

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**Influencia de la franja ribereña en la calidad del agua y percepción local sobre su estado
y manejo en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago Atitlán, Guatemala**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

En Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas

Por

Maynor Oliverio Tut Si

**Turrialba, Costa Rica
2016**

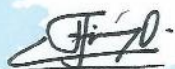
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:



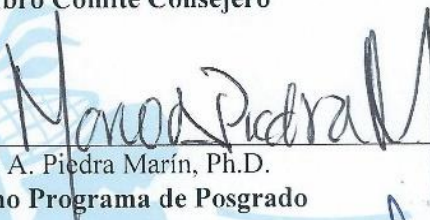
William Watler, M.Sc.
Director de tesis



Francisco Jiménez, Dr.Sc.
Miembro Comité Consejero



Diego Delgado, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mario A. Piedra Marín, Ph.D.
Decano Programa de Posgrado



Maynor Oliverio Tut S
Candidato

DEDICATORIA

A:

Dios: Por sus infinitas bendiciones, por brindarme la sabiduría y fuerzas necesarias para culminar con éxitos mis estudios.

Mi adorable madre: Leona Si Can, por ser mi guía, una madre ejemplar y luchadora que a pesar de tantas adversidades, ha logrado sacarnos adelante.

Mis hermanos: Selvin, Claudia, Irma, Marvin, Breny y Willy, por el apoyo que siempre me han mostrado y los consejos que me han brindado, por estar conmigo en los buenos y malos momentos.

Mis sobrinos: Kilder, Douglas, Omar, Robin y Harry.

La memoria de mi querido padre: Ernesto Tut Xol (QEPD). Papá, donde quiera que estés, te dedico este nuevo triunfo. Así mismo, a la memoria de mi abuela Tomasa Tut Xol y abuelo Zacarías Si, quienes partieron a un mejor lugar.

AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento al programa de becas “Henry A. Wallace Legacy Scholar” y al Departamento de Agricultura de Estados Unidos por el apoyo económico brindado durante los 2 años de la maestría.

A todos los profesores y personal administrativo de la Escuela de Posgrado de CATIE y el personal de la biblioteca Orton, por todos los conocimientos transmitidos y el apoyo en estos dos años.

Al Departamento de Investigación y Calidad Ambiental de la Autoridad de Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y Su Entorno (AMSCLAE) por el apoyo incondicional en la fase de campo de mi investigación.

Agradezco a las autoridades indígenas de las comunidades de Sololá, Santa Lucía Utatlán y Totonicapán por el apoyo y acompañamiento en campo.

Al director de tesis, MSc. William Watler, por su apoyo y por guiarme en la elaboración de esta tesis y sobre todo por su amistad y confianza. Asimismo, al Dr. Francisco Jiménez y al MSc. Diego Delgado por su acompañamiento en toda la fase de la tesis y apoyo en la revisión del documento.

A la comunidad guatemalteca del CATIE, muchas gracias por compartir momentos únicos en este centro de estudio.

A los compañeros y compañeras de la promoción 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017, por la oportunidad de compartir e intercambiar experiencias, conocer nuevas culturas y formar nuevas amistades.

A mis compañeros y compañeras de las maestrías de Cuencas y Agroforestería por compartir las aulas del saber. Gracias por su amistad y compañerismo.

Agradezco igualmente al personal de la unidad de bioestadística, especialmente a Sergio Vílchez, por su apoyo incondicional en el tema de estadística.

A mis compañeros deportistas, especialmente al equipo de fútbol del CATIE y al equipo de fútbol de la promoción 2015-2016. Muchas gracias por compartir momentos emocionantes, los cuales hicieron que mi estancia en CATIE fuera única e incomparable.

BIOGRAFÍA

El autor nació en la aldea Chamil, municipio de San Juan Chamelco, departamento de Alta Verapaz, Guatemala el 01 de abril de 1984, siendo el 4to de siete hijos de Ernesto Tut Xol (QEPD) y Leona Si Can. Se graduó de Ingeniero Forestal en la Universidad Rafael Landívar de Guatemala, en 2014. Ingresó a la Maestría en Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas del CATIE en el año 2015, culminando también todos los cursos de la Maestría en Agroforestería y Agricultura Sostenible. Asimismo, en el año 2005 realizó estudios universitarios en Recursos Naturales en Mount Hood Community College, Oregon, EEUU. Durante el período 2003-2005 participó como becario del programa CASS (Cooperative Asociation Scholarship for State) patrocinado por USAID y administrado por la Universidad de Georgetown, USA. Se graduó como maestro de educación primaria en el Instituto Normal Mixto del Norte “Emilio Rosales Ponce” siendo nominado como “Alumno Distinguido” de la promoción 2003. Ha laborado en organizaciones internacionales en el tema de gobernanza, incidencia política y gestión del riesgo a desastres y ha participado como voluntario y practicante en entidades como Servicio Forestal de Estados Unidos y el Parque Nacional Mount Hood, Oregon, USA.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA	V
CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE CUADROS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	X
RESUMEN GENERAL.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
CAPÍTULO I	15
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Objetivos del estudio	16
1.1.1. Objetivo general.....	16
1.1.2. Objetivos específicos	16
1.2. Preguntas de investigación.....	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
2.1. La franja ribereña.....	17
2.1.1. Funciones de la franja ribereña.....	17
2.1.2. Características de las franjas ribereñas	18
2.2. Delimitación y codificación de cuencas según la metodología Pfafstetter.....	19
2.3. Calidad del agua.....	20
2.3.1. Índice de Calidad del Agua (ICA)	20
2.4. Paisaje	23
2.4.1. Características de un paisaje	24
2.4.2. Análisis de paisaje	24
2.4.3. Métricas de paisajes y su relación con calidad del agua.....	25
2.5. Percepción local del ambiente	25
3. RESULTADOS PRINCIPALES	26
4. CONCLUSIONES	28
5. RECOMENDACIONES	30
6. LITERATURA CITADA	31
CAPÍTULO II	35
ARTÍCULO 1: INFLUENCIA DE LA FRANJA RIBEREÑA Y PAISAJES ADYACENTES EN LA CALIDAD DEL AGUA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO QUISCAB, CUENCA DEL LAGO ATITLÁN, GUATEMALA	35
1. INTRODUCCIÓN	36
2. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	37
2.1. Descripción del área de estudio	37
2.2. Análisis de la calidad del agua.....	38
2.3. Caracterización de la composición del paisaje	39
2.4. Análisis de la información	42

2.4.1. Índice de calidad de agua (ICA)	42
2.4.2. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.....	43
2.4.3. Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua	44
3. RESULTADOS.....	46
3.1. Índice de calidad del agua (ICA)	46
3.2. Análisis de varianza cuencas Pfafstetter y época de muestreo	47
3.3. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que influyen en índice de la calidad del agua.....	48
3.4. Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua ...	50
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
4.1. Índice de calidad del agua.....	53
4.2. Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua ...	56
5. CONCLUSIONES	59
6. LITERATURA CITADA	60
CAPÍTULO III.....	66
ARTÍCULO 2: PERCEPCIÓN DE LOS AGRICULTORES SOBRE EL ESTADO Y MANEJO DE LAS FRANJAS RIBEREÑAS Y SU RELACIÓN CON LA CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO QUISCAB, CUENCA DEL LAGO ATITLÁN, GUATEMALA	66
RESUMEN	66
1. INTRODUCCIÓN	66
2. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	68
2.1. Ubicación del área de estudio	68
2.2. Selección de la población y área de muestreo	68
2.3. Entrevistas para la recolección de información	69
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
4. RESULTADOS.....	71
4.1. Características de la población entrevistada	71
4.2. Descripción de las actividades y productos agrícolas.....	71
4.3. Usos y cobertura de la franja ribereña	75
4.4. Percepciones acerca de la contaminación	77
4.5. Percepción local del impacto de la cobertura forestal de la franja ribereña en la calidad del agua.....	79
5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
6. CONCLUSIONES	83
7. LITERATURA CITADA	85
8. ANEXO.....	88

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Pesos relativos para cada parámetro del “ICA”	21
Cuadro 2.	Ventajas y limitaciones del ICA como herramienta de evaluación de la calidad del agua	22
Cuadro 3.	Clasificación de los usos y cobertura de la tierra	40
Cuadro 4.	Caracterización de la composición del paisaje de las unidades hidrográficas y franjas ribereñas.....	40
Cuadro 5.	Variable de distancias de los usos y cobertura de la tierra más cercana con respecto a los puntos de muestreo de agua	41
Cuadro 6.	Clasificación de la calidad de agua propuesta por Brown	42
Cuadro 7.	Variables explicativas de la calidad del agua utilizadas en los modelos de regresión	44
Cuadro 8.	Calidad del agua de todos los sitios de muestreo	46
Cuadro 9.	Calidad del agua de todos los puntos de muestreo a nivel de unidades hidrográficas	47
Cuadro 10.	Comparación de medias del ICA por nivel y tipo de cuencas Pfafstetter	47
Cuadro 11.	Comparaciones de medias del ICA por época de muestreo	48
Cuadro 12.	Coefficientes de determinación, para cada modelo de regresión múltiple entre los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con las épocas de muestreo	48
Cuadro 13.	Variables que explican la calidad del agua a nivel franjas ribereñas hidrográficas	50
Cuadro 14.	Valores de componentes principales de la franja ribereña	51
Cuadro 15.	Variables que explican la calidad del agua a nivel de unidades hidrográficas	52
Cuadro 16.	Valores de componentes principales de las unidades hidrográficas	53
Cuadro 17.	Estratificación de los municipios para entrevistas	69
Cuadro 18.	Estructura de la entrevista semiestructurada.....	70
Cuadro 19.	Tabla de contingencia de los estratos versus tipo de cultivo de la población entrevistada	72
Cuadro 20.	Asistencia técnica en el manejo y utilización de agroquímicos	73
Cuadro 21.	Principales razones de los usos agrícolas en la franja ribereña	76
Cuadro 22.	Clasificación de la calidad de agua propuesta por Brown	79
Cuadro 23.	Importancia de la cobertura forestal en la franja ribereña	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Las divisiones de las unidades hidrográficas según método Pfafstetter.....	20
Figura 2.	Ubicación de la subcuenca del río Quiscab y unidades hidrográficas (cuencas e intercuenas, método Pfafstetter) de estudio.....	37
Figura 3.	Croquis de los puntos de muestreo, franja ribereña, uso de la tierra en las unidades hidrográficas (a) y distancias entre puntos de muestreo y uso de la tierra adyacente (b).....	42
Figura 4.	ICA de los puntos de muestreo de la época seca y lluviosa.....	46
Figura 5.	Calidad del agua por unidades hidrográficas en época seca y lluviosa.....	47
Figura 6.	Gráficos de residuos parciales de los parámetros que explican la calidad del agua en época lluviosa. RPAR_ICA = Residuos parciales del índice de calidad del agua.....	49
Figura 7.	Gráficos de residuos parciales de los parámetros que explican la calidad del agua en época seca.....	50
Figura 8.	Ordenación jerárquica de las variables importantes que explican la calidad del agua a nivel de la franja ribereña.....	51
Figura 9.	Estadístico Z de las variables explicativas en la calidad del agua a nivel de la franja ribereña.....	51
Figura 10.	Ordenación de las variables que explican la calidad del agua en la franja ribereña.....	51
Figura 11.	Ordenación jerárquica de las variables importantes que explican la calidad del agua a nivel de las unidades hidrográficas.....	52
Figura 12.	Estadístico Z de las variables explicativas en la calidad del agua a nivel las unidades hidrográficas.....	52
Figura 13.	Ordenación de las variables que explican la calidad del agua en las unidades hidrográficas.....	53
Figura 14.	Uso y cobertura de la tierra en la subcuenca del río Quiscab.....	68
Figura 15.	Características generales de la población entrevistada.....	71
Figura 16.	Fertilizantes utilizados por los productores.....	72
Figura 17.	Entidades que brindaron asistencia técnica a productores.....	74
Figura 18.	Tipos de práctica de conservación de suelos implementada por los entrevistados.....	74
Figura 19.	Ordenación de las prácticas de conservación de suelo y su ubicación geográfica en una gráfica de análisis de correspondencia.....	75
Figura 20.	Percepción acerca del uso y cobertura actual de la franja ribereña.....	75
Figura 21.	Percepción acerca del uso y cobertura de la franja ribereña en los próximos 10 años.....	76
Figura 22.	Percepción local acerca de las principales causas de la deforestación en la franja ribereña.....	77
Figura 23.	Evidencia de las fuentes de contaminación en el río Quiscab.....	78
Figura 24.	Percepción acerca de las fuentes de contaminación del agua.....	78
Figura 25.	Calidad del agua en las franjas ribereñas con cobertura forestal según la percepción local.....	80
Figura 26.	Percepción local acerca del rol de los bosques ribereños en la calidad del agua.....	80

LISTA DE ACRÓNIMOS

AMSCLAE	Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno
APHA	American Public Health Association
BMWP	Biological Monitoring Working Party
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas
CONAP	Consejo Nacional de Áreas Protegidas de Guatemala
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DE	Desviación Estándar
FAO	Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura
FRAGSTAT	Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps
GIMBOT	Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
ICA	Índice de Calidad de Agua
NFS	United States National Sanitation Foundation
ECM (IncMSE)	Error cuadrático medio
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala
MED	Modelo de Elevación Digital
OD	Oxígeno Disuelto
TDS	Sólidos Totales Disueltos
ULA	Unidos por el Lago de Atitlán
UNEP	United Nations Environment Programme
UTM	Universal Transverse Mercator
WHO	World Health Organization
WRC	Water Research Center
WQI	Water Quality Index

RESUMEN GENERAL

La franja ribereña desempeña un papel importante en la conservación de la calidad del agua. A pesar de ello, es una de las zonas de las cuencas hidrográficas más vulnerables y degradadas debido a las actividades antropogénicas. Dada a su importancia se realizó el presente estudio, el cual tiene como objetivo evaluar la influencia de la franja ribereña en la calidad del agua y analizar la percepción local sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua; estudio realizado en la cuenca del río Quiscab, cuenca del Lago Atitlán, Guatemala. Se seleccionaron 24 ríos de orden 1 y 2, y se establecieron 55 puntos de muestreo de agua (2 a 3 puntos por cada río) en dos épocas: seca y lluviosa. Se determinó la calidad del agua utilizando el ICA de la Fundación de Sanidad Nacional de Estados Unidos y se analizaron los siguientes parámetros: pH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, temperatura, nitratos, fosfatos, demanda bioquímica de oxígeno, turbidez y *Escherichia coli* (*E. coli*). Para determinar la influencia de la franja ribereña en la calidad del agua, se definieron 2 escalas de intervención: unidades hidrográficas y franjas ribereñas de 20 metros; en ambas escalas de intervención se evaluaron las siguientes variables: 1) porcentaje de uso de la tierra; 2) distancia más cercana entre los puntos de muestreo y los usos del suelo adyacentes a la franja ribereña y 3) mediciones de paisaje (índice de Shannon y densidad de riqueza de parches). La percepción local fue recopilada mediante entrevistas semiestructuradas, aplicadas a un total de 77 agricultores; la información se estructuró en cuatro temas principales: 1) caracterización de las actividades y prácticas agrícolas, 2) uso actual de la tierra en la franja ribereña, 3) situación actual de la contaminación del agua y 4) rol del bosque ribereño en la calidad del agua.

El análisis de la calidad del agua por época se realizó por medio de un análisis de varianza y comparación de medias de LSD de Fisher ($p < 0.05$) y los parámetros fisicoquímicos que influyen en el ICA se determinaron mediante un análisis de regresión múltiple. La influencia de la franja ribereña y unidades hidrográficas en la calidad del agua se determinó a través de árboles de regresiones, utilizando el algoritmo de randomForest. Por último, la percepción local se analizó con estadística descriptiva utilizando tablas de frecuencias, tablas de contingencia y análisis de correspondencias.

El resultado del estudio evidencia que la calidad del agua tiene un efecto temporal ($p < 0.0001$), es la época seca ($M=69.65$, $EE=0.94$) la que presenta mejor calidad en comparación con la época lluviosa ($M=63.42$, $EE=0.92$). Los parámetros que más influyeron en el ICA ($p < 0.05$) en época seca fueron: *E. coli*, DBO5, temperatura, TDS, OD; mientras que en época lluviosa, los parámetros que explicaron el ICA ($p < 0.05$) fueron: *E. coli*, turbidez, fosfato y DBO5; el parámetro que más influyó en la mala calidad del agua en ambas épocas de muestreo fue el *E. coli* (seca: $\beta_1 = -3.27$ y $CpMallows = 351.30$; lluviosa: $\beta_1 = -3.66$ y $CpMallows = 269.34$). La variable más importante de la franja ribereña que influyó en el ICA fue el porcentaje de poblado

(%ECM=15.5; $p < 0.0001$), el efecto fue negativo, a mayor porcentaje de la franja ribereña ocupado por zonas pobladas, la calidad del agua disminuye. En cambio, las variables de los paisajes adyacentes más influyentes en el ICA fueron: distancia del bosque (%ECM=13.2; $p < 0.0001$) y distancia de arbustos (%ECM=12.6; $p < 0.0001$), el efecto fue negativo, a mayor distancia de los bosques y arbustos adyacentes a la franja ribereña, la calidad del agua disminuye. A nivel de las unidades hidrográficas, la variable más importante que influyó en el ICA fue la diversidad de uso del suelo (%ECM=10.1; $p < 0.0001$), a mayor diversidad de uso, la calidad disminuye; además, las siguientes variables influyeron significativamente en el ICA: distancia del bosque, distancia de arbustos, distancia de poblado y las coordenadas UTM “X” El efecto de la distancia del poblado fue positivo, mientras más alejados estén los poblados de los ríos, la calidad del agua tiende a ser mejor. La época de muestreo de agua tuvo un efecto, tanto a nivel de franja ribereña así como a nivel de unidades hidrográficas.

Según la percepción local, la franja ribereña está ocupada por el uso agrícola y bosques principalmente. La actividad agrícola en el área de estudio se caracteriza por el uso de tecnología convencional. El 100% de la población utiliza fertilizante químico y únicamente el 9% utiliza fertilizantes orgánicos; únicamente el 23% ha recibido alguna asistencia técnica para el manejo y aplicación de agroquímicos. Las casas comerciales que distribuyen los agroquímicos son las entidades que más fortalecen las capacidades técnicas de los agricultores, mientras que la intervención gubernamental es muy limitada. La percepción acerca de los usos de la tierra en la franja ribereña se distribuyó de la siguiente manera: 50% áreas agrícolas, 38% bosque, 8% construcción y 4% pastizales. El 100% de los entrevistados opinó que los bosques tienen un papel relevante para la conservación de la calidad del agua; el 45% de los agricultores considera que la calidad del agua donde hay bosque ribereño es muy buena, 21% buena, 7% regular, 12% mala, 3% muy mala y 6% no respondieron; la percepción acerca de la calidad del agua se asignó según el consumo por parte de las familias y el nivel de contaminación. El 61% de los agricultores indicó que los desechos sólidos constituyen la principal fuente de contaminación del agua, 32% mencionó las actividades agrícolas y 47% las aguas residuales.

Palabras claves: calidad del agua, franja ribereña, usos y cobertura de la tierra, percepción local.

ABSTRACT

The riparian zone plays an important role in water quality conservation. In spite of this, it is one of the most vulnerable and degraded area within a watershed due to anthropogenic activities. The importance of riparian zone motivated this research, which aims to evaluate its influence of on the water quality and to analyze the local perception about the status and management of riparian areas and their relationship with the water quality. This study was conducted in the sub-basin of Quiscab river, Basin of Atitlán Lake. 24 rivers of 1 and 2 orders were selected, and 55 water sampling points (2 to 3 points per river) were established in two seasons: dry (March) and rainy (June). The Water Quality Index of the National Foundation Sanitation was used to determine the water quality and the following parameters were analyzed: pH, Oxygen Dissolved, Total Dissolved Solids, Temperature, Nitrate, Phosphate, Biochemical Oxygen Demand, turbidity and *Escherichia coli* (*E. coli*). To determine the influence of riparian area on water quality, two spatial scales were defined: 20 meters riparian buffer zone and the whole watershed; in both levels, the following variables were assessed: 1) land use/land cover percentage, 2) the nearest distance between the water point sampling and the adjacent land use; 3) landscape metrics (Shannon Diversity Index and Patch Richness Diversity). The local perception about the status and management of the riparian zone and its relationship of water quality was obtained using semi-structured interviews; 77 farmers were interviewed and the interview was classified in 4 principal topics: 1) Agricultural practice and activities characterization, 2) Current land use in the riparian zone, 3) Current status of water pollution and 4) role of riparian forest on water quality

Analysis of Variance and Fisher's LSD test ($p < 0.05$) were performed to compare the seasonal effect on water quality. Stepwise multiple regression analysis was used to identify the parameters that have significant effect on the WQI; while the influence of riparian zone and the whole watershed on water quality was determined using randomForest algorithm. Finally, local perception was analyzed using descriptive statistics, frequency tables, contingency tables and correspondence analysis.

The results of the study show that water quality has a temporary effect ($p < 0.0001$), with dry season ($M = 69.65$, $EE = 0.94$) being the best quality compared to the rainy season ($M = 63.42$, $SE = 0.92$). The parameters that most influenced Water Quality Index - WQI- ($p < 0.05$) in the dry season were: *E. coli*, biochemical oxygen demand, temperature, total dissolved solids and dissolved oxygen; whereas in the rainy season, the parameters that explained the WQI ($p < 0.05$) were: *E. coli*, turbidity, phosphate and biochemical oxygen demand. The parameter that most influenced bad water quality in both sampling water periods was *E. coli* (dry: $\beta_1 = -3.27$ and $CpMallows = 351.30$; rainy: $\beta_1 = -3.66$ and $CpMallows = 269.34$). The most important variable of the riparian zone that influenced WQI was the percentage of urban area (% ECM = 15.5, $p < 0.0001$), the effect was negative, the higher the percentage of the riparian zone occupied by urban

areas the water quality decreases. Adjacent landscape variables that explained the WQI were: forest distance (% ECM = 13.2, $p < 0.0001$) and shrub distance (% ECM = 12.6; $p < 0.0001$), the effect was negative, the greater distance between forests and shrubs adjacent to the riparian zone, the water quality decreases. At watershed level, the most important variable that influenced the WQI was the diversity of land use (% ECM = 10.1; $p < 0.0001$), the greater diversity of land use, the quality of water decreases. In addition, the following variables had significant influence on the WQI: forest distance, shrub distance, urban distance and "X" UTM coordinates. The effect of urban distance was positive, which means, the further away the urban area is located from the river, the quality of water tends to be better. The seasonal period of water sampling had a significant effect, at both the riparian zone as well as at watershed level.

According to local perception, the riparian zone is occupied mainly by agricultural use and forests. Agricultural activity in the study area is characterized by the use of conventional technology. 100% of the population uses chemical fertilizer and only 9% use organic fertilizers; only 23% have received some technical assistance for the management and application of chemical fertilizer; Agrochemical companies have worked on farmers' technical capacities, while government intervention is very limited. The perception of land uses in the riparian zone was distributed as follows: 50% agricultural areas, 38% forest, 8% urbanization and 4% grassland. 100% of the interviewers indicated that forests play a relevant role in water quality conservation; 45% of the farmers consider that the quality of the water where there is riparian forest is very good, 21% good, 7% regular, 12% bad, 3% very bad and 6% did not respond; the perception about the water quality was given according to the consumption by the families and the level of water contamination. 61% of farmers indicated that solid waste is the main source of water pollution, 32% mentioned agricultural activities and 47% of wastewater.

Key words: water quality, riparian zone, land use and land cover, local perception.

CAPÍTULO I

1. Introducción

La franja ribereña es un área de transición entre el ecosistema acuático y terrestre, constituye una zona crítica para la protección de los cuerpos de agua. Es un área importante dado que cumple funciones ecológicas e hidrológicas importantes (Belt *et al.* 1992; Wenger y Fowler 2000; Gayoso y Gayoso 2003), siendo una de ellas el amortiguamiento de los ingresos de contaminantes a las fuentes de agua producto de los usos de los suelos adyacentes (Palone y Todd 1997). A pesar de su importancia en la protección del agua, la franja ribereña es una de las zonas del paisaje más degradadas a nivel de cuenca (Basnyat *et al.* 2000; Richardson *et al.* 2007; Fernandes *et al.* 2014). El cambio de uso del suelo, el uso excesivo de agroquímicos en las actividades agrícolas y las descargas de aguas residuales son algunos de los factores que han contribuido a la degradación de la calidad del agua (Basnyat *et al.* 2000). La efectividad de las franjas ribereñas, como sistemas protectoras de las fuentes de agua, depende mucho de sus características, especialmente de su composición y configuración, debido a que su forma, tamaño, longitud, distribución en el paisaje, influyen en su funcionamiento (Fischer y Fischenich 2000; Gergel *et al.* 2002). Además, la configuración y composición de los paisajes adyacentes contribuyen a la calidad del agua, por lo que el análisis del paisaje tanto a nivel de la franja ribereña así como a nivel de cuencas es fundamental, para conocer el nivel de fragmentación (Mcintyre y Hobbs 1999) ya que las perturbaciones en el paisaje son indicadores relacionados a la calidad del agua.

En Guatemala, la mayoría de los cuerpos de agua están contaminados. Según el IARNA (2012), durante las últimas décadas ha aumentado la contaminación por fertilizantes y pesticidas, y por vertidos de productos químicos. La misma fuente revela que 14 de los 38 ríos principales y 4 de los lagos más importantes en el país están contaminados. Uno de estos lagos es el de Atitlán, el más grande del país en términos de volumen¹ (AMSCLAE 2011) y por su belleza escénica es uno de los sitios turísticos más importantes del país. Actualmente, el lago presenta una elevada acumulación de nitrato y fosfato, y de nutrientes provenientes de las actividades antropogénicas de la cuenca (IARNA 2015); se calcula que en un año ingresa al lago aproximadamente 170 toneladas de nitrógeno y 27 toneladas de fósforo (ULA 2014). Además de las actividades agrícolas, la presencia de poblado en la cuenca es otro de los factores que ha influido en la contaminación de los ríos y por ende del lago Atitlán (Reyes 2012; ULA 2014), debido a la descarga de aguas residuales producto de las prácticas e infraestructuras inadecuadas.

Para contrarrestar la contaminación de los ríos y del lago Atitlán, diversas organizaciones implementan acciones y estrategias, dentro de las cuales se puede mencionar: la creación de la fórmula de fertilizante especial con contenido bajo de fósforo denominada 20-03-17 (NPK) (AMSCLAE 2014), reducción de uso de bolsas plásticas y derivados (Acuerdo Municipal 2016),

¹ El lago Atitlan tiene un volumen de agua almacenada de 24.4 km³, área de espejo de agua de 130 km² y profundidad máxima de 324 metros (AMSCLAE 2011).

y recolección y reciclaje de residuos sólidos, entre otras. A futuro, se ha planteado un trasvase para el tratamiento de aguas residuales fuera de la cuenca a través de la construcción de un megacolector (AMSCLAE 2015).

Sin duda, estas acciones son plausibles y representan un avance importante para la preservación y protección de los cuerpos agua de la cuenca del Lago Atitlán. Sin embargo, es necesaria la implementación de otras acciones, tal es el caso de la protección de los ríos, ya que constituyen el medio principal por el cual ingresan los contaminantes al lago. Lo anterior ha motivado la realización del presente estudio con el propósito de evaluar el efecto de los usos y cobertura de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua de la red hídrica de la cuenca del río Quiscab. Cabe resaltar que el río Quiscab es el tributario de mayor drenaje superficial del Lago Atitlán, ocupa el 37% del área total de la cuenca del lago (ULA 2014) y, por ende, el más influyente en las condiciones actuales del lago (Reyes 2012; ULA 2014).

Además, se realizó un análisis de percepción local. El propósito fue conocer, desde el punto de vista de la población, cómo es actualmente el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua. Se identificaron las prácticas agrícolas, incluyendo tipos de cultivos, utilización de agroquímicos, conservación de suelos y fuentes de contaminación del agua, entre otras acciones. Asimismo, se conoció la percepción acerca del rol que juegan los bosques ribereños en la calidad del agua. En el estudio de las percepciones participaron agricultores dedicados al cultivo de granos básicos y hortalizas, la información fue recabada por medio de una entrevista semiestructurada. Se espera contribuir con información primaria para buscar estrategias de involucramiento de la población local en la conservación de los recursos naturales, tanto a nivel de franja ribereña así como a nivel de cuencas, ya que son ellos los que toman la decisión final acerca del manejo de los recursos naturales.

1.1. Objetivos del estudio

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la franja ribereña en la calidad del agua y la percepción local acerca de su estado y manejo en la cuenca del río Quiscab, cuenca del Lago Atitlán, Guatemala.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la calidad del agua en la red hídrica de la subcuenca del río Quiscab, utilizando parámetros físicos y químicos como indicadores de las características del agua.
- Evaluar el efecto de la composición del paisaje de la franja ribereña y de las unidades hidrográficas en la calidad del agua del río Quiscab.

- Analizar la percepción local sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua de la población de la cuenca del río Quiscab, cuenca del Lago Atitlán.

1.2. Preguntas de investigación

- ¿Cuáles son los parámetros que influyen en la calidad del agua en el río Quiscab?
¿Cuáles son los factores que afectan la calidad del agua en el río Quiscab?
- ¿Cómo afecta la composición del paisaje (usos de la tierra) de la franja ribereña y las unidades hidrográficas en la calidad del agua del río Quiscab?
- ¿Cuál es la percepción de la población local sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua en la cuenca del río Quiscab?

2. Revisión de literatura

2.1. La franja ribereña

La franja ribereña es una zona de transición importante entre los ecosistemas acuáticos y terrestres y sirve como una conexión entre los ecosistemas de bajura y tierras altas (Franklin 1992; Gregory *et al.* 1991; Swanson *et al.* 1992). Generalmente son elementos lineales que toman diferentes anchuras con alta proporción de área en el borde del río, pero que ocupan pequeños espacios dentro del paisaje (Phillips *et al.* 2000).

Es un área crítica dentro del paisaje puesto que tiene funciones ecológicas e hidrológicas importantes que influyen en la dinámica del ecosistema. Pueden contener una rica diversidad de plantas y animales, que ayudan a mantener la calidad del agua y preservar hábitat tanto terrestres como acuáticos (Phillips *et al.* 2000). Son áreas del paisaje con un alto valor económico y ecológico (Palone y Todd 1997).

2.1.1. Funciones de la franja ribereña

El diseño apropiado de las franjas ribereñas puede contribuir significativamente al mantenimiento del hábitat acuático y ribereño, y al control de la contaminación. Estas franjas cumplen un amplio rango de funciones, entre ellas se puede mencionar (Belt *et al.* 1992; Wenger y Fowler 2000; Gayoso y Gayoso 2003):

- Ayudan a mantener la integridad hidrológica, hidráulica y ecológica del canal del cauce, el suelo y vegetación asociada.
- Reducen la erosión al dar estabilidad a las orillas del cauce.
- Regulan las crecidas.

- Mantienen un flujo base en el cauce.
- Mantienen buena calidad del agua.
- Ayudan a proteger plantas y animales acuáticos y ribereños de las fuentes de contaminación de las tierras altas, atrapando o filtrando sedimentos, nutrientes y químicos desde actividades forestales y agropecuarias.
- Interceptan y atrapan sedimentos aportados por la escorrentía.
- Atrapan o quitan fósforo, nitrógeno y otros nutrientes que pueden causar eutroficación de los ecosistemas acuáticos.
- Atrapan o remueven otros contaminantes, tales como; los pesticidas y otros químicos.
- Protegen peces y vida silvestre proveyendo alimento, abrigo y protección térmica.
- Mantienen hábitat para peces y otros organismos acuáticos al moderar los cambios de temperatura en el agua a través de la sombra.
- Proveen hábitat (alimento y refugio) para organismos anfibios y terrestres.

2.1.2. Características de las franjas ribereñas

El buen funcionamiento de la franja ribereña como fuente de protección del agua depende mucho de las características, especialmente su composición y configuración, debido a que su forma, tamaño, longitud, distribución y proporción en el paisaje, influyen en su funcionamiento y son indicadores claves relacionados a la calidad del agua (Fischer y Fischenich 2000; Gergel *et al.* 2002).

