



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

**CALIDAD ECOLÓGICA DE DOS SISTEMAS  
RIBEREÑOS DE MONTAÑA Y SU RELACIÓN CON EL  
USO DE SUELO**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**BIÓLOGO**

**PRESENTA**

Luis Fernando Monfil Hernández

**DIRECTORA DE TESIS**

M. en C. Eloísa Adriana Guerra Hernández

**ASESOR:**

Dr. Gerardo Cruz Flores



Ciudad de México, Agosto, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*"Olvidamos que el ciclo del agua y el ciclo de la vida son uno mismo"*

*Jacques Y. Cousteau*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a mi *alma mater*, la Universidad Nacional Autónoma de México; vaya a donde vaya siempre portaré tus colores y escudo con mucho orgullo.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por abrirme las puertas de sus instalaciones y brindarme las herramientas necesarias para completar mi formación académica durante estos años. Del mismo modo la carrera de Biología, por abrirme las puertas de su maravilloso mundo y porque jamás terminare de aprender de ella.

Al Laboratorio de Calidad de Agua y Ecohidrología, y especialmente a la M. en C. Eloísa A. Guerra Hernández, por darme su confianza, apoyo, tiempo y consejos, que, a lo largo de este tiempo, me permitieron lograr esta meta; siempre estaré agradecido por haber encontrado una asesora tan maravillosa como usted.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, cuyas sus lecciones y consejos fueron de gran ayuda para elaborar este trabajo y para mejorar mi formación académica y profesional.

A mis sinodales, M. en C. Alma Bella López López, Dr. Justo Salvador Hernández Avilés y Biól. José Luis Guzmán Santiago, por el tiempo dedicado a la revisión de éste trabajo, sus consejos, herramientas y conocimiento otorgado que, sin duda, perfeccionaron la calidad de este.

A mi familia, quiénes sin importar la distancia, siempre procuraron que yo tuviera todo para convertirme en lo que hoy soy. Jamás podré pagarles todo lo que han hecho y sacrificado por mí.

## **DEDICATORIAS**

A mi madre Carmen, jamás podré pagarte todo lo que has hecho para que lograra todo lo que me he propuesto. Tu amor me ha convertido en esto que hoy soy. Te amo infinitamente.

A mi padre, Benigno †. Ojalá pudieras acompañarme y ver en lo que me he convertido, fuiste y serás siempre una inspiración para mí, esto también es por y para ti, te amo papá.

A mis hermanos, Miguel y Eduardo, quienes a pesar de la distancia siempre están ahí, hemos reído, llorado y peleado, pero siempre estaremos juntos.

A la familia García Rojas Hernández, Nichte, Sra. María, Sr. Gabriel, Iqui: ustedes saben cuan importantes que son para mí, gracias por adoptarme y apoyarme de forma incondicional a lo largo de estos años, jamás podré pagarles lo que han hecho por mí.

A los maravillosos amigos que la facultad me dio: Fernanda, Jazmín, Iliana, Paulina, Victoria, Angélica, Diana, Maximiliano, Brenda, Rodrigo, Andrea, Antonio, Jocelyn; por convertirse en una familia para mí, por todos y cada uno de los momentos, lecciones y experiencias que hemos vivido y que estoy seguro, seguiremos viviendo.

A mis amigas de la vida, Kenia, Diana, Nayeli: por acompañarme todos estos años, sin importar la distancia o el tiempo sin vernos nunca dejaron de apoyarme, escucharme y estar ahí cuando lo necesito.

Por último, al Colegio Preparatorio de Xalapa, institución que me permitió llegar hasta este lugar y a sus profesores, cuya dedicación y trabajo, fueron una fuente de inspiración para trabajar en busca de lo más alto.

A todos y cada uno de ustedes MIL GRACIAS, por ser parte de mi vida. Soy una persona afortunada de tener compañeros de vida tan maravillosas como ustedes.

## Índice General

	Página
Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
2. Antecedentes	5
3. Marco teórico	9
3.1 Ecosistemas de montaña	9
3.2 Ambientes ribereños	10
3.2.1 Estructura de los ambientes ribereños	12
3.2.2 Elementos básicos de los ecosistemas ribereños	13
3.2.3 Elementos secundarios de los ecosistemas ribereños	15
3.2.4 Degradación de los ecosistemas ribereños	16
3.2.5 índice de Calidad de Bosque de Ribera (QBR)	17
3.3 Suelo	18
3.3.1 Calidad del Suelo	19
3.3.2 Degradación del Suelo	20
3.3.3 Cambios en el uso de suelo	21
3.4 Agua	22
3.4.1 Calidad del Agua	23
3.4.2 Degradación del agua	25
3.5 Interacción Agua-Suelo-Vegetación	26
3.6 Cuencas hidrográficas	26
3.6.1 Cuenca de México y subcuenca La Compañía	28
3.6.2 Cuenca del Balsas y subcuenca Nexapa	29
4. Justificación	31
5. Hipótesis	32
6. Objetivos	32
6.1 Objetivo general	32
6.2 Objetivos Particulares	32
7. Caracterización del Área de Estudio	33
7.1 Descripción y ubicación geográfica	33
7.2 Clima	34
7.3 Hidrología	34
7.4 Edafología	35
7.5 Vegetación	36
8. Método	39
8.1 Trabajo de Gabinete	39
8.1.1 Delimitación del Área de Estudio	39
8.2 Trabajo de Campo	40
8.2.1 Muestreo de agua	40
8.2.1 Muestreo de Suelo	40
8.2.3 Determinación de parámetros <i>In situ</i>	41
8.2.4 Determinación del índice de Calidad de Bosque de Ribera (QBR)	42
8.3 Trabajo de Laboratorio	46
8.3.1 Parámetros físicos y químicos de los afluentes y suelos ribereños medidos	46

8.3.1.1	Parámetros hídricos	46
8.3.1.2	Parámetros edáficos	48
8.4	Manejo y análisis estadístico de los datos	51
9.	Resultados y discusión	52
9.1	Caracterización de los sitios y estado ecológico de la ribera	52
9.1.1	Subcuenca La Compañía	54
9.1.2	Subcuenca Nexapa	63
9.2	Variación del Índice QBR en función del Uso de Suelo	74
9.3	Propiedades físicas y químicas de los afluentes y suelos ribereños	76
9.3.1	Suelos ribereños	76
9.3.2	Afluentes Ribereños	77
9.4	Análisis de Correlación Múltiple	80
9.5	Análisis de Componentes Principales	82
9.6	Variación de las propiedades hídrico-edáficas en función del Uso de Suelo	84
9.7	Índice QBR y la variación de la calidad hídrica-edáfica	92
9.7.1	Análisis de correlaciones múltiples: Índice QBR vs CP's.	92
9.7.2	Análisis de Regresión Lineal Múltiple	93
10.	Conclusiones	95
11.	Referencias	97

## Índice de Cuadros

	<b>Página</b>
Cuadro 1: Componentes principales de los ecosistemas ribereños	14
Cuadro 2: Componentes secundarios de los ecosistemas ribereños	15
Cuadro 3: Clasificación de la calidad de los bosques de ribera	18
Cuadro 4: Indicadores de la calidad del suelo (ICS).	20
Cuadro 5: Indicadores de la calidad del agua.	24
Cuadro 6: Propiedades físicas y químicas de agua y suelo analizadas	46
Cuadro 7: Caracterización de los sitios de estudio monitoreados	52
Cuadro 8: Puntajes QBR de los sitios de estudio	53
Cuadro 9: Desglose de puntaje QBR en Joya Alta	55
Cuadro 10: Desglose de puntaje QBR en Alcalica Alta	57
Cuadro 11: Desglose de puntaje QBR en Alcalica	58
Cuadro 12: Desglose de puntaje QBR en Alcalica 2	59
Cuadro 13: Desglose de puntaje QBR en Alcalica Vivero	60
Cuadro 14: Desglose de puntaje QBR en Tomacoco	62
Cuadro 15: Desglose de puntaje QBR en Cascada VW	64
Cuadro 16: Desglose de puntaje QBR en Vallecito	66
Cuadro 17 Desglose de puntaje QBR en Apatlaco	67
Cuadro 18: Desglose de puntaje QBR en Buenavista	68
Cuadro 19: Desglose de puntaje QBR en Santiago Xalizintla	70
Cuadro 20: Desglose de puntaje QBR en Nealtican	73
Cuadro 21: Valores de los indicadores de calidad de suelo analizados	76
Cuadro 22: Valores de los Indicadores de calidad de agua analizados	78
Cuadro 23: Calidad del agua de acuerdo a su conductividad eléctrica	79
Cuadro 24: Análisis de correlación múltiple	81
Cuadro 25: Análisis de componentes principales	82
Cuadro 26: Peso de las variables en cada componente principal.	83
Cuadro 27: Matriz de correlaciones entre Índice QBR y componentes principales	92



## Índice de figuras

	Página
Figura 1: Ecosistema ribereño	11
Figura 2: Estructura de los ambientes ribereños	13
Figura 3: Balance hídrico de la Ciudad de México	22
Figura 4: Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	33
Figura 5: Franjas ecológicas y su vegetación característica en el PNIP	37
Figura 6: Ubicación geográfica de los puntos de monitoreo	39
Figura 7: Toma de muestras de agua	40
Figura 8: Limpieza del suelo y toma de la muestra	41
Figura 9: Parámetros medidos <i>in situ</i>	42
Figura 10: Zona de aplicación del índice QBR	43
Figura 11: Porcentaje de la suma de superficies con respecto al área total de la ribera	43
Figura 12: Conectividad entre la ribera y el ecosistema forestal adyacente	44
Figura 13: Tipo geomorfológico de la ribera	45
Figura 14: Parámetros químicos del agua determinados en laboratorio	48
Figura 15: Parámetros químicos del suelo determinados en laboratorio	50
Figura 16: Sitio de estudio Joya Alta	54
Figura 17: Sitio de estudio Alcalica Alta	56
Figura 18: Sitio de estudio Alcalica	57
Figura 19: Sitio de estudio Alcalica 2	58
Figura 20: Sitio de estudio: Alcalica Vivero	60
Figura 21: Contraste entre ambos márgenes del afluente en el sitio Alcalica Vivero	61
Figura 22: Sitio de estudio: Tomacoco	62
Figura 23: Alteraciones en Tomacoco	63
Figura 24: Sitio de estudio: Cascada VW	63
Figura 25: Sitio de estudio: Vallecito	65
Figura 26: Alteraciones en Vallecito	66
Figura 27: Sitio de estudio: Sitio de estudio Apatlaco	67
Figura 28: Sitio de estudio: Buenavista	68
Figura 29: Alteraciones en Buenavista	69
Figura 30: Sitio de estudio: Sitio de estudio Santiago Xalizintla	70
Figura 31: Alteraciones en Santiago Xalizintla	71
Figura 32: Sitio de estudio: Nealtican	72
Figura 33: Alteraciones en Nealtican	73
Figura 34: Usos de suelo presentes en el área de estudio	74
Figura 35: Relación índice QBR - Uso de suelo	75
Figura 36: Gráfica de pesos de los componentes 1 y 2	83
Figura 37: Gráfica de pesos de los componentes 3 y 4	84
Figura 38: Variación de la temperatura en función del uso de suelo	85
Figura 39: Variación de la conductividad eléctrica del agua en función del uso de suelo	86
Figura 40: Variación de la dureza total en función del uso de suelo	86
Figura 41: Variación del nitrógeno amoniacal en función del uso de suelo	87
Figura 42: Variación del fósforo disponible del suelo en función del uso de suelo	88
Figura 43: Variación de la conductividad eléctrica del suelo en función del uso de suelo	88
Figura 44: Variación del contenido de materia orgánica del suelo en función del uso de suelo	89

Figura 45 Variación del pH del agua en función del uso de suelo	90
Figura 46: Variación de la concentración del oxígeno disuelto en función del uso de suelo	91
Figura 47: Variación de la concentración de nitratos en el agua en función del uso de suelo	91
Figura 48: Variación entre el QBR bibliográfico y el QBR calculado	94

## **Resumen**

Uno de los principales aspectos a considerar para cuantificar la calidad ecológica de los ecosistemas acuáticos fluviales, son las zonas ribereñas. Todos los servicios ecosistémicos y funciones que ostentan éstas áreas, les hacen excelentes indicadores en la gestión y ordenamiento del paisaje y éste es el sentido de su inclusión como elemento clave para la calificación del estado ecológico de los ríos. El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) es, por su ubicación, diversidad y riqueza de servicios ecosistémicos, una de las regiones más importantes del país, desafortunadamente, éstas mismas cualidades, lo han convertido en objeto de una fuerte degradación de sus ecosistemas y recursos.

En ésta investigación, se realizaron cinco muestreos bimestrales durante un año en doce puntos localizados en dos cuencas diferentes dentro del PNIP y en su área de influencia, con el objetivo de analizar los efectos que los cambios en el uso de suelo ocasionan sobre las propiedades físicas y químicas de suelos y aguas de ambientes ribereños, y su relación con el estado ecológico de la vegetación, obtenido con del índice de Calidad de Bosque de Ribera.

Fueron identificados seis diferentes usos que se le da al suelo a lo largo de doce puntos de monitoreo, encontrándose cuatro de ellos con estado de conservación bueno y dos con deficiente calidad, que corresponden a usos de suelo “Agropecuario” y “Agrícola-Urbano-Minero”.

A partir de un análisis de componentes principales, fueron obtenidas diez variables, hídricas y edáficas, las cuales describen el 75% de la variabilidad total de la información en los sistemas ribereños, sobre las cuales, los cambios en el uso de suelo han tenido efectos negativos significativos.

Por último, con ayuda de un análisis de regresión múltiple, fue posible concluir que el índice de calidad de bosques de ribera, está relacionado por dichas propiedades, disminuyendo sus valores, principalmente, en función del descenso del gradiente altitudinal, aunado al desarrollo de diversas actividades antrópicas, ocasionando pérdidas de la calidad ecológica de estos ambientes.

