<i>Gomphonema clevei</i>	28	6	3	1	6	19		Pennales
<i>Gomphonema olivaceum</i>	2	0	3	1	0	1		Pennales
<i>Gomphonema parvulum</i>	15	3	5	3	10	50		Pennales
<i>Gomphonema sp.</i>	100	22	3	1	22	67		Pennales
<i>Luticula mutica</i>	3	1	5	2	1	7		Pennales
<i>Melosira lineata</i>	2	0	4	2	1	4		Pennales
<i>Navicula arvensis</i>	26	6	4	1	6	23	movil	Pennales
<i>Navicula cryptocephala</i>	5	1	4	1	1	4	movil	Pennales

<i>Navicula cryptotenella</i>	21	5	5	2	9	47	movil	Pennales
<i>Navicula pupula</i>	6	1	4	1	1	5	movil	Pennales
<i>Navicula sp.</i>	23	5	4	1	5	21	movil	Pennales
<i>Navicula subminuscula</i>	24	5	4	1	5	22	movil	Pennales
<i>Nitzschia amphibia</i>	3	1	5	3	2	10	movil	Centrales
<i>Nitzschia dissipata</i>	8	2	5	2	4	18	movil	Centrales
<i>Nitzschia palea</i>	62	14	5	1	14	70	movil	Centrales
<i>Nitzschia sigmoidea</i>	8	2	4	2	4	14	movil	Centrales
<i>Nitzschia sp.</i>	34	8	4	1	8	30	movil	Centrales
<i>Pinnularia sp.</i>	3	1	1	3	2	2	movil	Pennales
<i>Synedra ulna</i>	1	0	3	1	0	1	movil	Pennales
Total	446				128	514	50.67	

3. Muxaforo

Sitio	Mux. Aforo							
fecha	30/05/2012							
TAXA	organismos	a	s	v	a*v	a*s*v		ORDEN
<i>Achnanthes lanceolata</i>	5	3	5	2	6	30		Pennales
<i>Achanthes minutissima</i>	4	2	3	1	2	7.2		Pennales
<i>Cymbella sp.</i>	1	1	2	1	1	1.2		Pennales
<i>Frustulia sp.</i>	2	1	1	2	2	2.4	movil	Pennales
<i>Gomphonema clevei</i>	2	1	3	1	1	3.6		Pennales
<i>Gomphonema parvulum</i>	14	8	5	3	25	127		Pennales
<i>Gomphonema sp. N1</i>	44	27	3	1	27	80		Pennales

<i>Gomphonema sp. N2</i>	11	7	3	1	7	20		Pennales
<i>Gomphonema sp. N3</i>	10	6	3	1	6	18		Pennales
<i>Luticola mutica</i>	2	1	5	2	2	12	movil	Pennales
<i>Melosira lineata</i>	2	1	4	2	2	9.6		
<i>Navicula arvensis</i>	8	5	4	1	5	19	movil	Pennales
<i>Navicula cryptocephala</i>	2	1	4	1	1	4.8	movil	Pennales
<i>Navicula cryptotenella</i>	7	4	5	2	8	42	movil	Pennales
<i>Navicula halophila</i>	4	2	4	1	2	9.6	movil	Pennales
<i>Navicula pupula</i>	8	5	4	1	5	19	movil	Pennales
<i>Navicula sp.</i>	3	2	4	1	2	7.2	movil	Pennales
<i>Navicula subminuscula</i>	3	2	4	1	2	7.2	movil	Pennales
<i>Nitzschia amphibia</i>	4	2	5	3	7	36	movil	Centrales
<i>Nitzschia frustulum</i>	12	7	4	1	7	29	movil	Centrales
<i>Nitzschia palea</i>	7	4	5	1	4	21	movil	Centrales
<i>Nitzschia sigmaidea</i>	3	2	4	2	4	14	movil	Centrales
<i>Nitzschia sp.</i>	4	2	4	1	2	9.6	movil	Centrales
<i>Surirella sp.</i>	2	1	3	1	1	3.6	movil	Pennales
<i>Synedra ulna</i>	2	1	3	1	1	3.6		Pennales
Total	166				134	537	42.77	

ANEXO 8. Resultado de los índices bióticos con que fue evaluado el fitoplancton en dos sitios de muestreo.

Sitio	INDICES								Biomasa individuos/l
	OPI /20	Nygaard 1949 (Diatomeas)	B (NF T 90-354)	(WMS) (Zelinka y Marvan 1961)	IDG	TDI	DQI	% de móviles	
Muxnac Tq	17	3	1.4	4	3	69	31	50	487588
Hpiebomb	17	2	3.4	5	2	97	3	64	2752102

■ Evidencias de contaminación , ■ Contaminado , ■ Muy contaminado ,

ANEXO 9. Resultado de los índices bióticos con que fue evaluado el fitobentos en dos sitios de muestreo.

Sitio	Fecha	INDICES									Umbral de diferencia
		Nygaard 1949 (Diatomeas)	B (NF T 90-354)	IBD/20 (Francia)	IDG	WMS	TDI	DQI	% de móviles		
Muxaforo	30/05/2012	0.2	2.8	4.8	3	4	75.0	25.0	43	< 20%	
Muxnac	30/05/2012	0.3	4.6	13.4	3	4	75.1	24.9	51		
Muxnacarriba	17/04/2012	1.1	5.7	18.6	4	3	50.0	50.0	65		

■ Buenas condiciones ■ Condiciones estables ■ Evidencias de contaminación ,
 ■ Contaminado , ■ Muy contaminado,