En el caso particular del ancho, varía dependiendo de factores tales como la hidrología local, vegetación, tipo de suelo, pendiente y tipo de ríos, entre otras variables (Wenger 1999). En general, se ha establecido un amplio rango de anchuras, que varían desde 5 a 100 metros, dependiendo de los objetivos para su establecimiento (Wenger 1999, Fischer y Fischenich 2000). Sin embargo, se han realizado estudios específicos con respecto a la composición y tamaño de las franjas, por ejemplo, Woodar y Rock (1995) citado por Fischer y Fischenich (2000) indican que una franja de un ancho de 15 m compuesta de bosque fue efectiva para reducir concentraciones de fósforo provenientes de hogares aledaños, una anchura > 9 metros. con vegetación ribereña de tipo herbácea elimina hasta un 85% de sedimentos con pendientes entre 7 y 12% (Madison *et al.* 1992), mientras que con la misma anchura de bosque se elimina en promedio un 84% de los sólidos en suspensión, 79% de fosfatos y 73% de nitrógeno (Dillaha *et al.* 1989). En general, los autores coinciden que las plantas riparias actúan como sumideros, absorbiendo y guardando exceso de agua, nutrientes, y contaminantes que de alguna forma podría descargarse en los ríos, reduciendo la calidad del agua (Wenger 1999; Fischer y Fischenich 2000; Hawes y Smith 2005).

Para el tema de la protección de la calidad del agua, se recomienda una anchura que varía de 5 a 30 metros, dependiendo del tipo de vegetación y la pendiente (Jontos 2004). Según Jontos (2004), en pendientes de moderadas a altas la mayoría de los filtros ocurre dentro de los primeros 10 metros, pero anchos más grandes para pendientes muy altas son necesarios con vegetación

arbustiva o árboles, donde el suelo tiene baja permeabilidad o donde descargas de fuentes de contaminación no puntal son altos.

Aunque la anchura es vital, especial atención requiere el establecimiento de franjas de protección con vegetación continua debido a que pequeños claros permiten canalizar la escorrentía a los cursos de agua (Hawes y Smith 2005). Desde el punto de vista de la conservación del agua, es esencial proteger todos los tributarios, principalmente ríos pequeños (orden 1, 2 y 3), dado a que tiene una influencia positiva en la calidad del agua más que franjas más grandes en ríos grandes que ya llevan aguas contaminadas (Hawes y Smith 2005).

La franja ribereña tiene diferentes características, dependiendo de la zona donde se ubica, en relación con el curso principal del río; al respecto el servicio forestal de Estados Unidos las clasifica en tres zonas (Palone y Todd 1997): la primera es una zona estrecha de 5 metros, se ubica cerca a la orilla de río que a menudo incluye una mezcla de árboles nativos, arbustos, dicotiledóneas que se adaptan a las llanuras de inundación hidrológica; la principal función de esta zona es estabilizar las orillas del río y proporcionar desechos de maderas para hábitats acuáticos. La segunda es una zona que consta de 18 metros, ubicado en una zona adyacente a la zona 1; en esta zona existen árboles de rápido crecimiento y arbustos que pueden tolerar inundaciones periódicas, su principal función es la calidad del agua, absorbiendo y almacenando los nutrientes. La tercera es una zona adyacente a campos de cultivo o tierras con pastos que proporcionan una alta infiltración, filtración de sedimentos, absorción de nutrientes y pueden ayudar a dispersar la concentración de la escorrentía. Los pastos nativos y arbustos como flora silvestre, son normalmente preferidos por sus múltiples beneficios y adaptabilidad.

2.2. Delimitación y codificación de cuencas según la metodología Pfafstetter

Las unidades hidrográficas son un concepto asociado a la metodología Pfafstetter para la delimitación de cuencas, y se refieren a los espacios geográficos limitados por líneas divisorias de aguas relacionados espacialmente por sus códigos, donde el tamaño de sus áreas de drenaje es el único criterio de organización jerárquica. La metodología Pfafstetter fue creada en Brasil por Otto Pfafstetter en 1989 y adoptada como estándar internacional en 1997 por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Aguirre *et al.* 2003). En América del Sur se ha utilizado para la delimitación de cuencas hidrográficas (Ruiz y Torres 2008). En el caso de Guatemala, se generaron mapas de cuencas hidrográficas a escala 1:50000, utilizando la metodología Pfafstetter (MAGA 2009).

El sistema Pfafstetter se basa en la delimitación de cuencas en orden de jerarquía, considerando el área de la superficie y formas de la misma. Consiste en identificar al interior de la cuenca a lo largo del río principal, los cuatro tributarios con mayor volumen que contribuyan con flujo hídrico y descarguen directamente hacia el curso principal del río. Las características principales de la metodología son las siguientes: *a)* asigna códigos a las unidades de drenaje, con base en la topología de la superficie del terreno; *b)* provee una única identificación a cada

unidad hidrográfica, con base en su ubicación dentro del sistema total de drenaje que ocupa; *c*) es hidrológicamente ordenado; *d*) economía de dígitos cuyas cantidades dependen del nivel en que se encuentra la unidad; *e*) el sistema es jerárquico y las unidades hidrográficas son delimitadas desde las uniones de los ríos (confluencias).

Las unidades de drenaje son divididas en tres tipos (figura 1): cuenca, es un área que no recibe drenaje de ninguna otra área; intercuenca, es un área que recibe de otras unidades aguas arriba; cuenca interna o cerrada, es un área de drenaje que no contribuye con flujo a otra unidad o cuerpo de agua, tales como un océano o lago.

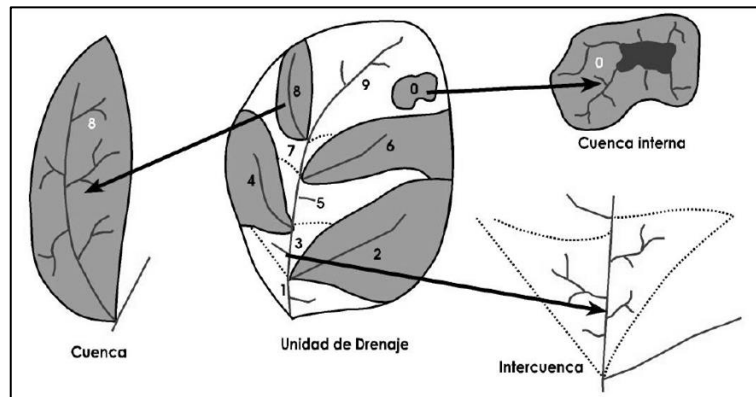


Figura 1. Las divisiones de las unidades hidrográficas según método Pfafstetter

La aplicación del método Pfafstetter utilizando la herramienta ArcGis 10.2 incluye cuatro pasos, que son los siguientes: 1) generación de las áreas de drenaje (umbral de acumulación), 2) generación de la red de drenaje relevante, 3) generación de las unidades hidrográficas o watersheds, y 4) codificación de las unidades hidrográficas o watersheds.

2.3. Calidad del agua

La calidad es la condición que tiene el agua para ser consumida o usada, dependiendo el tipo de usuarios, por lo que los parámetros varían de acuerdo con los requerimientos de estos usuarios; por ejemplo, para el consumo humano existen estándares y parámetros para definir un agua apta y generalmente son establecidos por los sistemas de salud, tomando en cuenta que muchas enfermedades están relacionadas con la calidad del agua (WHO 2006). Para la vida acuática, también existen parámetros dependiendo de las especies (Wilhm y Dorris 1968). De igual forma para la agricultura también existen otros estándares (Ayers y Westcot 1985).

2.3.1. Índice de Calidad del Agua (ICA)

Para determinar la calidad del agua se han desarrollado diversos índices (ICA) de acuerdo con parámetros y estándares establecidos (Brown *et al.* 1970; Landwehr y Deininger 1976; Cude 2001). El ICA indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un ICA

cercano o igual a cero por ciento, en tanto que en el agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100% (Bonilla *et al.* 2010).

Uno de los índices más empleados fue desarrollado por la National Sanitation Foundation (NSF) de Estados Unidos en la década de los años 70 (Brown *et al.* 1970), creado como un método estandarizado para comparar la calidad del agua de diferentes cuerpos de agua. Para desarrollar el ICA, la NSF usó la técnica de investigación Delphi (Ball y Church citado por Fernández y Solano 2005), seleccionando a un panel de expertos conformado por 142 personas con representación a nivel local, estatal y nacional de Estados Unidos (BASIN 2005; Fernández y Solano 2005). A partir del análisis de los expertos, se seleccionaron nueve parámetros y se asignó un peso relativo o peso de importancia de cada parámetro (Bonilla *et al.* 2010; WRC 2014); resultado que se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Pesos relativos para cada parámetro del “ICA”

No.	Parámetro (Sub _i)	Unidades	Peso relativo (W _i)
1	Coliformes fecales	NMP/100mL	0.15
2	pH	Unidades pH	0.12
3	Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO5)	mg/L	0.10
4	Nitrato (NO ₃)	Mg/l	0.10
5	Fosfato (PO ₄)	Mg/l PO ₄	0.10
6	Cambio de temperatura	°C	0.10
7	Turbidez	FAU	0.08
8	Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	0.08
9	Oxígeno disuelto (OD)	mg/l	0.17

Fuente: Tomado de Bonilla *et al.* 2010: 8

Los expertos construyeron gráficas y elaboraron rangos para determinar el valor del ICA parcial (Sub_i) o el Q-value de cada parámetro con un valor de 0 a 100 (BASIN 2005). Por ejemplo, en el caso de los coliformes fecales, si son mayores de 100,000 Bact 100mL el (Sub_i) es igual a 3. Si el valor de Coliformes fecales es menor de 100,000 Bact/100mL, se busca el valor en el eje de (X) y se procede a interpolar al valor en el eje de las (Y). El valor encontrado es el (Sub_i) de coliformes fecales, se procede a elevarlo al peso W_i. Los detalles de cada parámetro se puede encontrar en Bonilla *et al.* (2010) y el cálculo se puede obtener directamente de la página en línea del Centro de Investigaciones del Agua (WRC 2014).

La calificación general del ICA se calcula a partir de los pesos relativos de cada uno de los parámetros (W_i) y del valor del ICA parcial (Sub_i), ya sea mediante técnicas multiplicativas (ICAs) o aritméticas (ICAm) (Brown *et al.* 1970; Bonilla *et al.* 2010; WRC 2014). Las fórmulas para ambas técnicas se expresan de la siguiente manera:

$$ICAs = \sum_{i=1}^n Sub_i W_i \quad (\text{Ecuación 1}) \quad ICA_m = \prod_{i=1}^n (Sub_i^{W_i}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

ICA = Índice de calidad de agua

Sub_i = Subíndice del parámetro i

W_i = Peso relativo i

n = Número de parámetros (9)

Autores como Landwehr y Denninger (1976) evaluaron ambas técnicas y demostraron que las técnicas multiplicativas son superiores a las aritméticas, lo que significa que son mucho más sensibles a la variación de los parámetros, reflejando con mayor precisión un cambio de calidad (Gutiérrez *et al.* 2008). Por tal razón, la técnica multiplicativa se ha adoptado y utilizado en varios países, particularmente en Centroamérica y Guatemala (Bonilla *et al.* 2010; Reyes 2014). Una vez obtenido el ICA general, se procede a calificar la calidad del agua, de acuerdo con la siguiente categoría: excelente (ICA 91-100), buena (ICA 71-90), regular (ICA 51-70), mala (ICA 26-50) y muy mala (ICA 0-25) (Bonilla *et al.* 2010)

Si bien el ICA-NSF ha sido uno de los más utilizados para comparar la calidad de los ríos a nivel mundial, presenta sus ventajas y desventajas; en el cuadro 2 se presentan algunas de ellas.

Cuadro 2. Ventajas y limitaciones del ICA como herramienta de evaluación de la calidad del agua

Ventaja	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Permite mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua. • Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio. • Útiles para la evaluación de la calidad del agua para usos generales. • Permite a los usuarios una fácil interpretación de los datos. • Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas. • Permiten priorizar para evaluaciones de calidad del agua más detalladas. • Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua. • Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona un resumen de los datos. • No proporcionan información completa sobre la calidad del agua. • No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua. • Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación. • No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra. • Se basan en generalizaciones conceptuales que no son de aplicación universal. • Algunos científicos y estadísticos tienden a rechazar y criticar su metodología, lo que afecta la credibilidad de los ICA como una herramienta para la gestión.

Fuente: Tomado de Torres *et al.* (2009): 82

Aunque el análisis físico-químico (ICA) es el método más utilizado para determinar la calidad del agua y es el método utilizado en el presente estudio, existen métodos biológicos a través del uso de macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua. Uno de los métodos biológicos más utilizados es el Biological Monitoring Working Party (BMWP, por sus siglas en inglés) (Chesters 1980); este método hace múltiples mediciones en función de la estructura y comunidad, algunas de las categorías de medición son: riqueza de especies, enumeraciones, índices de diversidad y similitud de comunidades, índices bióticos, relaciones funcionales de los grupos alimenticios, índices milimétricos y multivariado (Bonada *et al.* citado por Reyes 2010). El análisis que se realiza bajo esta metodología es cualitativo, se basa principalmente en detectar la presencia o ausencia de ciertos organismos y solo requiere identificar hasta el nivel de familia. Estos organismos son clasificados según su tolerancia y sensibilidad hacia ciertos contaminantes (UNEP y WHO 1996).

2.4. Paisaje

Según Matteucci (2002), originalmente el paisaje se define como “un territorio genéticamente homogéneo, en el cual se observa la recurrencia regular y típica de las mismas combinaciones de interrelaciones entre estructura geológica, forma del relieve, agua superficial y subterránea, microclima, variedades de suelo, comunidades vegetales y animales”. Sin embargo, según el mismo autor, con el desarrollo de la ecología de paisaje, en la interfase entre la ecología y la geografía, el significado de paisaje ha sido modificado numerosas veces.

La ecología de paisaje es una de las ramas de la ecología que tiene sus orígenes en la geografía, así como en la geobotánica y en la planificación; su concepto está aún en desarrollo, ya que es una ciencia muy reciente, por lo que actualmente no existe un único concepto (Farina 2008). Lo que sí está claro es que la ecología del paisaje se enfoca en la relación espacial entre los elementos del paisaje o ecosistema, el flujo de energía, nutrientes minerales y la dinámica ecológica del mosaico del paisaje y los cambios en el tiempo (Turner *et al.* 2001). Además, tiene un enfoque multidisciplinario, involucra a un amplio campo de las ciencias, desde temas como usos de la tierra, conservación de vida silvestre, conservación de ecosistemas, biología de la conservación, manejo de recursos hídricos hasta aspectos de economía y sociología, entre otros (Turner *et al.* 2001; Gergel y Turner 2002). La ecología de paisaje no solo se ocupa de la cantidad de un componente en particular, sino también el arreglo en el espacio (Matteucci 2004).

Desde el punto de vista de ecología, el paisaje se puede definir como un área que es especialmente heterogénea en al menos un factor de interés (Turner *et al.* 2001), integrada por un conjunto de ecosistemas que recíprocamente se repiten en forma similar en todas partes (Forman y Godron 1986). Cada uno de estos ecosistemas puede estar considerado sobre un conjunto de escalas espaciales y temporales, que pueden ser producto de perturbaciones naturales o antropogénicas (Vílchez 2009).

A decir de la configuración de los paisajes, las perturbaciones antropogénicas son las principales causas de la creación de paisajes fragmentados, producto de los cambios de uso de la tierra. McIntyre y Hobbs (1999) clasificaron el estado de la alteración del paisaje en función del porcentaje de la cobertura original remanente; según estos autores, si el área mantiene más de 90% de cobertura original es clasificado como paisaje intacto, entre un 60 y 90% de cobertura original es considerado un paisaje variegado; entre un 10 y 60% es un paisaje fragmentado; y menos del 10% de su hábitat original es un paisaje relictual. Esta clasificación es muy importante para comprender el nivel o estado de la alteración del paisaje y entender las condiciones de configuración espacial de un paisaje creadas por una variedad de perturbaciones (Vílchez 2009).

Los paisajes alterados o perturbados forman los agropaisajes, y se pueden definir como un conjunto de ecosistemas donde los principales usos de suelo son agropecuarios y cuyos elementos individuales podrían ser remanentes de bosques, áreas de cultivo, sistemas agroforestales, áreas de pasturas y otros tipos de usos de suelo (Vílchez 2009). Estos elementos conforman los parches, corredores y la matriz, elementos de un paisaje que están inmersos en la estructura y composición (Turner *et al.* 2001, Forman y Godron 1986). Este concepto resalta una importancia particular en el presente estudio, ya que el tema de paisaje se desarrolla bajo el concepto de ecología de paisaje.

2.4.1. Características de un paisaje

El paisaje se caracteriza principalmente por su estructura y composición; su cuantificación constituye una herramienta para la descripción de la configuración espacial y para la interpretación de las asociaciones entre patrones y procesos (Matteucci 2004). La composición de un paisaje se refiere a los tipos y extensión de coberturas o parches del hábitat que lo componen, la cual puede ser descrita con medidas como la presencia, ausencia o proporciones relativas de los distintos usos de suelo o hábitats (riqueza relativa, diversidad de hábitats), o como el porcentaje de cobertura presente para cada elemento que compone el paisaje (Turner *et al.* 2001, Farina 2006). Una manera simple de determinar la composición de un paisaje es preguntarse ¿Qué tipos de usos de suelo o hábitats están presentes en el paisaje? (Vílchez 2009). La estructura del paisaje es la disposición, ubicación o arreglo espacial de los tipos de coberturas o parches de hábitat que lo componen y puede ser diferenciada por varias medidas, como tamaño, forma y arreglo de los parches, determinado por la conectividad, heterogeneidad, dominancia y distancia entre hábitats (Turner *et al.* 2001, Farina 2006).

2.4.2. Análisis de paisaje

En un análisis de paisaje, es importante entender los procesos y patrones, identificar los usos del suelo existentes, su arreglo espacial, extensión, etc. Para ello, las métricas de paisaje han sido ampliamente usadas tanto en estudios ecológicos como geográficos, las cuales proveen datos para caracterizar la composición y estructura de los paisajes (Brenes 2009). Las métricas de paisaje son índices numéricos desarrollados para cuantificar patrones de mapas categóricos

(o mosaicos de parches), cuantifican características espaciales específicas de los parches, clases de parches, o mosaicos de paisaje completos, o el contexto espacial de celdas individuales dentro de un mosaico de parches (Turner *et al.* 2001).

Las aplicación de las métricas son diversas, entre ellas se puede mencionar: describir cómo un paisaje ha cambiado a través del tiempo y hacer predicciones futuras relacionadas a los cambios en el paisaje (Brenes 2009); determinar si los patrones de dos o más paisajes difieren el uno del otro y en qué forma; evaluar estrategias de manejo alternativas en relación con los patrones de paisaje resultantes; y determinar si un patrón espacial particular propicia el movimiento para un organismo particular (Vílchez 2009), la propagación de disturbios, o la redistribución de nutrientes (Jones *et al.* 2001).

Para calcular las métricas de paisajes es necesario contar con mapas de uso y cobertura del suelo, el que puede obtenerse a partir de varias fuentes, ya sea generado a partir de imágenes satelitales, fotografías aéreas, o bien se puede adquirir en las agencias gubernamentales que cuentan con mapas actualizados. Existen varios programas que generan automáticamente las métricas, siendo uno de ellos FRAGSTAT (Mcgarigal y Marks 1995), programa diseñado para calcular una amplia variedad de métricas de paisaje, creado por la Universidad de Massachusetts en conjunto con el Servicio Forestal de Estados Unidos en 1995 (UMASS 2000).

2.4.3. Métricas de paisajes y su relación con calidad del agua

Estudios realizados por varios autores (Gergel *et al.* 2002; Uuemaa *et al.* 2007; Amiri y Nakane 2009) han demostrado que, a través de las métricas de paisaje, se puede determinar que la estructura y composición del paisaje son factores que influyen en la calidad del agua. Se ha demostrado el uso de las métricas a nivel de escala global (Turner *et al.* 2003), así como a escala regional y local en cuencas hidrográficas con uso agrícola (Young 1987; Cao *et al.* 2003; Uuemaa *et al.* 2007). En este sentido, el concepto y aplicación de las métricas de paisaje a nivel de cuencas constituye una herramienta útil para realizar un análisis de la influencia que puede tener la composición y estructura del paisaje, en términos de usos del suelo y calidad del agua (Amiri y Nakane 2009; Shen *et al.* 2015). Un estudio realizado por Uuemaa *et al.* (2007) determinó que existe una correlación entre los parámetros físicos del agua y las métricas de paisaje; en este estudio, las métricas utilizadas corresponden a: densidad de borde, densidad de parche, índice promedio de forma, índice promedio euclidiano del vecino más cercano, índice de contagio, densidad de riqueza de parche, e índice de diversidad de Shannon.

2.5. Percepción local del ambiente

La percepción del ambiente significa la toma de conciencia y la comprensión de una sociedad sobre su ambiente natural, involucra conocimiento, organizaciones, valores (Lazos y Paré 2002). Puede ser expresada a través de leyendas, creencias y tradiciones, las cuales ayudan a comprender la conducta de la sociedad y su relación con la naturaleza (UNESCO-MAB 1973).

Según Whyte (1977), las percepciones de una sociedad en relación con el ambiente están basadas tanto en aspectos objetivos como subjetivos, por tanto, la percepción se puede definir como la experiencia directa sobre el medio ambiente conjuntamente con la información indirecta que recibe el individuo, su mundo social influenciado por el contexto cultural (Lazos y Paré 2002). En este sentido, Alcron (1984) divide en 4 categorías los factores que dan forma al contexto de la percepción de los recursos: *a*) biológicas y físicas, *b*) culturales, *c*) económicas y *d*) sociales. A partir de estos contextos, cada individuo construye su percepción a través de las deducciones, construcciones e interpretaciones que realiza sobre su medio (Lazos y Paré 2002).

El estudio de la percepción social del ambiente ha sido el interés de varias disciplinas. Por ejemplo, desde hace más de siete décadas, biólogos y antropólogos han estudiado la percepciones de diversos grupos sociales y las cosmovisiones indígenas sobre el mundo natural, llevando a cabo investigaciones para conocer la percepción del ambiente en relación con su manejo (Lazos y Paré 2002). La UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Tecnología) en el marco del Programa MAB (Man and Biosphere Programme), promueve investigaciones relacionadas a tópicos tales como: percepción de riesgos y azares ambientales, adaptaciones a situaciones cambiantes, conservación, los paisajes, ambientes urbanos, planeación ambiental (UNESCO-MAB 1973), así como investigaciones relacionadas a la percepción de la calidad ambiental, en el uso, manejo y conservación de la tierra y sus recursos, y los sistemas urbanos, entre otros (UNESCO-MAB 1984).

3. Resultados principales

El resultado del presente estudio se resume en 2 artículos. El primer artículo se enfoca en evaluar el efecto de los usos de la tierra en la franja ribereña y de las unidades hidrográficas en la calidad del agua en el río Quiscab. Los resultados principales se describen a continuación:

- ✓ Se analizó la calidad del agua en 55 puntos de muestreo en dos épocas (seca y lluviosa), para un total de 110 observaciones; de las cuales, el 40% del total de muestreo presenta una calidad buena (ICA 70-90), 51% regular (ICA 50-70) y el 9% restante mala (ICA 25-50). El análisis por época presenta diferencias significativas ($p < 0.0001$), la época seca muestra mejor calidad ($M=69.65$, $EE=0.94$) que la época lluviosa ($M=63.42$, $EE=0.92$). En época seca, el 58% de los puntos de muestreo presenta calidad buena contra un 22% en época lluviosa; mientras que la calidad regular 35% en época seca y 67% en lluviosa; en cambio, la calidad mala el resultado fue de 7% en seca y 11% en lluviosa.
- ✓ En el análisis realizado a nivel de las unidades hidrográficas, tomando en cuenta los 24 puntos de salida, la calidad del agua se distribuyó de la siguiente manera: 33% buena, 57% regular y 10% mala. En el análisis por época, el resultado fue el siguiente: 58% buena, 29% regular y 13% mala en época seca; 8% buena, 84% regular y 8% mala en época lluviosa.

- ✓ Los parámetros que influyen en el ICA varían según la época de muestreo. En la época seca, los más influyentes ($p < 0.05$), en orden de importancia (CpMallows), son los siguientes: *E.coli*, DBO5, TDS, temperatura y oxígeno disuelto. En época lluviosa, los parámetros que explicaron la calidad del agua fueron: *E.coli*; turbidez, fosfato y DBO5.
- ✓ El *E. coli* influyó significativamente en la mala calidad del agua en ambas épocas de muestreo fue el *E. coli* (seca: $\beta_1 = -3.27$ y CpMallows = 351.30; lluviosa: $\beta_1 = -3.66$ y CpMallows = 269.34), junto con el DBO5 fueron los únicos que influyeron en las dos épocas de muestreo.
- ✓ La variable más importante de la franja ribereña que influyó en el ICA fue el porcentaje de poblado (%ECM=15.5; $p < 0.0001$); el efecto fue negativo, a mayor porcentaje de la franja ribereña ocupada por zonas pobladas, la calidad del agua disminuye.
- ✓ Las variables de los paisajes adyacentes (distancia más cercana entre los puntos de muestreo de agua y parches de los usos del suelo adyacente a la franja ribereña) más influyentes en el ICA fueron: distancia del bosque (%ECM=13.2; $p < 0.0001$) y distancia de arbustos (%ECM=12.6; $p < 0.0001$); el efecto fue negativo, a mayor distancia de los bosques y arbustos adyacentes a la franja ribereña, la calidad del agua disminuye.
- ✓ A nivel de las unidades hidrográficas, la variable más importante que influyó en el ICA fue la diversidad de uso del suelo (%ECM=10.1; $p < 0.0001$), a mayor diversidad de uso, la calidad disminuye; además, los paisajes adyacentes influyentes en el ICA fueron: la distancia del bosque y distancia de la vegetación arbustiva, distancia de poblado; el efecto de la distancia del poblado fue positivo, mientras más alejado estén los poblados de los ríos, la calidad del agua tiende a ser mejor. Las coordenadas UTM X fue una de las variables que influyó en la calidad del agua, lo cual sugiere que los puntos de muestreo ubicados en la parte Este de la cuenca tienden a tener ICAs bajos.

El segundo artículo se enfoca en analizar percepción de los agricultores sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua. En este participaron 77 agricultores. Los principales resultados son los siguientes:

- ✓ El uso actual de la franja ribereña del río Quiscab es dominado por el uso agrícola, según lo manifestado por el 50% de los participantes del estudio.
- ✓ El tipo de cultivo que se desarrolla en el área se agrupa en dos categorías: granos básicos y hortalizas. Los granos básicos que se cultivan son maíz y frijol, mientras que las hortalizas incluyen una gran variedad de cultivos, entre los cuales se mencionan zanahoria, papas y repollo.
- ✓ La agricultura constituye una de las actividades más importantes para la población. El cultivo de granos básicos se caracteriza por ser un cultivo de subsistencia, ya que

constituye una de las dietas básicas de la población, mientras que el cultivo de hortalizas tiene un carácter más comercial.

- ✓ La agricultura que se desarrolla en la cuenca es convencional, caracterizada por el uso de agroquímicos. Además, los agricultores realizan limitadas prácticas de conservación de suelos.
- ✓ El 38% coinciden en que en la franja ribereña existe cobertura forestal y afirman que la cobertura desempeña un rol importante en la conservación de la calidad del agua.
- ✓ El 8% de los entrevistados manifestó que en la franja ribereña hay presencia de zonas pobladas o construcciones urbanas.
- ✓ Acerca del impacto de los bosques ribereños en la calidad del agua, la percepción local pone de manifiesto que los bosques desempeñan un papel fundamental en la conservación del agua. De acuerdo con la calificación brindada por parte de los entrevistados, la percepción se agrupó de la siguiente manera: el 45% opina que la calidad del agua donde hay bosque ribereño es muy buena, 21% buena, 7% regular, 12% mala, 3% muy mala y 6% no respondió. La calificación brindada por la población está en función del consumo familiar; por ejemplo, la calidad muy buena y buena es un indicador de consumo, mientras que en la calidad regular a muy mala indican que el agua ya está contaminada y no la consumen.
- ✓ En cuanto a las fuentes de contaminación, el 61% de la población indica que los desechos sólidos son las principales fuentes, 47% indican aguas residuales, 32% mencionan residuos agrícolas y 26% mencionaron que las aguas residuales de los hoteles y comercios son las fuentes que contaminan los ríos y el lago.

4. Conclusiones

- ✓ El porcentaje de zonas ocupadas por poblados en la franja ribereña es el factor más importante que influye en la mala calidad del agua; a pesar de que el porcentaje de poblado es menor ($M=5.4\%$; $EE=1.3$), la incidencia de *E. coli* influyó significativamente en la mala calidad del agua. La principal causa de la mala calidad del agua son las descargas de aguas residuales en los cauces del río, producto de las malas prácticas y la inadecuada infraestructura.
- ✓ La buena cobertura forestal en la parte alta de la cuenca, con poca perturbación antropogénica, es uno de los factores que contribuye en la conservación de la calidad del agua.
- ✓ El porcentaje de la cobertura forestal de la franja ribereña no es un factor que explica la calidad del agua, a pesar de que ocupa una buena proporción de la franja ribereña ($M=34.5\%$, $EE=3.1\%$), los resultados sugieren que no es suficiente para contrarrestar los efectos de la contaminación.
- ✓ El rol del bosque en la calidad del agua está en función de su ubicación en el paisaje adyacente. En este sentido, mientras más conectados estén los bosques adyacentes con los bosques ribereños, la calidad del agua es mejor. Por lo tanto, mantener un bosque intacto,

con poca y sin ninguna perturbación antropogénica, es necesario para mantener la calidad del agua.

- ✓ Los paisajes adyacentes juegan un rol importante en la calidad del agua, principalmente la distancia entre los puntos de muestreo y la cobertura forestal, vegetación arbustiva y poblados. A medida que los parches de bosques y arbustos estén más alejados de los ríos, la calidad del agua tiende a disminuir. En cambio, la distancia del poblado influye de manera positiva, mientras más alejados estén los poblados de los ríos, la calidad tiende a mejorar
- ✓ A nivel de unidades hidrográficas, la diversidad de uso del suelo fue el factor más importante que influyó en la calidad del agua, lo cual indica que la fragmentación en el paisaje tiene un efecto sobre las condiciones actuales del agua. Además, los puntos de muestreo ubicados en la parte Este de la cuenca, principalmente con cultivos de hortalizas, presentan calidad de agua baja.
- ✓ Por medio de la percepción local se logró identificar los diferentes puntos de vista de los agricultores sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua en el río. El estudio refleja la situación actual de la cuenca del río Quiscab y por ende del Lago de Atitlan; desde el punto de vista de la población, se identificaron dos escenarios clave: por un lado, la población está consciente de la situación de la contaminación de los ríos reconociendo que sus actividades han contribuido a empeorar la situación; por otro lado, reconocen y valoran la importancia del cuidado del bosque, suelos y agua, aunque están conscientes de que han hecho muy poco para la conservación de los recursos.
- ✓ Actualmente, la franja ribereña del río Quiscab está siendo ocupada por áreas agrícolas caracterizadas por el uso de fertilizantes químicos y agricultores con poca capacidad técnica para el manejo y aplicación de agroquímicos. Al respecto de la capacitación técnica, los centros comerciales dedicados a la venta de productos químicos son los que más han brindado capacitación técnica a los agricultores, mientras que la presencia gubernamental es muy limitada. Esta situación constituye una amenaza para los recursos naturales de la cuenca, tomando en cuenta que los comercios tienen un fin lucrativo y no cuentan con planes para la conservación o protección de los recursos.
- ✓ Las limitadas prácticas de conservación de suelos, inadecuada deposición de residuos sólidos y aguas residuales son algunos de los problemas que se manifiestan actualmente en la cuenca del río Quiscab. Dadas estas condiciones, la efectividad de las franjas ribereñas en la conservación de la calidad del agua es muy limitada.
- ✓ A pesar de la situación actual, la población está consciente de los beneficios de la franja ribereña en la calidad del agua. Una parte de la población coincide en que la calidad el agua donde hay bosque es buena; sin embargo, una parte de ella señala que la cobertura forestal que existe actualmente en la franja ribereña no es suficiente para conservar la calidad del agua, debido a que los ríos están muy contaminados por las actividades antropogénicas.
- ✓ A través del estudio se identificaron problemas estructurales en el manejo de los recursos naturales, algunos de ellos son: el limitado acceso a la tierra, la inexistencia de una regulación sobre el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos, falta de programas

gubernamentales sólidos para la recuperación y conservación de los recursos naturales, y débil sistema de manejo de desechos sólidos y aguas residuales.