## **Abstract**

One of the main aspects to consider in quantifying the ecological quality of river aquatic ecosystems are the riparian zones. All the ecosystem services and functions that these areas provide make them excellent indicators in landscape management and planning, and this is the reason of their inclusion as a key element for qualifying the ecological status of rivers. The Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) is, due to its location, diversity and wealth of ecosystem services, one of the most important regions of the country, unfortunately, these same qualities have made it a target of strong degradation of its ecosystems and means.

In this research, five bimonthly samplings were carried out during a year at twelve points located within the PNIP and in its area of influence, this with the aim of analyzing the effects that changes in land use cause on the physical and chemical properties of riparian soils and waters, and relate these alterations to the ecological state of the vegetation obtained with the index of riparian quality.

Six different uses that are given to the soil were identified, classifying four of them with a good state of conservation and two with poor quality, these being "Agrícola" and "Agrícola-Urbano-Minero".

From a Principal Component Analysis, ten variables were obtained, which describe 75% of the total variability of the information in the studied systems, on which, changes in land use have caused significantly negative effects on their values. Finally, with the help of a multiple regression analysis, it was possible to conclude that the index of riparian quality is modified by these properties, decreasing their values, mainly, as a function of the descent of the altitudinal gradient, which allows the development of various anthropic activities, causing losses of ecological quality on these sites.

## 1. Introducción

Los ecosistemas naturales proporcionan bienes y servicios a la sociedad cuya obtención, en caso de no existir, tendría un gran coste. Algunos de los servicios que provee el medio natural son identificables localmente y sus beneficios también son inmediatos y a veces cuantificables económicamente. Por el contrario, otros se manifiestan en niveles y escalas muy amplias de manera que, para su uso correcto, deben utilizarse aproximaciones globales, regionales y locales y, si es posible considerar las proyecciones temporales (Castro-Nogueira, 2002).

Según el ecosistema a estudiar, será la definición del concepto de calidad ecológica (Gómez, 2013). En este sentido, para definir la calidad ecológica en un ecosistema acuático, se deben abarcar componentes físicos y químicos del agua, además de biológicos y físicos del hábitat (Gómez, 2013; Galeano-Rendón et al., 2017). En estos ecosistemas, determinar la calidad ecológica ayudará a definir los problemas posibles existentes en la cuenca, tales como la sedimentación, eutrofización y contaminación por agentes biológicos (Gómez, 2013). Los bosques ribereños han sido identificados como uno de los elementos ecológicos más valiosos de los sistemas fluviales, puesto que sus atributos están estrechamente relacionados con las condiciones hídricas, las cuales que determinan su calidad (Magdaleno & Martínez, 2014).

Para un óptimo reconocimiento de la afectación por diferentes actividades de los cuerpos hídricos, es necesario contar con información de diferentes estaciones de muestro que sirvan de referencia y de métodos que permitan evaluar dicha calidad de los hábitats (Acosta et al., 2009); la selección de éstos sitios de referencia, debe ser a partir de escenarios donde se encuentre una menor interferencia humana posible y son útiles para medir el grado de alteración antrópica en otros sitios pertenecientes a la misma región (Galeano-Rendón et al., 2017). Asimismo, es importante la evaluación de la calidad de las características físicas del cauce y la ribera, debido a que los resultados obtenidos son fundamentales considerando que un buen estado del entorno natural incide en la calidad ecológica (Galeano-Rendón et al., 2017). Lo anterior, se conoce mediante la aplicación de índices específicamente diseñados para ellos, entre los que destaca el índice de calidad de bosque de Ribera (QBR), el cual considera que los bosques de ribera son indicadores de la gestión antrópica del territorio (actividades de agricultura, ganadería, construcción de vías y represas, entre otros) y son elementos clave para la calificación del estado ecológico de los ríos (Galeano-Rendón et al., 2017).

Las características y funciones que ostentan los bosques de ribera les hacen excelentes indicadores de la gestión del territorio y este es el sentido de su inclusión como elemento clave para la calificación del estado ecológico de los ríos, sin embargo, en la mayoría de los casos, el estado de los bosques ribereños no ha sido bien analizado, y son la mayoría, probablemente una de las características ecológicas menos entendidas de ríos (Magdaleno & Martínez, 2014). Hoy en día, las riberas se encuentran en su mayoría en un estado importante de degradación, lo cual ha generado una fructífera línea de trabajo cuyo objetivo es la conservación de las menos degradadas o diseñar y ensayar técnicas de restauración en diferentes niveles para las degradadas.

La modificación del ambiente ha dado lugar en muchas ocasiones a la degradación del suelo, el cual, es un proceso perjudicial que afecta el desarrollo diversas actividades benéficas para la población. En una primera etapa el suelo forestal y de conservación se transforma en zona de cultivo, posteriormente y sin un manejo adecuado, el rendimiento de los cultivos disminuye, consecuencia del avance en la degradación. Con el tiempo, cambia el uso que se da a esa tierra, de ser cultivable se convierte en área de pastoreo, luego se cubre de maleza y finalmente, se torna árida (Encina e Ibarra, 2000). Los estudios sobre el cambio en el uso del suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación, desertificación y la pérdida de la biodiversidad de una región (Lambin et al., 2001). Se ha estimado que alrededor del 16% del suelo México está sujeto a inundaciones periódicas, por lo que podría considerarse, al menos potencialmente, como parte de ecosistemas ribereños o con cierta semejanza a ellos y aunque más de 70% de esta área se ha convertido en urbana y agrícola o se encuentra inundada por reservorios, alrededor de 2% de la tierra del área permanece como un ecosistema ripario natural (Granados-Sánchez et al., 2006).

En México, los ríos abarcan una red de 633,000 km de longitud (CONAGUA, 2011), con un flujo de agua de 399 km<sup>3</sup> de agua anualmente; Garrido et al. (2010), señalan que de éste escurrimiento el 87% se presenta en 39 ríos principales. El contexto básico de magnitud lineal e extensión de los ríos, asciende a una segunda dimensión que incluye áreas de superficies ribereñas, al considerar los alcances laterales del frente de humedad que tienen estos ríos en las tierras inundables (Cruz-Flores et al. En: Paz et al., 2019). Desafortunadamente, se desconoce el nivel de alteración la mayoría de los ríos y afluentes ocasionado por la acción humana. El

inadecuado uso del agua en México está generando no sólo problemas ambientales, sino también sociales y económicos; pese a existir un instrumento normativo que regula dicho recurso: la Ley de Aguas Nacionales (CONAGUA, 1992). Además de la extracción de agua de los ríos como un importante factor para su alteración, en México las descargas residuales y el aporte de fosfatos y nitratos provenientes de la agricultura juegan un importante papel en dicha modificación (CONAGUA, 2011).

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl es, por su ubicación, diversidad y riqueza de servicios ecosistémicos, una de las regiones más importantes del país, misma que beneficia a gran parte de la región centro, por lo que la presión en la que se encuentra la hace vulnerable a una fuerte degradación de sus ecosistemas y los recursos que provee (CONANP, 2013), haciendo necesaria una estrategia que en primer lugar, especifique las principales problemáticas en las que se encuentra y en una segunda parte, dictamine una estrategia en la que los recursos sean aprovechados de una manera sustentable que permita una mejor condición y conservación de la zona (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006).

## **2. Antecedentes**

El área metropolitana de la Ciudad de México, es una de las regiones más pobladas del mundo con una problemática compleja respecto a la degradación ambiental (Hernández-García & Granados-Sánchez, 2006); la crisis ambiental que enfrenta hace necesaria la inmediata implementación de estrategias que protejan y mejoren las áreas que en la zona proveen de procesos naturales fundamentales para todas las manifestaciones de vida.

En 1933, ante el deterioro incuantificable de la vegetación forestal en la Cuenca de México, se declararon zona protectora forestal los terrenos situados en las vertientes y planicies que forman parte de la Cuenca de México (DOF, 1933). Para 1937, se concede mayor precisión a la región que por su ubicación geográfica, riqueza natural e importancia ecológica debería formar parte del área protegida, mediante un decreto que declara la pertenencia de los terrenos de la Hacienda Zoquiapan y Anexas al Parque Nacional Izta-Popo. Con este decreto se faculta a las autoridades correspondientes para dictar las disposiciones necesarias a fin de suspender las explotaciones

forestales y atender las necesidades de los pueblos enclavados dentro de los límites del Parque (DOF, 1937).

El estudio de las riberas en las últimas tres décadas ha ido creciendo, como consecuencia al aumento en la degradación ambiental en estos ecosistemas, en donde el cambio de uso de suelo no ha sido la excepción. Ubalde et al. (1999), cuantificaron los cambios en la superficie de los suelos y la influencia que han tenido la pendiente y la orientación de estos cambios mediante la comparación de fotografías aéreas en la Ribera Salada, en Lleida, España. Los resultados arrojaron que los campos de cultivo habían disminuido, dando lugar a pastos, Por otro lado, el bosque denso había aumentado su extensión.

Segnini y Chacón (2005), realizaron un trabajo cuyo objetivo fue caracterizar el ambiente de los cuerpos de agua corriente de la cuenca alta del río Chama, a partir del análisis de tres grupos de variables: a) externas al cauce, b) hidrológicas y c) fisicoquímicas (Segnini y Chacón, 2005). Kutscher et al. (2009), trabajaron en los bosques ribereños del noroeste de Chubut sometidos a distintos usos de la tierra mediante la aplicación del índice QBR, adaptado a ríos andino-patagónicos. Los usos seleccionados fueron pastoreo doméstico, explotación forestal del bosque nativo plantaciones exóticas y urbanizaciones, además se incluyeron sitios de referencia en bosques nativos no intervenidos y en áreas pre urbanas. Los resultados indicaron que los sitios de menos calidad de ribera resultaron ser los de arroyos urbanos de aguas debajo de la urbanización, y los que atraviesan áreas sometidas al pastoreo, además la presencia de vegetación en las riberas determinó una mejor condición de los ecosistemas ribereños, aun cuando presentara dominancia de especies exóticas.

En otros casos, estos estudios se han relacionado con la caracterización ecológica y la descripción de la dinámica, la estructura y la composición vegetal de las zonas ribereñas. En México, existen varios trabajos encaminados al estudio de éstos ecosistemas, tal es el caso del realizado por Granados-Sánchez et al. (2005), donde hablan de la ecología de éstos ecosistemas, su importancia, composición y principales atributos.

Cañizales-Velázquez et al. (2009), evaluaron el efecto de las actividades turísticas en la diversidad y estructural vertical del estrato arbóreo en el bosque de galería del Río Ramos en Nuevo León. Así mismo, Rodríguez-Téllez et al. (2012), trabajaron en la calidad del bosque de ribera del río El Tunal, Durango, México, mediante la aplicación del índice QBR. Del mismo



modo Rodríguez-Téllez et al. (2016), aplicaron el índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR) con el fin de caracterizar el estado ecológico que guarda el bosque de ribera asociado al río La Saucedá, Durango, México.

Moreno et al. (2017), analizaron las variables de vegetación ribereña y su relación con las propiedades del suelo en un afluente del río Tacotalpa, Tabasco. Meli et al. (2017), ejemplifican la problemática de la restauración ecológica desde una perspectiva integral y discute algunos aspectos que pueden influir en el éxito de la restauración de los bosques de ribera del trópico húmedo de México.

Díaz-Palacio et al. (2018), analizaron la influencia del uso de suelo en las condiciones ecológicas de las zonas riparias en la cuenca del río Sabinal, Chiapas, utilizando el índice de calidad de las riberas (QBR) y la composición de especies leñosas en tres diferentes usos de suelo (bosque secundario, pastizales, y cultivos y asentamientos humanos). Los resultados mostraron un mayor impacto en las riberas influenciadas por actividades humanas, puntuando valores bajos del índice de calidad de ribera, contrario a las mayores calificaciones puntuadas en zonas riparias adyacentes a bosques secundarios.

En la Cuenca de México, Carmona-Jiménez et al., (2017) evaluaron un conjunto de parámetros hidromorfológicos, fisicoquímicos y biológicos en 10 ríos de montaña de ésta cuenca, con el fin de reconocer las características que definen las condiciones de referencia potenciales y el estatus de calidad ecológica en la región. Se encontró que las alteraciones más importantes son modificaciones estructurales del caudal que afectan la estructura y función de los ríos.

Dentro del área de estudio en cuestión, uno de los trabajos más importantes es el realizado por Granados-Sánchez et al. (2005), donde se habla del nivel de deterioro del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y el impacto ecológico-social de éste.

Ayala (2011), trabajó en la caracterización ecológica de sitios ribereños con diferentes usos de suelo en la región occidental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y sus áreas de influencia, con el objetivo de evaluar la relación existente entre la vegetación, el suelo y el agua, encontrando que el bosque de ribera sustenta la conectividad entre el sistema agua-suelo y es el elemento clave para la evaluación del estado ecológico de los ríos arroyos.

Cortés y Vega (2013), compararon la dinámica del carbono, nitrógeno y fósforo en el sistema agua-sedimento-suelo en sitios con distintas condiciones de uso de suelo en el Río Amecameca, del Parque Nacional Izta-Popo y su caracterización ecológica.

Uno de los trabajos más recientes realizados en la zona es el de Mena (2018), quien trabajó en la evaluación de la infiltración de agua en suelos ribereños con diferente tipo de vegetación y uso de suelo en cuatro sitios del PNIP, empleando el índice QBR para la caracterización del grado de perturbación de la vegetación. Encontró que la infiltración mostró correlación significativa con el porcentaje de humedad del suelo, el contenido de arcillas en el suelo y con la densidad real.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1 Ecosistemas de montaña**

Las montañas son ecosistemas que albergan gran biodiversidad y representan una fuente importante de servicios ambientales para la sociedad. Devenish et al. (2012), indican que el medio montañoso cubre el 27 % de la superficie de la Tierra, mantiene el 22 % de la población del mundo y además da lugar a los hogares de más del 20 % de la población mundial, aunque sus beneficios se extienden a billones de personas más que habitan en las tierras bajas y regiones de llanura.

Los ecosistemas montañosos ofrecen una gran diversidad de recursos sociales y ambientales como provisión de agua, energía, variedad de ecosistemas en ladera, diversidad genética, recursos forestales y minerales, productos agropecuarios, ocio y turismo, recursos paisajísticos, históricos y culturales, entre otros. De los diferentes flujos de recursos establecidos entre las áreas de montaña y las llanuras adyacentes, el hídrico es posiblemente uno de los que hace más patente la dependencia socioambiental respecto a estos ecosistemas (López-Alonso, 2005).

Los principales ríos del mundo se originan en las montañas. Wohl (2010) señala un número de características que definen un río de montaña, tales como: un pronunciado gradiente en el canal, una marcada variabilidad en su régimen hidrológico, una alta variabilidad espacial en la morfología del canal, entre otras.

La principal característica de los arroyos y ríos de alta montaña es que su régimen hidrológico viene determinado por el régimen nival y, en consecuencia, el caudal tiene una variabilidad estacional extraordinaria, con máximos primaverales asociados al deshielo (López-Alonso, 2005). En estos cuerpos acuáticos, el agua siempre es fría, con temperaturas medias que varían a lo largo del año desde algunos grados bajo cero hasta los 16°C.

Como la vegetación de la microcuenca suele ser escasa y con una proporción de roca muy importante, ingresa poca materia orgánica alóctona al río, ocasionando que el metabolismo del río resulte dominado por la producción primaria de las algas microscópicas dominantes (López-Alonso, 2005). Cuando los ríos entran en el dominio del bosque, su metabolismo pasa a ser mayoritariamente heterotrófico, es decir, dominado por la respiración, ya que, a pesar de no

disponer de un bosque de ribera estructurado como pasa en los ríos de montaña media, reciben importantes cantidades de hojas y ramas desde el ecosistema terrestre (López-Alonso, 2005).

Los ríos de montaña suelen transportar grandes cantidades de sedimentos (Elosegi & Díez, 2009). Ésta capacidad de arrastre depende del caudal y de la pendiente: en los tramos de mayor pendiente, el cauce suele presentar cascadas, mientras que aguas abajo, la pendiente del valle disminuye, con lo que se reduce la capacidad de acarreo de sedimentos (Elosegi & Díez, 2009).

En México, los ecosistemas de montaña son de los más extensos y pese a que aproximadamente la mitad del territorio nacional está ubicada por debajo de los 1 000 m s.n.m., el 69% de sus habitantes vive en comunidades que se localizan por encima de esta altitud, tan solo las localidades del Eje Neovolcánico Transversal albergan casi 30% de la población total del país (Cantú et al., 2013).

La vegetación ribereña entra dentro de los diez principales tipos de vegetación presentes en México (CONABIO, 1998). Cantú et al. (2013) indicaron que en México la vegetación ribereña abarca un total de 150 mil hectáreas, de las cuales, aproximadamente 3576 se encuentran en zonas montañosas por encima de los 1000 m s.n.m.

### **3.2 Ambientes Ribereños**

A lo largo de los márgenes del cauce de corrientes fluviales se encuentran franjas angostas de vegetación que pueden denominarse como la interfase entre los ecosistemas terrestres y acuáticos (Granados-Sánchez et al., 2006). El término de ambiente ribereño, también conocido como ecosistemas ripario o de galería, se refiere a esa zona de transición, la cual se caracteriza por una flora y fauna la cual está altamente influenciada por la intensidad luminosa, el contenido de agua y la granulometría del suelo (Figura 1) (Granados-Sánchez et al., 2006).

La zona ribereña puede considerarse como el borde inmediato del agua, donde algunas plantas y animales especializados forman una comunidad distinta (Granados-Sánchez et al., 2006). En una escala mayor, podría ser el área inundada periódicamente por el agua, los bancos y las planicies de inundación de un río. En la escala más grande, podría ser la franja de bosque que tiene una influencia significativa sobre el ecosistema ribereño y que es influenciada

significativamente por el río. Así, los ecosistemas ribereños tienen muchos atributos que realzan su diversidad biológica, como lo son: límites, patrones sucesionales, disposición vertical en estratos y microhábitats especiales definidos por rasgos físicos.

La vegetación y el afluente están intrínsecamente acoplados en estos ecosistemas (Valencia-Leguizamón & Tobón, 2017). Éste acoplamiento, ejerce un control significativo sobre el movimiento del agua en las cuencas de drenaje y en la respuesta de los caudales (Todd et al., 2006), de este modo, la estructura y actividad de la vegetación regulan los procesos hidrológicos y, del mismo modo, los procesos ecológicos moderan la estructura y actividad de la vegetación, la cual, finalmente determinará las funciones y servicios ecosistémicos de estos ecosistemas a múltiples escalas (Wei et al., 2011).

Son zonas reguladoras de los flujos de agua (superficiales y subsuperficiales) y de sedimentos (los cuales llevan consigo nutrientes) desde las partes más altas de la cuenca hacia el drenaje de agua. Actúan como filtros y por ello son designadas como “sistema tampón”, ya que retienen parte del nitrógeno y el fósforo transportados por la escorrentía. Una banda de vegetación de ribera de 16 m de largo retiene 50 % del nitrógeno y 95 % del fósforo (Granados-Sánchez et al., 2006). Es por ello que estas zonas frenan la eutrofización y la contaminación de los ríos causada por los abonos o pesticidas traídos de tierras agrícolas que son transportados por las aguas.



Figura 1. Ecosistema ribereño (Laboratorio de Calidad de Agua y Ecohidrología, 2020).

### 3.2.1 Estructura de los ambientes ribereños

Las características estructurales y funcionales del ecosistema ribereño son los enlaces clave para mantener la integridad ecológica (USDA, 2003). Este ecosistema, está estructurado, generalmente, por el área riparia (faja ribereña propiamente dicha) y la planicie de inundación con sus condiciones edáficas propias y la vegetación que ahí crece (vegetación riparia o ciliar) (Granados-Sánchez et al., 2006). Sin perturbación, la evolución del ecosistema ripario se da en la dirección de adecuación entre su forma y su función: el ancho del área riparia más común varía entre 12 y 30 metros a lado y lado del canal. Ésta variación se da principalmente en función de los cambios en los tipos de vegetación, la humedad del suelo y otras características ecológicas. Si la estructura o función se ve comprometida, las consecuencias pueden hacerse evidentes en la degradación del hábitat.

La zona ribereña puede ser dividida para un mejor estudio. Dufor y Rodríguez-González (2019), describen cuatro subzonas, representadas en la figura 2:

1. Zona inundada permanentemente o zona acuática: generalmente es la zona acuática, que incluso en temporada de secas, mantiene un flujo de agua constante. Posee alta dinámica de sedimentos y en ella se encuentran plantas acuáticas tolerantes a la inundación permanente.
2. Zona frecuentemente inundada (zona riparia): es una denominación de perturbaciones fluviales, con alta erosión de sedimento y deposición del mismo. En ella se encuentran plantas acuáticas riparias y emergentes tolerantes a la inundación frecuente.
3. Zona regularmente inundada (zona riparia): hay una deposición significativa de sedimento más fino y en ellas se establecen plantas tolerantes a dichas condiciones.
4. Zona ocasionalmente inundada o elevada: aquí no existe una dinámica de sedimentos significativa, generalmente se encuentra inundación en temporada de lluvias. En ella se asientan plantas ribereñas con tolerancia variable a la inundación dependiendo de la microtopografía local.

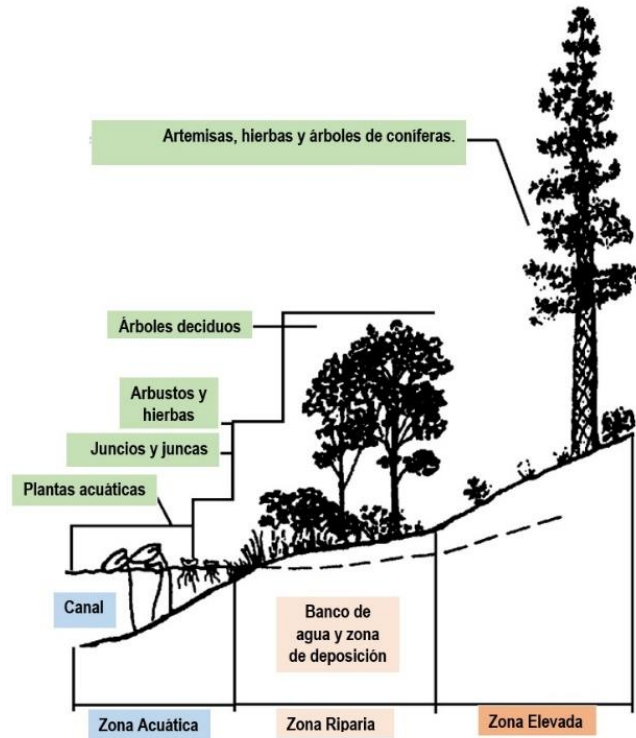


Figura 2. Estructura de los ambientes ribereños. Modificado de: OEPC (1994).

### 3.2.2 Elementos básicos que conforman los ecosistemas ribereños

El ecosistema ribereño es el vínculo más importante entre el ecosistema de las tierras altas y el hábitat acuático. Los componentes del ecosistema ribereño son complejos y diversos y, como tales, proporcionan una variedad de funciones que son típicas solo de ese ecosistema (USDA, 2003).

En el cuadro 1, se describen las principales funciones de los componentes más importantes de los ecosistemas ribereños: el suelo, la vegetación y el agua.

Toda comunidad vegetal asociada a cuerpos acuáticos, sin importar si está en desiertos o montañas, es considerada como ribereña (USDA, 2003). La estructura de esta vegetación es compleja y diversa, y es un componente crucial en los sistemas fluviales con múltiples funciones socio-ecológicas (Dufor y Rodríguez, 2019). Las copas de los árboles grandes se enredan para crear un microclima que funciona para enfriar el ecosistema ribereño, mantener la temperatura del agua y proteger las áreas húmedas (USDA, 2003). Así mismo, éstas comunidades vegetales




## Calidad Ecológica de dos sistemas ribereños de montaña y su relación con el uso de suelo

ofrecen recursos alimentarios abundantes y diversificados para la comunidad de animales; son considerados la base de la cadena alimentaria de los cuerpos de agua (Ceccon, 2003).

Además de la protección que la vegetación ribereña otorga al canal de agua, también brinda material orgánico proveniente del mantillo (hojas y ramas caídas en estado de descomposición), el cual se transporta al cuerpo de agua y constituye el suministro energético más importante sobre la producción autóctona de los ríos (Ceccon, 2003).

Otro gran beneficio es la captación de dióxido de carbono, el cual reduce los gases de efecto invernadero y la diversificación del paisaje (Naiman et al., 2005). Socialmente, la vegetación ribereña contribuye a la identificación del paisaje al cual pertenece, lo que contribuye a servicios culturales, ya sean recreativos, espirituales o de inspiración.

*Cuadro 1. Elementos básicos que conforman los ecosistemas ribereños.*

<b>Elemento</b>	<b>Funciones</b>	<b>Ejemplo</b>
<b>Suelo.</b>	Mantener la humedad. Ofrecer un medio de cultivo para las plantas. Promover la buena calidad del agua al actuar como filtro.	
<b>Vegetación: árboles, arbustos, hierba.</b>	Proporcionar comida. Crear corredores de migración. Proporcionar refugio y protección. Crear microclimas: proporcionar bosque fresco y agua fría.	
<b>Sistema lóxico</b>	Se lleva el exceso de agua. Proporcionar alimentos y agua para animales. El agua se filtra en las corrientes durante los períodos de bajo flujo. Influir en el microclima.	

Respecto al sustrato, este brinda el soporte para el crecimiento de la vegetación. Sin suelo, las plantas no pueden crecer; sin plantas, el suelo se lava. Cuando el suelo está deteriorado o la capa




superficial del suelo está amenazada, las plantas son menos abundantes, tienen áreas basales más pequeñas y tienen más espacio entre ellas. Una cobertura vegetal pobre deja el suelo aún más expuesto a la escorrentía y la erosión. A medida que se mantiene poca o ninguna humedad en el suelo, la capa freática disminuye, la calidad del agua sufre y sobreviven menos plantas (USDA, 2003).

### 3.2.3 Elementos secundarios de los ecosistemas ribereños

La complejidad de los ecosistemas ribereños, hace que sus componentes sean mucho más específicos que en otros ecosistemas. Algunos de éstos derivan de los principales, pero su importancia amerita la explicación de ellos (Cuadro 2).

*Cuadro 2. Elementos secundarios de los ecosistemas ribereños.*

<b>Elemento</b>	<b>Funciones</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Raíces</b>	Capturar el flujo terrestre y los nutrientes. Eliminar el nitrógeno y fósforo del suelo. Estabilizar los bancos manteniendo la tierra unida. Atrapar y retener contaminantes.	
<b>Hojarasca, residuos orgánicos.</b>	Proporciona alimento. Aporta nutrientes al suelo Se biodegrada en tierra vegetal nueva.	
<b>Grandes desechos leñosos atrapados en arroyos</b>	Desarrollo de llanuras aluviales. Proporcionar hábitat. Proporcionar descanso y cobertura para peces. Almacenar sedimentos y materia orgánica.	

En el apartado anterior se hizo énfasis en las funciones de la parte aérea de las plantas, sin embargo, la raíz de ellas, cumple con funciones igual de importantes en los ecosistemas ribereños; Mander et al. (2005), consideran que las raíces de la vegetación, incrementan la

rigurosidad de la superficie, lo que favorece la infiltración y retiene sedimentos, contaminantes y nutrimentos, del mismo modo, evitan la erosión del suelo y fortalecen los bancos de las orillas del cauce. Además, actúan como un agente transformador cuando las bacterias de ésta zona descomponen los residuos de pesticidas y los transforma en componentes no tóxicos y otras formas biodegradables (Mendoza et al., 2014).