5. Recomendaciones

- ✓ El tratamiento de aguas residuales a través de la implementación y mejora en la infraestructura actual es necesaria, por la alta incidencia de *E. coli*. Ante tal situación, se recomienda operativizar el plan maestro de manejo integral de aguas residuales y agua potable a todo nivel (comunitario y municipal), priorizando una gestión con un enfoque de cuencas hidrográficas.
- ✓ Aunque los efectos de los bosques ribereños no son significativos actualmente en la calidad del agua, se recomienda mantener los bosques en la franja ribereña, dadas las diversas funciones que tienen. Al respecto, es necesario llevar a cabo otros estudios para demostrar el papel que juega el bosque en la protección de los recursos hídricos.
- ✓ Se recomienda fortalecer las acciones comunitarias para la protección de las zonas de recarga hídrica. Es necesario llevar a cabo programas de conservación de los bosques, principalmente en la parte alta para evitar la fragmentación y el avance de la frontera agrícola.
- ✓ Se recomienda implementar planes de manejo de cuencas, para la protección de los recursos naturales, en especial el recurso hídrico, suelo y bosque. En este, se debe incluir lineamientos y estrategias para la conservación de los recursos naturales, y establecer al recurso hídrico como eje transversal del manejo y gestión. Los planes deben ser implementados respetando las costumbres, tradiciones y formas de vida de la población.
- ✓ Ante la complejidad social, agrícola y económica de la cuenca, será necesario el involucramiento de los diversos actores en la toma de decisiones, principalmente las autoridades comunitarias y la población en general, porque son ellos los que toman la decisión final a cerca del uso y cuidado de los recursos naturales. Para ello, será necesario la creación de comités de cuencas, quienes serían los impulsores de los planes de cuencas.
- ✓ Se recomienda a las autoridades encargadas realizar esfuerzos para el desarrollo de programas y actividades encaminados en la búsqueda de mejoras en las prácticas agrícolas, a través de asistencia técnica dirigida a los agricultores, principalmente a los que se dedican al cultivo de hortalizas. En la misma línea, será necesario retomar las acciones iniciadas, particularmente la implementación del cambio de fertilizante; si bien una parte de la población aún no está convencida, se deben buscar nuevos mecanismos de incidencia.

6. Literatura citada

- Acuerdo Municipal, No. 111. 2016. Prohibición del uso, venta y distribución de bolsas plásticas, duroport, pajillas y derivados en el municipio de San Pedro la Laguna, Sololá, Guatemala. Diario de Centroamérica, Guatemala. 07 oct.
- Aguirre, M; Torres, H; Ruiz, R. 2003. Manual de procedimientos para la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas del Perú (en línea). CEPAL. 11 p. Consultado 2 oct. 2015. Disponible en http://www.cepal.org/deype/noticias/noticias/7/44607/delimitacion_codificacion_cuen cas.pdf
- Alcorn, JB. 1984. Huastec Mayan ethnobotany. University of Texas Press, Austin.
- Amiri, BJ; Nakane, K. 2009. Modeling the linkage between river water quality and landscape metrics in the Chugoku district of Japan. *Water Resources Management* 23(5):931-956.
- AMSCLAE (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, Guatemala). 2011. El lago de Atitlán: caso cianobacteria mayo 2011 (Diapositiva). Sololá, Guatemala, 19 diapositivas.
- _____. 2014. Comunicado de prensa. 17 de junio de 2014. Panajachel, Sololá, Guatemala.
- _____. 2015. Tercer informe: plan maestro de manejo integral de aguas residuales y agua potable de los municipios de la cuenca del lago Atitlán.
- Ayers, RS; Westcot, DW. 1985. Water quality for agriculture (en línea). FAO Consultado 10 oct. 2015. Disponible en <http://www.fao.org/DOCRp/003/T0234e/T0234e00.htm>
- BASIN (Boulder Area Sustainability Information Network, USA). 2005. Watershed: National Sanitation Foundation Water Quality Index. (en línea). Consultado 15 oct. 2016. Disponible en http://bcn.boulder.co.us/basin/watershed/wqi_nsf
- Basnyat, P; Teeter, L; Lockaby, BG; Flynn, KM. 2000. Land use characteristics and water quality: a methodology for valuing of forested buffers. *Environmental Management* 26(2):153-161.
- Belt, GH; O'Laughlin, J; Merrill, T. 1992. Design of forest riparian buffer strips for the protection of water quality: analysis of scientific literature. Report No. 8. Idaho wildlife and range policy analysis group. 35 p.
- Bonilla, BL; de los Angeles Gonzales, C; Arias, AY; Chávez, JM. 2010. Metodología analítica para la determinación del índice de calidad del agua (ICA). 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). Eds. M Springer; JMS Chicas. Editorial Universitaria, San Salvador, El Salvador. 19 p.
- Brenes, C. 2009. Análisis multitemporal de cambio de uso de suelo y dinámica del paisaje en el Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba CR: CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 125 p.
- Brown, RM; McClelland, NI; Deininger, RA; Tozer, RG. 1970. A water quality index - do we are?. *Water Sewage Works*. 339 -343 p.
- Cao, W; Hong, H; Yue, S; Ding, Y; Zhang, Y. 2003. Nutrient loss from an agricultural catchment and landscape modeling in southeast China. *Bulletin of environmental contamination and toxicology* 714:0761-0767.
- Chesters, R. 1980. Biological monitoring working party: the 1978 national testing exercise. Department of the Environment Water Data Unit.

- Dillaha, T; Reneau, R; Mostaghimi, S; Lee, D. 1989. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. 32(2): Disponible en <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=31033&t=3>
- Farina, A. 2008. Principles and methods in landscape ecology: towards a science of the landscape. Springer Science & Business Media.
- Fernandes, J; Souza, Ad; Tanaka, M. 2014. Can the structure of a riparian forest remnant influence stream water quality? A tropical case study. *Hydrobiologia* 724(1):175-185.
- Fernández, N; Solano, F. 2005. Índice de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia Mundial, capítulo 3. *In* Índices de calidad y contaminación del agua. Universidad de Panplona Colombia p.40-116.
- Fischer, R; Fischenich, J. 2000. Design recommendations for riparian corridors and vegetated buffer strips. Technical note series. US Army Corps of Engineer Research and Development Center. 17 p.
- Forman, RT; Godron, M. 1986. Landscape Ecology. Estados Unidos de América: Jhon Wiley and Sons 619:
- Gayoso, J; Gayoso, S. 2003. Diseño de zonas ribereñas, requerimiento de un ancho mínimo. Universidad Austral de Chile. 12 p.
- Gergel, SE; Turner, MG. 2002. Learning landscape ecology: a practical guide to concepts and techniques. Springer Science & Business Media.
- Gergel, SE; Turner, MG; Miller, JR; Melack, JM; Stanley, EH. 2002. Landscape indicators of human impacts to riverine systems. *Aquatic Sciences* 64(2):118-128.
- Gutiérrez, L; Quintana, R; Rubio, H; Ortega, J; Pinedo, C. 2008. Índice de calidad del agua en la cuenca baja del Río San Pedro, Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 4(2):108-115.
- Hawes, E; Smith, M. 2005. Riparian buffer zones: Functions and recommended widths. Eightmile River Wild and Scenic Study Committee. 15 p.
- IARNA (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala). 2015. Florecimiento de cianobacterias en el lago de Atitlán, agosto 2015. Universidad Rafael Landívar. Guatemala, 6 p.
- Jones, KB; Neale, AC; Nash, MS; Van Remortel, RD; Wickham, JD; Riitters, KH; O'Neill, RV. 2001. Predicting nutrient and sediment loadings to streams from landscape metrics: A multiple watershed study from the United States Mid-Atlantic Region. *Landscape Ecology* 16(4):301-312.
- Jontos, R. 2004. Vegetative buffers for water quality protection: an introduction and guidance document. Connecticut Association of Wetland Scientists White Paper on Vegetative Buffers. Draft version 1:22.
- Landwehr, JM; Deininger, R. 1976. A comparison of several water quality indexes. (en línea). *Water Pollution Control Federation* 48(5):954-958. Consultado 15 oct. 2016. Disponible en http://www.jstor.org/stable/25038981?seq=1#page_scan_tab_contents
- Lazos, E; Paré, L. 2002. Miradas indígenas sobre una naturaleza entristecida: percepciones del deterioro ambiental entre nahuas del sur de Veracruz. *Revista Mexicana de Sociología* 64(4):245-247.
- Liaw, A; Wiener, M. 2002. Classification and regression by randomForest. *R news* 2(3):18-22.
- Madison, C; Blevins, R; Frye, W; Barfield, B. 1992. Tillage and grass filter strip effects upon sediment and chemical losses. *In* *Agronomy Abstracts*. ASA, Madison, WI 331.
- McGarigal, K; Marks, BJ. 1995. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. University of Massachusetts and US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station

- McIntyre, S; Hobbs, R. 1999. A framework for conceptualizing human effects on landscapes and its relevance to management and research models. *Conservation biology* 13(6):1282-1292.
- Palone, RS; Todd, AH. 1997. Chesapeake bay riparian handbook: a guide for establishing and maintaining riparian forest buffers. US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry.
- Reyes, E. 2012. Uso de macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad de agua en la cuenca del lago Atitlán, Guatemala. Tesis M.Sc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 114 p.
- Reyes, E. 2014. Macroinvertebrados acuáticos de los cuerpos lénticos de la Región Maya, Guatemala. *Revista Científica* 23(1):7-16.
- Richardson, DM; Holmes, PM; Esler, KJ; Galatowitsch, SM; Stromberg, JC; Kirkman, SP; Pyšek, P; Hobbs, RJ. 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and distributions* 13(1):126-139.
- Ruiz, R; Torres, H. 2008. Manual de procedimientos para la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas: caso América del Sur (en línea). IUCN SUR - SGCAN. 39 p. (Hydrology Research). Consultado 26 oct. 2015. Disponible en http://75.98.169.113/uploads/documentos/Anexo_3_MANUAL_DE_DELIMITACION_Y_CODIFICACION_UH_Sudamerica_UICN_CAN.pdf
- Shen, Z; Hou, X; Li, W; Aini, G; Chen, L; Gong, Y. 2015. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. *Ecological Indicators* 48:417-427.
- Torres, P; Cruz, CH; Patiño, PJ. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 8:79-94. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242009000300009&nrm=iso
- Turner, MG; Gardner, RH; O'Neill, RV. 2001. *Landscape ecology in theory and practice: pattern and process*. New York, Springer Science & Business Media. 417 p.
- Turner, RE; Rabalais, NN; Justic, D; Dortch, Q. 2003. Global patterns of dissolved N, P and Si in large rivers. *Biogeochemistry* 64:297-317.
- ULA (Unidos por el Lago Atitlán, Guatemala). 2014. State of the lake 2014. Guatemala, University of Nevada. 40 p.
- UNEP (United Nations Environment Programme, USA); WHO (World Health Organization, USA). 1996. *Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. Eds. J Bartram; R Ballance. CRC Press.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, París); MAB (Programme on Man and Biosphere, París). 1973. Expert Panel on Project 6 - Impact of Human Activities on Mountain Ecosystems. Final Report. MAB Report Series No. 8.
- UNESCO (United Nations Educational, SaCO, París); MAB (Programme on Man and Biosphere, París). 1984. *Percepción ambiental: seminario regional para América Latina y el Caribe*. Montevideo, Uruguay.
- Uuemaa, E; Roosaare, J; Mander, Ü. 2007. Landscape metrics as indicators of river water quality at catchment scale. *Hydrology Research* 38(2):125-138.
- Vílchez, S. 2009. Efecto de la composición y estructura del paisaje y del hábitat sobre distintos grupos taxonómicos en un agropaisaje en Matiguás, Nicaragua. M.Sc. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 121 p.

- Wenger, S. 1999. A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation. Office of Public Service & Outreach, Institute of Ecology, University of Georgia.
- Wenger, SJ; Fowler, L. 2000. Protecting stream and river corridors. Creating Effective Local Riparian Buffer Ordinances. Carl Vinson Institute of Government, The University of Georgia, Athens:
- WHO (World Health Organization, Switzerland). 2006. Guidelines for drinking-water quality: recommendations. First addendum to third edition. 3 ed. World Health Organization.
- Whyte, AV. 1977. Guidelines for field studies in environmental perception. París, Unesco. 118 p. (MAB technical note 5).
- Wilhm, JL; Dorris, TC. 1968. Biological parameters for water quality criteria. Bioscience:477-481.
- WRC (Water Research Center, United States). 2014. Monitoring the quality of surface waters: calculating NSF water quality index (WQI) (en línea). Consultado 07 de julio. Disponible en <http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>.
- Young, RA. 1987. Agricultural non-point-source pollution model: a watershed analysis tool. United States Department of Agriculture (en línea). Conservation research report 35:49-51. Consultado 01 sep. 2016. Disponible en <http://www.jswnonline.org/content/44/2/168.abstract>

CAPÍTULO II

Artículo 1: Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua de la subcuenca del río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala

Resumen

La investigación tuvo como propósito determinar la influencia de la franja ribereña y el paisaje adyacente en la calidad del agua de la subcuenca del río Quiscab, tributario de mayor drenaje superficial del Lago Atitlán, Guatemala. El estudio abarcó dos escalas de análisis: unidades hidrográficas y franjas ribereñas; se seleccionaron 24 unidades hidrográficas y franjas ribereñas de 20 metros en ambos lados de los ríos. En ambos niveles se evaluaron las siguientes variables: 1) porcentaje de cobertura y uso de la tierra; 2) distancia entre los puntos de muestreo, los usos y cobertura de la tierra fuera de la franja ribereña de 20 metros, y 3) mediciones de paisaje (índice de Shannon y densidad de riqueza de parches). Se establecieron 55 puntos de muestreo para estimar el índice de la calidad del agua basado en el índice de la Fundación de Sanidad Nacional de Estados Unidos (ICA-NSF); el muestreo se realizó en dos épocas: seca y lluviosa; los parámetros evaluados para estimar el ICA fueron: pH, oxígeno disuelto (OD), sólidos disueltos totales (TDS), temperatura, nitratos (NO_3), fosfatos (PO_4^{3-}), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) incubado durante cinco días a 20 °C, turbidez (FAU) y *Escherichia coli* (*E. coli*). Mediante un análisis de regresión múltiple se identificaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos con mayor influencia en la calidad del agua; mientras que las variables de la franja ribereña y unidades hidrográficas que explican la calidad del agua se determinaron por medio de árboles de regresiones usando el algoritmo de randomForest. El resultado del estudio evidencia que la calidad del agua tiene un efecto temporal ($p < 0.0001$), es la época seca ($M=69.65$, $EE=0.94$) la que presenta mejor calidad en comparación con la época lluviosa ($M=63.42$, $EE=0.92$). Los parámetros que más influyeron en el ICA ($p < 0.05$) en época seca fueron: *E. coli*, DBO5, temperatura, TDS, OD; mientras que en época lluviosa, los parámetros que explicaron el ICA ($p < 0.05$) fueron: *E. coli*, turbidez, fosfato y DBO5; el parámetro que más influyó en la mala calidad del agua en ambas épocas de muestreo fue el *E. coli* (seca: $\beta_1 = -3.27$ y $CpMallows = 351.30$; lluviosa: $\beta_1 = -3.66$ y $CpMallows = 269.34$). La variable más importante de la franja ribereña que influyó en el ICA fue el porcentaje de poblado (%ECM=15.5; $p < 0.0001$), el efecto fue negativo, a mayor porcentaje de la franja ribereña ocupado por zonas pobladas, la calidad del agua disminuye. En cambio, las variables de los paisajes adyacentes más influyentes en el ICA fueron: distancia del bosque (%ECM=13.2; $p < 0.0001$) y distancia de arbustos (%ECM=12.6; $p < 0.0001$), el efecto fue negativo, a mayor distancia de los bosques y arbustos adyacentes a la franja ribereña, la calidad del agua disminuye. A nivel de las unidades hidrográficas, la variable más importante que influyó en el ICA fue la diversidad de uso del suelo (%ECM=10.1; $p < 0.0001$), a mayor diversidad de uso, la calidad disminuye; además, las siguientes variables influyeron significativamente en el ICA: distancia del bosque, distancia de arbustos, distancia de poblado y las coordenadas UTM “X” El efecto de la distancia del poblado fue positivo, mientras más alejados estén los poblados de los ríos, la calidad del agua tiende a ser mejor.

1. Introducción

La calidad del agua en las cuencas hidrográficas es un tema crítico y preocupante, puesto que muchas de ellas están contaminadas (Dourojeanni y Jouravlev 1999; Escobar 2002), lo cual constituye una amenaza para los ecosistemas acuáticos y para la humanidad en general. El cambio de uso del suelo, principalmente para usos agrícolas y urbanización, es uno de los factores que ha influido directamente en la contaminación de los cuerpos de agua (Basnyat *et al.* 2000; Villaseñor y Cárdenas 2014). Ante tal situación, es necesario tomar acciones que permitan minimizar los efectos de la contaminación. Para ello, es importante identificar aquellos factores que influyen en la calidad del agua a diferentes escalas, tanto a nivel de cuencas como a una escala más específica, que es el caso de las franjas ribereñas (Nava *et al.* 2016). Las franjas ribereñas bien conservadas y con cobertura forestal desempeñan un papel importante en la protección de los cuerpos de agua (Ceccon 2003), principalmente de los impactos relacionados con el uso de los suelos debido a la actividad humana (Hawes y Smith 2005). Además, mejoran la infiltración de la escorrentía superficial, reducen la acumulación de sedimentos y previenen la erosión (Dillaha *et al.* 1989; Dindaroğlu *et al.* 2015). Tomando en cuenta su importancia, varios esfuerzos se han realizado para su preservación como una alternativa para disminuir los efectos de la contaminación y mejorar la calidad de los cuerpos de agua (Palone y Todd 1997; Wenger 1999; Gayoso y Gayoso 2003; Hawes y Smith 2005).

La efectividad de la franja ribereña depende mucho de sus características, especialmente de su composición y configuración, debido a que su forma, tamaño, longitud y distribución en el paisaje, influyen en su funcionamiento y son indicadores clave en la calidad del agua (Fischer y Fischenich 2000; Gergel *et al.* 2002). El ancho ideal de la franja varía dependiendo del propósito para su protección (Jontos 2004), depende también de la hidrología local, vegetación, tipo de suelos, pendiente, tipo de ríos, entre otras variables (Wenger 1999). Para la protección de la calidad del agua, Jontos (2004) recomienda conservar una franja ribereña de 5 a 30 metros de ancho, dependiendo del tipo de vegetación y la pendiente; en cambio, la longitud debe ser a lo largo de la red hídrica, ya que franjas con vegetación continua son más eficientes que parches de vegetación (Hawes y Smith 2005). A pesar de la importancia de la franja ribereña en la protección del agua, generalmente son una de las zonas del paisaje más degradadas (Basnyat *et al.* 2000; Richardson *et al.* 2007; Fernandes *et al.* 2014), ya que el avance de la frontera agrícola y la expansión de áreas pobladas son factores que contribuyen a su fragmentación y afectan la calidad del agua de los ríos y lagos.

La presente investigación tuvo por objetivo determinar la influencia de los usos y cobertura de la tierra de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua, en la subcuenca del río Quiscab, tributario de mayor superficie de drenaje del Lago Atitlán, que ocupa el 37% del área de los cinco tributarios de la cuenca del lago. Dado a su tamaño, aporta una gran cantidad de nutrientes provenientes de las actividades antropogénicas de la cuenca y aguas negras de los poblados establecidos en la misma, hacia el lago (AMSCLAE 2011; IARNA

2012). Los resultados del estudio aportarán información de vital importancia para la protección de las franjas ribereñas y de las unidades hidrográficas en general.

2. Materiales y metodología

2.1. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la unidad hidrográfica del río Quiscab (Figura 2), perteneciente a la cuenca del Lago Atitlán, departamento de Sololá, Guatemala. El río Quiscab es uno de los cinco ríos permanentes que alimentan el flujo hídrico del lago, y es el tributario de mayor superficie de drenaje, pues ocupa el 37% del área total de la cuenca. Tiene una superficie de drenaje de 159.6 km² con una longitud del cauce principal de 22.2 km. Está ubicada entre las coordenadas 91°07' y 91°17' longitudes oeste, 14°36' y 14°44' latitudes norte, con una elevación mínima de 1600 y máxima de 3300 msnm, una precipitación media de 1837 mm/año. Se ubica en el nivel 8 según la clasificación Pfafstetter para Guatemala (MAGA 2009). Los usos del suelo están dominados por bosque de coníferas (30%), paisajes agrícolas (34% cultivo de granos básicos, principalmente maíz y frijol, y 5% hortalizas), vegetación arbustiva (16%). El área está conformada por cinco municipios: Sololá, San José Chacayá, Santa Lucía Utatlán y Nahualá del departamento de Sololá, y la parte sur del departamento de Totonicapán; y 126 comunidades. Según la clasificación de paisajes de McIntyre y Hobbs (1999), la cuenca se ubica en categoría de paisajes fragmentados.

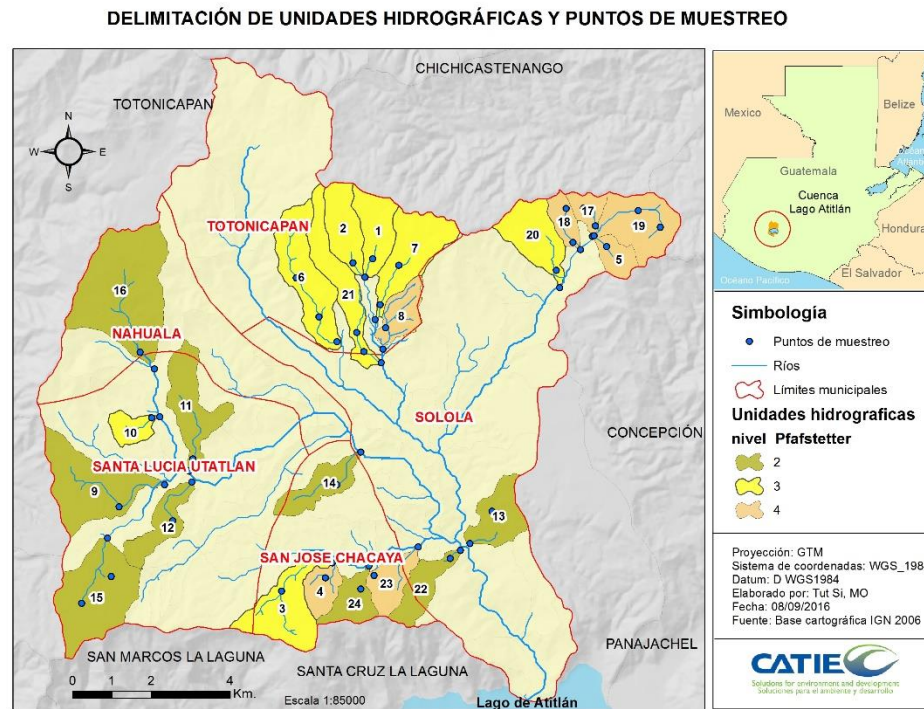


Figura 2. Ubicación de la subcuenca del río Quiscab y unidades hidrográficas (cuencas e intercuenas, método Pfafstetter) de estudio

2.1. Delimitación del área de estudio

Se seleccionaron 24 ríos de orden 1 y 2 (Strahler 1957), correspondientes a unidades hidrográficas de los niveles 2, 3 y 4, según la metodología Pfafstetter (Pfafstetter 1989). Paralelamente, se delimitó una franja ribereña de 20 metros, en ambos lados de cada uno de los ríos (Jontos 2004).

Los ríos seleccionados se caracterizan por ubicarse en la cabecera de las cuencas, siendo las primeras ramificaciones de una red hídrica, los ríos de orden 1 se caracterizan por no contar con tributario, mientras que los de orden 2 son el resultado de la unión de 2 ríos de orden 1. Los niveles de las unidades hidrográficas corresponden al orden jerárquico en que las áreas de drenaje se ubican dentro del área general de la cuenca. Los niveles 2 y 4 se caracterizan por ser áreas que no reciben drenaje de ninguna otra área, pero sí contribuyen con flujo a otra unidad de drenaje, se denominan cuencas; el nivel 3 es un área que recibe el drenaje de otra unidad que se ubica agua arriba, se denomina intercuenca (Pfafstetter 1989).

La delimitación y codificación de las unidades hidrográficas se realizó mediante el programa de ArcGis 2.0, utilizando herramienta *Hidrology* de *Spatial Analyst*, mientras que la franja ribereña se delimitó a través de la herramienta de geoprocésamiento *Buffer* con el mismo programa.

2.2. Análisis de la calidad del agua

Para analizar la calidad del agua se establecieron 55 puntos de muestreo. La selección de los puntos y la cantidad se realizó en función de la representatividad de los usos y cobertura de la tierra, tanto en la franja ribereña como en los paisajes adyacentes. Además, se consideró el acceso y seguridad (MINAGRI y ANA 2011; USGS 2015), la logística en laboratorio y el presupuesto. Las muestras de agua fueron tomadas durante los meses de marzo y junio del año 2016, correspondiente a la época seca y lluviosa, respectivamente, para un total de 110 muestras.

Se analizaron nueve parámetros físico-químicos y microbiológicos como indicadores de la calidad del agua. Los parámetros físicoquímicos fueron los siguientes: pH, oxígeno disuelto (OD), en %, sólidos disueltos totales (TDS), en mg/l, cambio de temperatura (°C), nitratos (NO_3^- mg/l), fosfatos (PO_4^{3-} mg/l), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), en 5 días a 20 °C, turbidez (FAU); mientras que los parámetros microbiológicos corresponden a los coliformes fecales, específicamente la bacteria *Escherichia coli*, como número más probable de gérmenes coliformes por 100 cm³ (NMP/100 ml). Los parámetros de temperatura, TDS y OD se tomaron in situ; los parámetros pH, E.coli, NO_3^- , PO_4^{3-} y turbidez fueron analizados en el laboratorio de AMSCLAE, el DBO5 fue incubado y analizado en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala, sede del Altiplano.

La toma de muestras, traslado y análisis se realizó siguiendo los procedimientos establecidos por el laboratorio de la AMSCLAE, basados en los procedimientos estándar de la Asociación de Salud Pública Americana (APHA, por sus siglas en inglés) (Eaton y Franson 2005; Way 2012). Una vez obtenido el resultado de los análisis de laboratorio y medidas *in situ* de cada uno de los puntos de muestreo, se procedió a calcular los subíndices de calidad del agua para cada uno de los parámetros, proceso que fue realizado desde la página en línea² del Centro de Investigación del Agua (WRC, por sus siglas en inglés) (WRC 2014). Posteriormente, se calculó el índice de calidad del agua (ICA) a través de la ecuación desarrollada por Brown (Bonilla *et al.* 2010), utilizado por Reyes (2012) en la cuenca del Lago Atitlán, Guatemala. La ecuación fue la siguiente:

$$ICA_m = \prod_{i=1}^9 (Sub^{w_i}) \text{ (ver ecuación 1)}$$

Donde:

ICA_m = Valor de la calidad del agua que varía de 0 a 100

W_i = Pesos relativos asignados a cada parámetro (*Sub_i*), y ponderados entre 0 y 1 (Cuadro 2)

Sub_i = Subíndice de los parámetros (ecoli = 0,15; pH = 0,12; DBO5 = 0,1; NO₃⁻ = 0,1;

PO₄³⁻ = 0,1; cambio temperatura = 0,1; turbidez = 0,08; TDS = 0,08, OD = 0,17)

2.3. Caracterización de la composición del paisaje

Para la caracterización de la composición del paisaje se utilizaron dos fuentes principales de información: 1) el mapa de bosques y uso de la tierra del año 2012 elaborado por el Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y uso de la Tierra (GIMBOT 2014), y 2) el mapa de uso de la tierra del año 2010 elaborado por el Ministerio de Agricultura de Guatemala. Debido a la fecha de elaboración de los mapas, fue necesario realizar un proceso de actualización de los usos y cobertura de la tierra; para ello, se digitalizó el mapa a una escala 1:5000 a través de una interpretación visual, utilizando imágenes de Google Earth™ sincronizado con ArcGis 2.0™, por medio de la extensión *ArcBruTile*. Finalmente, se realizó un proceso de validación en campo, mediante puntos de control con GPS y fotografías.

Durante el proceso de actualización se generaron nuevas categorías de usos y cobertura de la tierra. Para el propósito del presente estudio se realizó una nueva clasificación, se agruparon todos los tipos de bosque en una sola categoría llamada bosques, las zonas pobladas rurales y urbanas en zonas pobladas y los granos básicos y hortalizas en agrícolas. En el cuadro 3 se detallan los usos y cobertura obtenidos a partir del análisis de mapas y de la nueva clasificación.

²<http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>

Cuadro 3. Clasificación de los usos y cobertura de la tierra

No	Clasificación inicial	Nueva clasificación
1	Bosque de conífera	Bosque
2	Bosque latifoliado	
3	Bosque mixto	
4	Bosque ribereño*	
5	Granos básicos	Agrícola
6	Hortalizas	
7	Vegetación arbustiva	Arbustos
8	Pastizales	Pastizales
9	Cultivos permanentes arbóreos	Cultivos permanentes arbóreos
10	Área urbana	Poblado
11	Zonas pobladas rurales*	
12	Plantaciones forestales	Plantaciones forestales

Fuente: Adaptado de Anderson *et al.* (1976)

* Nuevas categorías generadas a partir de la actualización de los usos y cobertura de la tierra

Para caracterizar el paisaje, se transformó el mapa vectorial a formato raster con una resolución de 5 metros. Posteriormente, se procedió a cortar los usos y cobertura de la tierra para las 24 unidades hidrográficas y la franja ribereña de los 55 puntos de muestreo de agua; el procedimiento se realizó mediante la herramienta *Extract by mask* de ArcGis 2.0. Una vez obtenido el archivo de mapas (24 unidades hidrográficas y 55 franjas ribereñas), se procedió a caracterizar el paisaje a través de cálculos de mediciones con el programa Fragstat 4.2 (Mcgarigal y Marks 1995). Para calcular las medidas se utilizó la regla de ocho celdas del vecino más cercano. En el cuadro 4 se describe las mediciones generadas para la caracterización del paisaje.

Cuadro 4. Caracterización de la composición del paisaje de las unidades hidrográficas y franjas ribereñas

Código	Descripción	Observaciones
P_bosque	Porcentaje de cobertura forestal	El porcentaje del área de las unidades hidrográficas y franja ribereña que se encuentra bajo cobertura forestal. Incluye bosque de conífera, latifoliado, mixto y bosque ribereño.
P_arbusto	Porcentaje de vegetación arbustiva	El porcentaje del área de las unidades hidrográficas y franja ribereña que se encuentra bajo cobertura de vegetación arbustiva. Incluye charral o matorral.
P_agrícola	Porcentaje de tierras agrícolas	El porcentaje del área de las unidades hidrográficas y franja ribereña que se encuentra actualmente bajo usos agrícolas. Incluye cultivo de granos básicos y hortalizas.

P_poblado	Porcentaje de poblado	El porcentaje del área de las unidades hidrográficas y franja ribereña ocupada por zonas pobladas. Incluye zonas urbanas y rurales.
PRD	Riqueza de densidad de parches	Número de diferentes tipos de parches presentes en las unidades hidrográficas y franja ribereña, estandarizado a 100 ha. La ecuación se expresa como $PRD = m/A (10000 \text{ m}^2) * (100 \text{ ha})$, donde: m = número de distintos tipos de parches; A= área.
SHDI	Índice de diversidad de Shannon	Indica la diversidad de parches en el paisaje. Es calculado con base en el número de tipo parches (usos y cobertura) presentes y el área relativa de cada paisaje. $SHDI = -\sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i)$, donde P_i es la proporción del paisaje ocupado por cada tipo de parche.

Fuente: Mcgarigal y Marks (1995).

Además, se calcularon las áreas de pastizales, cultivos permanentes arbóreos y plantaciones arbóreos. Sin embargo, estas no se incluyeron como parte de las variables del estudio, debido que las áreas ocupadas por dichos usos no eran representativas.

Se calculó las distancias de los usos y cobertura de la tierra más cercana con respecto a los 55 puntos de muestreo de agua. El proceso se realizó mediante el programa ArcGist 2.0, con la extensión de análisis *Proximity* y el comando *Generate near table*, incluyendo como datos de entrada los puntos de muestreo y el mapa de uso y cobertura de la tierra de las unidades hidrográficas, incluyendo las opciones *location* y *find only closest feauture*. Posteriormente, se realizó un proceso de depuración de datos, dado que el programa selecciona todos los atributos más cercanos, incluyendo aquellos que se ubican aguas abajo del punto de muestreo, y desde el punto de vista hidrológico y para el propósito de esta investigación, no contribuyen con el objetivo planteado, por lo que se descartaron los datos, dejando únicamente aquellos atributos ubicados aguas arriba de la toma de muestra. Finalmente, la distancia se calculó entre el borde final de la franja ribereña y el borde del parche más cercano. En el cuadro 5 se detallan las variables de distancias calculadas.