Otra función derivada de la vegetación ribereña es la caída de hojarasca, la cual, sumada a otros desechos naturales, son el aporte de nutrientes al suelo, a su humedad y su aireación.

### **3.2.4 Degradación de los ecosistemas ribereños**

Los ecosistemas ribereños son zonas boscosas muy apreciadas por los humanos y muchos animales, dadas las buenas condiciones y recursos que brindan, sin embargo, también son las zonas terrestres con mayores deficiencias en su manejo, utilizadas y entendidas de nuestro paisaje. Su manejo debería realizarse con mucho cuidado (Granados-Sánchez et al., 2006), no obstante, su correspondencia ambiental con los ecosistemas adyacentes y su importancia en el contexto de la cuenca, este componente se explota intensivamente debido a su proximidad con el agua y a su productividad para el pastoreo y la agricultura. En ese sentido las zonas ribereñas constituyen uno de los elementos clave en el funcionamiento de una cuenca, el cual no debe tratarse en forma aislada sino como parte de un todo en el manejo integral de la misma, donde cada una de ellas representa un caso especial (Mendoza et al., 2014).

Una buena condición hidrológica del suelo está relacionada con diversas características, de las cuales, las más relacionadas con la vegetación podrían ser la densidad aparente, la materia orgánica, la tasa de infiltración la temperatura, tasa de infiltración y la resistencia a la penetración (Giraldo, 2002).

La eliminación de la vegetación es la principal causa de degradación del suelo y de la pérdida de su capacidad de tolerar la erosión, esto como consecuencia de que el suelo quede desnudo y sufra las consecuencias del impacto de las gotas de lluvia y del aumento de la escorrentía, produciéndose una pérdida neta del suelo y de su capacidad de mantener la vida (García-Fayos, 2004).

En México, son seis cuencas las que poseen un grado muy elevado de impacto en sus zonas ribereñas, entre las que se encuentran las cuencas de México y la del río Balsas, Santiago, Pánuco, Bravo y la del río La Sabana (Garrido et al., 2010), el área total riparia en alteración es del 30% de la totalidad de las zonas ribereñas del país. Otras 90 cuencas tienen un impacto intermedio, entre niveles de impacto alto y medio, 297 más entre bajo y muy bajo (Garrido et al., 2010).

### **3.2.5 Índice de Calidad de Bosque de Ribera (QBR).**

Para el estudio ecológico de las zonas ribereñas, Munné et al. (1998), propusieron el índice de Calidad de Bosque de Ribera (QBR, por sus siglas en catalán) el cual, es un índice que está basado en cuatro componentes del hábitat ripario: la cobertura total de la vegetación riparia, la estructura de la cobertura, la calidad de la cobertura y las alteraciones en el canal. Así mismo, toma en cuenta las diferencias en la geomorfología de los ríos desde las zonas altas hasta las corrientes bajas, mismas que son medidas de forma simple y cuantitativa. El índice es medido en campo y se puntúa entre 0 y 100 puntos, tomando en cuenta ambos lados del cauce.

Antes de medir el índice QBR, el canal principal y la zona de planicie deben ser perfectamente diferenciados identificando la zona de almacenamiento. A pesar de que ésta delimitación no es fácil, el observador debe usar todos los indicadores disponibles del área riparia, tales como las terrazas fluviales, la presencia de vegetación riparia y los efectos de las inundaciones.

Para la determinación del índice, el río es dividido en dos secciones: el canal principal y el área ribereña. El primero es subdividido en dos: el área permanentemente inundada y la zona del canal ubicado entre el canal con flujo permanente y el banco de agua y sitio de almacenaje.

El puntaje total, tiene intervalos que van desde los 0 a los 100 puntos y se obtiene mediante la suma de cuatro puntajes, basada en los cuatro aspectos antes mencionados, los cuales, se califican en cuatro valores: 0, 5, 10 o 25. Si el puntaje final es negativo, se puntúa como 0 y si es superior a 25 se puntúa como 25. Según el puntaje final, se asigna un color el cual indica el grado de conservación de la vegetación de ribera (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de la calidad de los bosques de Ribera (Munné et al., 1998).

Nivel de Calidad	Características	Valor índice QBR	Color
<b>Muy Bueno</b>	<i>Sin alteraciones, estado natural</i>	$\geq 95$	Azul
<b>Bueno</b>	<i>Ligeramente perturbado</i>	75-90	Verde
<b>Moderado</b>	<i>Inicio de alteración importante</i>	55-70	Amarillo
<b>Deficiente</b>	<i>Alteración fuerte</i>	30-50	Naranja
<b>Malo</b>	<i>Degradación extrema</i>	$\geq 25$	Rojo

La categoría azul, hace referencia a sitios donde la zona de ribera posee excelentes condiciones, similares a su estado natural. En la categoría verde, se clasifican aquellos sitios que presentan ligeras perturbaciones; en color amarillo, se identifican aquellos donde las alteraciones son más notorias, en ellos las zonas ribereñas tendrán una importante alteración, pero moderada. En la categoría naranja, se sitúan aquellos con una calidad ribereña deficiente, la alteración es fuerte y las condiciones indican una gran perturbación. En la última categoría, de color rojo, se enlistarán aquellos sitios donde la degradación es extrema, las alteraciones a la ribera son evidentes e intensas y la calidad del ecosistema muy mala.

### 3.3 Suelo

El suelo es un recurso natural finito y no renovable que presta diversos servicios ecosistémicos o ambientales (Burbano, 2016), si bien el concepto varía en función del área en el que se trabaja, Lutens y Salazar (1999) lo definen como “un sistema vivo, heterogéneo y dinámico que incluye componentes físicos, químicos, biológicos y sus interacciones”. Algunas de las funciones y servicios ecosistémicos que éste recurso provee son los siguientes: producción de alimentos y biomasa, importante para los ciclos biogeoquímicos, almacenamiento o fijación de carbono, almacenamiento y filtración de agua, soporte de las actividades humanas y fuente de materias primas, reserva de biodiversidad, depósito del patrimonio geológico y arqueológico y funge como elemento del paisaje y patrimonio cultural de la humanidad (Bautista et al., 2004; Burbano, 2016)

En México, la riqueza edáfica también constituye una parte de la megadiversidad biológica del país puesto que de las 30 unidades de suelo reconocidas por la FAO/UNESCO/ISRIC, 21 se encuentran en el país (SEMARNAT, 2006).

### **3.3.1 Calidad del Suelo**

La calidad del suelo se interpreta como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. Este concepto ha sido relacionado con la funcionalidad del suelo e incluye atributos como la fertilidad, la productividad potencial, utilidad y salud del recurso (Bautista et al., 2004)

El concepto de calidad es funcional, e incluye variables que sirven para evaluar la condición del suelo, también denominadas indicadores de calidad de suelo (ICS) (Hidalgo et al., 2017). Los ICS son herramientas de medición que ofrecen información sobre las propiedades, procesos y características del suelo (Bremer y Ellert, 2004). Son atributos medibles que revelan la respuesta de la productividad o funcionalidad del suelo al ambiente e indican si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece (Ghaemi et al., 2014).

Los indicadores de la calidad del suelo (Cuadro 4) pueden ser propiedades físicas, químicas y biológicas, o procesos que ocurren en él (SQI, 1996). Las del tipo físicas son una parte necesaria en la evaluación de la calidad de éste recurso, puesto que no son fácil de recuperar (Singer y Ewing, 2000). Los indicadores biológicos, integran una amplia cantidad de factores que pueden afectar la calidad del suelo, los cuales son principalmente generados por la presencia de micro y macroorganismos (Karlen, et al., 1997). Y, por último, los indicadores químicos, afectan directamente las relaciones suelo-planta, la calidad y disponibilidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y nutrimentos para las plantas y microorganismos (SQI, 1996).

*Cuadro 4. Indicadores de la calidad del suelo (ICS). (Tomado de Bautista et al., 2004).*

<b>Propiedad</b>	<b>Relación con la condición y función del suelo</b>
<b>Físicas</b>	
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo
Profundidad del suelo	Estima la productividad y la erosión
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica
<b>Biológicas</b>	
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica
Respiración, contenido de humedad y temperatura	Mide la actividad microbiana, estima la actividad de la biomasa
N potencialmente mineralizable	Productividad del suelo y suministro potencial del N
<b>Químicas</b>	
Materia orgánica	Define la fertilidad del suelo, estabilidad, erosión
pH	Define la actividad química y biológica
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana
P, N y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida de potencial de N; productividad e indicadores de la calidad ambiental

### 3.3.2 Degradación del Suelo

Desafortunadamente, a pesar de la riqueza de suelos que tiene México y la necesidad de producción de alimentos, la sociedad tiene gran desinterés en la condición en que se encuentran y su alto nivel de degradación, en comparación con otros recursos como el agua o los bosques, esto consecuencia de que no se puede consumir directamente el suelo y no se le da la importancia desde social hasta económica a éste recurso.

En los últimos años, la ganadería y el pastoreo han ocasionado daños incalculables en numerosas regiones del mundo, alrededor de 2,000 millones de hectáreas de suelo, se han degradado por causa de actividades humanas (Colegio de Posgraduados, 2013). Siendo la erosión hídrica, eólica y degradación física los principales tipos de degradación del suelo, cuyos efectos, impactan a más de 1,200 millones de habitantes alrededor del mundo. En México, la situación

no es para nada alentadora. De los 200 millones de hectáreas que el país ocupa, más de 142 millones de ellas, se encuentran en con algún proceso de degradación (Colegio de Posgraduados, 2013), lo cual tiene consecuencias directas en los humanos tales como la escasez de agua, la baja y deficiente producción de alimentos, equiparando los daños a una escala mayor, con los provocados por el cambio climático.

### **3.3.3 Cambios en el uso de suelo**

La degradación del suelo ocurre como respuesta a múltiples factores ambientales, sociales y económicos (Cotler et al., 2007). Si bien es cierto que en algunos ecosistemas los suelos pueden verse afectados por factores naturales, en las riberas el factor preponderante recae en las actividades humanas (Cotler et al., 2007). En general, todo cambio en el uso de suelo que modifique el tipo y densidad de las poblaciones vegetales originales y que ocasionen el descubrimiento de la superficie del suelo, propician la degradación de éste. El primer efecto al perder la cobertura vegetal es la erosión por la lluvia, posteriormente y en función de las características del suelo (estructura, textura y contenido de materia orgánica), se observan efectos negativos en la capacidad de infiltración, disminuye la recarga del acuífero, se pierde profundidad, disminuye la productividad, entre otras. (Cotler et al., 2007).

Diversos estudios han concluido que los cambios en el uso y cobertura del suelo, afectan la geomorfología, las propiedades del suelo, procesos hidrológicos y la calidad del agua en escala global, regional y local (Wan et al., 2014), y éstos, la integridad ecológica de ecosistemas acuáticos (Miserendino et al., 2011). Los principales causantes antropogénicos de éstos cambios en uso y cobertura de suelo son la sobre explotación de las tierras agrícolas, la conversión de vegetación natural a bosques comerciales, el pastoreo y la urbanización (Namugize et al., 2018). Los efectos se han demostrado tanto en zonas altas como bajas de la cuenca, sin embargo, coinciden en la pérdida de la calidad del agua consecuencia de dichas modificaciones (Namugize et al., 2018).

En México, éstos procesos de cambios en el uso de suelo y vegetación se han llevado a cabo durante varios siglos, sin embargo, éstos se incrementaron a partir de la segunda mitad del siglo XX (Cuevas et al., en Cotler 2010). Las actividades que mayor impacto han tenido sobre la

vegetación natural, son la ganadería, la agricultura y el crecimiento de los asentamientos humanos y las zonas urbanas. Entre los años 70 y el 2009, más del 80% de las cuencas en México perdieron entre el 1 y el 20% de su vegetación primaria, dando una pérdida acumulada del 78% de toda la vegetación primaria eliminada en el periodo de ese estudio (Cuevas et al., en Cotler 2010). En ese mismo periodo, en la cuenca del Balsas, se destruyó el 14% de vegetación primaria, equivalente a 521,000 ha y 825, 228 ha de vegetación secundaria, mientras que en la cuenca de México se perdió entre el 30 y 80% de vegetación primaria y entre el 30 y 50% de vegetación secundaria (Cuevas et al., en Cotler 2010).



*Figura 3. Cambios en el uso del suelo. Recuperado de: <https://www.proceso.com.mx/480732/profepa-clausura-predio-cambio-uso-suelo-areas-forestales-en-edomex>*

### **3.4 Agua**

El agua de una de las sustancias más importantes que existen en la naturaleza; puede presentarse en los tres estados de la materia, y mantenerse durante largo tiempo conservando su calidad, si no es afectada por contaminación. El 98% del total del agua es salada y se encuentra en océanos y mares; el restante 2% del agua es dulce, sin embargo de ésta agua potencialmente aprovechable, el 68.9% está congelada en los polos, el 30.8% es agua subterránea y solamente el 0.3% es superficial, localizada en ríos, lagos, lagunas y humedales (Denzin et al., 2017). Pese a su escasez, el agua disponible puede ser aprovechada por todos los seres vivos y hasta que la población humana alcance los 9 mil millones en el año 2050 (Denzin et al., 2017), sin embargo, esta disponibilidad, estará sujeta a las vigentes formas irracionales de uso de los ecosistemas y



el consumo desmedido de la misma, que, de no modificarse, no permitirán este abasto (Perevochtchikova, 2016).

### **3.4.1 Calidad del Agua**

Una de las actividades más importantes para la gestión del recurso hídrico es el monitoreo periódico de los cuerpos de agua (Castro et al., 2014). La calidad del agua se define en función del uso al que se destinará y de un conjunto de características físicas, químicas y biológicas y se basa en la determinación de sustancias químicas específicas que pueden afectar la salud (OMS, 2006). Para determinar la calidad de las aguas superficiales se utilizan distintos indicadores físicos, químicos, microbiológicos y biológicos, así como índices de calidad (Calvo, 2013).

Las variables que se han tenido en cuenta para determinar la calidad del agua, pueden ser divididas en dos grupos, las de origen viviente, que comprenden tanto residuos y desechos provenientes de organismos vivos o incluso los mismos organismos y las de origen antrópico, en la que se consideran a todas las sustancias sintetizadas por el hombre a través de procesos industriales (Alonso et al., 2003). Las variables microbiológicas tienen especial atención puesto que ocasionan enfermedades a través de virus, bacterias y parásitos. Además, algunas bacterias denominadas coliformes totales y fecales son indicadores de la contaminación del agua, las últimas evidenciando la presencia de heces de humanos y animales en los sistemas acuáticos (Quintero et al., 2010).

Otro de los aspectos a tener en cuenta en los planes de monitoreo ambiental en la calidad del agua son los nutrientes; el enriquecimiento de ellos pese a que puede llegar a ser positivo, en exceso puede generar el agotamiento de oxígeno, grandes proliferaciones de algas o hierbas y ésta eutrofización afecta la salud y el aprovechamiento del recurso (Quintero et al., 2010). Los nutrientes llegan a los cuerpos acuáticos procedentes de diferentes ámbitos: la ganadería, la agricultura, la industria y las aguas residuales, posteriormente, estos nutrientes son transportados por los ríos a través de toda la cuenca, donde se van acumulando y generando problemas ambientales y para la biota, hasta que desembocan en el mar, donde no causan daños menores. A manera de ejemplo, se puede mencionar que el catión de amonio indica contaminación por fertilizantes y heces, el anión nitrito indica actividad bacteriológica mientras que el anión de

nitrate contaminación agrícola (Quintero et al., 2010). Los fosfatos por su parte indican la presencia de detergentes y fertilizantes, el exceso de éste nutrimento genera eutrofización y su medición incluye compuestos como ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. Así mismo los sulfuros o metales pesados, llegan a ocasionar toxicidad, persistencia y bioacumulación; a determinadas concentraciones implicará la muerte de especies o la limitación del recurso para usos humanos.

Quintero et al., (2010), proponen algunas variables que pueden ser monitoreadas para la evaluar la calidad el agua (Cuadro 5), del mismo modo, se integran las variables hidrológicas, las cuales, permitirán cuantificar la carga del contaminante de agua, el cual es el producto de la concentración del tóxico por el caudal de la descargar de la fuente de contaminación (Hudson, 1997).

*Cuadro 5. Indicadores de la calidad del agua. Tomado y modificado de Quintero et al. (2010).*

<b>Físicas y químicos</b>	<b>Biológicos/Microbiológicos</b>
Color	DBO <sub>5</sub>
Olor	DBO
Transparencia	Bacterioplancton
Turbiedad	Fitoplancton
Temperatura	Coliformes fecales y totales
pH	<b>Nutrientes</b>
Oxígeno disuelto	Fósforo total
Dureza total	Ortofosfatos
Salinidad	Nitrógeno total
Conductividad	Amonio
Sólidos disueltos totales	Nitrito
Sólidos sedimentables	Nitrato
Sólidos suspendidos totales	<b>Metales</b>
Sólidos totales	Fe, Hg, Cd, Cu, As, Zn, Pm, Cr, Ni
<b>Hidrológicos</b>	
Caudal	
Velocidad de la corriente	
Superficie	

En México, la calidad de las aguas superficiales se determina a partir de tres parámetros: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO<sub>5</sub>), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (CONAGUA, 2018b).

Para el 2017, la Red Nacional de Monitoreo contaba con 5,028 puntos de monitoreo, de los cuales, 2,685 correspondían a áreas superficiales en los que se incluyen ríos, arroyos, lagos, lagunas, presas y zonas costeras, calificando su calidad como Excelente, Buena, Aceptable, Contaminada o Fuertemente Contaminada, basándose en cada uno de los indicadores y sus respectivas escalas (CONAGUA, 2018b).

### **3.4.2 Degradación del Agua**

Uno de los principales problemas de sistemas acuáticos loticos y lenticos, aguas subterráneas y zonas costeras, es su contaminación, ocasionada en mayor medida por las descargas de aguas residuales (UNAM y CNDH, 2018). Estas descargas deterioran la calidad del agua y afectan a los ecosistemas que dependen de ella; la contaminación del agua disminuye su disponibilidad. En México, cada segundo se vierte a las redes de descarga y cuerpos de agua 88.6 m<sup>3</sup> de aguas contaminadas sin tratamiento alguno provenientes del uso público urbano (CONAGUA, 2018b), cada litro contamina aproximadamente 8 litros de agua dulce. Esto no solo disminuye la disponibilidad del recurso, también ocasiona una explotación en los mantos acuíferos. Del mismo modo y en una escala más amplia, el ciclo hidrológico se ve modificado, la disminución del recurso e incluso la desecación de los cuerpos de agua, reducen el recurso disponible renovable para que se lleve a cabo el ciclo, lo que ocasiona bajas precipitaciones. En México, datos oficiales disponibles indican, por ejemplo, que los porcentajes de sitios con calidad “excelente” han disminuido de 40% a 31% (para DBO), o de 23% a 4% (para DQO) entre 2008 y 2016 (CONAGUA, 2017).

Sin embargo, la problemática no solo radica en la contaminación del recurso, sino también en la disminución de su volumen, afectando ambos su disponibilidad, generando escasez a un nivel crítico y creciente en México con gran impacto, sobre todo a nivel regional (López, 2017). Dada la diversidad en la distribución geográfica de los recursos hídricos y las actividades económicas, se estima que alrededor del 80% del producto interno bruto y 75% de la población del país se localizan en regiones que sufren de escasez de agua alta y muy alta (CONAGUA, 2017). El estrés hídrico se expresa sobre las fuentes de agua subterráneas y superficiales: uno de cada seis acuíferos localizados en el norte y centro del país está comprometido por sobreexplotación, salinización o contaminación (CONAGUA, 2017).

### **3.5 Interacción Agua-Suelo-Vegetación**

Millones de personas sufren los efectos de la limitación en el acceso al agua. La explotación de los recursos hídricos, su mal uso o su contaminación, presenta una amenaza cada vez mayor para la disponibilidad y la calidad del agua para sus diferentes usos. Los bosques, juegan un papel integral en el suministro de agua de calidad y también en estabilizar y proteger los suelos de la erosión (Blanco, 2017). La mayoría del agua dulce en el planeta, se proporciona a través de cuencas, cuya vegetación está conservada y se compone principalmente de árboles, los cuales protegen no sólo las aguas superficiales, también las subterráneas, principalmente de contaminantes por medio de la labor filtrante de los suelos forestales (FAO, 2009). Tanto el suelo como el agua son condicionantes esenciales del crecimiento y salud de la vegetación en un sitio. Pese a esto y con la necesidad del agua para actividades antrópicas, los bosques están frecuentemente bajo una gran presión ambiental.

La calidad del agua, la protección frente a avenidas, inundaciones, deslizamientos de tierra, aludes, colmatación de embalses de agua, protección de orillas y márgenes de cursos de agua son algunos de los servicios ambientales que los bosques y otros tipos de vegetación proporcionan y que están relacionados con el ciclo hidrológico global (Ellison et al., 2017). Es por lo que, cuando la gestión forestal, encargada de modificar y aprovechar los procesos ecológicos naturales para obtener distintos bienes y servicios de los bosques, modifica la cobertura arbórea ya sea al plantar, cortar o podar árboles y otra vegetación presente en bosques, el ciclo hidrológico se verá modificado. Así mismo, los niveles de erosión y sedimentos, están relacionados directamente con el tipo y grado de cobertura vegetal que tiene el suelo, así como de las alteraciones que la gestión forestal haya podido ocasionar en el suelo (Blanco, 2017).

La gran relación que existe entre la vegetación, el suelo y el agua, hace que cualquier tipo de modificación sobre alguno de estos tres componentes tenga un impacto directo sobre los otros dos y esto, se vea reflejado en los ecosistemas naturales.

### **3.6 Cuencas hidrográficas**

Las cuencas conjuntan un complejo mosaico de ecosistemas naturales y transformados, donde se reconocen los vínculos entre las zonas altas y bajas, cuyas externalidades, transportadas por

los cursos de agua, crean una conexión física entre poblaciones alejadas unas de otras (Cotler, 2010). Los territorios de las cuencas otorgan bienes y servicios ambientales invaluable para nuestra existencia como son el suministro de agua dulce, regulación del caudal de los ríos, el mantenimiento de los regímenes hidrológicos naturales, el control de la erosión o la respuesta a eventos naturales extremos, entre otros (Balvanera y Cotler, 2009).

Las condiciones orográficas y climáticas del país han modelado las cuencas en una gran diversidad de tamaños y formas. La cuenca es reconocida como la unidad territorial más adecuada para la gestión integrada de los recursos hídricos (Dourojeanni et al., 2002). Según información del INEGI, INE y CONAGUA (2007), México cuenta con 1,471 cuencas, con una amplia diversidad de áreas, desde los miles a un kilómetro cuadrado. Aunado a éste exorbitante número, se llevó a cabo una agrupación de cuencas, en función a los siguientes criterios:

- Cuencas contiguas cuya superficie individual es menor a 200 km<sup>2</sup>.
- Si la suma de las superficies de dichas cuencas no alcanzara los 200 km<sup>2</sup>, todas se agrupan con la cuenca contigua o circundante de mayor tamaño
- Las barras costeras unidas o conectadas físicamente al continente quedan integradas a la cuenca con la que se relacionan espacialmente.
- Todas las cuencas agrupadas deben localizarse dentro de la misma región y subregión hidrológica de acuerdo a la delimitación establecidas por la CONAGUA.
- Las cuencas por agruparse deben ubicarse también, en la misma provincia fisiográfica de acuerdo al mapa de provincias fisiográficas de la UNAM.
- Además, se agruparon cuencas cuyo tipo de drenaje y dirección preferencial fuese semejante.

Como resultado, el total de unidades se redujo de 1,471 a sólo 393, de las cuales 228 no se vieron modificadas mientras que 1,243, sufrieron algún tipo de modificación (Cotler, 2010).

En años recientes, las cuencas hidrográficas se han convertido en unidades físico-naturales cada vez más utilizadas para el estudio y gestión de los recursos naturales en México y el mundo (Cotler y Caire, 2009), esto debido a que la cuenca interconecta todo el espacio geográfico que las constituye a través de los flujos hídricos, superficiales y subterráneos, y los flujos de nutrientes, materia y energía (Walker et al., 2006).

### **3.6.1 Cuenca de México y subcuenca La Compañía**

Ubicada en la zona centro del país, se delimita la Cuenca de México, una cuenca endorreica que se encuentra asentada sobre una planicie aluvial que anteriormente era un sistema de antiguos lagos, abarca parte del Estado de México y la Ciudad de México. Tiene una altitud promedio de 2240 m s.n.m. y un área aproximada de 9,600 km<sup>2</sup>, de los cuales, 2400 corresponden a área urbana. Es la cuenca más poblada del país con aproximadamente 20 millones de habitantes, es decir, el 19% de la población total del país (Ruíz en Cotler, 2010), de los cuales el 1,52% habita en la zona alta, 39.51 en la zona media y el 58.97% en la zona baja de la cuenca.

Datos de la CONAGUA (2018a), indican que la Cuenca de México tiene una disponibilidad de agua anual de entre 100 y 350 hectómetros cúbicos por hectárea anualmente. Pese a la baja disponibilidad del recurso y sumando el factor poblacional, en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el 97% de la población cuenta con acceso a éste recurso.

En México, la distribución de agua no es homogénea ni tampoco su disponibilidad estacional (Bunge en Cotler, 2010), tal es el caso de la Cuenca de México, donde desde tiempos prehispánicos se lucha contra las inundaciones y se han construido varios acueductos con el fin de extraer el agua de la cuenca en ciertas épocas del año, ya que la lluvia provoca grandes inundaciones (Perló y González, 2005), paradójicamente, en esta región del país, se invierten grandes cantidades de dinero con el propósito de traer agua de otras cuencas que logran abastecer el suministro de éste recurso a toda la población que vive en ésta zona del país (Cotler, 2010).

Una de los elementos más importantes de una cuenca es la vegetación, desafortunadamente en la Cuenca de México la vegetación sufre una degradación en niveles críticos, se cree que menos del 20 de la vegetación en ésta cuenca es primaria y menos del 10% es secundaria, esto como consecuencia de que de los 18 mil km<sup>2</sup> que abarca ésta cuenca, en su mayoría tiene un uso de suelo antrópico. La conectividad entre la vegetación se ha visto afectada (INEGI, 2009), ocasionado por la fuerte demanda de actividades agrícolas y pecuarias, alta red carretera y alta concentración demográfica. Las numerosas actividades antrópicas tienen consecuencias no sólo en la pérdida de la vegetación, ya que, al ser éste uno de los componentes principales de la cuenca, su pérdida ocasiona entre otros problemas, la reducción en la recarga de los acuíferos. En el caso de la cuenca de México, solo 3400 hm<sup>3</sup> del agua es anualmente renovable, haciendo

de ésta la cuenca que menor volumen de agua recupera y si se lleva a cifras per cápita, se convierte en la única cuenca del país que renueva menos de 500 metros cúbicos de agua y recupera solo 144 m<sup>3</sup> por habitante (CONAGUA, 2018a).