Cuadro 5. Variable de distancias de los usos y cobertura de la tierra más cercana con respecto a los puntos de muestreo de agua

Código	Descripción	Observaciones
D_bosque	Distancia al bosque más cercano	Mide la distancia, en línea recta, del borde de la franja ribereña al borde más cercano del parche de bosque localizado aguas arriba del punto de muestreo de agua.
D_arbusto	Distancia al arbusto más cercano	Mide la distancia, en línea recta, del borde de la franja ribereña al borde más cercano del parche de vegetación arbustiva localizado aguas arriba del punto de muestreo de agua.

D_agrícola	Distancia al uso agrícola	Mide la distancia, en línea recta, del borde de la franja ribereña al borde más cercano del parche de uso agrícola localizado aguas arriba del punto de muestreo de agua.
D_poblado	Distancia a las zonas pobladas	Mide la distancia, en línea recta, del borde de la franja ribereña al borde más cercano de las zonas pobladas localizadas aguas arriba del punto de muestreo de agua.

A continuación se muestra, a manera de ejemplo, el croquis de los puntos de muestreo, franja ribereña delimitada, y el uso y cobertura de la tierra en la unidad hidrográfica (figura 3).

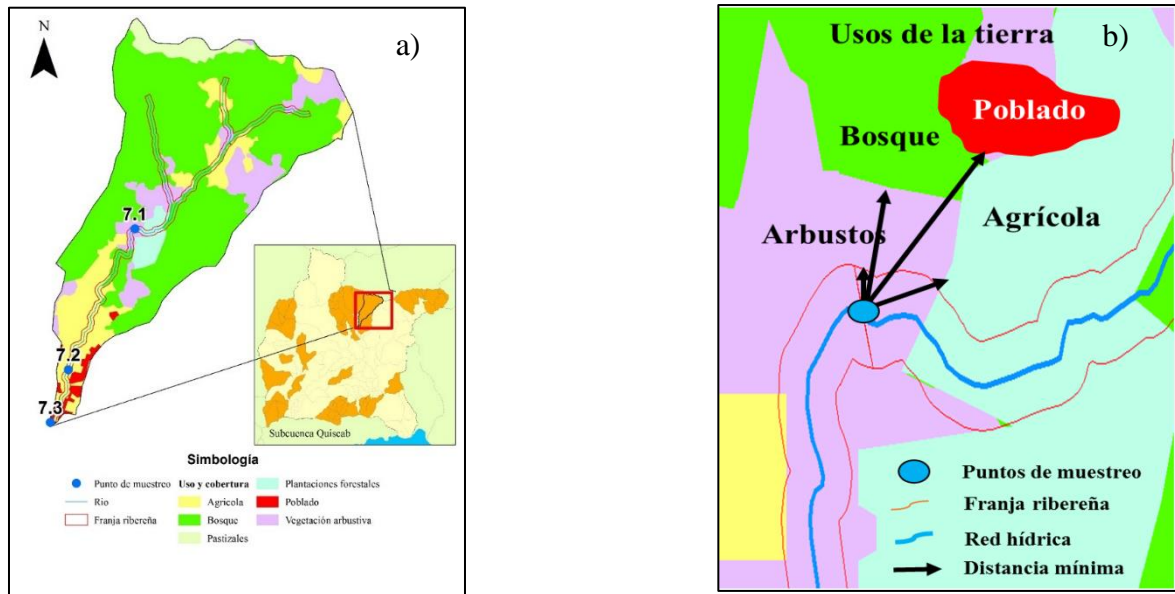


Figura 3. Croquis de los puntos de muestreo, franja ribereña, uso de la tierra en las unidades hidrográficas (a) y distancias entre puntos de muestreo y uso de la tierra adyacente (b)

2.4. Análisis de la información

2.4.1. Índice de calidad de agua (ICA)

El índice de calidad del agua fue clasificado de acuerdo con las categorías propuestas por Brown (Cuadro 6), una versión modificada del índice de calidad del agua (WQI) de la Fundación Nacional de Saneamiento (ICA-NSF) desarrollado en 1970 (Bonilla *et al.* 2010).

Cuadro 6. Clasificación de la calidad de agua propuesta por Brown

ICA	Calidad de Agua	Color
90 - 100	Excelente	Azul
70 - 90	Bueno	Verde
50 - 70	Regular	Amarillo
25 - 50	Mala	Naranja
0 - 25	Muy mala	Rojo

Fuente: Bonilla *et al.* (2010).

Se realizó un análisis estadístico descriptivo tomando en cuenta el porcentaje de los puntos de muestreo ubicados en las diferentes categorías. El análisis se realizó por época y por sitio de muestreo. Asimismo, se realizó un análisis de varianza, tomando en cuenta la época de muestreo, los niveles (2, 3 y 4) y tipo de cuencas (cuencas e intercuencas) según Pfafstetter, y los valores del ICA de los 55 puntos de muestreo. Una vez identificada la significancia de las variables ($p < 0.05$), se procedió a realizar una prueba de comparación de media de Fisher con una confianza de 95% ($\alpha = 0.05$). Con ello se determinó la época y el nivel de cuencas que presentan las mejores medias del ICA. El análisis se llevó a cabo por medio del programa Infostat (Rienzo *et al.* 2011).

2.4.2. Análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

El ICA indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo, es comúnmente utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo (Bonilla *et al.* 2010). En el cálculo del ICA intervienen nueve parámetros, que, en conjunto, determinan la calidad del agua, sin embargo no queda muy claro qué parámetros influyen significativamente en la calidad.

Dadas estas circunstancias, se planteó la necesidad de identificar los parámetros que influyeron en el ICA. Para ello se realizó un análisis de regresión múltiple bajo el modelo paso a paso, utilizando el programa Infostat. El análisis se realizó por época, para identificar y determinar los parámetros más importantes que explican la calidad del agua según la época de muestreo. En el modelo se seleccionaron únicamente los parámetros que explican la calidad del agua con una confianza de 95% ($p < 0.05$).

El modelo de regresión aplicada fue el siguiente:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_9 X_{9i} + \epsilon_i \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

Y_i = i-ésima observación de la variable dependiente Y (ICA).

β_0 = parámetro desconocido que representa la ordenada al origen de la recta (indica el valor esperado de Y cuando $x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_9 = 0$).

$X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{9i}$ = i-ésimo valor de las variables o explicativas (pH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, cambio de temperatura (ΔT°), nitratos, fosfatos, DBO5).

$\beta_1 \dots \beta_k$ = Coeficiente de regresión (tasa de cambio en Y frente al cambio unitario en X).

ϵ_i = Efecto del error (variación aleatoria o no explicada por el modelo) asociada a la j-ésima observación de Y bajo el nivel X_i .

Previo al análisis de los datos, se realizó una prueba de normalidad por medio del test de Shapiro-Wilks (Shapiro y Wilk 1965) y se transformaron a logaritmo natural los datos de los siguientes parámetros: E. coli, turbidez y DBO5.

2.4.3. Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua

Para determinar la influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua, se utilizaron las variables generadas a partir de la caracterización de la estructura del paisaje, principalmente los porcentajes de uso y cobertura de la tierra y distancias más cercanas entre los puntos de muestreo y los usos de la tierra fuera de la franja ribereña (cuadro 2 y 3).

El análisis se realizó por medio de un modelo de árbol de regresiones, utilizando el paquete estadístico R (R core Team 2013). Se utilizó el algoritmo y librería de randomForest (Breiman 2001; Liaw y Wiener 2002), el cual es una técnica de clasificación y regresión útil para clasificar grandes cantidades de datos con precisión (Walker 2013). Una de las características importantes de esta técnica es la posibilidad de obtener un conjunto de medidas descriptivas que incluyen la matriz de proximidad y la matriz de importancia local (Seoane *et al.* 2014). A través de la matriz de importancia local, el modelo de randomForest clasifica jerárquicamente las variables predictoras más importantes en un árbol de regresiones, tomando en cuenta la medida del error cuadrático medio del modelo (Breiman 2001; Liaw y Wiener 2002). La literatura en randomForest sugiere probar varios modelos debido a que puede existir variaciones en las matrices de la importancia de las variables, lo cual se debe a que randomForest selecciona aleatoriamente un conjunto de atributos para construir los árboles (Seoane *et al.* 2014). Tomando en cuenta esta recomendación, y previo a la selección del modelo, se realizó una aleatorización a través de la generación de 1000 modelos y basado en la combinación de los 1000 posibles se validó y seleccionó al de mayor consistencia (r^2). En el modelo de regresión se utilizó el ICA como variable de respuesta, mientras que para las variables regresoras o explicativas se tomaron en cuenta 12 variables, las cuales se detallan en el cuadro 7.

Cuadro 7. Variables explicativas de la calidad del agua utilizadas en los modelos de regresión

Cobertura y uso (%)	Distancias (m)	Métricas de paisaje	Coordenadas geográficas (UTM)
Bosque	Bosque	Densidad de riqueza de parches (PRD)	X
Vegetación arbustiva	Vegetación arbustiva	Índice de diversidad de Shannon (SHDI)	Y
Agrícola	Agrícola		
Poblado	Poblado		

El modelo randomForest genera una matriz de importancia donde ordena jerárquicamente las variables incluidas en el modelo de regresión, basado en el porcentaje del error cuadrático medio (%ECM); valores más altos indican mayor importancia (Liaw y Wiener 2002). A partir de la matriz de importancia se generó las variables significativas ($\alpha = 0.05$) que explican la calidad del agua, y se determinó a partir de un estadístico Z de una sola cola (1.65). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde:

Z= valor Z asociado con la observación de interés

X = matriz de importancia

μ = media de la matriz de importancia

σ = desviación estándar de la matriz de importancia } Error estándar

n = tamaño de la muestra (grados de libertad)

Para determinar las variables significativas que influyen en la calidad del agua, estas fueron seleccionadas a partir de los valores Z de una sola cola (1.65), los valores de la matriz de importancia fueron transformados a una distribución normal, para obtener las variables significativas ($Z > 1.65$; $p < 0.05$). Finalmente las variables predictoras se ordenaron en una gráfica de componentes principales. El modelo generó una matriz de proximidad y se convirtió a una matriz de distancias (1-proximidad). Con base en la matriz de distancia se realizó una proyección u ordenación de las variables predictoras. Una vez que se tuvo la ordenación, se obtuvieron los componentes que describen la matriz de distancias y se generó una matriz de covarianzas para las variables predictoras; con la matriz de covarianza se proyectaron las predictoras en la gráfica de componentes principales. Por último, con la función *ordisurf* del paquete “Vegan” de R (Oksanen *et al.* 2013) se proyectó la variable de respuesta (ICA), trazando una superficie de contorno en el diagrama de ordenación.

Los modelos utilizados en la interfaz de R fueron los siguientes:

Franjas ribereñas:

```
RandomForest(ICA~P_Veg_arbustiva+P_bosques+P_Agricola+P_Poblado+D_Veg_arbustiva  
+ D_bosques+D_Agricola+D_poblado+PRD+SHDI+Época+X+Y, strata=ID,  
proximity=TRUE, importance=TRUE, data=B_datos)
```

Unidades hidrográficas

```
RandomForest(ICA_total~P_bosque+P_arbusto+P_agricola+P_poblado+D_bosques+D_arbus  
to+D_agricola+D_poblado+PRD+SHDI+X+Y+Época, proximity=TRUE, importance=TRUE,  
data=Bdatos_uhidrografica)
```

En el modelo de franjas ribereñas se realizó una estratificación (strata=ID), para agrupar los datos por unidades hidrográficas, tomando en cuenta que en cada río se establecieron repeticiones de muestreos de agua (2 a 3 puntos por río, total 55). En cambio, en el modelo de unidades hidrográficas no fue necesaria la estratificación, dado a que se utilizaron únicamente los datos del punto de salida (24 datos). En ambos modelos se incluyeron datos de las dos épocas de muestreo, por lo que la cantidad total de datos utilizados fueron 110 para franjas ribereñas y 48 para unidades hidrográficas.

3. Resultados

3.1. Índice de calidad del agua (ICA)

Los resultados del índice de calidad de agua de los puntos de muestreo se presentan en el cuadro 8, ordenados de acuerdo con la clasificación propuesta por Brown (Bonilla *et al.* 2010). El resultado indica que, de los 110 puntos de muestreo, el 40% resultaron con calidad buena, 51% con calidad regular, 9% con calidad mala; ningún punto de muestreo obtuvo una calidad excelente (ICA = 90-100), ni calidad muy mala (ICA=0-25).

Cuadro 8. Calidad del agua de todos los sitios de muestreo

Calidad	Buena	Regular	Mala	No. puntos de muestreo
Porcentaje (%)	40	51	9	100
Cantidad	44	56	10	110

Los resultados de todos los sitios de muestreo se muestran en la figura 4, en la cual se observa que la época seca es la que presenta mejor calidad. La distribución de la calidad por época fue de la siguiente manera: en la época seca 58% resultaron con calidad buena y solamente 22% en la época lluviosa; la calidad regular en época seca fue de 35% y 67% en la época lluviosa; la calidad mala en época seca fue de 7% y 11% en la lluviosa. La época lluviosa presenta una calidad menor que en época seca debido a la influencia de turbidez y fosfato en las muestras de agua.

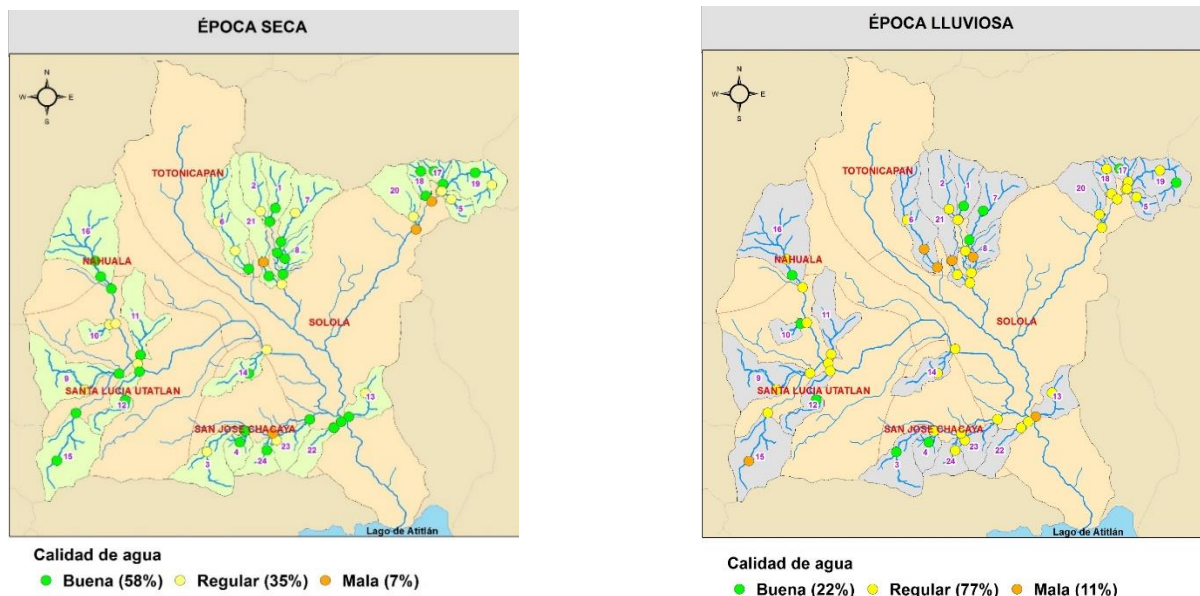


Figura 4. ICA de los puntos de muestreo de la época seca y lluviosa

En el cuadro 9 se presenta la distribución de la calidad de los puntos de muestreo de las unidades hidrográficas, y en la figura 5 se presenta la distribución por unidades geográficas por época.

Cuadro 9. Calidad del agua de todos los puntos de muestreo a nivel de unidades hidrográficas

Calidad	Buena	Regular	Mala	No. puntos de muestreo
Porcentaje (%)	33	57	10	100
Cantidad	16	27	5	48

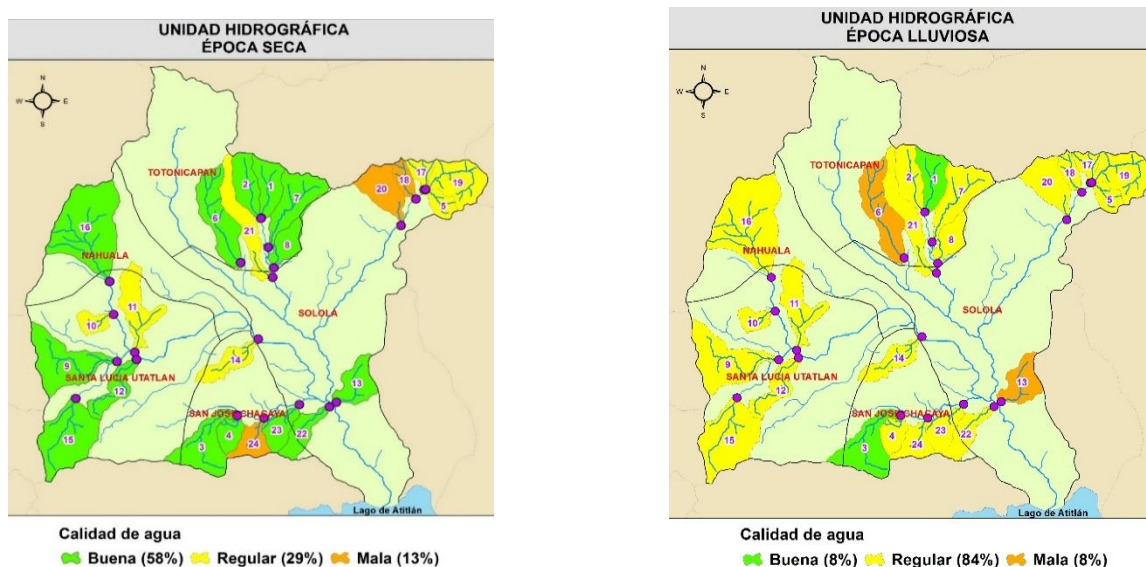


Figura 5. Calidad del agua por unidades hidrográficas en época seca y lluviosa

3.2. Análisis de varianza cuencas Pfafstetter y época de muestreo

El resultado del análisis de varianza indica, con un 95% de confianza, que existe diferencia significativa de los promedios del ICA entre los niveles de cuencas ($p=0.0364$); en cambio, el ICA entre el tipo de cuencas no presentó diferencia significativa ($p=0.3407$). Lo anterior indica que el orden jerárquico de las unidades hidrográficas influye en los promedios del ICA, y no importa si la unidad recibe o no drenaje de otras unidades aguas arriba, que es la característica de los tipos de cuencas Pfafstetter. La prueba de comparación de medias de Fisher ($\alpha=0.05$) muestra que las cuencas con nivel 3 presentan los mejores promedios de índices de calidad de agua (68.73). En el cuadro 10 se presenta el detalle de la prueba de comparación de medias.

Cuadro 10. Comparación de medias del ICA por nivel y tipo de cuencas Pfafstetter

		Medias	Número de datos	Error estándar	
Nivel Pfafstetter	2	65.15	38	1.02	a
	4	65.74	34	1.02	a
	3	68.73	38	1.01	b
Tipo Pfafstetter	Cuenca	65.93	66	0.75	a

Intercuenca	67.14	44	0.93	a
-------------	-------	----	------	---

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En cuanto a la época de muestreo, el análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas entre la época seca y lluviosa ($p=0.0001$). La prueba de comparación de medias de Fisher ($\alpha=0.05$) indica que la época seca presenta los mejores promedios de calidad del agua (69.6). En el cuadro 11 se presenta los datos de la comparación de medias.

Cuadro 11. Comparaciones de medias del ICA por época de muestreo

Época	Medias	Número de datos	Error estándar	
Lluviosa	63.42	55	0.92	a
Seca	69.65	55	0.94	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

3.3. Parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que influyen en índice de la calidad del agua

Los parámetros que influyeron en la calidad del agua varían según la época de muestreo. En cuanto a la época seca, los parámetros que explican significativamente ($p<0.05$) la calidad del agua, ordenados según su importancia (CpMallows), fueron los siguientes: Ecoli ($p<0.0001$; CpMallows=351.3), cambio de temperatura ($p<0.0001$; CpMallows=64.07), DBO5 ($p<0.0001$; CpMallows=52.84), OD ajustado a un modelo cuadrático ($p=0.0004$; CpMallows=20.16) y TDS ($p=0.0225$; CpMallows=11.47). En la época lluviosa, los parámetros influyentes fueron E.coli ($p<0.0001$; CpMallows=269.34), turbidez ($p<0.0001$; CpMallows=42.91), fosfato ($p<0.0001$; CpMallows=27.94) y DBO5 ajustado a un modelo cuadrático ($p=0.0131$; CpMallows=11.51). En el cuadro 12 se presenta el resumen de los modelos y se detalla los coeficientes de regresión y los parámetros estadísticos asociados.

Cuadro 12. Coeficientes de determinación, para cada modelo de regresión múltiple entre los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos con las épocas de muestreo

Época	N	R ² Aj	ECMP	CM error	Modelo
Seca	55	0.98	3.81	2.67	$= 73.04 - 3.27 (\text{Logn ecoli}) - 3.58 (\text{Logn DBO5}) - 0.02 (\text{TDS}) - 0.47 (\Delta T^\circ) + 0.51 (\text{OD}) - 0.0025 (\text{OD})^2$ $= 100.01 - 3.66 (\text{Logn ecoli}) - 1.55 (\text{Logn turbidez}) -$
Lluviosa	55	0.98	5.4	4.17	$8.51 (\text{fosfato}) - 0.075 (\text{Logn DBO5}) - 1.33 (\text{Logn DBO5})^2$

ECMP = Error cuadrático medio de predicción; CM error = cuadrado medio del error

En las figuras 6 y 7 se presentan las gráficas de residuos parciales de los parámetros del modelo ajustado para la época lluviosa y seca. En estas se observa la relación que existe entre los parámetros y el índice de calidad del agua.

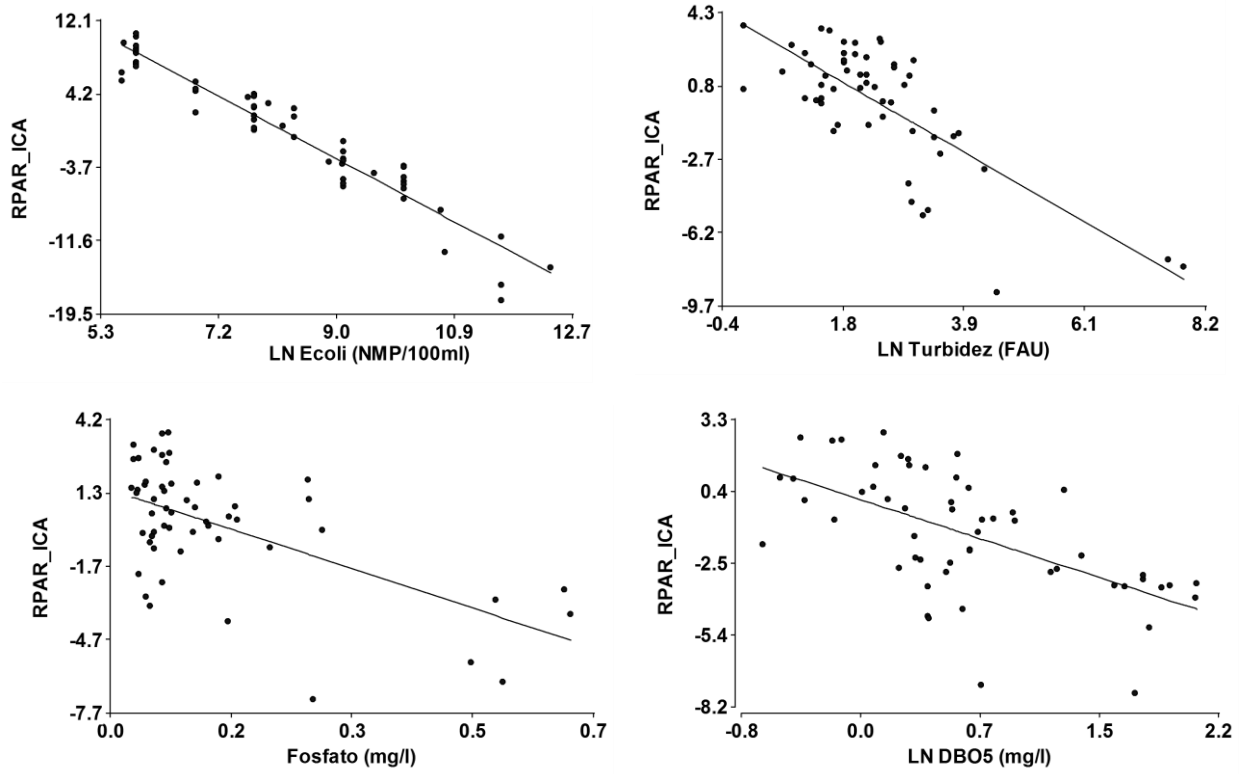
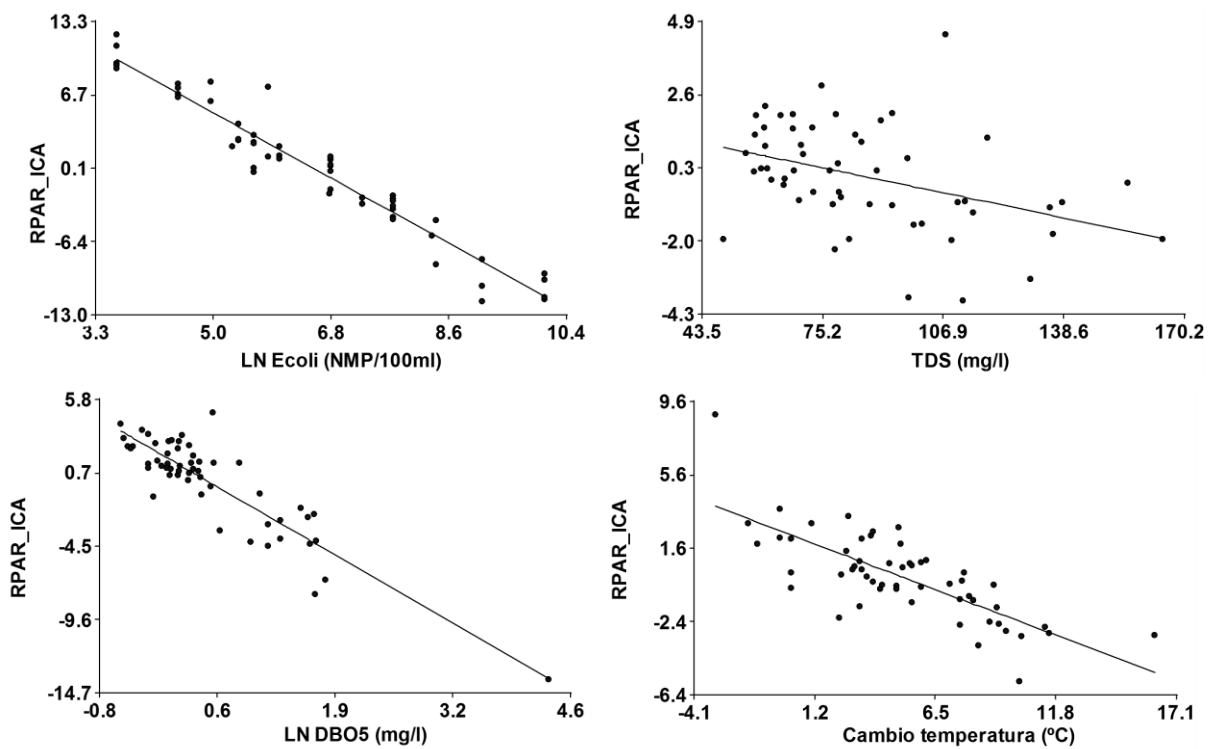


Figura 6. Gráficos de residuos parciales de los parámetros que explican la calidad del agua en época lluviosa. **RPAR_ICA** = Residuos parciales del índice de calidad del agua



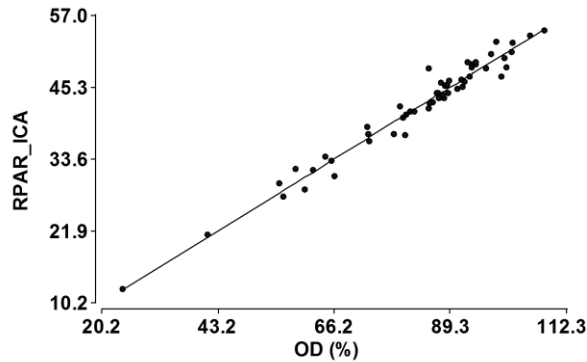


Figura 7. Gráficos de residuos parciales de los parámetros que explican la calidad del agua en época seca

RPAR_ICA = Residuos parciales del índice de calidad del agua

3.4. Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua

El modelo de randomForest implementado para la franja ribereña, presenta un 72.37% de la variabilidad explicada y un $R^2 = 0.807$. La influencia de la franja ribereña en la calidad del agua está determinada por la época de muestreo de agua y el porcentaje del área ocupado por zonas pobladas; mientras que en las variables de paisajes adyacentes, la calidad del agua fue explicada por la distancia del bosque y distancia de la vegetación arbustiva. Las variables más importantes que explican la calidad del agua fueron la época (ECM = 17.4%) y el porcentaje de zonas pobladas (ECM = 15.5%), en el caso de las zonas pobladas, a pesar de que representa una media muy baja ($M=5.4\%$; $EE=1.3$) en relación con los demás usos, su influencia fue muy significativa en la mala calidad del agua ($p<0.0001$). Lo anterior es contrario a lo que ocurrió con la cobertura forestal, a pesar de que ocupa un área más grande ($M=34.5\%$; $EE=3.1\%$), su importancia relativa fue menor (ECM = 9.8%) y no fue seleccionada como variable explicativa por el modelo ($z = -4.61 < 1.96$). Similar situación ocurrió con el porcentaje de arbusto y área agrícola, las cuales fueron excluidas en el modelo como variables explicativas en la calidad del agua, por lo que su efecto pudo haber sido enmascarado debido a la interacción con los otros factores incluidos en el modelo (Nava *et al.* 2016). En el cuadro 13 se presenta un resumen de las variables significativas que explican la calidad del agua a nivel de franja ribereña.

Cuadro 13. Variables que explican la calidad del agua a nivel franjas ribereñas hidrográficas

Variables	n	Media (m)	EE	ECM (%)	Estadístico Z	Valor p
Época	2			17.4	21.6	<0.0001
P_poblado (%)	110	5.4	1.3	15.5	15.0	<0.0001
D_bosque (mts.)	110	197.1	25.8	13.2	6.6	<0.0001
D_arbusto (mts.)	110	361.9	40.6	12.6	4.3	<0.0001

EE: Error Estándar; ECM: Error Cuadrático Medio; n: número de observaciones

Por medio del índice de importancia, basado en el error cuadrático medio (%ECM), generado por el modelo randomForest, se presenta una ordenación jerárquica de las variables importantes (Figura 8), y los valores del estadístico Z para cada variable (Figura 9). Se muestra el estadístico Z para cada variable, valores <1.65 indican variables explicativas.

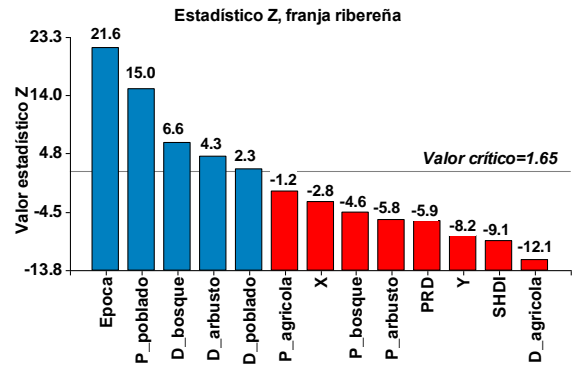
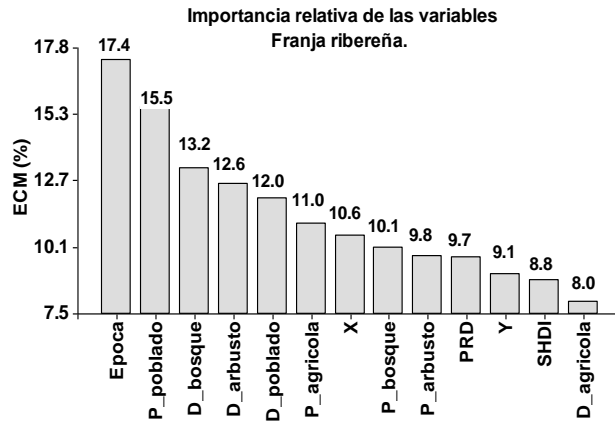


Figura 8.

Figura 9.

Figura 8. Ordenación jerárquica de las variables importantes que explican la calidad del agua a nivel de la franja ribereña.

Figura 9. Estadístico Z de las variables explicativas en la calidad del agua a nivel de la franja ribereña.