Al no renovarse éste recurso, la posibilidad de que los mantos acuíferos se recarguen a partir de la infiltración se hace una tarea cada vez más compleja; el acuífero que se encuentra en la ZMVM, es uno de los 205 a lo largo del país que no se encuentran disponibles para su aprovechamiento, lo cual, origina una problemática no sólo ambiental, también económica, como lo es la explotación de otros acuíferos con el fin de abastecer ésta zona (CONAGUA, 2018a). La suma de todos éstos problemas ocasiona que la ZMVM sea la que mayor presión ejerce sobre el recurso hídrico (CONAGUA, 2016b).

Ubicada al suroriente dentro de la cuenca de México, se encuentra la Subcuenca La Compañía, la cual en gran parte de su área pertenece al Estado de México y una proporción menor se ubica dentro del estado de Puebla. Su parteaguas, son los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, (5230 y 5426 m s.n.m. respectivamente). Es una subcuenca cerrada, la cual abarca un área de 4865 km<sup>2</sup>.

Dentro de ella se encuentran tres áreas naturales protegidas, el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Santuario del Agua y Forestal “El Salto” y el Parque Nacional Sacromonte.

### **3.6.2 Cuenca del Río Balsas y subcuenca Nexapa**

La cuenca del río Balsas está localizada en 420 municipios de los estados de Guerrero, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala, México, Michoacán, Jalisco y la Ciudad de México, es una cuenca del tipo exorreica, cuya superficie comprende un área de 120,036 km<sup>2</sup>, lo que la hace la segunda más grande del país, solo por detrás de la cuenca del Río Bravo. Está limitada por las sierras Madre del Sur y la de Juárez, así como por el eje neovolcánico. Con un total de 9.7 millones de habitantes, la cuenca del Balsas es la cuarta más poblada del país. La distribución de la población es bastante heterogénea, el 72.18% habita en la zona alta, el 24.46 en la zona media y solo el 3.36% en la zona baja (Ruíz en Cotler, 2010). Esta distribución, ocasiona que diversas actividades antrópicas se desarrollen en la parte alta de la cuenca, lo cual, repercutirá en las zonas media y baja.

En ésta región del país, la situación si bien no es crítica, si da señales de necesitar acciones que eviten lo que pasó en la ZMVM; el crecimiento demográfico ha ido en aumento en los últimos años y la explotación de los recursos también se ha incrementado. La disponibilidad del agua anualmente en ésta cuenca es de entre 100 y 350 hm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2018b), volumen que la hace vulnerable a carecer de éste recurso en algunas épocas del año.

La cuenca del Balsas, se encuentra dentro de las diez cuencas que más cobertura de vegetación primaria posee, de sus 120 mil km<sup>2</sup>, casi 7 millones de hectáreas son de vegetación natural, 2.3 millones de vegetación primaria, es decir sólo el 21.2%, dominando la vegetación secundaria en ella (Garrido et al., 2010), lo que es indicador de un proceso de degradación de la vegetación primaria, ya sea por causas naturales como huracanes o factores antrópicos como la deforestación o bien un proceso de recuperación natural o inducida, en el caso de abandono de tierras de cultivo.

La degradación de la vegetación altera la recuperación del agua en la cuenca, a pesar de ser la segunda con mayor extensión, el agua renovable en ésta cuenca la posiciona como la octava en éste rubro, con 22 mil hm<sup>3</sup> anualmente, que si se relaciona con los 12.04 millones de habitantes que se concentran en ésta cuenca, arroja que por habitante solo se renuevan 1,799 metros cúbicos por año, siendo la séptima que mayor volumen per cápita renueva (CONAGUA, 2018b). Sumando todos éstos factores, la Cuenca del Balsas se convierte en una de las que mayor presión hídrica tiene, con el 50.2% (CONAGUA, 2018b).

La Subcuenca Nexapa se encuentra dentro de la región hidrológica Balsas, en la zona del Alto Balsas y pertenece a la cuenca del Río Atoyac. Posee un área de 4,440 km<sup>2</sup> y es del tipo abierta. Comprende desde el nacimiento del Río Nexapa, desde la vertiente Oriental del Volcán Iztaccíhuatl y en las vertientes Oriental y Sur del Volcán Popocatepetl. Éste es un río de régimen permanente, cuyo cauce se ve alimentado principalmente por los deshielos del volcán.



#### **4. Justificación**

El 8 de noviembre de 1935 fue declarado, por decreto presidencial, Parque Nacional a las montañas Iztaccíhuatl y Popocatepetl. Sin embargo y a 85 años de éste decreto, las condiciones de ésta zona siguen mostrando un incremento en su deterioro. La creciente densidad poblacional y como consecuencia, el incremento en la demanda de recursos y aumento de diversas actividades que satisfagan las necesidades de los habitantes que rodean el Parque Nacional se han convertido en un problema que merece la pena ser atendido. Así mismo, la contaminación de los cuerpos de agua es otro factor que, con el incremento poblacional, impacta la disponibilidad de éste recurso. Un trabajo realizado por Garrido et al. (2010), arrojó que tanto la Cuenca de México como la del Balsas, son dos de las once cuencas mexicanas que presentan un alto nivel de degradación en su canal fluvial. La principal razón de éste problema es la descarga de aguas residuales sin tratamiento, haciendo que la mayor fuente de agua para el abastecimiento doméstico y público, sea obtenida de fuentes subterráneas, las cuales, por su mejor calidad son sobreexplotadas (Bunge & Vichi en Cotler, 2010) dejando de lado las aguas superficiales del país, que en su gran mayoría se encuentran con un alto grado de contaminación.

Al interior de las cuencas hídricas la vegetación juega un papel fundamental, al mantener la calidad del agua, regular la cantidad y periodicidad de los cauces, mantener la estabilidad ambiental cuenca arriba-cuenca abajo, infiltrar el agua para recargar los acuíferos, proteger el suelo, capturar CO<sub>2</sub>, controlar las inundaciones, y ser refugio y proveedor de recursos para la fauna (Matthews et al., 2000; Revenga et al. 1988). Sin embargo, tanto la Cuenca del Río Balsas como la Cuenca del Valle de México, presentan una alteración alta en la zona riparia junto con otras seis cuencas a nivel nacional.

Todos éstos factores, han generado una alteración en el paisaje misma que ha generado una fructífera línea de trabajo que permita ampliar el conocimiento que hasta ahora se tiene de las causas y ejes conductores de la transformación del paisaje del bosque ribereño y los recursos hidrológicos que a través de él se ven influenciados, de la misma forma, éste conocimiento permitirá incluir a la población local en los procedimientos formales de la planificación y gestión del paisaje y apoyará en el diseño de estrategias para resolver problemáticas locales.

## **5. Hipótesis**

Las propiedades físicas y químicas de suelo y agua se ven influenciadas de manera negativa, con consecuencias como el exceso de nutrientes, cambios en las temperaturas e incremento en la cantidad de sales, debido a los cambios en el uso de suelo por actividades de recreación, ganadería, agricultura o presencia de asentamientos humanos, y el deterioro de la calidad ecológica de los sitios, generando una disminución en los valores del índice QBR.

## **6. Objetivos**

### **6.1 Objetivo general**

Evaluar la calidad ecológica del bosque de ribera, en sitios con diferente uso de suelo de dos afluentes del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, utilizando el índice de Calidad de Bosques de Ribera (QBR) y el comportamiento de algunos parámetros físicos y químicos de agua y suelo.

### **6.2 Objetivos Particulares**

- Realizar un estudio del comportamiento de las propiedades físicas y químicas del suelo y agua en doce sitios pertenecientes a dos afluentes del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su área de influencia.
- Obtener el Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR) para los sitios bajo estudio.
- Evaluar la relación entre el índice QBR, los parámetros hídricos y los parámetros edáficos para conocer la calidad ecológica de cada uno de los sitios de estudio en función de los cambios en el uso del suelo.

## 7. Caracterización del Área de Estudio

### 7.1 Descripción y ubicación geográfica

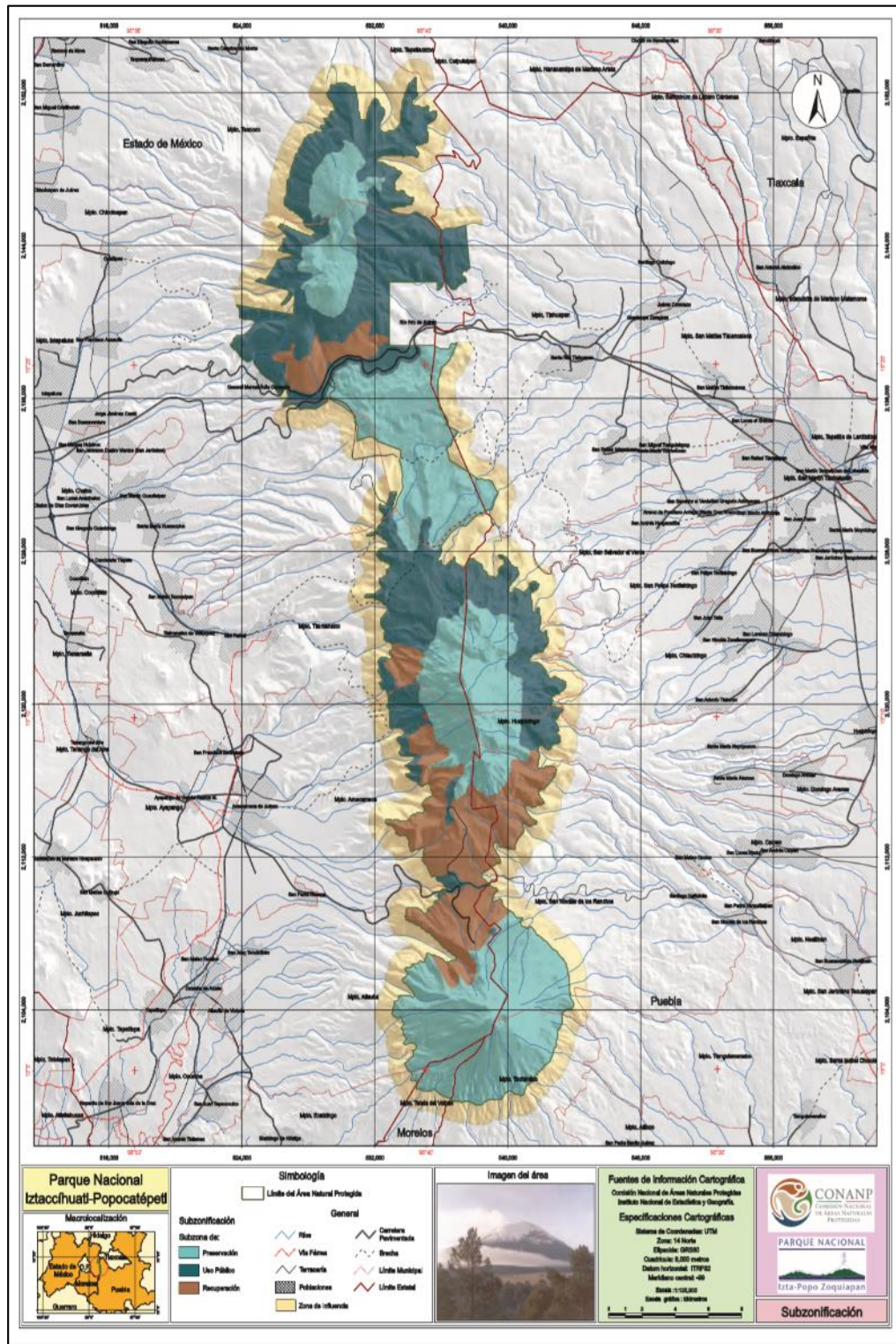


Figura 4. Ubicación del Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl (Tomado de CONANP, 2013)

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) (Figura 4), se ubica entre los estados de Puebla, Morelos y de México. Se localiza entre las siguientes coordenadas extremas 18°59'00.43" y 19°28'09.44" de Latitud Norte y 98°34'55.88" y 98°46'40.95" de Longitud Oeste. De acuerdo con el decreto oficial publicado en 1948, su superficie es de 25,679 hectáreas, aunque datos de la CONANP (2013), hacen referencia a un área aproximada de 40 mil hectáreas, esto debido a que incluye la elevación de las montañas donde el parque se ubica. Sus geoformas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesíticas. Su rango altitudinal va desde los 3 mil a los 5 mil 480 metros sobre el nivel del mar.

## 7.2 Clima

Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68°C por cada 100 metros.

Además, por la altitud ésta región se ve influenciada en la época fría del año por sistemas de tiempo propios de las latitudes medias, como los frentes fríos y la invasión de masas de aire polar continental; en el verano influyen los sistemas meteorológicos propios de la zona tropical como los huracanes y las ondas tropicales. A continuación, se presentan algunos de los climas más representativos, según la clasificación climática a de Köeppen (CONANP, 2013):

- Clima templado subhúmedo, con lluvias en verano: (C (w''2) (w) (b') ig)
- Clima templado, húmedo, con lluvias de verano: C(m) (w) b(e) g
- Clima semifrío húmedo con lluvias de verano: Cc (w2) (w) iw''
- Clima frío, con una temperatura media anual de entre -2°C y 5°C: ETHw
- Clima muy frío, con una temperatura media anual de menor de -2°C y la del mes más caliente menor de 0°C: EFHw

## 7.3 Hidrología

De acuerdo con el Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl, la Sierra Nevada se divide en cuatro subcuencas, estas son: en el flanco occidental de la Sierra Nevada, la subcuenca denominada Chalco-Textcoco, del lado oeste y suroeste la subcuenca de Cuautla-Yautepec, en

la parte oriental tenemos dos subcuencas, al norte, la subcuenca del Río Atoyac y al sur de este flanco oriental, la subcuenca del río Nexapa (CONANP, 2013)

Los recursos hídricos que se originan en el Parque Nacional se forman principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial la cual es abundante en la región, y sobrepasa los mil milímetros anuales. Las corrientes superficiales pueden ser permanentes o intermitentes, éstas últimas son innumerables durante la época lluviosa y también se produce gran infiltración de agua que va a alimentar las corrientes subterráneas (CONANP, 2013).