Las variables explicativas se ordenaron en un componente principal (Cuadro 14). El eje 1 está correlacionado con las variables: porcentaje áreas pobladas (-0.0653), distancia bosque (-0.1060), distancia arbusto (-0.0595) y la época de muestreo de agua (0.0296). En la gráfica de ordenación (Figura 10) se muestra la relación con el índice de calidad del agua mediante líneas de superficie (*ordisuf*), en la cual se evidencia que el porcentaje de las áreas pobladas, distancia del bosque y arbusto tienen una correlación e influencia en la disminución en la calidad del agua.

Cuadro 14. Valores de componentes principales de la franja ribereña

Variables	Eje 1	Eje 2
P_poblado	-0.0653	0.0524
D_bosque	-0.1060	0.0574
D_arbusto	-0.0595	0.0456
Época	0.0296	-0.0266

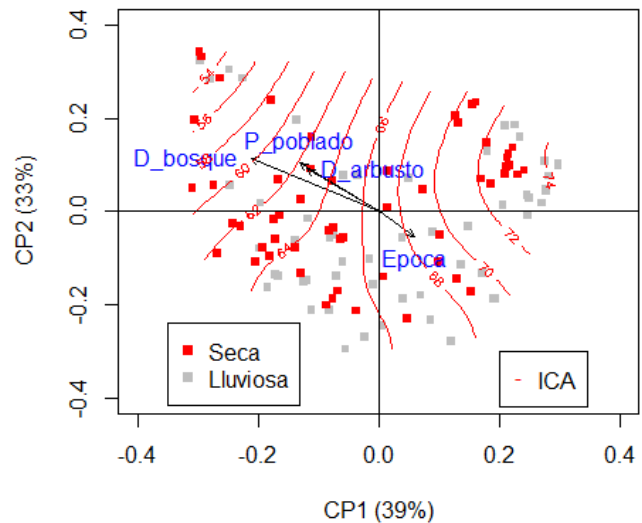


Figura 10. Ordenación de las variables que explican la calidad del agua en la franja ribereña

El análisis a nivel de unidades hidrográficas indica que la calidad del agua es explicada por seis variables: distancia del bosque, distancia de vegetación arbustiva, distancia de poblado, índice de diversidad de Shanon, coordenada UTM X y época de muestreo. La variable con la mayor importancia relativa fue el índice de Shannon (ECM = 10.1%), lo cual indica que la diversidad y heterogeneidad de uso de la tierra afecta la calidad del agua. A diferencia del modelo de las franjas ribereñas, ninguna de las variables de porcentaje y uso de la tierra en la unidad hidrográfica figura como predictora en la calidad. El modelo de randomForest implementado para unidad hidrográfica, presenta un 39.4% de la variabilidad explicada y $R^2 = 0.7231$. En el cuadro 15 se presenta un resumen de las variables significativas que explican la calidad del agua a nivel de franja ribereña.

Cuadro 15. Variables que explican la calidad del agua a nivel de unidades hidrográficas

VARIABLES	n	Media	EE	ECM (%)	Estadístico Z	Valor p
SHDI	24	1.3	0.1	10.1	9.4	<0.0001
D_bosque	24	297.2	45.4	8.6	5.3	<0.0001
D_arbusto	24	307.9	52.6	9.2	6.8	<0.0001
D_poblado	24	261.5	50.8	9.0	6.3	<0.0001
X	24	422579.9	545.9	7.8	2.8	0.0249
Época	2			7.9	3.1	0.0098

EE: Error Estándar; ECM: Error Cuadrático Medio; n: número de observaciones

En la figura 11 se presenta la importancia de las variables a nivel de unidades hidrográficas, ordenadas jerárquicamente (%ECM); en la figura 12 se muestra el estadístico Z para cada variable.

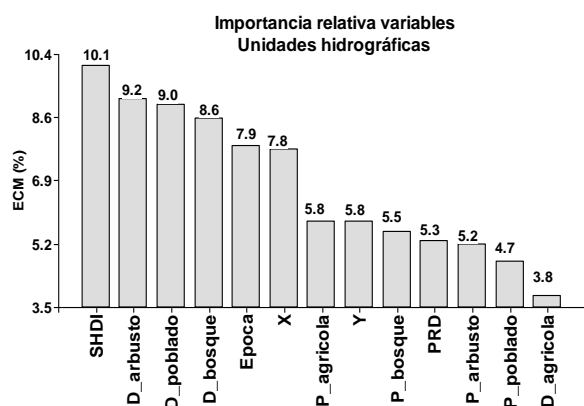


Figura 11.

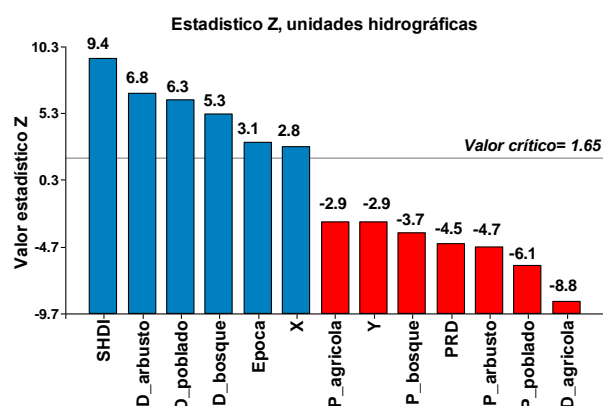


Figura 12.

Figura 11. Ordenación jerárquica de las variables importantes que explican la calidad del agua a nivel de las unidades hidrográficas

Figura 12. Estadístico Z de las variables explicativas en la calidad del agua a nivel las unidades hidrográficas

En el cuadro 16 se presenta las correlaciones entre los ejes de ordenación y las variables que explican la calidad del agua en las unidades hidrográficas. En el eje 1 está correlacionado con la distancia de las zonas pobladas (-0.1100), índice de Shannon (0.1968), época (0.0281) y coordenadas UTM X (0.1739); mientras que el eje 2 está correlacionado con distancia del bosque (0.0828) y distancia del arbusto (-0.1359). En la figura 13 se presenta la ordenación de las variables explicativas y su relación con la calidad del agua (ICA). Los valores del ICA se colocan como una línea de superficie (*ordisurf*).

Cuadro 16. Valores de componentes principales de las unidades hidrográficas

Variables	Eje 1	Eje 2
D_bosque	0.0807	-0.0828
D_arbusto	0.0689	-0.1359
D_poblado	-0.1100	0.0396
SHDI	0.1968	0.0621
Época	-0.0360	0.0281
X	0.1739	0.0843

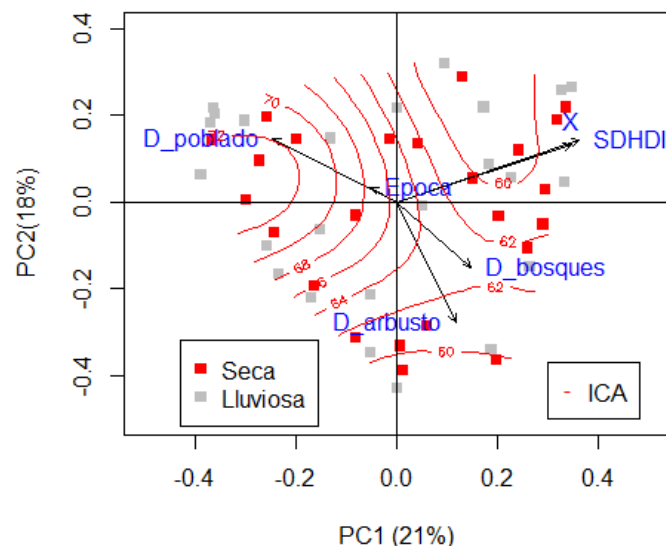


Figura 13. Ordenación de las variables que explican la calidad del agua en las unidades hidrográficas

4. Discusión de resultados

4.1. Índice de calidad del agua

El Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que agua en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100% (Bonilla *et al.* 2010). Para determinar la calidad del agua se han desarrollado diversos índices (Landwehr y Deininger 1976; Cude 2001; Fernández y Solano 2005), el más utilizado es el desarrollado por la Fundación Nacional de Sanidad de Estados Unidos (NSF, por sus siglas en inglés) (Brown *et al.* 1970). La NSF clasificó la calidad del agua de la siguiente manera: excelente (ICA 90-100), buena (70-90), regular (50-70), mala (25-50) y muy mala (ICA 0-25) (Brown *et al.* 1970; WRC 2014). A pesar de que el ICA es utilizado a nivel mundial para determinar la calidad de diversos cuerpos de agua, también tiene sus limitaciones, ya que proporciona un resumen de los datos y no proporciona información completa sobre la calidad del agua (Torres *et al.* 2009); por ello debe ser reforzado con normas específicas, dependiendo los usuarios del agua.

De acuerdo con la clasificación del ICA-NSF, la calidad del agua de los ríos de orden 1 y 2 de la red hídrica de la cuenca Quiscab se ubican dentro de la categoría buena (40%) y regular

(51%), con algunos puntos en condiciones malas (9%). Lo anterior indica que los ríos de primer y segundo orden, pueden ser considerados como fuentes de agua para consumo humano (FAO 2006); aunque en época lluviosa baja considerable la calidad, lo cual se debe a la influencia de la escorrentía (Pejman *et al.* 2009). En general, la calidad “buena” puede ser usada para consumo humano con una ligera purificación, ideal para recreación y actividades agrícolas; la calidad “regular” puede ser usada para abastecimiento público, sin embargo requerirá un pretratamiento ya que existe la posibilidad de presencia de bacterias, para uso recreacional se deben tomar precauciones y es utilizable para la mayoría de los cultivos. La calidad “mala” no es recomendable para consumo humano, y con uso restringido para actividades recreacionales y agrícolas (Hallock 2002; WHO 2003; WHO 2006; EMVOTMA y DINAMA 2010).

Los usos de la tierra son considerados como los principales factores que influyen en la calidad del agua (Fisher *et al.* 2000; Auquilla *et al.* 2006). En el caso del río Quiscab, los puntos de muestreo de agua ubicados en bosques con poca perturbación antropogénica favorecieron la calidad del agua; de hecho, la FAO (2009) menciona que la cobertura forestal es el modo más efectivo para la conservación de la calidad del agua. Si bien la cuenca del río Quiscab está categorizada como fragmentada (Mcintyre y Hobbs 1999), aún se conservan los bosques, principalmente en la parte alta de la cuenca. En este sentido, las reservas privadas comunitarias son una de las estrategias más importantes para la conservación del bosque en el área de estudio, tal es el caso de la reserva natural “Corazón del bosque” y un área conocida como montañas de María Tecún, ambas consideradas como áreas prioritarias para la conservación (UVG *et al.* 2003). Otro de los factores que ha influido en la conservación del bosque es la topografía del área, dado a que existen pendientes mayores a 75% (MAGA 2013b), donde no es posible implementar cultivos ni mucho menos establecer zonas pobladas.

Por otro lado, los usos agrícolas son considerados como fuentes de contaminación no puntual, principalmente por la descarga de residuos de nutrientes (Bartram 1996; Lawniczak *et al.* 2016). En la cuenca del río Quiscab, la agricultura es una de las principales actividades de la población (MAGA 2011), situación que afecta la calidad del agua en la cuenca del río y por ende al Lago de Atitlán; se estima que el río Quiscab aporta al lago aproximadamente el 55% de nitrógeno y 59% fósforo producto de las actividades agrícolas en la cuenca (ULA 2014). A pesar de ello, en este estudio no se evidencia un aporte significativo de los usos agrícolas a la contaminación del agua, ya que se encontraron contenidos bajos de nitrato y fosfato. De hecho algunos puntos ubicados en paisajes agrícolas presentan calidad buena, especialmente en época seca, y por otro lado, únicamente el fosfato influyó en la calidad del agua en época seca. Reyes (2012) encontró similares resultados en los ríos de montaña, característica de los ríos de orden 1 y 2, en el cual indica que la contaminación por nutrientes es mínima y concluye que dicha situación pudo deberse a la presencia de perifiton (hongos, bacteria) que retiene altas cantidades de nutrientes.

La urbanización es otro de los usos que contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua (Dourojeanni y Jouravlev 1999; Riemann *et al.* 2004), situación que se logró evidenciar

en el presente estudio, debido a que los resultados de la calidad del agua fueron condicionados, en gran parte, por la presencia de *E. coli* en las muestras de agua; por lo tanto, las zonas pobladas influyeron en la baja calidad del agua, debido a la descarga de aguas residuales a los ríos. Investigaciones anteriores realizadas por Reyes (2012) y Padilla (2010) confirman que las zonas pobladas son uno de los factores que afectan la calidad del agua en la cuenca. Autores como Dourojeanni y Jouravlev (1999), Nava *et al.* (2016) y Escobar (2002), señalan que las descargas de aguas servidas en los cuerpos de agua cercanos a las zonas urbanas son los principales contaminantes de los cuerpos de agua; los mismos autores coinciden que el aumento de descargas, tanto en volumen como en grado de concentración de los elementos contaminantes, es producto de una debilidad en el sistema de tratamiento.

Si bien la incidencia de *E. coli* influyó significativamente en la baja calidad del agua, únicamente 9% de los puntos de muestreo fueron clasificados como calidad mala, calidad que no es recomendable para consumo humano (WHO 2006). Contrario al resultado de Padilla *et al.* (2010), donde en el 100% de los sitios de muestreo se concluyó que ninguno era apto de forma directa para consumo humano, a su vez, indicó que puede utilizarse para el riego pero restringiendo su uso a los cultivos que sufren cocción. Cabe resaltar que la diferencia entre el estudio realizado por Padilla y el presente estudio radica en el orden de ríos muestreados y la ubicación de los puntos; ya que Padilla realizó el estudio en la parte media y baja de la cuenca, donde la incidencia de zonas pobladas es mucho mayor.

La calidad del agua superficial en las cuencas hidrográficas tiene un efecto temporal, es decir, la calidad varía dependiendo de la época de muestreo (Ouyang *et al.* 2006; Offem *et al.* 2011). En el caso de la cuenca del río Quiscab, la época lluviosa fue la que presentó los menores índices de calidad en comparación con la época seca. Resultados similares fueron encontrados por un estudio realizado por Offem (2011), en el cual se concluye que los mejores promedios en la calidad del agua se dio en época seca. Según Ouyang *et al.* (2006), las variaciones temporales de la contaminación de los ríos se da debido a los aportes naturales o antropogénicos de fuentes puntuales o no puntuales. Los parámetros que explican la calidad del agua varían dependiendo la época, mientras algunos pueden ser importantes en una época y pueden no serlo en otra época (Ouyang *et al.* 2006). Sin embargo, algunos parámetros pueden ser influyentes independientemente de la época, tal es el caso del *E. coli* y DBO5, los cuales fueron los más influyentes en la baja calidad del agua en ambas épocas de muestreo. Lo anterior se debe a la presencia de poblado en el área de estudio (Hach *et al.* 1997; Muñoz *et al.* 2012), por lo que estos parámetros debieran ser de atención prioritaria en monitoreos futuros y en la planificación de acciones de manejo de la cuenca (Auquilla *et al.* 2006).

En época lluviosa, la calidad del agua es influenciada por la escorrentía, condición que hace que varíen los parámetros que explican la calidad del agua (Pejman *et al.* 2009). El arrastre de sedimentos o nutrientes producto de los usos agrícolas y la limitada práctica de conservación de suelos son factores que influyen en la mala calidad del agua, por lo tanto, las actividades antropogénicas contribuyen en las condiciones de las aguas en los ríos. Por un lado, el arrastre

de sedimentos incrementa la turbidez, que es común en esta época debido las actividades agrícolas y posibles deslizamientos en las partes altas de la cuenca (MPCA 2008); y por otro lado, la escorrentía favorece la deposición de residuos de nutrientes en los cuerpos de agua, principalmente fosfato y nitrato, producto de las actividades agrícolas y actividades domésticas (UNEP 2008). De hecho, más de 30% del área de estudio (24 unidades hidrográficas) está ocupada por paisajes agrícolas con altos usos de fertilizante fosforado y nitrogenado, situación que ha afectado la calidad del agua.

Para minimizar los efectos de la contaminación, es necesaria la implementación de buenas prácticas agrícolas incluyendo técnicas de conservación de suelos, tales como: construcción de terrazas, mejorar la cobertura de las franjas ribereñas, mejorar las técnicas de manejo y uso de fertilizantes, control de sedimentos y erosión (Cecon 2003; Sharpley *et al.* 2006; EPA 2016). Estas prácticas, son esenciales para reducir los efectos de la contaminación, principalmente en época lluviosa, dados los efectos de la escorrentía (Bartram 1996).

4.2. Influencia de la franja ribereña y paisajes adyacentes en la calidad del agua

El efecto de los usos del suelo cercanos a las fuentes de agua influyen en la calidad del agua, esto es ampliamente aceptado y estudiado (Basnyat *et al.* 2000; Fisher *et al.* 2000; Da Trinidad *et al.* 2011; Silva *et al.* 2012), tanto a nivel de franjas ribereñas (Krueper 1993; Connolly *et al.* 2015), así como a nivel de cuencas (Jones *et al.* 2001).

En términos paisajísticos, la franja ribereña versus la unidad hidrográfica representa dos escalas espaciales para cuantificar indicadores de paisaje (Gergel *et al.* 2002), vinculadas al análisis de calidad de agua (Moreno-Mateos *et al.* 2008; Shen *et al.* 2015). Recientemente, la configuración espacial de los usos del suelo y su relación con la calidad del agua también se han empezado a considerar a través del uso de métricas de paisaje (Uemaa *et al.* 2007). Por ejemplo, Lee *et al.* (2009) indican que la calidad de los cuerpos de agua está estrechamente asociada tanto con las proporciones del uso de la tierra como con la configuración de la agricultura urbana y las áreas forestales; en tanto, Tran *et al.* (2010) indican que la franja ribereña es importante para la calidad del agua, dado que es una zona de conexión entre el ecosistema terrestre y acuático, y entre procesos que ocurren a diferentes escalas espaciales.

El análisis realizado a nivel de franja ribereña evidencia que la mala calidad del agua está altamente influenciada por el porcentaje del área ocupado por zonas pobladas; Reyes (2012) y Padilla (2010) encontraron resultados similares en el río Quiscab, en donde indican que, efectivamente, las áreas pobladas influyen en la mala calidad del agua. De hecho, en muchas investigaciones se ha comprobado que la urbanización afecta la negativamente la calidad de los cuerpos de agua (Riemann *et al.* 2004). La presencia de coliformes fecales, producto de los vertidos de aguas residuales, es uno de los contaminantes más frecuentes, sumado a ello, el mal manejo y regulación de las aguas residuales afecta las condiciones ecológicas de los ríos (Nava *et al.* 2016).

Por otra parte, la cobertura forestal de la franja ribereña no fue considerada como una variable explicativa en la calidad del agua, a pesar de contar con alto porcentaje en relación con los demás usos del suelo en la franja ribereña (52%). Esto contradice lo indicado por la literatura e investigaciones al respecto, ya que se considera que la cobertura forestal de la franja ribereña desempeña un papel importante en la conservación de la calidad del agua (Fischer y Fischenich 2000; Ceccon 2003; Fernandes *et al.* 2014). Uno de los factores que pudo haber incidido fue el efecto de las zonas pobladas, dada a la alta incidencia de *Escherichia coli*. Entry *et al.* (2000) encontraron resultados similares y concluyeron que la alta incidencia de coliformes vegetales limita la efectividad de la vegetación en la retención de contaminantes. En la misma línea, Nava *et al.* (2016), indican que la efectividad de las franjas ribereñas en la conservación de la calidad del agua depende del nivel de perturbación antropogénica, especialmente la presencia de zonas urbanas. Por lo anterior se concluye que los bosques ribereños no son suficientes para contrarrestar los efectos de la contaminación del agua en el río Quiscab.

No obstante, el papel del bosque, incluyendo la vegetación arbustiva, en la calidad del agua está dado por su ubicación en el paisaje adyacente medido a través de la distancia entre los ríos y los parches de bosques más cercano, por lo tanto, mientras más distantes estén ubicados los parches de bosques y arbustos de los ríos, la calidad del agua tiende a ser inferior. Visto desde otra perspectiva, mientras más conectados estén los bosques adyacentes con los bosques ribereños, la calidad del agua es mejor. Según la FAO (2009), el uso de la tierra más efectivo para la protección de los cuerpos de agua contra erosión, sedimentación y otros contaminantes es un bosque sin perturbaciones, debido a que la conversión de un bosque continuo a bosque remanente influye en la calidad del agua (Tran *et al.* 2010). Lo anterior permite concluir que mantener un bosque intacto (Mcintyre y Hobbs 1999) en el paisaje adyacente a los ríos es necesario para la conservación del agua.

Lee *et al.* (2009) indican que la calidad de los cuerpos de agua está estrechamente asociada tanto con las proporciones del uso de la tierra, así como con la configuración de la agricultura urbana y las áreas forestales, sin embargo, no todos los usos son relevantes, es decir no todos los usos del suelo explican la variabilidad. Por ejemplo, Nava *et al.* (2016) realizaron un estudio sobre la influencia de factores de paisaje en la calidad del agua, en el cual encontraron que los usos agrícolas no influyeron en los resultados; ante tal situación, indican que su efecto pudo haber sido enmascarado debido a la interacción con los otros factores de paisajes incluidos en el análisis (Nava *et al.* 2016). En este caso, el efecto de las zonas pobladas pudo haber incidido para que tanto el porcentaje de bosque, así como el porcentaje de áreas agrícolas, no hayan sido tomados en cuenta como variables explicativas de la calidad del agua.

Mejorar la efectividad de la franja ribereña para la conservación de la calidad del agua, no solo implica un buen manejo forestal, sino también del manejo de la matriz del paisaje adyacente (Ceccon 2003). Especialmente en mejorar la infraestructura para el tratamiento de aguas

residuales, incrementar la cobertura forestal tanto de la franja ribereña como en los paisajes adyacentes, e implementar prácticas de conservación de suelos, entre otras.

La época de muestreo fue una de las variables que influyó en la calidad del agua, tanto a nivel de franja ribereña, así como a nivel de unidades hidrográficas, la tendencia es similar: en la época seca es mejor la calidad en comparación con la época lluviosa. Lo anterior indica que la calidad del agua en el río Quiscab tiene una dependencia temporal y espacial (Alberto *et al.* 2001; Chang 2005; Tran *et al.* 2010; Khalil 2015).

A nivel de unidades hidrográficas, la predicción realizada por el modelo randomForest indica que la diversidad de uso del suelo es el factor más importante que afecta significativamente la calidad del agua, a mayor diversidad menor es la calidad de agua. Este resultado contradice lo encontrado por Haung (2013), quien concluye que el incremento en la diversidad de uso favorece la calidad del agua. Sin embargo, otros autores respaldan los resultados obtenidos, tal es el caso de Lee *et al.* (2009), quienes mencionan que la calidad del agua es más probable que se degrade cuando hay una fuerte intercalación de diversos tipos de uso del suelo y cuando existe un gran número de diferentes tipos de uso de la tierra dentro de una cuenca. De igual forma, Riemann *et al.* (2004) coinciden en que la diversidad de uso de la tierra en las cuencas hidrográficas es indicador de fragmentación en el paisaje y afecta la calidad del agua. Estudios realizados por Xia *et al.* (2012) y Shen *et al.* (2015) sobre la influencia del paisaje en la calidad del agua encontraron que, efectivamente, la fragmentación afecta la calidad del agua. Coincidentemente, el 46% de las unidades hidrográficas seleccionadas están en la categoría de fragmentado (10-60% cobertura forestal) y 21% en la categoría relictual (<10% de cobertura forestal), según la clasificación de McIntyre y Hobbs (1999).

La distancia entre el punto de muestreo de agua y la ubicación de las zonas pobladas en el paisaje adyacente es una de las variables que explicó la calidad del agua, en este sentido, mientras más alejado está el poblado del río, la calidad del agua es mejor. Un estudio realizado por Osborne y Wiley (1988) encontró resultados similares, en el cual concluyeron que la distancia entre áreas urbanas y los ríos fue la variable más importante en la predicción de concentración de nitrógeno y fósforo en el agua. En el caso del río Quiscab, uno de los factores que, posiblemente, contribuye a este hallazgo es la utilización de letrina o pozo ciego para la eliminación de excretas por parte de la mayoría de las familias rurales que viven alejadas de los ríos (p.ej. 63% utilizan pozo ciego en el municipio el departamento de Sololá) (INE 2011), lo cual hace que los desechos no sean descargados directamente en los ríos.

5. Conclusiones

Existe un efecto temporal y espacial en la calidad del agua, lo que significa que la calidad depende de la época de análisis y los sitios de muestreo. El *E. coli* es el parámetro que más influyó en la mala calidad del agua, tanto en época seca como lluviosa, pues alcanza niveles de hasta 240×10^3 NMP/100 ml. en sitios con incidencia de poblado. Lo anterior indica que la presencia de poblados afecta significativamente la calidad del agua, producto de las malas prácticas y gestión de aguas residuales. Este resultado influyó para que la cobertura forestal de la franja ribereña pierda su efectividad en la conservación de la calidad del agua.

A pesar de ello, un buen porcentaje de los puntos de muestreo (58% época seca y 22% época lluviosa) se clasifican dentro de la categoría de calidad buena (ICA 70-90). Estos puntos de muestreo se ubican principalmente en la parte alta de la cuenca, donde se conserva buena cobertura forestal con poca o nula influencia de zonas pobladas.

Los usos agrícolas no fueron un factor influyente en la calidad del agua, a pesar de que en época lluviosa el fosfato (indicador de uso agrícola) fue uno de los parámetros que influyó en el índice de calidad. En ambos casos, el efecto directo pudo haber sido enmascarado o subestimado, dada a la interacción con otros usos de la tierra y otros factores de paisaje, particularmente el efecto de las zonas pobladas.

Además, los factores de paisajes adyacentes son las variables que más explican la calidad del agua, es decir la distancia de los bosques, arbustos y poblado; mientras más cerca estén los bosques y arbustos y más alejadas estén las zonas pobladas de los ríos, la calidad del agua tiende a ser mejor. Lo anterior implica no solamente un buen manejo forestal en la franja ribereña, sino también del manejo de la matriz de paisaje adyacente.

Por tanto, la calidad del agua depende mucho de la conectividad y el grado de fragmentación de los bosques. En este sentido, mientras más conectados estén los bosques adyacentes con los bosques ribereños, la calidad del agua es mejor. Un bosque fragmentado con perturbaciones antropogénicas implica una mala calidad en el agua, por lo tanto, mantener un bosque intacto, con poca o ninguna perturbación antropogénica, es necesario para mantener la calidad del agua. En este contexto, la intervención comunitaria ha sido fundamental en la conservación del bosque y por ende en la calidad del agua; ejemplos como la reserva natural “Corazón del bosque” y la conservación de las montañas conocidas como María Tecún son evidencias de la conservación de los recursos naturales en la cuenca del río Quiscab.

6. Literatura citada

- Alberto, WD; María del Pilar, Da; María Valeria, A; Fabiana, PS; Cecilia, HA; María de los Ángeles, B. 2001. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquía river basin (Córdoba–Argentina). (en línea). *Water research* 35(12):2881-2894. Consultado 20 sep. 2016. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135400005923>
- AMSCLAE (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, Guatemala). 2011. El lago de Atitlán: caso cianobacteria mayo 2011 (Diapositiva). Sololá, Guatemala, 19 diapositivas.
- Anderson, JR; Hardy, EE; Roach, JT; Witmer, RE. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. US Government Printing Office. (Geological Survey Professional Paper 964).
- Auquilla, RC; Astorga, Y; Jiménez Otárola, F. 2006. Influencia del uso del suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica. 48:81-92.
- Bartram, J. 1996. Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes. United Nations Environment Programme. 367 p.
- Basnyat, P; Teeter, L; Lockaby, BG; Flynn, KM. 2000. Land use characteristics and water quality: a methodology for valuing of forested buffers. *Environmental Management* 26(2):153-161.
- Bonilla, BL; de los Angeles Gonzales, C; Arias, AY; Chávez, JM. 2010. Metodología analítica para la determinación del índice de calidad del agua (ICA). 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). Eds. M Springer; JMS Chicas. Editorial Universitaria, San Salvador, El Salvador. 19 p.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine learning* 45(1):5-32.
- Brown, RM; McClelland, NI; Deininger, RA; Tozer, RG. 1970. A water quality index - do we are?. *Water Sewage Works*. 339 -343 p.
- Ceccon, E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. *Ciencias* (72):46-53.
- Connolly, N; Pearson, R; Loong, D; Maughan, M; Brodie, J. 2015. Water quality variation along streams with similar agricultural development but contrasting riparian vegetation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 213:11-20.
- Chang, H. 2005. Spatial and temporal variations of water quality in the han river and Its tributaries, Seoul, Korea, 1993–2002. (en línea). *Water, Air, and Soil Pollution* 161(1):267-284. Consultado 20 sep. 2016. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-005-4286-7>
- Da Trinidad, R; Buffon, I; Guerra, T. 2011. Influence of the land use and land cover on the water quality: a method to evaluate the importance of riparian zones. *Ambiente y Agua* 6(1):104-117.
- Dillaha, T; Reneau, R; Mostaghimi, S; Lee, D. 1989. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. 32(2): Disponible en <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=31033&t=3>

- Dindaroğlu, T; Reis, M; Akay, A; Tonguç, F. 2015. Hydroecological approach for determining the width of riparian buffer zones for providing soil conservation and water quality. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(1):275-284.
- Dourojeanni, A; Jouravlev, A. 1999. Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Eaton, A; Franson, M. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. Disponible en <https://books.google.co.in/books?id=buTn1rmfSI4C>
- Entry, JA; Hubbard, RK; Thies, JE; Fuhrmann, JJ. 2000. The influence of vegetation in riparian filterstrips on coliform bacteria: Movement and survival in water. *Journal of environmental quality* 29(4):1206-1214.
- EPA (Environmental Protection Agency, United States). 2016. Agricultural Management Practices for Water Quality Protection. USEPA Watershed Academy Training Module. (en línea). Consultado 06 nov. 2016. Disponible en https://cfpub.epa.gov/watertrain/moduleFrame.cfm?parent_object_id=1362
- Escobar, J. 2002. La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Santiago de Chile, División de Recursos Naturales CEPAL-CELAC, Naciones Unidas. (Serie Recursos Naturales e Infraestructura, v. 50).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma). 2009. Los bosques y el agua. Estudio FAO Montes 155 p.
- Fernandes, J; Souza, Ad; Tanaka, M. 2014. Can the structure of a riparian forest remnant influence stream water quality? A tropical case study. *Hydrobiologia* 724(1):175-185.
- Fernández, N; Solano, F. 2005. Índice de calidad (ICAs) y de contaminación (ICOs) del agua de importancia Mundial, capítulo 3. *In* Índices de calidad y contaminación del agua. Universidad de Panplona Colombia p.40-116.
- Fischer, R; Fischenich, J. 2000. Design recommendations for riparian corridors and vegetated buffer strips. Technical note series. US Army Corps of Engineer Research and Development Center. 17 p.
- Fisher, D; Steiner, J; Endale, D; Stuedemann, J; Schomberg, H; Franzluebbbers, A; Wilkinson, S. 2000. The relationship of land use practices to surface water quality in the Upper Oconee Watershed of Georgia. *Forest Ecology and Management* 128(1):39-48.
- Gayoso, J; Gayoso, S. 2003. Diseño de zonas ribereñas, requerimiento de un ancho mínimo. Universidad Austral de Chile. 12 p.
- Gergel, SE; Turner, MG; Miller, JR; Melack, JM; Stanley, EH. 2002. Landscape indicators of human impacts to riverine systems. *Aquatic Sciences* 64(2):118-128.
- GIMBOT (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, Guatemala). 2014. Mapa de bosques y uso de la tierra 2012 y mapa de cambios en uso de la tierra 2001 - 2010 para estimación de emisiones de gases de efecto invernadero. 16 p.
- Hach, CC; Klein Jr, RL; Gibbs, CR. 1997. Biochemical Oxygen Demand. Hatch Company. (Technical Information Series—Booklet No. 7).
- Hallock, D. 2002. A water quality index for ecology's stream monitoring program. Olympia, Washington State Department of Ecology.
- Hawes, E; Smith, M. 2005. Riparian buffer zones: Functions and recommended widths. Eightmile River Wild and Scenic Study Committee. 15 p.
- IARNA (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala). 2012. Perfil Ambiental de Guatemala 2010-2012. Vulnerabilidad local y creciente construcción de riesgo. 440 p.

- INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2011. Encuesta Nacional de Condiciones de Vida. (en línea). Disponible en <https://www.ine.gob.gt/index.php/estadisticas/tema-indicadores>
- Jones, KB; Neale, AC; Nash, MS; Van Remortel, RD; Wickham, JD; Riitters, KH; O'Neill, RV. 2001. Predicting nutrient and sediment loadings to streams from landscape metrics: A multiple watershed study from the United States Mid-Atlantic Region. *Landscape Ecology* 16(4):301-312.
- Jontos, R. 2004. Vegetative buffers for water quality protection: an introduction and guidance document. Connecticut Association of Wetland Scientists White Paper on Vegetative Buffers. Draft version 1:22.
- Khalil, F. 2015. Temporal and spatial analysis of water quality time series. (en línea). Tesis Ph.D. Ohio, United States. University of Akron. 218 p. Consultado 20 sep. 2016. Disponible en http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=akron1446027770
- Krueper, DJ. 1993. Effects of land use practices on western riparian ecosystems. *Ecology and conservation of neotropical migrant landbirds*: 321-330.
- Landwehr, JM; Deininger, R. 1976. A comparison of several water quality indexes. (en línea). *Water Pollution Control Federation* 48(5):954-958. Consultado 15 oct. 2016. Disponible en http://www.jstor.org/stable/25038981?seq=1#page_scan_tab_contents
- Lawniczak, AE; Zbierska, J; Nowak, B; Achtenberg, K; Grześkowiak, A; Kanas, K. 2016. Impact of agriculture and land use on nitrate contamination in groundwater and running waters in central-west Poland. *Environmental monitoring and assessment* 188(3):1-17.
- Lee, S-W; Hwang, S-J; Lee, S-B; Hwang, H-S; Sung, H-C. 2009. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. (en línea). *Landscape and Urban Planning* 92(2):80-89. Consultado 19 sep. 2016. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169204609000371>
- Liaw, A; Wiener, M. 2002. Classification and regression by randomForest. *R news* 2(3):18-22.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Agricultura, Guatemala); DIGEGR (Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos, Guatemala); IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazz, G. 2013. Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sololá, Guatemala. 1:757-984.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Guatemala); SESAN (Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional, Guatemala). 2011. Diagnóstico de la región de occidente de Guatemala. 114 p.
- McGarigal, K; Marks, BJ. 1995. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. University of Massachusetts and US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station
- McIntyre, S; Hobbs, R. 1999. A framework for conceptualizing human effects on landscapes and its relevance to management and research models. *Conservation biology* 13(6):1282-1292.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, Perú); ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). 2011. Protocolo de monitoreo de la calidad de los recursos hídricos. Lima, Perú, 34 p.
- Moreno-Mateos, D; Mander, Ü; Comín, FA; Pedrocchi, C; Uemaa, E. 2008. Relationships between landscape pattern, wetland characteristics, and water quality in agricultural catchments. *Journal of environmental quality* 37(6):2170-2180.

- MPCA (Minnesota Pollution Control Agency, US). 2008. Turbidity: description, impact on water quality, sources, measures, a general overview. Impaired Waters No. 3.21. Minnesota Pollution Control Agency. Impaired Waters no. 3.21:
- Muñoz, H; Suarez, J; Vera, A; Orozco, S; Batle, J; Ortiz Z, A; Mendiola, J. 2012. Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, Mexico. *Contaminación ambiental*. 28(1):27-38.
- MVOTMA (Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Argentina); DINAMITA (Dirección Nacional de Medio Ambiente, Argentina). 2010. Calidad de agua: índices de calidad de agua (diapositivas). Programa de Formación Iberoamericano en materia de aguas. Ed. L Reolon. Buenos Aires, Argentina, 77 diapositivas.
- Nava, M; Diemont, SA; Hall, M; Ávila, V. 2016. Riparian buffer zone and whole watershed influences on river water Quality: implications for ecosystem services near megacities. *Environmental Processes* 3:277-305.
- Offem, BO; Ayotunde, EO; Ikpi, GU; Ochang, SN; Ada, FB. 2011. Influence of seasons on water quality, abundance of fish and plankton species of Ikwori Lake, South-Eastern Nigeria. *Fisheries and Aquaculture Journal* 13:1-18.
- Oksanen, J; Blanchet, FG; Kindt, R; Legendre, P; Minchin, PR; O'Hara, R; Simpson, GL; Solymos, P; Stevens, MHH; Wagner, H. 2013. Package 'vegan'. Community ecology package, R package version 2.4-1 2(9): Disponible en <https://cran.r-project.org>, <https://github.com/vegandevs/vegan>
- Osborne, LL; Wiley, MJ. 1988. Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed. *Journal of Environmental Management* 26(1):9-27.
- Ouyang, Y; Nkedi-Kizza, P; Wu, Q; Shinde, D; Huang, C. 2006. Assessment of seasonal variations in surface water quality. *Water research* 40(20):3800-3810.
- Padilla, T; García, N; Pérez, W. 2010. Caracterización físico-química y bacteriológica, en dos épocas del año, de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19(3):43-46.
- Palone, RS; Todd, AH. 1997. Chesapeake bay riparian handbook: a guide for establishing and maintaining riparian forest buffers. US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Area State and Private Forestry.
- Pejman, AH; Bidhendi, GRN; Karbassi, AR; Mehrdadi, N; Bidhendi, ME. 2009. Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques. *International Journal of Environmental Science & Technology* 6(3):467-476. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1007/BF03326086>
- Pfafstetter, O. 1989. Classificação de bacias hidrográficas. Manuscrito não publicado. Departamento Nacional de Obras de Saneamento, Brasil.
- Reyes, E. 2012. Uso de macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad de agua en la cuenca del lago Atitlán, Guatemala. Tesis M.Sc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 114 p.
- Richardson, DM; Holmes, PM; Esler, KJ; Galatowitsch, SM; Stromberg, JC; Kirkman, SP; Pyšek, P; Hobbs, RJ. 2007. Riparian vegetation: degradation, alien plant invasions, and restoration prospects. *Diversity and distributions* 13(1):126-139.
- Riemann, R; Riva-Murray, K; Murdoch, P. 2004. Effects of forest fragmentation and urbanization on stream conditions-The development of relevant landscape parameters and source datasets for effective monitoring. *In* Convention of the Society of American Foresters. New York, p.234-235.

- Seoane, JA; Day, IN; Campbell, C; Casas, JP; Gaunt, TR. 2014. Using a random forest proximity measure for variable importance stratification in genotypic data. *IWBBIO* 2014:1049-1060.
- Shapiro, SS; Wilk, MB. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52(3-4):591-611.
- Sharpley, AN; Daniel, T; Gibson, G; Bundy, L; Cabrera, M; Sims, T; Stevens, R; Lemunyon, J; Kleinman, P; Parry, R. 2006. Best management practices to minimize agricultural phosphorus impacts on water quality. ARS-163. Agricultural Research Service. United States Department of Agriculture, Ecosystems & Environment. 52 p.
- Shen, Z; Hou, X; Li, W; Aini, G; Chen, L; Gong, Y. 2015. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. *Ecological Indicators* 48:417-427.
- Silva, DM; Camargo, PB; Mcdowell, WH; Vieira, I; Salomão, MS; Martinelli, LA. 2012. Influence of land use changes on water chemistry in streams in the State of São Paulo, southeast Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 84(4):919-930.
- Strahler, AN. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Civ. Eng* 101:1258-1262.
- Torres, P; Cruz, CH; Patiño, PJ. 2009. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 8:79-94. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242009000300009&nrm=iso
- Tran, CP; Bode, RW; Smith, AJ; Kleppel, GS. 2010. Land-use proximity as a basis for assessing stream water quality in New York State (USA). *Ecological Indicators* 10(3):727-733.
- ULA (Unidos por el Lago Atitlán, Guatemala). 2014. State of the lake 2014. Guatemala, University of Nevada. 40 p.
- UNEP (United Nations Environment Programme, US. 2008. Vital water graphics: an overview of the state of the world's fresh and marine water. (en línea). 2 ed. ed. Disponible en <http://www.unep.org/dewa/vitalwater/article102.html>
- USGS (Geological Survey of United States, US). 2015. Collection of water samples *In* National field manual for the collection of water-quality data. US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chapter A4.
- Uuemaa, E; Roosaare, J; Mander, Ü. 2007. Landscape metrics as indicators of river water quality at catchment scale. *Hydrology Research* 38(2):125-138.
- UVG (Universidad del Valle, Guatemala); TNC (The Nature Conservancy, Guatemala); CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Guatemala); APVM (Asociación Patronato Vivamos Mejor, Guatemala); ARNP (Asociación de Reservas Naturales Privadas, Guatemala). 2003. Diagnóstico cológico-social en la cuenca de Atitlán. Eds. M Dix; I Fortín; O Medinilla; LE Ríos. Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy. 13 p.
- Villaseñor, LA; Cárdenas, FJ. 2014. Análisis de la interacción urbano-social de las áreas riparias de la ciudad de Colima. XI Simposio de la Asociación Internacional de Planificación Urbana y Ambiente (UPE 11)(La Plata, 2014)
- Walker, M. 24 sep. 2013. Random forest algorithm. Data science central, the online resources for big data practitioners (en línea, blog). Consultado 2 sep. 2016. Disponible en <http://www.datasciencecentral.com/profiles/blogs/random-forests-algorithm>.

- Way, C. 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. Water Environment Federation, Secaucus, NJ, USA.
- Wenger, S. 1999. A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation. Office of Public Service & Outreach, Institute of Ecology, University of Georgia.
- WHO (World Health Organization, Geneva). 2003. Guidelines for safe recreational water environments: Coastal and fresh waters. Geneva, Switzerland., World Health Organization. 253 p.
- WHO (World Health Organization, Switzerland). 2006. Guidelines for drinking-water quality: recommendations. First addendum to third edition. 3 ed. World Health Organization.
- WRC (Water Research Center, United States). 2014. Monitoring the quality of surface waters: calculating NSF water quality index (WQI) (en línea). Consultado 07 de julio. Disponible en <http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>.
- Xia, L; Liu, R; Zao, Y. 2012. Correlation analysis of landscape pattern and water quality in Baiyangdian watershed. *Procedia Environmental Sciences* 13:2188-2196.

CAPÍTULO III

Artículo 2: Percepción de los agricultores sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua en el río Quiscab, cuenca del lago Atitlán, Guatemala

Resumen

El estudio tuvo como objetivo determinar la percepción de los agricultores sobre el estado y manejo de las franjas ribereñas y su relación con la calidad del agua en la subcuenca del río Quiscab, cuenca del Lago Atitlán, Guatemala. La información fue recopilada mediante entrevistas semiestructuradas, aplicadas a 77 agricultores, y luego fue estructurada en cuatro temas principales: 1) caracterización de las actividades y prácticas agrícolas, 2) uso actual de la tierra en la franja ribereña, 3) situación actual de contaminación y el 4) rol del bosque ribereño en la calidad del agua. La actividad agrícola en el área de estudio se caracteriza por el uso de tecnología convencional; el 100% de los entrevistados mencionó que utiliza fertilizante químico y únicamente el 9% manifestó utilizar fertilizante orgánico. El 23% indicó que ha recibido alguna asistencia técnica para el manejo y aplicación de agroquímicos, de las casas comerciales que distribuyen los agroquímicos. La percepción acerca de los usos de la tierra en la franja ribereña se distribuyó de la siguiente manera: 50% áreas agrícolas, 38% bosque, 8% construcción y 4% pastizales. El 100% de los entrevistados opinó que los bosques tienen un papel relevante para la conservación de la calidad del agua; el 45% de los agricultores considera que la calidad del agua donde hay bosque ribereño es muy buena, 21% buena, 7% regular, 12% mala (25-50), 3% indicaron que la calidad del agua donde hay bosque ribereño es muy mala (0-25) y 6% no respondieron. El 61% de los agricultores indicó que los desechos sólidos constituyen la principal fuente de contaminación del agua, 32% mencionó las actividades agrícolas y 47% las aguas residuales.

1. Introducción

Las percepciones sociales del ambiente se definen como el conjunto de comprensiones y sensibilidades de una sociedad sobre su ambiente natural (Lazos y Paré 2002; Ramírez e Ibarra 2015). Las mismas se expresan mediante las opiniones de los actores locales, las cuales reflejan su nivel de conocimiento acerca del medio ambiente que los rodea (Arcos *et al.* 2006). Las opiniones expresadas son producto de las experiencias directas de los actores locales sobre el medio ambiente, conjuntamente con la información que recibe el individuo de su medio social (Arizpe *et al.* 1993). Estas determinaciones constituyen sistemas cognitivos en los que es posible reconocer la presencia de opiniones, creencias, valores y normas que tienen las personas sobre el ambiente natural, las cuales van a determinar la orientación de actitudes positivas o negativas con respecto a la conservación de la naturaleza (Bertoni y López, 2010).

Las investigaciones sobre la percepción del ambiente están fundadas en las relaciones sociedad-naturaleza, y su comprensión tiene base a nivel individual y colectivo (Lazos y Paré 2002). Por lo tanto, las decisiones y acciones de una sociedad en relación con el ambiente están basadas en aspectos objetivos y subjetivos, principales premisas del estudio de percepciones (Whyte 1977). El estudio de las percepciones ambientales es un punto de partida con el fin de acercarse a la visión que la gente tiene de la transformación de su entorno natural y de las causas que los explican, posibilitando entender el significado de sus acciones y prácticas actuales (Lazos y Paré 2002; Benez *et al.* 2010). Para empezar a planear acciones en busca de soluciones para ciertos problemas ambientales es necesario conocer, primero, cómo los grupos involucrados perciben las transformaciones del medio, y segundo, cómo los diversos pensamientos se estructuran y se enfrentan al quehacer ambiental (Lazos y Paré 2002).

Recientemente se han publicado varias investigaciones sobre percepciones locales, en temas tales como: servicios ecológicos (Ramírez e Ibarra 2015), medio ambiente y recursos forestales (Peralta *et al.* 2016; Plata y Vega 2016), clima (Cepeda y Vignola 2011), conservación de los recursos naturales (Cruz-Burga 2014), cambio de uso y cobertura de la tierra (Dalle *et al.* 2006), entre otros. Al nivel de franjas ribereñas, Arcos (2006) realizó un estudio sobre la percepción local del papel de los bosques ribereños en la conservación de los recursos naturales, en el cual resalta la importancia de conocer las percepciones de los actores locales para entender los factores que influyen el cambio de uso de la tierra en la franja ribereña, particularmente las razones de la toma de decisión acerca de eliminarla o conservarla. Dalle *et al.* (2006) coinciden en que es necesario realizar un análisis de los factores que influyen en los actores locales en la toma de decisiones sobre el uso del suelo, y conducen a diferentes resultados de conservación.

El río Quiscab es el tributario de mayor drenaje superficial del Lago Atitlán, ocupa el 37% del área total de la cuenca del lago (ULA 2014), lo cual representa un interés particular, dado que la dinámica social, agrícola y ambiental en toda la subcuenca influye directamente en las condiciones actuales del lago (Reyes 2012; ULA 2014). Se estima que el río Quiscab aporta al lago aproximadamente el 55% de nitrógeno y 59% de fósforo producto de las actividades agrícolas en la cuenca (ULA 2014), lo cual es uno de los factores que ha contribuido al florecimiento de cianobacterias en el lago (AMSCLAE 2011; ULA 2014; IARNA 2015).

Además de las actividades agrícolas, la presencia de poblados o comunidades en la cuenca es otro de los factores que ha influenciado en la contaminación de los ríos que desembocan en el Lago Atitlán (Reyes 2012; ULA 2014), debido a la descarga de aguas residuales producto de las prácticas e infraestructuras inadecuadas. La situación a futuro es pesimista debido al crecimiento poblacional, que según la proyección de población, con base en el censo del Instituto Nacional de Estadística del 2002, el departamento de Sololá³ se duplica cada 17 años en función de una tasa de crecimiento anual de 3.9 (MAGA 2011). Esto representa una amenaza para la calidad del agua, ya que la población requerirá más espacios y recursos y, por ende, se

³ Departamento donde se ubican cuatro de las cinco comunidades existentes en la cuenca del río Quiscab: Sololá, Santa Lucía Utatlán, Nahualá, San José Chacayá.

incrementará la contaminación. El involucramiento de los actores locales, principalmente líderes comunitarios y agricultores, en la busca de soluciones es relevante, porque son ellos que toman la decisión final sobre el manejo, protección y conservación de los recursos. En este estudio participaron agricultores de las comunidades ubicadas en la cuenca del río Quiscab, con el fin de generar información primaria y con ello brindar recomendaciones y proponer algunas alternativas para enfrentar los retos que conlleva el cuidado del río y del lago.

2. Materiales y metodología

2.1. Ubicación del área de estudio

El estudio se realizó en la subcuenca del río Quiscab, afluente de la cuenca del Lago Atitlán, departamento de Sololá, Guatemala. Para más detalle, referirse al capítulo II, artículo 1, descripción del sitio (Figura 2).

2.2. Selección de la población y área de muestreo

El área de muestreo corresponde a los cinco municipios y 126 comunidades ubicadas en la cuenca del río Quiscab. Se realizó una estratificación para agrupar los municipios tomando en cuenta el tipo de cultivo de la población; por un lado se agruparon los municipios donde existe cultivo de hortalizas y por otro lado se agruparon los municipios donde predomina el cultivo de granos básicos (maíz y frijol). La estratificación se realizó de la siguiente manera: 1) hortalizas: municipios de Sololá y San José Chacayá, 2) granos básicos (maíz y frijol): municipios de Santa Lucía Utatlán, Nahualá y Tonicapán. La estratificación se realizó con base en el mapa de uso y cobertura de la tierra (Figura 14) y visita a campo.

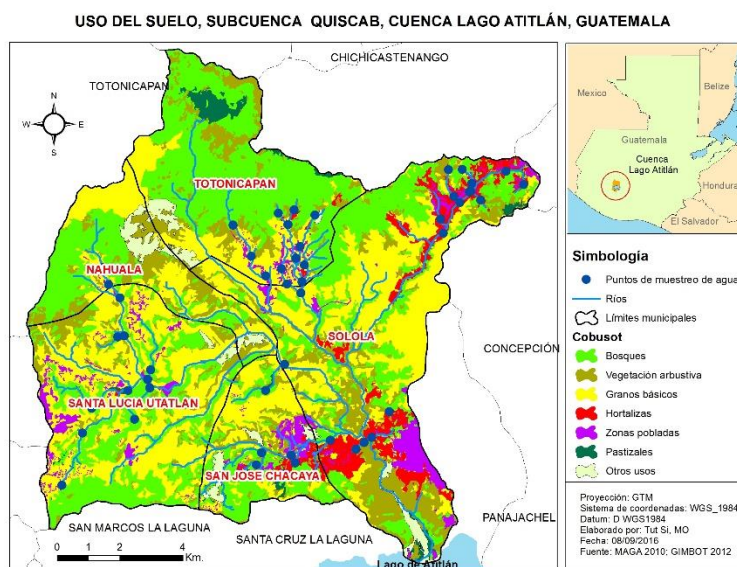


Figura 14. Uso y cobertura de la tierra en la subcuenca del río Quiscab

Para la población meta se consideró un agricultor por comunidad, y la selección final se realizó mediante muestreo aleatorio simple estratificado. La fórmula que se utilizó fue la siguiente:

$$n = \frac{Z^2 \times (P \times Q) \times N}{e^2(N - 1) + Z^2 \times (P \times Q)} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde:

- n** == Tamaño de la muestra
- N** = Número total de comunidades (126)
- p** = Probabilidad de aceptación de hipótesis nula (0.5)
- q** = Probabilidad de rechazo de hipótesis nula (0.5)
- Z** = Nivel de confianza 95% (P (-1.96<z<1.96)=0.95)
- E** = Precisión o error (0.07)

De acuerdo con la fórmula anteriormente descrita, la cantidad de muestra correspondió a 77 unidades muestrales, lo que equivale al número de personas entrevistadas. Una vez determinado el tamaño de la muestra, se calculó la cantidad de entrevistas por estratos, tomando en cuenta la proporción de comunidades en cada estrato. En el cuadro 17 se detalla la cantidad de muestras obtenida.

Cuadro 17. Estratificación de los municipios para entrevistas

Estratos	Municipios	Comunidades		
		Total	%	Muestreo
1	Santa Lucía Utatlán, Nahualá y Totonicapán	63	50	39
2	Sololá y San José Chacayá	63	50	38*
	TOTAL	126	100	77

* Los dos estratos tienen la misma cantidad de comunidades y en teoría deben tener la misma cantidad de muestreo, sin embargo, debido a que la cantidad por estrato es un número impar, existe un desajuste al obtener el 50% para el muestreo final; para ajustar el número total de muestreo (77), se asignó al azar 1 más para el estrato 2.

2.3. Entrevistas para la recolección de información

La información fue obtenida mediante entrevistas semiestructuradas focalizadas (Ander-Egg 1982; Sabino 1992) realizadas a 77 personas, de las cuales 42% son agricultores dedicados a la siembra de hortalizas y 58% son agricultores de granos básicos, principalmente maíz y frijol. La entrevista se estructuró en cuatro temas, según se detalla en el cuadro 18.

Cuadro 18. Estructura de la entrevista semiestructurada

Estructura de la entrevista	Temática	Preguntas relacionadas
1. Caracterización de las actividades y prácticas agrícolas	Tipo y clase de cultivos, aplicación de agroquímicos, tipo de fertilizantes, aplicación de fertilizantes, capacitación sobre uso y manejo de agroquímicos, prácticas de conservación de suelo	¿Qué cultivos produce? ¿Aplica agroquímicos? Si utiliza fertilizantes químicos, ¿qué tipo de fertilizantes utiliza en cada cultivo? ¿Ha recibido alguna capacitación sobre el manejo y aplicación de los productos químicos? ¿Qué institución le ha brindado la capacitación?
2. Fuentes de contaminación	Principales fuentes de contaminación de los ríos y lago.	¿Cuál cree que es la mayor fuente de contaminación del lago? ¿Qué piensa al respecto?
3. Uso actual de la tierra en la franja ribereña	Uso actual de la tierra en la franja ribereña, conservación de bosque, cambio de uso	¿Qué usos generalmente le dan a la tierra que están cerca del río? ¿Implementa algunas prácticas de conservación de suelos? Los que conservan los bosques en la franja ribereña, ¿qué cree que harán con los bosques? En caso de que decidan eliminar el bosque, ¿qué cree que van a hacer con el terreno después? ¿En los últimos 10 años, se han cortado los bosques ribereños en su comunidad? En caso afirmativo, ¿por qué cree que cortan los bosques ribereños?
4. Rol del bosque ribereño en la calidad del agua	Importancia del bosque ribereño, rol del bosque ribereño en la calidad del agua	En la comunidad, ¿cuántos productores cree que conservan bosques cerca de los ríos? ¿Cuál cree que es la mayor importancia del bosque ribereño? ¿Cómo usted clasificaría la calidad del agua donde hay bosque ribereño? ¿Por qué?

3. Análisis de resultados

Los resultados de las entrevistas se analizaron en el programa Infostat (Di Rienzo *et al.* 2011), utilizando tablas de frecuencias, tablas de contingencia y análisis multivariado de datos categóricos con la técnica de análisis de correspondencias.

4. Resultados

4.1. Características de la población entrevistada

De acuerdo con la estratificación realizada, en la figura 15 se observan las características de la población entrevistada. Por una parte, en el lado izquierdo de la gráfica se muestra la configuración del estrato 1, donde se agrupan a los productores de granos básicos provenientes de los municipios de Santa Lucía Utatlán y Totonicapán; se observa que la edad de las personas entrevistadas es mayor de 50 años y la mayoría sin ninguna escolaridad. En la parte derecha de la gráfica se muestra la configuración del estrato 2, caracterizado por productores de hortalizas de los municipios de San José Chacayá y Sololá, con edades que oscilan entre los 20 a 50 años y con un nivel escolar de primaria y básico.

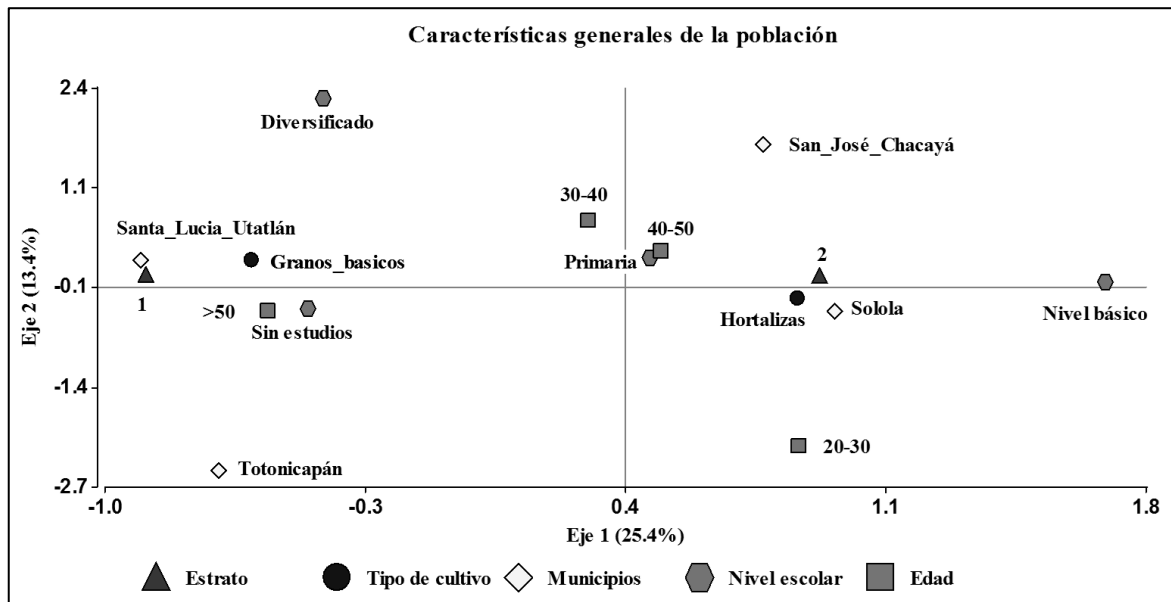


Figura 15. Características generales de la población entrevistada

4.2. Descripción de las actividades y productos agrícolas

El cuadro 19 muestra que existe una diferencia significativa entre los dos estratos y el tipo de cultivo ($p < 0001$), según la prueba de Chi Cuadrado de Pearson. La mayoría de los entrevistados del estrato 1 (76%) se dedica al cultivo de granos básicos, mientras que de los del estrato 2, un alto porcentaje (84%) se dedica al cultivo de hortalizas.

Cuadro 19. Tabla de contingencia de los estratos versus tipo de cultivo de la población entrevistada

Tipo de cultivo	Frecuencia absoluta			Frecuencia relativa		
	Estrato 1	Estrato 2	Total	Estrato 1	Estrato 2	Total
Granos básicos	34	11	45	0.76	0.24	1
Hortalizas	5	27	32	0.16	0.84	1
Total	39	38	77	0.51	0.49	1

Chi Cuadrado Pearson 26.87, p<0001

Según los agricultores entrevistados, los granos básicos son principalmente el cultivo de maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*), mientras que las hortalizas varían, son los más predominantes el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) y zanahoria (*Daucus carota*). Otras hortalizas reportadas por los entrevistados fueron: el repollo (*Brassica oleracea* var. *Capitata*), cebolla (*Allium cepa*), tomillo (*Thymus vulgaris*), rábano (*Raphanus sativus*), ejote (*Phaseolus vulgaris*), lechuga (*Lactuca sativa*), haba (*Vicia faba*), arveja (*Pisum sativum*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*).

El sistema de cultivo es tradicional, con aplicación de fertilizantes químicos. Al respecto, el 100% de los entrevistados indicó que utiliza más de algún tipo de agroquímicos y únicamente el 9% mencionó que utiliza fertilizante orgánico. El tipo de fertilizante que utilizan varía según el tipo de cultivo. Los productores que se dedican al cultivo de granos básicos (estrato 1), en su gran mayoría (97% para maíz) utilizan la fórmula 20-20-0; en cambio, los productores de hortalizas utilizan diferentes tipos de fertilizantes, dependiendo del tipo de cultivo, los más utilizados son el 20-20-0, 15-15-15, 10-50-0 y en menor cantidad urea y fertilizantes orgánicos. En la figura 16 se presenta los diferentes tipos de fertilizantes utilizados, según el tipo de cultivo agrupado por estratos.

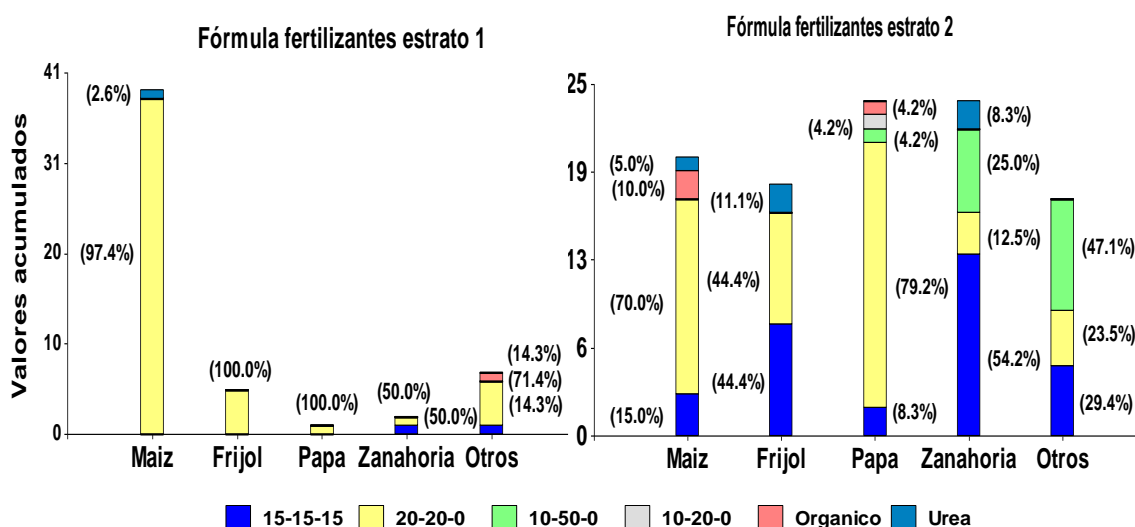


Figura 16. Fertilizantes utilizados por los productores

La frecuencia y forma de aplicación de los fertilizantes depende del cultivo. En el caso de los granos básicos, se aplican dos veces durante el ciclo de cultivo, la primera aplicación se realiza durante los meses de mayo a agosto, y la segunda aplicación de agosto a septiembre, la forma de aplicación es alrededor de la planta. En las hortalizas, la forma y frecuencia varían según el tipo y ciclo de cultivo; regularmente se aplica fertilizante al voleo, algunos en zanjas y aplicaciones foliares.

La aplicación y manejo de fertilizante, generalmente, se realiza de manera empírica; únicamente el 23% del total de entrevistados manifestó que ha recibido capacitación y asistencia técnica sobre la aplicación y manejo de agroquímico, mientras que el 77% no ha recibido ninguna capacitación. Los agricultores de los municipios de Sololá son los que más han recibido asistencia técnica en comparación con Santa Lucía, Nahualá y Totonicapán. En el cuadro 20 se detalla la cantidad absoluta y relativa de entrevistados capacitados en el manejo y aplicación de agroquímicos, agrupado por estratos y municipios.

Cuadro 20. Asistencia técnica en el manejo y utilización de agroquímicos

Estrato	Municipios	Frecuencia Absoluta		Frecuencia relativa (%)	
		Si	No	Si	No
1	Santa Lucía Utatlán,	4	35		
	Nahualá, Totonicapán			10	90
2	Sololá y San José	14	24		
	Chacayá			37	63
Total		18	59	23	77

Chi cuadrado 7.59, p= 0.0059

El 50% de los agricultores que recibieron asistencia técnica fueron capacitados por entidades privadas, principalmente casas comerciales que se dedican a la venta de productos agroquímicos; el 39% de ellos fueron capacitados por organizaciones no gubernamentales (ONG) y únicamente 11% fueron capacitados por entidades gubernamentales. Las entidades privadas han tenido más presencia en los municipios de Sololá y San José Chacayá (estrato 2), donde predomina el cultivo de hortaliza; se resalta la ausencia de entidades gubernamentales en dichos municipios, ya que ninguno de los entrevistados mencionó que haya recibido capacitación de parte de alguna institución gubernamental. En la figura 17 se observa la distribución de las entidades que brindaron la capacitación.