El parteaguas de la Sierra Nevada, donde se localizan los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, es el origen de la división de las aguas tributarias del Océano Atlántico (Golfo de México) y de las del Océano Pacífico, formando dos de las más importantes cuencas del país; la de México y la del Alto Balsas y de varias subcuencas que abastecen a numerosas comunidades y municipios incluyendo aquellas que rodean al Parque Nacional (CONANP, 2013).

#### **7.4 Edafología**

El material parental de los suelos está compuesto por rocas ígneas extrusivas de pómez, por la acumulación de cenizas volcánicas de diferentes etapas de actividad volcánica y por sedimentos de origen volcánico. La múltiple superposición de capas de tefras (pómez) y cenizas, además de los efectos del intemperismo hídrico y eólico y del clima, ejercen efectos diferenciales sobre los procesos de formación de los suelos característicos de esta región que son los andosoles, los cuales debido a su composición y a la acción combinada de estos factores pueden ser vítricos, húmicos, mólicos y ócricos. El suelo representativo de la región es andosol mólico, que se forma a partir de las cenizas volcánicas, aunque su evolución es diversa, según lo accidentado del terreno y de su acumulación (CONANP, 2013).

En el Programa de Manejo del PNIP (CONANP, 2013) se hace mención que, de acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), las unidades de suelo presentes en el área del parque son:

- Litosoles. Suelos someros, con menos de 0.1 metros de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental.

- Regosoles. Son suelos formados a partir de material suelto como arena, grava o piedra; en el parque se localizan a altitudes por debajo de los 3 mil 900 metros sobre el nivel del mar y normalmente son pobres en contenido de materia orgánica y nutrientes.
- Andosoles. Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica; y la proporción de vidrios volcánicos presentes.
- Cambisoles. Son suelos mejor desarrollados, con horizontes A y B bien definidos, pero pobres en contenido de nutrientes; presentan potencial para el desarrollo forestal con adecuadas prácticas de manejo para la conservación de suelo y captación de humedad.
- Fluvisoles. Son suelos formados en cañadas, escurrimientos y zonas de depósitos de material reciente; de textura gruesa, su fertilidad es baja debido al escaso contenido de nutrientes.

Por lo anterior, se comprende que los suelos presentes en el parque están asociados con su origen volcánico, por lo que el tiempo no será un factor importante en la formación de estos, sin embargo, factores como el clima, el material parental y la vegetación, serán factores con mayor peso en las propiedades edáficas del sitio (Sandoval, 2020).

## **7.5 Vegetación**

El Parque Nacional es el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro del país. Su importancia radica no sólo en la extensión de bosques en buen estado de conservación, sino en la diversidad de su flora y fauna. La conservación de estos ecosistemas permite la continuidad de los procesos naturales y garantiza la calidad de los servicios ecosistémicos, fundamentales para los millones de habitantes de los valles centrales de México, Puebla y Morelos, la macrorregión más poblada del país (CONANP, 2013).

En el Parque Nacional, la distribución de la vegetación atiende a la altitud, de modo que pueden distinguirse tres pisos fundamentales de vegetación que incluyen zonas de transición o ecotonos donde se llevan a cabo complejas relaciones ecológicas entre las comunidades, dificultando su interpretación y límite altitudinal preciso. A pesar de ello, se ha clasificado la vegetación en tres categorías básicas, según la clasificación de Rzedowski (1978).

Ante éste panorama, dentro de los límites del parque y en los confines de su área de influencia, tanto en la región de Zoquiapan y Anexas como en la de Iztaccíhuatl-Popocatépetl es posible observar cuatro grandes fajas altitudinales (Hernández-García y Granados-Sánchez, 2006) (Figura 5), en las cuales se observa el impacto causado por los diferentes grados de aprovechamiento de los recursos naturales a través del tiempo y que actualmente definen el patrón de actividades productivas de las comunidades:

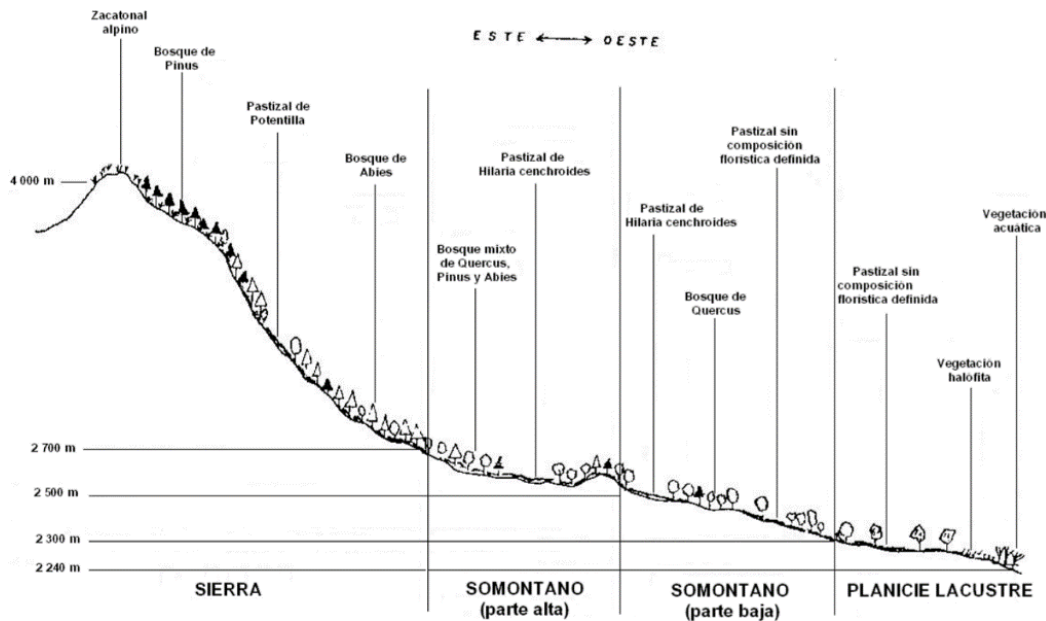


Figura 5. Franjas ecológicas y su vegetación característica en el PNIP. (Hernández-García y Granados-Sánchez, 2006).

- Sierra. Se extiende desde los 2700 a los 5000 m s.n.m. y separa la cuenca de México de las de Puebla y Morelos. Es la zona cubierta actualmente por la vegetación arbórea, pero que en su límite inferior muestra marcadamente los efectos del deterioro de su riqueza biológica. Con diferentes niveles de perturbación y daño, es la zona que actualmente debe ser objeto de mayor atención en cuanto a la amenaza potencial y actual que significa el avance de los asentamientos urbanos y el aprovechamiento no sostenible de sus recursos.
- Zona de erosión inducida. Se ubica entre los 2500 y 2750 m s.n.m. Es un área que, por su acceso relativamente fácil y la cercanía con las comunidades, actualmente muestra los efectos de la utilización no sustentable de los recursos naturales.

- Somontano. Es la zona en la que los cerros descienden a la llanura y en la que se desarrollan gran parte de las actividades productivas. Los principales cultivos en pequeña escala son diversos frutales, algunas hortalizas y especies forrajeras y como cultivos de subsistencia el maíz y el frijol, principalmente.
- Llanura: Es la zona de asentamientos humanos y la que, por su cercanía con la ciudad de México, se ve sometida a fuertes presiones por el uso de suelo para la construcción de casas y los servicios que son inherentes al desarrollo urbano, pero cuyos primeros y permanentes efectos recaen sobre los recursos naturales y la organización comunitaria tradicional.



## 8. Método

### 8.1 Trabajo de Gabinete

#### 8.1.1 Delimitación del Área de Estudio

Se seleccionaron dos afluentes con corrientes permanentes y a lo largo de cada uno de ellos, se eligieron seis sitios de estudio en zonas sometidas a diferentes usos de suelo y con diferentes grados de conservación a través del gradiente altitudinal dentro y fuera del PNIP, tanto hacia la zona occidental como oriental.

Con ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) QGis Versión 2.18.16, se delimitó la red hidrográfica de las subcuencas de estudio. Igualmente se identificaron los doce sitios ubicados en una corriente de agua permanente de las dos diferentes subcuencas, los cuales aparentaban diferente grado de conservación y uso de suelo (Figura 6).

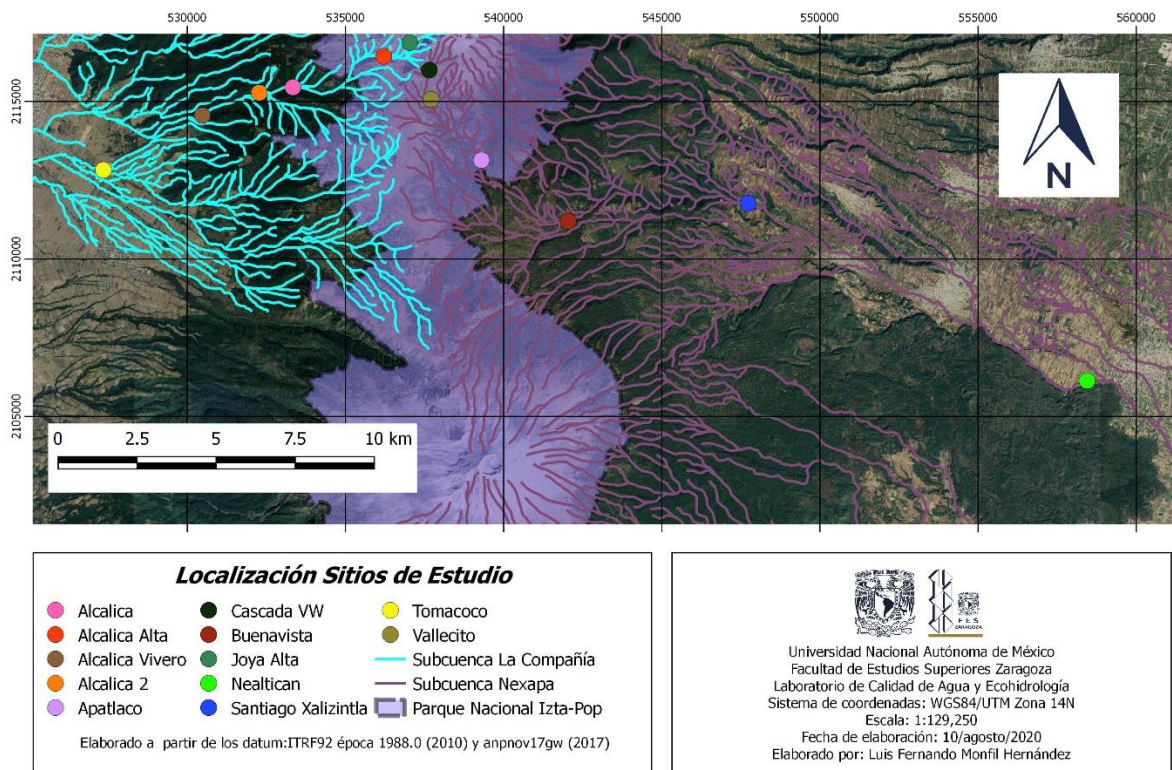


Figura 6. Ubicación de los sitios de estudio

## 8.2 Trabajo de Campo

Los datos analizados corresponden con los resultados de 10 salidas a campo realizadas durante dos periodos de estudio: septiembre-diciembre 2018 y febrero-mayo 2019. La red de monitoreo para los dos períodos de evaluación cuenta con 12 sitios. Se realizó la caracterización de cada uno de ellos, la cual incluye los siguientes datos: fecha y hora, ubicación (coordenadas geográficas UTM), nubosidad, pendiente del terreno y del cauce, uso que se le da al suelo y el tipo de vegetación predominante.

### 8.2.1 Muestreo de Agua

Para cada sitio de estudio se tomaron bimestralmente muestras de agua de forma manual utilizando recipientes de polietileno blancos de 1000 mL y 500 mL (Figura 7). En función de los análisis a realizar, se llevó a cabo la conservación de cada muestra, además de mantenerlas a una temperatura menor a 4 °C para su traslado al laboratorio. Los recipientes se llenaron completamente hasta su parte superior se taparon. Esto limita la interacción con la fase gaseosa y la agitación durante el transporte, consiguiendo que quede la menor cantidad de aire en el recipiente para evitar que pudiera interferir con el analito y desvirtuar la medición.



*Figura 7. Toma de muestras de agua.*

### 8.2.2 Muestreo de Suelo

De cada sitio se obtuvieron dos muestras compuestas de suelo, una por cada lado del cauce del río, las cuales fueron tomadas una distancia lateral de un metro del cauce y conformadas por

tres muestras recolectadas a 0, 15 y 30 metros a lo largo de un transecto marcado, y a una profundidad de 0 a 30 cm del área seleccionada para tomar la muestra de suelo, donde previamente se limpió la superficie, eliminando hojarasca, rocas y restos de materia orgánica (Figura 8). Además, para cada muestra se registró la fecha, el sitio del muestreo y la ubicación dentro del transecto (Ej.: 271019-1 LD 0m). De cada una de estas muestras se tomaron 300 g. para formar la muestra compuesta con una parte proporcional de cada una y formar una muestra compuesta de 900 g. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico herméticas y se colocaron en una hielera para no alterar sus propiedades edáficas. Para la determinación de la densidad aparente, se tomaron núcleos de suelo con tubos de cobre a los 0 y 30 m del transecto, a cada lado del cauce. Para esta muestra, se introdujo el tubo completamente en el suelo y posteriormente se retiró con ayuda de una pala, se selló con plástico y ligas en los extremos, se etiquetó y almacenó para su traslado al laboratorio.



Figura 8. Limpieza del suelo y toma de la muestra

### 8.2.3 Determinación de parámetros *In situ*

Con un multiparámetro (Combo HANNA modelo HI-98129), se realizó la medición *in situ* de temperatura, pH y conductividad eléctrica de la corriente de agua, debido a que pueden alterarse en un periodo de tiempo corto, igualmente se hizo la determinación del oxígeno disuelto con ayuda de un oxímetro YSI Modelo 55-25FT.