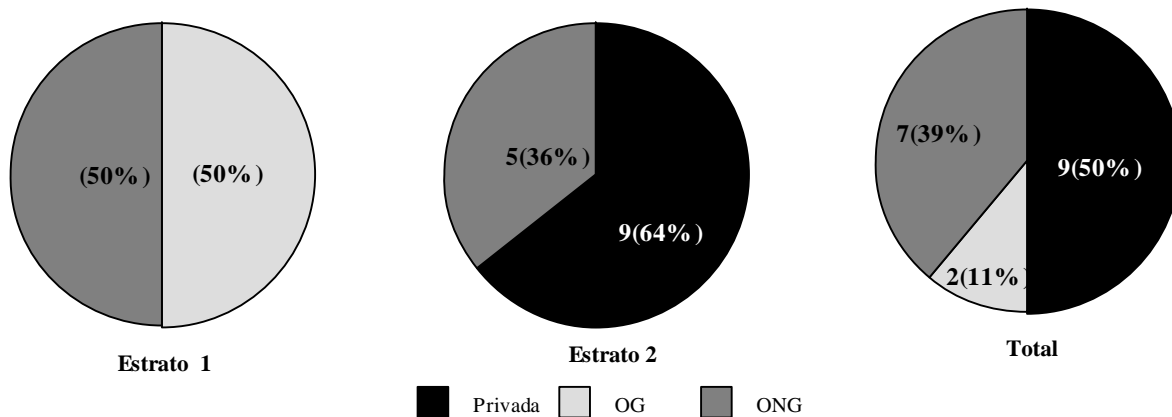


Figura 17. Entidades que brindaron asistencia técnica a productores

En cuanto a las prácticas de conservación de suelo, el 25% implementa barreras muertas, 10% barreras vivas, 3% utiliza abono orgánico y el 62% indicó que no realiza ninguna práctica de conservación de suelo. La distribución anterior se muestra en la figura 18.

Prácticas de conservación de suelos

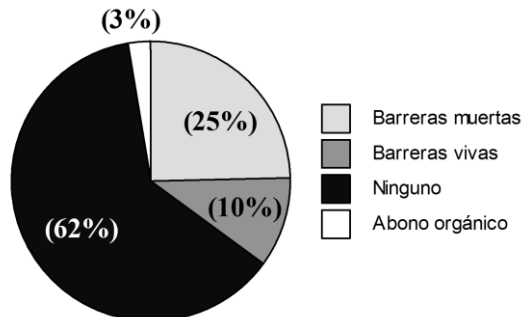


Figura 18. Tipos de práctica de conservación de suelos implementada por los entrevistados

Cabe resaltar que las barreras muertas, la práctica más implementada, son construidas en formas de terrazas, utilizando rocas como materia prima; esta práctica es común debido a la topografía de los terrenos, ya que hay cultivos en pendientes altas (>75%), clasificadas como fuertemente escarpadas (MAGA et al 2013b). El 95% de los entrevistados que implementa barreras muertas son de los municipios de San José Chacayá y Sololá, en los cuales el cultivo de hortalizas es predominante. La mayoría (69%) de los que no realizan ninguna práctica son de los municipios de Santa Lucía Uatlán y Totonicapán, donde el tipo de cultivo predominante son los granos básicos. La relación anterior se presenta en la figura 19, donde se observa la distribución gráfica, según el análisis de correspondencia.

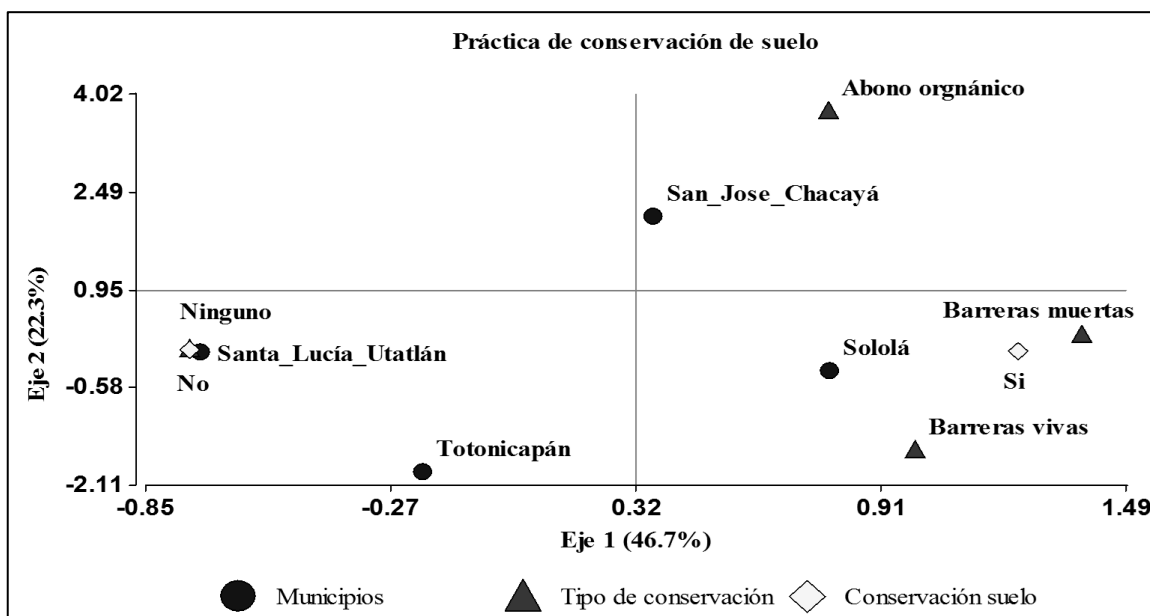


Figura 19. Ordenación de las prácticas de conservación de suelo y su ubicación geográfica en una gráfica de análisis de correspondencia

4.3. Usos y cobertura de la franja ribereña

Los usos y coberturas actuales y futuras de la franja ribereña se muestran en las figuras 20 y 21. En cuanto a los usos actuales, el 50% de los agricultores indicó que los cultivos es el uso predominante en la franja ribereña, mientras que el 38% considera que hay bosque y una minoría opina que hay construcción y pastura (8 y 4% respectivamente). La percepción por estrato es similar que la percepción general, predominando siempre cultivos y bosques.

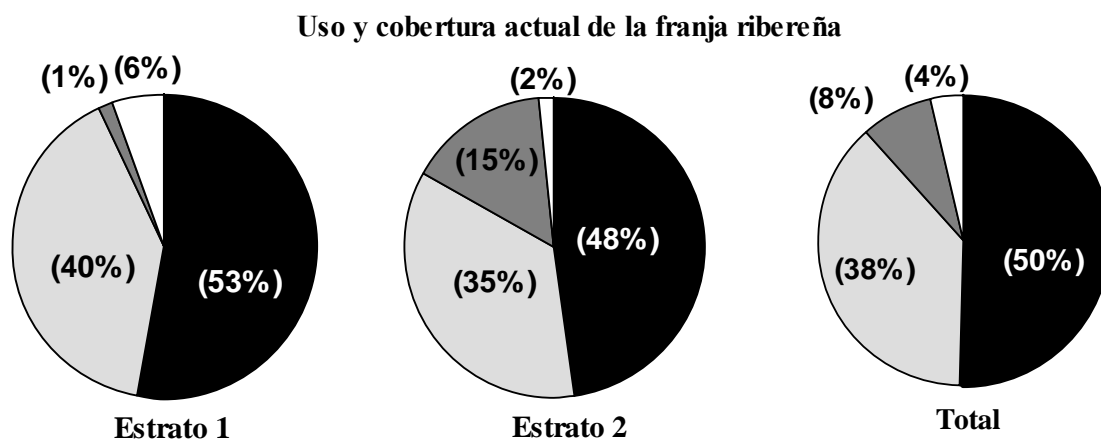


Figura 20. Percepción acerca del uso y cobertura actual de la franja ribereña

En relación con el uso y cobertura en los próximos 10 años (figura 8), el 50% opina que el cultivo seguirá siendo el uso mayor en la franja ribereña, el 24% indica que habrá bosques, un

18% manifiesta que la franja ribereña será ocupada por áreas pobladas (construcciones urbanas), y 1% opina que habrá pastura. Según los entrevistados, habrá una reducción en la cobertura forestal y un incremento en la construcción, es decir habrá una expansión de las áreas pobladas en la franja ribereña.

Uso y cobertura futura de la franja ribereña

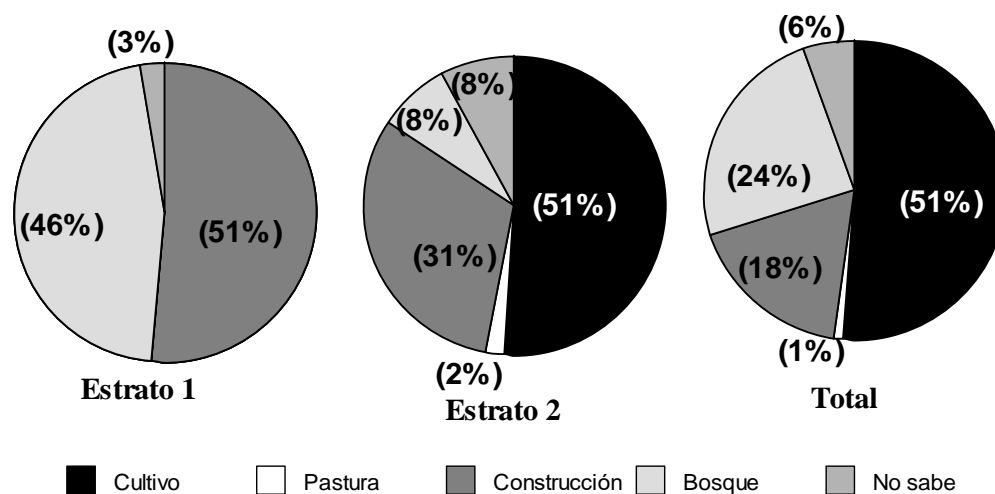


Figura 21. Percepción acerca del uso y cobertura de la franja ribereña en los próximos 10 años

La actividad agrícola es y seguirá siendo el uso predominante en la franja ribereña en los próximos años 10 años. Según los entrevistados existen dos razones principales para ello: 1) por necesidad, y 2) por producción o comercialización. La primera razón es porque los agricultores no tienen suficientes terrenos y no cuentan con otros medios de ingresos, adicionales a los de la agricultura. La segunda es que cultivan hortalizas en la franja ribereña para aprovechar el agua para miniriego y aumentar la producción. Según los resultados de la tabla de contingencia (Cuadro 21), existe diferencia de opiniones entre los dos estratos ($p < 0.0001$) de productores, según la prueba de Chi Cuadrado Pearson. En el Cuadro 21 se presenta un resumen de la clasificación realizada, de acuerdo con la opinión de los entrevistados.

Cuadro 21. Principales razones de los usos agrícolas en la franja ribereña

Estrato	Por necesidad	Producción	No sabe	Total
1	9	29	1	39
2	34	3	1	38
Total	43	32	2	77

Chi Cuadrado Pearson 35.65, $p < 0.0001$

Una de las principales causas de la disminución de la cobertura forestal es la expansión de la frontera agrícola y la urbanización. Lo anterior coincide con la percepción de los

entrevistados, que manifiestan que en los últimos 10 años se han eliminado áreas de bosques en la franja ribereña. La mayoría de los entrevistados (47%) manifiesta que la causa principal es la agricultura, el 37% considera que la extracción de madera y leña ha sido una de las causas, mientras que el 12% señala que la expansión de los poblados (construcción) ha influido en la disminución de la cobertura forestal. En la figura 22 se observa el detalle de las causas de la deforestación desglosado por estrato y el promedio general.

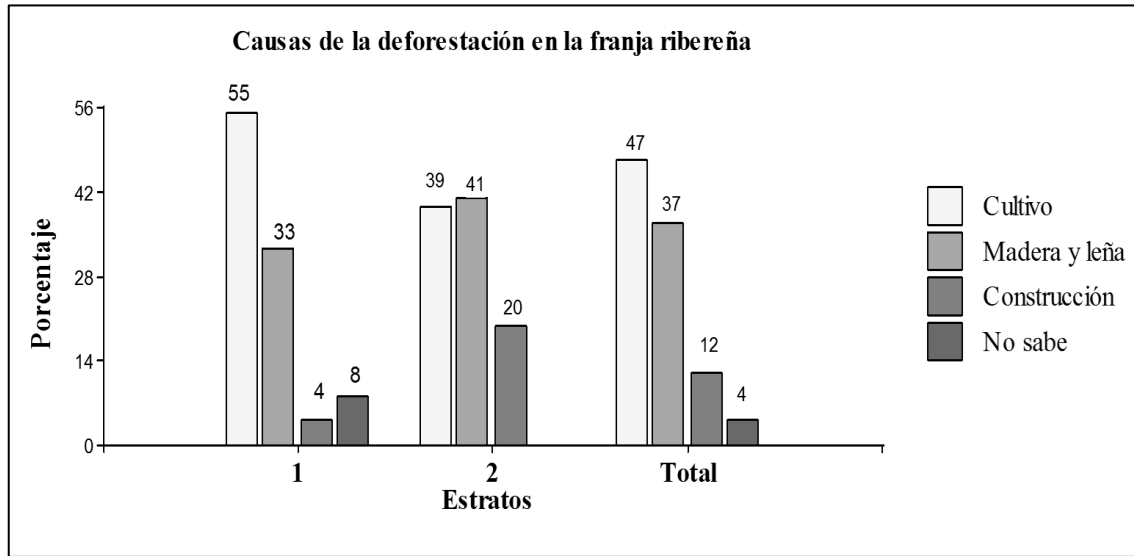


Figura 22. Percepción local acerca de las principales causas de la deforestación en la franja ribereña

4.4. Percepciones acerca de la contaminación

La contaminación de los ríos afecta directamente al lago de Atitlán. En el informe del estado del lago 2014, se reportó que el río Quiscab ingresó al lago 55% de nitrógeno y 59% fósforo, producto de las actividades agrícolas (ULA 2014), lo cual fue una de las causas del florecimiento de cianobacterias (AMSCLAE 2011; ULA 2014; IARNA 2015). Con base en lo anterior, se recopiló información sobre la percepción de los agricultores entrevistados acerca de la contaminación de los ríos y el lago, el rol que juega la actividad agrícola en la contaminación del agua y las otras fuentes principales de contaminación. Los resultados indican que únicamente el 32% de los participantes están conscientes de que la actividad agrícola es una de las fuentes de contaminación de los ríos y el lago, de los cuales el 28% pertenecen a los municipios de Sololá y San José Chacayá, donde predomina el cultivo de hortalizas. En los municipios Santa Lucía Utatlán, Nahualá y Totonicapán, donde predomina el cultivo de granos básicos, solo el 4% de los entrevistados indicó que la actividad agrícola influye en la contaminación de los ríos y el lago.

En relación con las otras fuentes de contaminación identificadas por los entrevistados, el 61% indica que la basura constituye una de las fuentes de contaminación, 47% que son las aguas

residuales de los poblados, mientras que un 26% opinó que los desagües de hoteles y restaurantes son fuentes de contaminación de los ríos y el lago. En la figura 23 se muestran evidencias de las fuentes de contaminación en los ríos, y en la 24 se presenta el detalle de las fuentes de contaminación según la percepción de los entrevistados.



Figura 23. Evidencia de las fuentes de contaminación en el río Quiscab

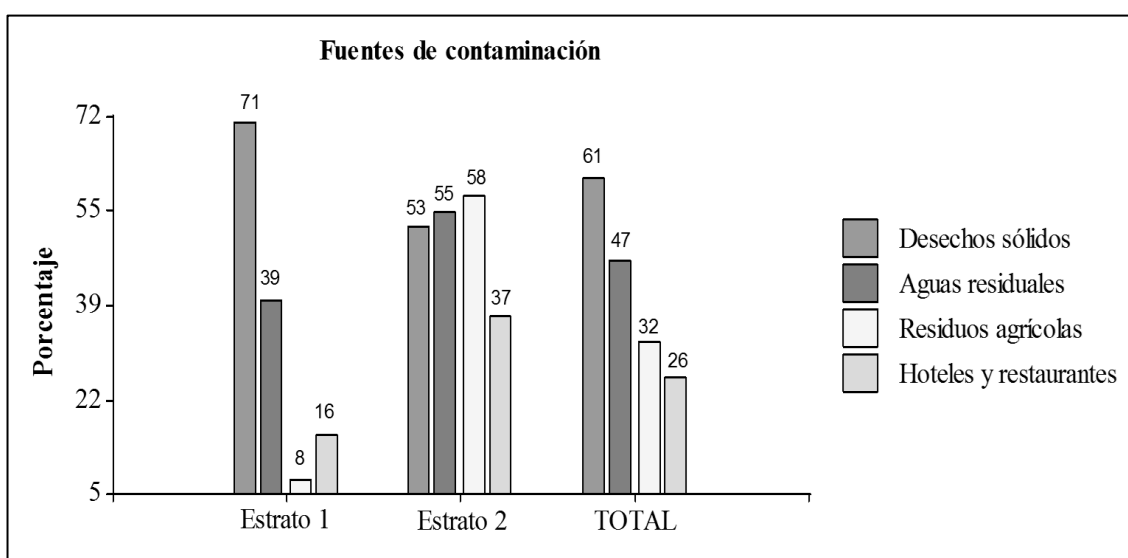


Figura 24. Percepción acerca de las fuentes de contaminación del agua

4.5. Percepción local del impacto de la cobertura forestal de la franja ribereña en la calidad del agua

La calidad del agua es un tema crítico a nivel de cuencas hidrográficas, debido a la contaminación que sufren los cuerpos de agua. Para disminuir los efectos de la contaminación, se ha propuesto diferentes opciones, una de ellas es la protección de bosques ribereños, debido a que la cobertura forestal en la franja ribereña tiene una función preponderante en la conservación de la calidad del agua (Belt *et al.* 1992; Wenger 1999; Gayoso y Gayoso 2003). El resultado de la percepción local acerca del rol que juegan los bosques es el siguiente: el 45% de los agricultores menciona que la calidad del agua es muy buena donde hay bosque, 21% indica que es buena, 13% regular, 12% menciona que es mala y 3% que es muy mala (Figura 22). La calificación brindada por los entrevistados está en función del uso que realizan. En este sentido, mencionaron que el agua de calidad muy buena y buena la utilizan para consumo familiar, en cambio la calidad regular utilizan únicamente para regar los cultivos, mas no consumirla. Mientras tanto, sobre la calidad mala y muy mala indicaron que el agua está muy contaminada, no la utilizan para cultivo ni mucho menos para consumo humano. Aunque la percepción de la calidad del agua fue cualitativa, la categorización se basó en la clasificación del índice de calidad del agua (ICA) propuesta por Brown (Bonilla *et al.* 2010), detallada en el cuadro 6.

Cuadro 22. Clasificación de la calidad de agua propuesta por Brown

ICA	Calidad de Agua	Color
90 - 100	Muy buena	Azul
70 – 90	Bueno	Verde
50 – 70	Regular	Amarillo
25 – 50	Malo	Naranja
0 – 25	Muy malo	Rojo

Fuente: Bonilla *et al.* (2010)

La percepción de los agricultores varía según los municipios (estratos). En la población de los municipios de Sololá y San José Chacayá, la gran mayoría (más del 90%) coinciden que el agua es de calidad buena y muy buena donde hay bosques, mientras que en los productores de los municipios de Santa Lucía Utatlán y Totonicapán, una minoría (3% y 36%) coincide que la calidad es muy buena y buena, respectivamente. En los municipios del estrato 1, un 54% indica que aunque haya cobertura forestal en la franja ribereña, la calidad del agua tiene cierto nivel de contaminación (26% regular, 23% mala y 5% muy mala), debido a la basura, aguas residuales y aguas negras. En la figura 25 se presenta la distribución porcentual de las opiniones referentes al impacto del bosque ribereño en la calidad del agua.

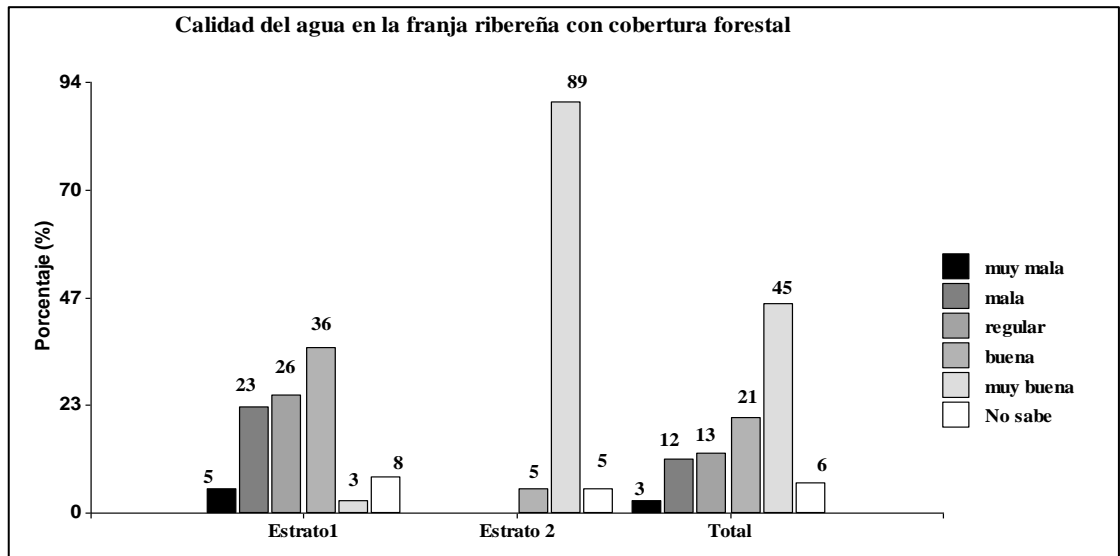


Figura 25. Calidad del agua en las franjas ribereñas con cobertura forestal según la percepción local

La percepción de los agricultores entrevistados acerca del impacto de la cobertura forestal de la franja ribereña en la calidad del agua se presenta en la figura 26. Los entrevistados de los municipios de Sololá y San José Chacaya, caracterizados por el cultivo de hortalizas, indicaron que la calidad del agua es muy buena, mientras que los de Santa Lucía Utatlán y Totonicapán, caracterizados por el cultivo de granos básicos, indicaron que la calidad del agua es buena, regular y mala.

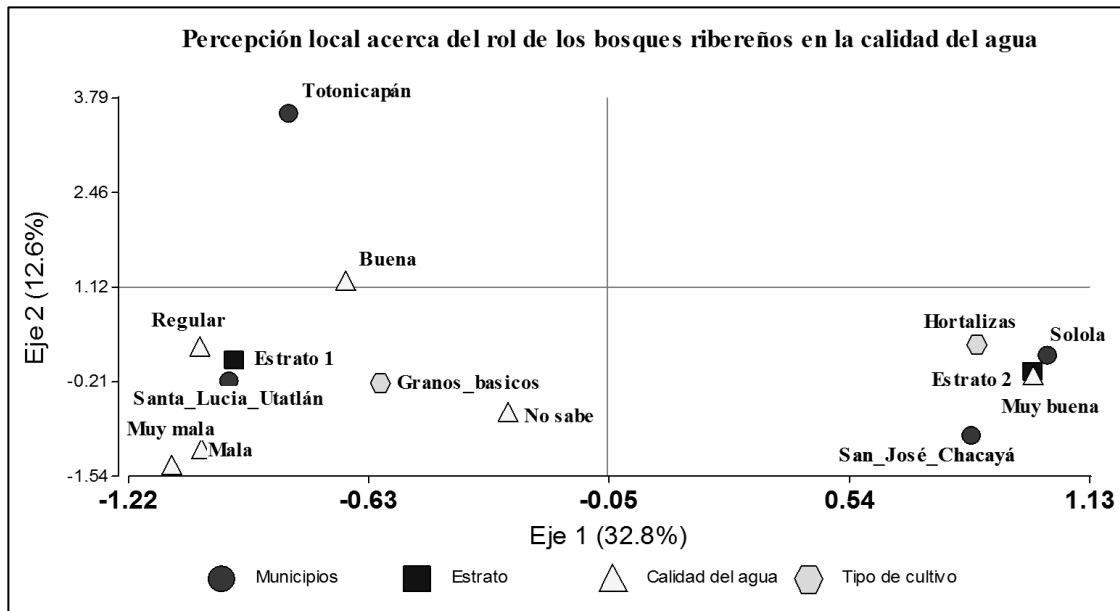


Figura 26. Percepción local acerca del rol de los bosques ribereños en la calidad del agua

Aunque las opiniones son diversas sobre la calidad del agua, la mayoría de los agricultores entrevistados (70 personas) coinciden que los bosques juegan un papel importante en la calidad del agua. En menor cantidad (7 personas), mencionaron que la cobertura forestal protege el suelo y evita derrumbes. En el cuadro 23 se presenta la distribución del número de entrevistados y su percepción acerca de la importancia de la cobertura forestal en la franja ribereña.

Cuadro 23. Importancia de la cobertura forestal en la franja ribereña

Estratos	Conservación del agua	Protección del suelo	Evita derrumbes	Total
1	38	1	0	39
2	32	4	2	38
Total	70	5	2	77

5. Discusión de resultados

El uso y cobertura de la tierra en las franjas ribereñas y en las unidades hidrográficas influye en la calidad del agua (Da Trinidad *et al.* 2011; Capoane *et al.* 2016). El cambio de uso, debido al avance de la frontera agrícola y la expansión de zonas urbanas constituyen serias amenazas para la calidad del agua, lo cual es ampliamente estudiado (Fisher *et al.* 2000; Riemann *et al.* 2004). La percepción local acerca de los cambios de usos del suelo, las prácticas agrícolas y su impacto en la calidad del agua ha sido motivo de investigación (Arcos *et al.* 2006; Turyahabwe *et al.* 2013). El estudio de percepciones acerca del uso y manejo los recursos naturales es importante, dado a que los puntos de vista de los actores locales son fundamentales para el manejo integrado de cuencas (Arcos *et al.* 2006) y en cualquier acción que se desee implementar en busca de soluciones para ciertos problemas ambientales (Lazos y Paré 2002).

Desde esta perspectiva, los actores locales de la cuenca Quiscab indican que el uso actual de la franja ribereña es la actividad agrícola, principalmente para cultivo de maíz y frijol, base de la seguridad alimentaria local (MAGA *et al.* 2013a). Además, la población se dedica al cultivo de hortalizas, y muchos de ellos cultivan en la franja ribereña, dada la accesibilidad y disponibilidad del agua para riego. La escasez y el limitado acceso a la tierra es otro de los factores que propicia la actividad agrícola en la franja ribereña, incluso en terrenos con altas pendientes (>75%) (MAGA *et al.* 2013b). La agricultura representa una de las actividades más importantes en la cuenca del lago Atitlán; se estima que el 46% de la población económicamente activa de la cuenca se dedica a la actividad agrícola, actividad que ocupa el 44% del área total de la cuenca del lago Atitlán (IARNA 2015). En el departamento de Sololá, donde se ubican cuatro de los municipios de la cuenca del río Quiscab, se ha reportado que del total de producción agrícola, el cultivo de granos básicos y hortalizas representan, en término de volumen, el 19 y 14 % respectivamente (MAGA Y SESAN 2011).

A pesar de que la agricultura es una actividad importante, los agricultores tienen poca preparación técnica para el manejo de agroquímicos. Bocel (2013) encontró similares resultados en la subcuenca del río San Francisco, cuenca vecina del río Quiscab, donde la mayoría de los agricultores indicaron que no reciben asesoría técnica permanente en cuanto a la correcta aplicación de los fertilizantes. La situación es preocupante, dado a que la mayoría de los agricultores han recibido asistencia técnica por parte de los centros comerciales que se dedican a la venta de agroquímicos; es conocido que el propósito de los comercios es netamente de carácter lucrativo, por tanto no está en sus planes la protección de los recursos naturales (Cabeza 2010). Por otro lado, se identificó que los agricultores implementan muy pocas prácticas de conservación de suelo, situación que fue identificada también por la Universidad del Valle de Guatemala (Stein 2013). Estas prácticas agrícolas traen consigo serias consecuencias en la salud de los ríos, debido a la descarga de residuos de nutrientes, incremento en la erosión y sedimentos a los ríos, factores que afectan la calidad de los cuerpos de agua (Basnyat *et al.* 2000; Riemann *et al.* 2004; Nava *et al.* 2016). De hecho, datos generados por ULA (2014) indican que por medio del río Quiscab ingresan el 55% de nitrógeno y 59% fósforo producto de las actividades agrícolas en la cuenca, lo cual es uno de los factores que ha contribuido al florecimiento de cianobacterias en el lago (AMSCLAE 2011; ULA 2014; IARNA 2015).

Si bien las autoridades han implementado estrategias para la reducción de los nutrientes que ingresan al lago, tal es el caso de la implementación de la fórmula de fertilizante especial con contenido bajo de fósforo denominada 20-03-17 (NPK) (AMSCLAE 2014), los agricultores aún no están dispuestos a colaborar debido a que hay cierto rechazo ante esta propuesta (AMSCLAE 2014). Al respecto, los agricultores manifiestan que no están dispuestos a cambiar el tipo de fertilizante debido a que están acostumbrados a utilizar lo mismo todos los años y están conformes con la rentabilidad de sus cultivos, aunque una parte manifestó que es posible que cambien, siempre y cuando mejoren la rentabilidad.

Ante este escenario pesimista, se deben hacer grandes esfuerzos para incidir en los agricultores, no solo en el tema agrícola sino en la conservación de los recursos naturales en general. Según Lazos y Paré (2002), el involucramiento de la población es vital en cualquier estrategia de conservación, tomando en cuenta sus costumbres, tradiciones y formas de vida. Debido a la complejidad del tema, dado que involucra cambios de actitud, el proceso de incidencia debe ser pensado a largo plazo y a diferentes niveles. En este contexto, la educación ambiental jugará un rol importante, empezando desde el ámbito escolar, incluyendo el ámbito familiar y comunal. Se recomienda realizar otros estudios de percepciones para contar con más insumos para tomar decisiones sobre estrategias a implementar.

El rol de los bosques ribereños en la conservación de la calidad del agua es reconocido por la población, manifiestan que el agua que consumen es de buena calidad, dado a que las fuentes que utilizan para su consumo provienen de fuentes protegidos por bosques. El rol

de los bosques en la calidad de agua es ampliamente conocido, por ejemplo, autores tales como Sliva y Williams (2001) y Ceccon (2003) indican que los bosques ribereños son muy importantes para mitigar el ingreso de nutrientes y otros contaminantes a los ríos. Aunque en la cuenca no existe una estrategia formal para la protección de las áreas de recarga hídrica, existen iniciativas comunitarias, tal es el caso de una veda forestal impuesta por los comunitarios en la montaña conocida como “María Tecún”, considerada como un área prioritaria de conservación dentro de la cuenca (UVG et al. 2003). Estudios recientes muestran que el manejo forestal comunitario ha sido una de las estrategias exitosas para frenar la deforestación y por ende la conservación de los recursos hídricos (AMPV 2015).

A pesar de las iniciativas anteriormente mencionadas, gran parte de la población reconoce que ha hecho muy poco para proteger los bosques ribereños y los bosques en general, prueba de ello es la alta incidencia de coliformes fecales producto de las descargas de aguas residuales directamente a los ríos (Padilla *et al.* 2010; Reyes 2014). Debido a esta situación, la población indica que la calidad del agua donde hay poblado es mala y no la utilizan para consumo humano. La población está consciente de los problemas de la contaminación, reconociendo que ellos han contribuido en gran medida. Desde la perspectiva de los actores locales, las fuentes de contaminación del agua son principalmente los desechos sólidos, aguas residuales y los residuos agrícolas. Lo anterior coincide con las principales fuentes de contaminación reportadas por instituciones y los estudios realizados en la cuenca (AMSCLAE 2011; ULA 2014; IARNA 2015).

6. Conclusiones

La percepción local permite tener un acercamiento de la visión de la población acerca del uso y manejo de los recursos naturales en la cuenca, principalmente los recursos agua, suelo y bosques. Esto es de vital importancia, dado que son los pobladores locales los que conviven con dichos recursos y son los que toman las decisiones sobre cómo aprovecharlos, por lo que su involucramiento en cualquier estrategia o programa de conservación es clave para el éxito del mismo.

Este estudio refleja la situación actual de la cuenca del río Quiscab y por ende al lago de Atitlán. Desde el punto de vista de la población, se identificaron dos escenarios claves: por un lado, la población está consciente de la situación de la contaminación de los ríos reconociendo que sus actividades han contribuido a empeorar la situación; por otro lado, reconocen y valoran la importancia del cuidado del bosque, suelo y agua, aunque están conscientes de que han hecho muy poco para la conservación de los recursos, a excepción de las comunidades de la parte alta de la cuenca, principalmente en las comunidades de Totonicapán, quienes cuentan con un sistema de conservación a través de la veda forestal.

A través de este estudio se identificaron problemas estructurales en el manejo de los recursos naturales, algunos de ellos son: el limitado acceso a la tierra, la inexistencia de una regulación

sobre el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos, falta de programas gubernamentales sólidos para la recuperación y conservación de los recursos naturales y un débil sistema de manejo de desechos sólidos y aguas residuales. Ante esta situación, se recomienda implementar planes, programas y políticas a largo plazo que vayan encaminados a promover el uso adecuado de los recursos naturales; una de las opciones es la implementación de planes de manejo integral de cuencas, donde el recurso integrado sea los recursos hídricos, y con la participación activa de la población integrada en comités de cuencas.

En el caso particular de la franja ribereña del río Quiscab, la percepción local acerca de la situación actual de la franja no es muy alentadora. Por un lado, la franja ribereña está siendo ocupada por áreas agrícolas caracterizadas por el uso de fertilizantes químicos y agricultores con poca capacidad técnica para el manejo y aplicación de agroquímicos. Al respecto de la capacitación técnica, los centros comerciales que se dedican a la venta de productos químicos son los que más han brindado capacitación técnica a los agricultores, mientras que la presencia gubernamental es muy limitada. Por otro lado, las limitadas prácticas de conservación de suelo, inadecuada deposición de residuos sólidos y aguas residuales son algunos de los problemas que se manifiestan actualmente en la cuenca del río Quiscab.

A pesar de ello, la población está consciente de la importancia de las franjas ribereñas, especialmente el rol que desempeña el bosque ribereño en la conservación del agua. Al respecto, la población coincide en que la calidad del agua donde hay bosque es buena, ya que el agua que consumen proviene generalmente en las partes montañosas de la cuenca; sin embargo, una vez que existe influencia de zonas pobladas la calidad del agua es mala debido a la contaminación, aunque existan bosques ribereños, no son suficientes para reducir los efectos de la contaminación, por lo que el agua de estos ríos ya no es consumible.

Si bien la población está consciente sobre la importancia de la protección de la franja ribereña, factores como la situación de la pobreza, limitadas opciones de fuentes de ingreso y la falta de otros sitios para cultivar hace que la población ocupe las franjas ribereñas para uso agrícola. Esta situación seguramente no cambiará, debido a que la población está en constante crecimiento y por ende hay mayor demanda de los recursos; por lo que la intervención de las entidades gubernamentales en capacitación técnica, implementación de estrategias de mejoras de las prácticas agrícolas, medidas de adaptación y mitigación, son algunas de las acciones que se pueden implementar para minimizar la problemática ambiental en la cuenca.

7. Literatura citada

- AMPB (Alianza Mesoamericana de Pueblos y Bosques, Nicaragua). 5 nov. 2015. Estudios Forestales en América Latina muestran rentabilidad en Manejo Comunitario y capacidad para frenar deforestación (en línea, lista de discusión). Managua, Nicaragua, Consultado 07 nov. 2016. Disponible en <http://www.alianzamesoamericana.org/estudios-forestales-en-america-latina-muestran-rentabilidad-en-manejo-comunitario-y-capacidad-para-frenar-deforestacion/>.
- AMSCCLAE (Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno, Guatemala). 2011. El lago de Atitlán: caso cianobacteria mayo 2011 (Diapositiva). Sololá, Guatemala, 19 diapositivas.
- _____. 2014. Comunicado de prensa. 17 de junio de 2014. Panajachel, Sololá, Guatemala.
- Ander-Egg, E. 1982. Metodología del trabajo social. (en línea). El Ateneo. Consultado 21 oct. 2016. Disponible en <https://books.google.es/books?id=N8BJAAAAYAAJ>
- Arcos, I; Jiménez, F; León, JA. 2006. Percepción local acerca del papel de los bosques ribereños en la conservación de los recursos naturales en la microcuenca del río Sesesmiles, Copán, Honduras. Recursos Naturales y Ambiente (48):118-122.
- Arizpe, L; Paz, F; Velázquez, M. 1993. Cultura y cambio global: percepciones sociales sobre la deforestación en la Selva Lacandona. Nueva Antropología 21(68):135-136.
- Basnyat, P; Teeter, L; Lockaby, BG; Flynn, KM. 2000. Land use characteristics and water quality: a methodology for valuing of forested buffers. Environmental Management 26(2):153-161.
- Belt, GH; O'Laughlin, J; Merrill, T. 1992. Design of forest riparian buffer strips for the protection of water quality: analysis of scientific literature. Report No. 8. Idaho wildlife and range policy analysis group. 35 p.
- Benez, MC; Kauffer Michel, EF; Álvarez Gordillo, GdC. 2010. Percepciones ambientales de la calidad del agua superficial en la microcuenca del río Fogótico, Chiapas. Frontera norte 22:129-158. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73722010000100006&nrm=iso
- Bocel, JC. 2013. Plan de acción para la reducción del uso de fertilizantes y detergentes fosfatados en la subcuenca del río San Francisco, cuenca del lago de Atitlán. Tesis Lic. Universidad Rural de Guatemala. 111 p.
- Bonilla, BL; de los Angeles Gonzales, C; Arias, AY; Chávez, JM. 2010. Metodología analítica para la determinación del índice de calidad del agua (ICA). 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). Eds. M Springer; JMS Chicas. Editorial Universitaria, San Salvador, El Salvador. 19 p.
- Cabeza, MD. 2010. El sistema agroalimentario globalizado: imperios alimentarios y degradación social y ecológica. Revista de Economía Crítica 10:32-61.
- Capoane, V; Tiecher, T; Dos Santos, D. 2016. Land use and water quality: influence of riparian zones and wetlands in two watersheds from plateau of Rio Grande do Sul. Geografia Ensino and Pesquisa 20(2):163-175.
- Ceccon, E. 2003. Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas. Ciencias (72):46-53.

- Cepeda, C; Vignola, R. 2011. Percepción local ante variaciones en el clima y su impacto en comunidades de Waslala y El Cúa, Nicaragua. *Revista Centroamericana de Ciencias Sociales* 8(2):53-78.
- Cruz-Burga, ZA. 2014. Percepción local del impacto de la conservación sobre las población rural en áreas naturales protegidas. Tesis doctoral. Barcelona, España, Universitat Autònoma de Barcelona. 2013 p.
- Da Trinidad, R; Buffon, I; Guerra, T. 2011. Influence of the land use and land cover on the water quality: a method to evaluate the importance of riparian zones. *Ambiente y Água* 6(1):104-117.
- Dalle, SP; de Blois, S; Caballero, J; Johns, T. 2006. Integrating analyses of local land-use regulations, cultural perceptions and land-use/land cover data for assessing the success of community-based conservation. *Forest Ecology and Management* 222(1):370-383.
- De la Cruz, JR. 1982. Clasificación de zonas de vida de Guatemala a nivel de reconocimiento. MAGA, Instituto Nacional Forestal. 42 p.
- Di Rienzo, J; Casanoves, F; Balzarini, M; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, yC. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar> 8:195-199.
- Fisher, D; Steiner, J; Endale, D; Stuedemann, J; Schomberg, H; Franzluebbbers, A; Wilkinson, S. 2000. The relationship of land use practices to surface water quality in the Upper Oconee Watershed of Georgia. *Forest Ecology and Management* 128(1):39-48.
- Gayoso, J; Gayoso, S. 2003. Diseño de zonas ribereñas, requerimiento de un ancho mínimo. Universidad Austral de Chile. 12 p.
- IARNA (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala). 2015. Florecimiento de cianobacterias en el lago de Atitlán, agosto 2015. Universidad Rafael Landívar. Guatemala, 6 p.
- Lazos, E; Paré, L. 2002. Miradas indígenas sobre una naturaleza entristecida: percepciones del deterioro ambiental entre nahuas del sur de Veracruz. *Revista Mexicana de Sociología* 64(4):245-247.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Agricultura, Guatemala); DIGEGR (Dirección de Información Geográfica, Estratégica y Gestión de Riesgos, Guatemala); IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazz, Guatemala). 2013a. Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sololá, Guatemala. 1:1-756.
- _____. 2013b. Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sololá, Guatemala. 1:757-984.
- MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Guatemala); SESAN (Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional, Guatemala). 2011. Diagnóstico de la región de occidente de Guatemala. 114 p.
- Nava, M; Diemont, SA; Hall, M; Ávila, V. 2016. Riparian buffer zone and whole watershed influences on river water Quality: implications for ecosystem services near megacities. *Environmental Processes* 3:277-305.
- Padilla, T; García, N; Pérez, W. 2010. Caracterización físico-química y bacteriológica, en dos épocas del año, de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19(3):43-46.
- Peralta, C; Galindo, MG; Contreras, C; Algara, M; Mas, JF. 2016. Percepción local respecto a la valoración ambiental y pérdida de los recursos forestales en la región Huasteca de San Luis Potosí, México. *Madera y bosques* 22(1):71-93.
- Plata, A; Vega, D. 2016. Percepción local del estado ambiental en la cuenca baja del río Manzanares. *Luna Azul* (42):235-255.

- Ramírez, K; Ibarra, A. 2015. Percepción local de los servicios ecológicos y de bienestar de la selva de la zona maya en Quintana Roo, México. *Investigaciones Geográficas (Boletín del Instituto de Geografía)*(86):67-81.
- Reyes, E. 2012. Uso de macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad de agua en la cuenca del lago Atitlán, Guatemala. Tesis M.Sc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 114 p.
- Reyes, E. 2014. Macroinvertebrados acuáticos de los cuerpos lénticos de la Región Maya, Guatemala. *Revista Científica* 23(1):7-16.
- Riemann, R; Riva-Murray, K; Murdoch, P. 2004. Effects of forest fragmentation and urbanization on stream conditions-The development of relevant landscape parameters and source datasets for effective monitoring. *In* Convention of the Society of American Foresters. New York, p.234-235.
- Saarinen, TF. 1976. *Environmental planning: Perception and behavior*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt (HMH).
- Sabino, CA. 1992. *El proceso de investigación*. Ed. Panapo. Lumen-Humanitas, Buenos Aires Argentina. 216 p.
- Sliva, L; Williams, D. 2001. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. *Water research* 35(14):3462-3472.
- Stein, M. 2013. Proyecto para el desarrollo agrícola (Diapositiva). Sololá, Guatemala, Universidad del Valle Guatemala. 73 diapositivas.
- Turyahabwe, N; Tumusiime, DM; Kakuru, W; Barasa, B. 2013. Wetland use/cover changes and local perceptions in Uganda. *Sustainable Agriculture Research* (2)4:95-105.
- ULA (Unidos por el Lago Atitlán, Guatemala). 2014. State of the lake 2014. Guatemala, University of Nevada. 40 p.
- UVG (Universidad del Valle, Guatemala); TNC (The Nature Conservancy, Guatemala); CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Guatemala); APVM (Asociación Patronato Vivamos Mejor, Guatemala); ARNP (Asociación de Reservas Naturales Privadas, Guatemala). 2003. Diagnóstico ecológico-social en la cuenca de Atitlán. Eds. M Dix; I Fortín; O Medinilla; LE Ríos. Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy. 13 p.
- Wenger, S. 1999. A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation. Office of Public Service & Outreach, Institute of Ecology, University of Georgia.
- Whyte, AV. 1977. Guidelines for field studies in environmental perception. París, Unesco. 118 p. (MAB technical note 5).

8. Anexo

Análisis estadístico descriptivo de los parámetros analizados para determinar el ICA.

Época	Variable	n	Media	D.E.	E.E.	Mín	Máx	Mediana	Q1	Q2	Q3
Luviosa	OD (mg/L) Ecoli (NMP/100mL)	55	95.0	18.2	2.5	38.0	143.6	93.6	84.9	93.6	108.2
	pH	55	7.6	0.3	0.0	7.0	8.4	7.6	7.4	7.6	7.8
	DBO5 (mg/L)	55	2.5	2.0	0.3	0.5	8.0	1.7	1.2	1.7	3.2
	Cambio.T (°C)	55	2.6	2.6	0.4	-3.5	7.8	2.2	0.6	2.2	4.8
	Fosfato (mg/L)	55	0.1	0.2	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.1	0.2
	Nitratos (mg/L)	55	1.3	2.2	0.3	0.0	11.4	0.6	0.2	0.6	1.3
	Turbidez (FAU)	55	96.1	428.1	57.7	1.0	2566.7	9.0	4.7	9.0	20.0
	TDS (mg/L)	55	102.7	37.8	5.1	45.1	219.0	97.4	77.6	97.4	118.4
	ICA_TOTAL	55	63.2	10.1	1.4	36.0	78.0	65.0	56.0	65.0	70.0
Seca	OD (mg/L) Ecoli (NMP/100mL)	55	83.5	16.2	2.2	24.4	108.1	87.5	78.3	87.5	93.7
	pH	55	7.4	0.2	0.0	6.9	7.8	7.4	7.3	7.4	7.5
	DBO5 (mg/L)	55	3.2	10.0	1.4	0.6	75.4	1.3	1.0	1.3	2.6
	Cambio.T (°C)	55	5.1	3.8	0.5	-3.1	16.1	4.8	2.9	4.8	7.8
	Fosfato (mg/L)	55	0.2	0.2	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0	0.1	0.2
	Nitratos (mg/L)	55	0.9	0.9	0.1	0.0	3.5	0.6	0.2	0.6	1.3
	Turbidez (FAU)	55	7.3	10.1	1.4	1.0	59.3	3.3	2.0	3.3	7.0
	TDS (mg/L)	55	86.6	26.9	3.6	49.3	164.5	79.2	65.3	79.2	101.3
	ICA_TOTAL	55	69.7	10.8	1.5	30.0	85.0	71.0	66.0	71.0	76.0
General	OD (mg/L) Ecoli (NMP/100mL)	110	89.2	18.1	1.7	24.4	143.6	89.1	80.8	89.0	99.5
	pH	110	7.5	0.3	0.0	6.9	8.4	7.5	7.4	7.5	7.7
	DBO5 (mg/L)	110	2.8	7.2	0.7	0.5	75.4	1.5	1.0	1.5	2.6
	Cambio.T (°C)	110	3.8	3.5	0.3	-3.5	16.1	3.4	1.4	3.3	5.9
	Fosfato (mg/L)	110	0.1	0.2	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0	0.1	0.2
	Nitratos (mg/L)	110	1.1	1.7	0.2	0.0	11.4	0.6	0.2	0.6	1.3
	Turbidez (FAU)	110	51.7	304.7	29.1	1.0	2566.7	6.0	3.0	6.0	14.0
	TDS (mg/L)	110	94.7	33.6	3.2	45.1	219.0	86.3	69.6	85.8	112.9
	ICA_TOTAL	110	66.5	10.9	1.0	30.0	85.0	68.0	60.0	68.0	74.0

Medidas de resumen variables modelo de randomForest a nivel de la franja ribereña

Variable	n	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx	Mediana
% bosque	110	34.5	32.3	3.1	93.8	0.0	100.0	33.9
% arbusto	110	14.3	20.7	2.0	144.0	0.0	95.1	2.7
% agrícola	110	42.0	36.5	3.5	87.0	0.0	100.0	34.8
% poblado	110	5.4	13.7	1.3	255.6	0.0	89.0	0.2
Distancia bosque (m)	110	197.1	270.8	25.8	137.4	20.0	1201.7	61.2
Distancia arbusto (m)	110	361.9	425.4	40.6	117.6	20.0	2000.0	214.5
Distancia agrícola (m)	110	137.8	375.1	35.8	272.2	20.0	2000.0	20.0
Distancia poblado (m)	110	442.8	593.6	56.6	134.1	20.0	1800.0	147.5
% bosque	110	129.7	174.2	16.6	134.3	6.9	1095.9	90.3
% arbusto	110	0.7	0.4	0.0	57.4	0.0	1.5	0.7
X	110	422674.1	4011.5	382.5	1.0	415306.0	430004.0	422505.4
Y	110	1637956.1	3323.0	316.8	0.2	1632484.0	1642522.0	1638876.0
ICA_TOTAL	110	66.5	10.9	1.0	16.4	30.0	85.0	68.0

Medidas de resumen variables modelo de randomForest a nivel de unidades hidrográficas

Variable	n	Media	D.E.	E.E.	CV	Mín	Máx	Mediana
% bosque	48	45.4	21.5	3.1	47.4	0.3	85.5	43.9
% arbusto	48	12.1	11.1	1.6	91.6	2.0	50.4	9.2
% agrícola	48	34.6	17.2	2.5	49.7	3.9	67.8	37.2
% poblado	48	5.6	5.5	0.8	97.5	0.1	18.7	3.7
Distancia bosque (m)	48	297.2	314.8	45.4	105.9	0.0	1201.7	206.3
Distancia arbusto (m)	48	307.9	364.1	52.6	118.3	0.0	1624.9	170.9
Distancia agrícola (m)	48	39.4	99.5	14.4	252.8	0.0	414.6	0.0
Distancia poblado (m)	48	261.5	352.1	50.8	134.7	0.0	1638.9	132.6
% bosque	48	4.6	2.6	0.4	56.9	1.0	10.8	3.6
% arbusto	48	1.3	0.4	0.1	29.6	0.6	1.9	1.3
X	48	422579.9	3782.6	546.0	0.9	415956.0	428317.0	422552.0
Y	48	1637523.6	3087.6	445.7	0.2	1633429.0	1641829.0	1637831.5
ICA_TOTAL	48	64.5	10.4	1.5	16.2	35.6	82.0	67.4

Análisis de la varianza nivel Pfafstetter y época de muestreo

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
ICA TOTAL	110	0.76	0.72	8.63

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Coef
Modelo.	9825.19	13	755.78	22.98	<0.0001	
Epocal	580.1	1	580.1	17.63	0.0001	
Nivel_Phastete	229.26	2	114.63	3.48	0.0346	
Tipo_Phastette	30.16	1	30.16	0.92	0.3407	
EST_OD_porc	370.81	1	370.81	11.27	0.0011	2.74
EST_Ecoli	566.91	1	566.91	17.23	0.0001	-3.8
EST_pH	77.45	1	77.45	2.35	0.1282	-1.11
EST_DBO5	446.33	1	446.33	13.57	0.0004	-2.54
EST_Cambio.T	369.17	1	369.17	11.22	0.0012	-2.08
EST_Fosfato	327.03	1	327.03	9.94	0.0022	-2.54
EST_Nitratos	2.1	1	2.1	0.06	0.8011	0.23
EST_Turb	65.75	1	65.75	2	0.1607	-1.24
EST_TDS	115.01	1	115.01	3.5	0.0646	-1.96
Error	3157.99	96	32.9			
Total	12983.17	109				

Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.17100

Error: 32.8957 gl: 96

Epocal	Mediasn	E.E.	
Luviosa	63.42 55	0.92	A
Seca	69.65 55	0.94	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.66258

Error: 32.8957 gl: 96

Nivel Phastete	Mediasn	E.E.	
2.00	65.15 38	1.02	A
4.00	65.74 34	1.02	A
3.00	68.73 38	1.01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test: LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=2.21577

Error: 32.8957 gl: 96

Tipo Phastette	Mediasn	E.E.	
Cuenca	65.93 66	0.75	A
Intercuenca	67.14 44	0.93	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Análisis de regresión lineal parámetros ICA

Análisis de regresión lineal época seca

Época	Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Seca	ICA_TOTAL	55	0.98	0.98	3.56	217.62	233.68

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp Mallows	VIF
const	73.04	4.64	63.71	82.37	15.74	<0.0001		
LN_Ecoli	-3.27	0.17	-3.62	-2.92	-18.77	<0.0001	351.3	2.04
LN_DBO5	-3.58	0.52	-4.61	-2.54	-6.91	<0.0001	52.84	3.83
TDS	-0.02	0.01	-0.05	-0.00370	-2.36	0.0225	11.47	1.65
Cambio.T	-0.47	0.06	-0.59	-0.35	-7.7	<0.0001	64.07	1.09
OD	0.51	0.11	0.3	0.73	4.77	<0.0001	28.29	62.4
OD^2	-0.00250	0.00067	-0.00390	-0.00120	-3.8	0.0004	20.16	52.23

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6170.56	6	1028.43	392.17	<0.0001
LN_Ecoli	924.32	1	924.32	352.47	<0.0001
LN_DBO5	125.32	1	125.32	47.79	<0.0001
TDS	14.59	1	14.59	5.56	0.0225
Cambio.T	155.4	1	155.4	59.26	<0.0001
OD	125.79	2	62.89	23.98	<0.0001
Error	125.88	48	2.62		
Total	6296.44	54			

Análisis de regresión lineal época lluviosa

Epoca	Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Lluviosa	ICA_TOTAL	55	0.96	0.96	5.40	242.26	256.31

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp Mallows	VIF
const	100.01	1.51	96.97	103.04	66.15	<0.0001		
LN_Ecoli	-3.66	0.22	-4.11	-3.21	-16.42	<0.0001	269.34	2.1
LN_Turb	-1.55	0.25	-2.06	-1.04	-6.16	<0.0001	42.21	1.64
Fosfato	-8.51	1.76	-12.04	-4.97	-4.84	<0.0001	27.94	1.16
LN_DBO5	-0.75	1.01	-2.79	1.29	-0.74	0.4633	5.56	6.62
LN_DBO5^2	-1.33	0.52	-2.37	-0.29	-2.57	0.0131	11.51	5.28

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5349.6	5	1069.9	256.62	<0.0001
LN_Ecoli	1124.6	1	1124.6	269.72	<0.0001
LN_Turb	158.23	1	158.23	37.95	<0.0001
Fosfato	97.5	1	97.5	23.38	<0.0001
LN_DBO5	156.68	2	78.34	18.79	<0.0001
Error	204.3	49	4.17		
Total	5553.9	54			

Análisis de regresión simple para coliformes fecales

Época	Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Luviosa	ICA_TOTAL	55	0.87	0.87	14.72	303.5	309.54

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp Mallows	VIF
const	106.5	2.35	101.78	111.19	45.4	<0.0001		
LN_Ecoli	-5.23	0.28	-5.79	-4.68	-18.87	<0.0001	350.41	1

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	4834	1	4834.2	355.99	<0.0001
LN_Ecoli	4834	1	4834.2	355.99	<0.0001
Error	719.7	53	13.58		
Total	5554	54			

Época	Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Seca	ICA_TOTAL	55	0.8	0.8	26.42	334.06	340.09

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	105.02	2.51	99.98	110.05	41.84	<0.0001		
LN_Ecoli	-5.35	0.37	-6.08	-4.61	-14.6	<0.0001	210.14	1

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	5042.2	1	5042.21	213.07	<0.0001
LN_Ecoli	5042.2	1	5042.21	213.07	<0.0001
Error	1254.2	53	23.66		
Total	6296.4	54			

Script modelo franja ribereña implementado en el interfaz de R

```
library(randomForest)
library(vegan)

MOD<-list()
for(i in 1:1000){
m<-
randomForest(ICA_TOTAL~P_bosque+P_arbusto+P_agricola+P_poblado+D_bosque+D_arb
usto+D_agricola+D_poblado+PRD+SHDI+Epoca+X+Y,
strata=ID, proximity=TRUE, importance=TRUE,
data=Bdatos20m[sample(c(1:110),100,replace = TRUE),])
MOD[[i]]<-m
}
length(MOD)

rf.all <- do.call (combine, MOD)
cor(predict(rf.all,Bdatos20m),Bdatos20m$ICA_TOTAL)^2
rf.all$proximity
importance(rf.all)
Z=((importance(rf.all)[,1])-mean(importance(rf.all)[,1]))/(sd(importance(rf.all)[,1])/sqrt(96))
P= dnorm(importance(rf.all)[,1], mean=mean(importance(rf.all)[,1]),
sd=sd(importance(rf.all)[,1])/sqrt(96))
sig<-data.frame(VAR=names(Z), Z, P)
str(rf.all)
x<-c("P_poblado", "D_bosque", "D_arbusto", "Epoca")

xxx<-Bdatos20m[,x]

m<-
randomForest(ICA_TOTAL~P_bosque+P_arbusto+P_agricola+P_poblado+D_bosque+D_arb
usto+D_agricola+D_poblado+PRD+SHDI+Epoca+X+Y,
strata=ID, proximity=TRUE, importance=TRUE, data=Bdatos20m)

pc<-t(cov(cmdscale(1-m$proximity),scale(xxx)))
EJEEE=cmdscale(1-m$proximity)
EJE=cmdscale(1-m$proximity)
sd(EJE)
sd(EJE[,1])
sd(EJE[,2])
c(sd(EJE[,1]),sd(EJE[,2]))/(sd(EJE[,1])+sd(EJE[,2]))

Eje1<-(0.5423165*0.7237)
Eje2<-(0.4576835*0.7237)

plot(cmdscale(1-m$proximity),col=c("gray","red")[Bdatos20m$Epoca1],pch=15,
ylim=c(-0.4,0.4), xlim=c(-0.4,0.4), xlab=c('CP1 (39%)'), ylab=c('CP2 (33%)'), cex=0.8)
```

```

x0<-0
y0<-0
for(i in 1:4){
  xx1<-pc[i,1]*2
  yy1<-pc[i,2]*2
  arrows(x0,y0, x1=xx1, y1=yy1,length=0.06,angle=25,code=2,lwd=1.5,col="black",lty=1)
}

text(pc[1,1]*2, pc[1,2]*2, label = c("P_poblado"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=3)
text(pc[2,1]*2, pc[2,2]*2, labels = c("D_bosque"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=2)
text(pc[3,1]*2, pc[3,2]*2, label = c("D_arbusto"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=4)
text(pc[4,1]*2, pc[4,2]*2, label = c("Epoca"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=1)

ordisurf(x=cmdscale(1-m$proximity), Bdatos20m$ICA_TOTAL, add=TRUE, col="red")

legend(-0.35,-0.24, legend=c('Seca', 'Lluviosa'), col=c("red","gray"),pch=15 )
legend(0.2,-0.30, legend='ICA', col="red",pch='-', cex=1)

abline(h=0)
abline(v=0)

```

Script modelo unidades hidrográficas implementado en el interfaz de R

```

library(randomForest)
library(vegan)

MOD<-list()
for (i in 1:1000)
{
  m<-
  randomForest(ICA_TOTAL~P_bosque+P_arbusto+P_agricola+P_poblado+D_bosque+D_arbusto
+D_agricola+D_poblado+PRD+SHDI+X+Y+Epoca,
proximity=TRUE, importance=TRUE, data=Bdatos_uhidrografica[sample(c(1:48), 40, replace =
TRUE),])
  MOD[[i]]<-m
}
length(MOD)
rf.all <- do.call (combine, MOD)
cor(predict(rf.all,Bdatos_uhidrografica),Bdatos_uhidrografica$ICA_TOTAL)^2
rf.all$proximity
importance(rf.all)

Z=((importance(rf.all)[,1])-mean(importance(rf.all)[,1]))/(sd(importance(rf.all)[,1])/sqrt(34))
P= dnorm(importance(rf.all)[,1], mean=mean(importance(rf.all)[,1]),
sd=sd(importance(rf.all)[,1])/sqrt(34))
sig<-data.frame(VAR=names(Z), Z, P)

x<-c("D_bosque", "D_arbusto", "D_poblado", "SHDI", "Epoca", "X")

```

```

names(Bdatos_uhidrografica)

xxx<-Bdatos_uhidrografica[,c(8,9,11,13,14,16)]

m<-
randomForest(ICA_TOTAL~P_bosque+P_arbusto+P_agricola+P_poblado+D_bosque+D_arbusto
+D_agricola+D_poblado+PRD+SHDI+X+Y+Epoca,
proximity=TRUE, importance=TRUE, data=Bdatos_uhidrografica)
pc<-t(cov(cmdscale(1-m$proximity),scale(xxx)))

EJEEE=cmdscale(1-m$proximity)
c(sd(EJEEE[,1]),sd(EJEEE[,2]))/(sd(EJEEE[,1])+sd(EJEEE[,2]))

Eje1<-(0.5271668*0.3939)
Eje2<-(0.4728332*0.3939)

plot(cmdscale(1-m$proximity),col=c("grey","red")[Bdatos_uhidrografica$epoca],pch=15,
ylim=c(-0.5,0.4), xlim=c(-0.5,0.5), xlab=c('PC1 (21%)'), ylab=c('PC2(18%)'), cex=1)
x0<-0
y0<-0
for(i in 1:6){
  xx1<-pc[i,1]*2
  yy1<-pc[i,2]*2
  arrows(x0,y0, x1=xx1, y1=yy1,length=0.06,angle=25,code=2,lwd=1.5,col="black",lty=1)
}
text(pc[c(1),1]*2, pc[c(1),2]*2, labels = c("D_bosques"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=4)
text(pc[c(2),1]*2, pc[c(2),2]*2, labels = c("D_arbusto"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=2)
text(pc[c(3),1]*2, pc[c(3),2]*2, labels = c("D_poblado"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=2)
text(pc[c(4),1]*2, pc[c(4),2]*2, labels = c("SDHDI"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=4)
text(pc[c(5),1]*2, pc[c(5),2]*2, labels = c("Epoca"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=4)
text(pc[c(6),1]*2, pc[c(6),2]*2, labels = c("X"), cex = 1, col = "blue", adj=1, pos=3)

ordisurf(x=cmdscale(1-m$proximity), Bdatos_uhidrografica$ICA_TOTAL, add=TRUE,
col="red")

legend(-0.43,-0.32, legend=c('Seca', 'Lluviosa'), col=c("red","grey"),pch=15, cex = 1)
legend(0.3,-0.37, legend='ICA', col="red",pch='-', cex=1)

abline(h=0)
abline(v=0)

```

Resultados randomForest franja ribereña de 20 metros

```

randomForest(formula = ICA_TOTAL ~ P_bosque + P_arbusto + P_agricola + P_poblado
+ D_bosque + D_arbusto + D_agricola + D_poblado + PRD + SHDI + Epoca + X + Y,
data = Bdatos20m[sample(c(1:110), 100, replace = TRUE), ], strata = ID, proximity =
TRUE, importance = TRUE)

```

Type of random forest: regression
 Number of trees: 500
 No. of variables tried at each split: 4
 Mean of squared residuals: 36.74557
 % Var explained: 72.37
 Correlación: 0.8073315

Family: gaussian
 Link function: identity
 Formula:
 $y \sim s(x_1, x_2, k = 10, bs = "tp", fx = FALSE)$
 Estimated degrees of freedom: 5.46 total = 6.46
 REML score: 405.109

Matriz de importancia

Variables	Matriz de importancia		Matriz de significancia*	
	%IncMSE	IncNodePurity	Estadístico Z	Valor p
Epoca	17.4	761.0963	21.567686	0.000000
P_poblado	15.5	1755.1621	15.00763	0.000000
D_bosque	13.2	1383.1849	6.580069	0.000000
D_arbusto	12.6	850.9697	4.26792	0.000159
D_poblado	12	1068.3191	2.265676	0.110207
P_agrícola	11	784.3428	-1.165575	0.727577
X	10.6	593.3694	-2.840256	0.025418
P_bosque	10.1	797.4787	-4.605754	0.000036
P_arbusto	9.8	491.9391	-5.769112	0.000000
PRD	9.7	819.489	-5.941237	0.000000
Y	9.1	535.0238	-8.188238	0.000000
SHDI	8.8	496.2497	-9.102388	0.000000
D_agrícola	8	379.9345	-12.07642	0.000000

*Estadístico Z positivos ($Z > 1.65$) y $p < 0.05$ son variables significativas

Resultados randomForest Unidad Hidrográfica

```
randomForest(formula = ICA_TOTAL ~ P_bosque + P_arbusto + P_agricola + P_poblado
+ D_bosque + D_arbusto + D_agricola + D_poblado + PRD + SHDI + X + Y + Epoca,
data = Bdatos_uhidrografica[sample(c(1:48), 40, replace = TRUE), ], proximity = TRUE,
importance = TRUE)
```

Type of random forest: regression
 Number of trees: 500
 No. of variables tried at each split: 4
 Mean of squared residuals: 54.32873
 % Var explained: 39.39
 Correlación: 0.7231384

Family: gaussian
 Link function: identity
 Formula:
 $y \sim s(x1, x2, k = 10, bs = "tp", fx = FALSE)$
 Estimated degrees of freedom:
 4.4 total = 5.4
 REML score: 174.2771

Matriz de Importancia

Variables	Matriz de importancia		Matriz de significancia*	
	%IncMSE	IncNodePurity	Estadístico Z	Valor p
SHDI	10.058461	466.09154	9.405205	0.000000
D_arbusto	9.165469	456.60288	6.807745	0.000000
D_poblado	9.001674	391.13532	6.331312	0.000000
D_bosque	8.631368	456.87251	5.254195	0.000001
Época	7.887411	243.07324	3.090237	0.009794
X	7.778133	297.01324	2.77238	0.024866
P_agrícola	5.829928	231.14579	-2.894395	0.017598
Y	5.828574	203.5184	-2.898335	0.017398
P_bosque	5.549942	211.40266	-3.708797	0.001196
PRD	5.273653	190.45165	-4.512441	0.000044
P_arbusto	5.202584	204.3942	-4.71916	0.000017
P_poblado	4.725379	188.74716	-6.107215	0.000000
D_agrícola	3.792488	79.56666	-8.820731	0.000000

*Estadístico Z positivos ($Z > 1.65$) y $p < 0.05$ son variables significativas