La alcalinidad total, está representada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (Goyenola, 2007), fue determinada por el método volumétrico de los dos indicadores.

El oxígeno disuelto, que es la cantidad de este gas disuelto en el agua, fue determinado con el método de Winkler con la modificación de la azida de sodio. Por último, las durezas de calcio

y total, que indican la cantidad de calcio y la suma de calcio y magnesio cuantificados en forma de carbonatos, se determinaron por el método complejométrico.

Además, en cada sitio fueron determinados los siguientes parámetros hidrológicos: a) ancho del cauce, medido con ayuda de un flexómetro, b) el perfil batimétrico, obtenido al medir la profundidad del cauce en intervalos regulares de una orilla a otra del cauce, y c) la velocidad de corriente, medida con un correntómetro digital con medición mínima de 0.1 m seg<sup>-1</sup>(Figura 9).

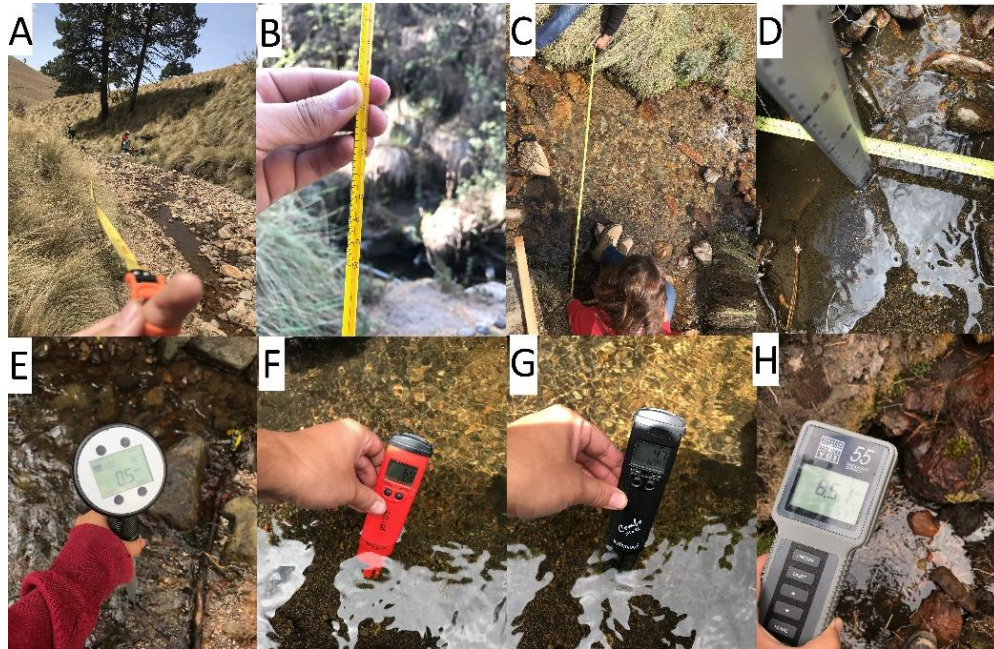


Figura 9. Parámetros medidos in situ. A: Medición del transecto; B: Medición de temperatura ambiente; C: Ancho del cauce; D: Perfil batimétrico; E: Velocidad del cauce; F: pH y temperatura; G: Conductividad eléctrica y H: Oxígeno disuelto

#### 8.2.4 Determinación del Índice de Calidad de Bosque de Ribera (QBR)

Previo a la aplicación del índice, se diferenció y delimitó dentro de cada sitio de estudio la orilla y la ribera. La primera corresponde a la zona del cauce inundable en crecidas periódicas en un periodo aproximado de dos años y la segunda es la zona inundable en crecidas de gran magnitud (Figura 10) (Munné et al., 1998; ACA, 2006).

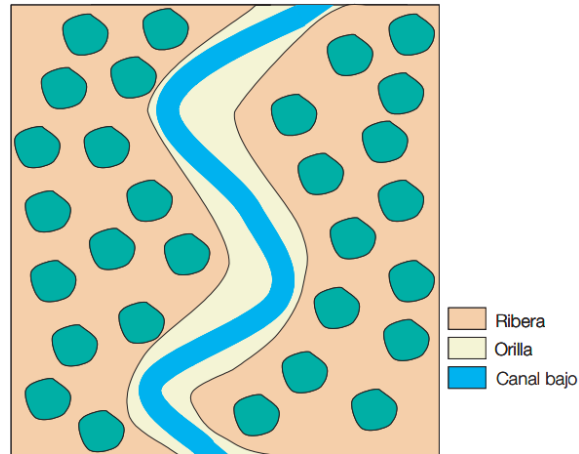


Figura 10. Zona de Aplicación del Índice QBR. Tomado de Agencia Catalana del Agua (2006.)

El índice QBR, consta de cuatro bloques a evaluar, totalmente independientes y la puntuación de cada bloque no debe ser inferior a 0 ni superior a 25, considerando ambos márgenes del río como una misma unidad (Munné et al., 1998). Al final, la puntuación total del sitio, es la suma de los puntajes obtenidos para cada uno de los cuatro bloques, y donde el resultado puede variar entre 0 y 100.

La puntuación de cada bloque es independiente y está en función de características específicas:

- Primer bloque - Grado de cobertura vegetal: en este bloque, se midió el % de cobertura de toda la vegetación considerando solo el área ribereña, excluyendo las orillas y el canal bajo, por ambos lados del río (Figura 11).

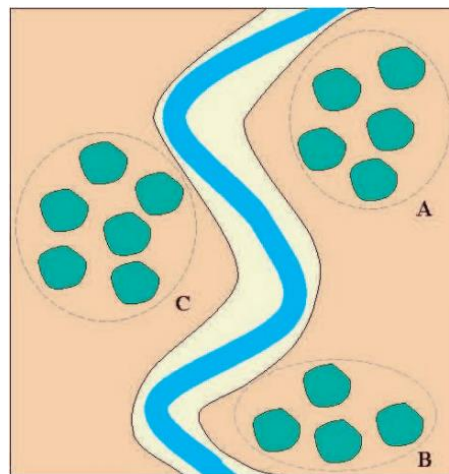


Figura 11. Porcentaje de la suma de superficies A, B y C con respecto al área total de la ribera (área color rosa). Tomado de: Agencia Catalana del Agua (2006).

Asimismo, se tomó en cuenta la conectividad entre el bosque de ribera y el ecosistema forestal adyacente a la hora de sumar o restar puntos (Figura 12). La presencia de caminos no asfaltados, no fue motivo de penalización, sin embargo, caminos anchos y asfaltados, si fueron considerados como elementos que rompen la conectividad, del mismo modo, los campos de cultivo y cualquier tipo de actividades que implicaban una pérdida en la cobertura vegetal y cambios en el uso de suelo presentes tanto dentro de la ribera, como en el límite de ella y el ecosistema adyacente.

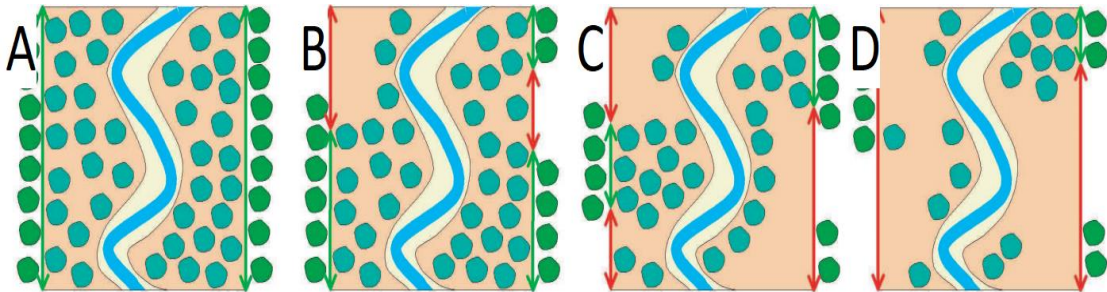


Figura 12. Conectividad entre la ribera y el ecosistema forestal adyacente. A: conectividad total, B: conectividad superior al 50%, C: conectividad entre el 25 y el 50%, D: conectividad inferior al 25%. Tomado de Agencia Catalana del Agua (2006).

- Segundo bloque - Estructura de la cobertura: en este apartado se midió la complejidad de la vegetación, tomando en cuenta el porcentaje de cobertura de árboles y arbustos. Para no redundar en la valoración del apartado pasado, se consideró solo la estructura de zonas con cubiertas de vegetación, de modo que no se pudiera dar una puntuación alta en casos donde la cobertura sea baja por muy bien estructurada que esté la vegetación, de esta manera, se evitó la sobrevaloración de islas de vegetación en muy buen estado. Elementos que se penalizaron la puntuación de este apartado, fueron la linealidad de los pies de los árboles (reflejo de plantaciones) y áreas de cobertura distribuidas no uniformemente, elementos que sumaron puntos es la presencia de helófitos y arbustos en orillas y la interconexión entre árboles y arbustos.
- Tercer bloque - Calidad y diversidad de la cubierta vegetal: para cubrir este apartado, previamente se especificó el tipo geomorfológico presente (Figura 13), una vez seleccionado, se contó el número de especies arbóreas y arbustivas nativas presentes tanto en la orilla, como en la ribera. La diversidad de especies arbustivas autóctonas y la disposición de las especies arbóreas en franjas paralelas, aumentan la puntuación. Por su parte, especies introducidas, penalizan la puntuación, y de forma más notoria, cuando se

encuentran formando comunidades. Otros aspectos que restan en la puntuación, es la existencia de estructuras o construcciones de origen antrópico y los vertidos voluminosos de basura. A las especies más representativas de los sitios se les tomaron imágenes fotográficas con el fin de ser identificadas taxonómicamente; dicha identificación fue realizada con ayuda del Listado de Especies del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (CONANP, 2013), del informe de la flora alpina del centro de México (Steinmann et al., 2017) y con la plataforma digital *Naturalista* de la CONABIO.

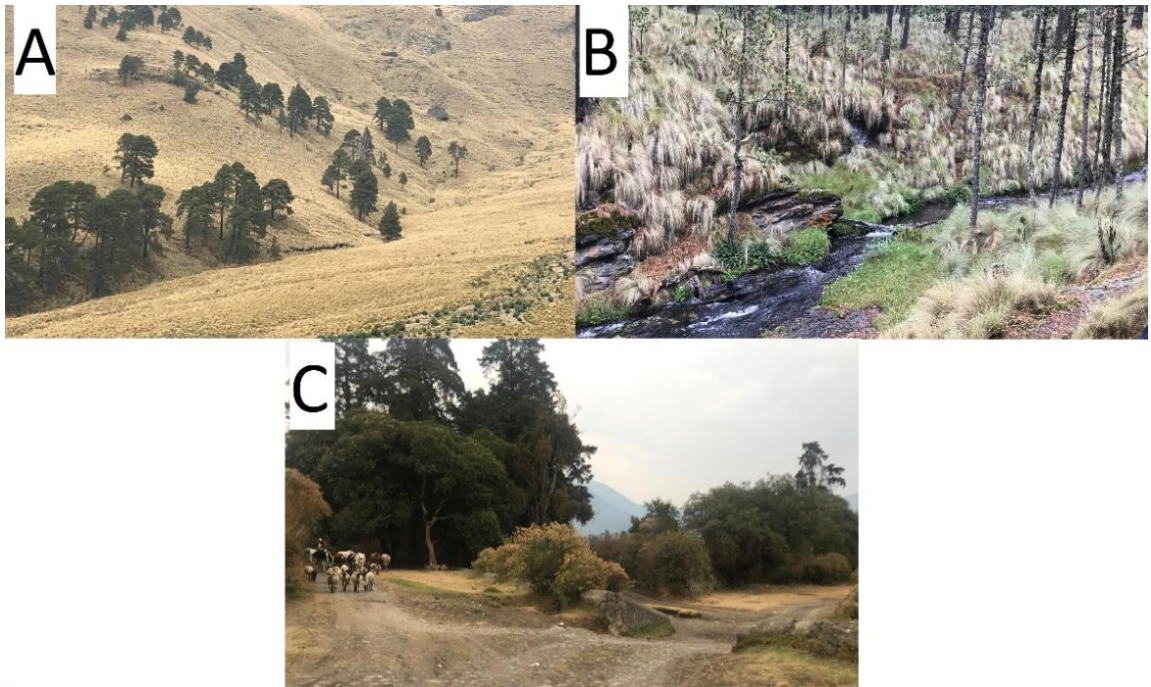


Figura 13. Tipo geomorfológico de la ribera. A: Ribera cerrada, B: Ribera de tramos medianos, C: Ribera abierta.

- Cuarto bloque - Grado de naturalidad del canal fluvial: en este apartado se contabilizaron las modificaciones de las terrazas adyacentes al río, lo cual implica que este se reduzca., los márgenes se hagan más derechos y el río más recto. Cuando además hay presencia de estructuras sólidas como paredes o muros, la puntuación bajó. La presencia de cualquier estructura artificial entre del lecho del río, restó también puntos. Lo que no fue considerado para restar puntos, con puentes y caminos presentes para cruzar el río o como acceso a la estación de muestro.

## 8.3 Trabajo de Laboratorio

### 8.3.1 Parámetros físicos y químicos de agua y suelos ribereños.

Las muestras de agua y suelo fueron transportadas al laboratorio donde, a partir de un tratamiento previo, se analizaron en ellas parámetros tanto físicos como químicos en agua y suelo. En el Cuadro 6 se muestran las propiedades físicas y químicas, tanto en suelo como agua, que fueron registrados en los sitios de estudio que formaron parte de éste trabajo y las unidades en las que éstas fueron medidas.

*Cuadro 6. Propiedades físicas y químicas analizadas en agua y suelo de ambientes ribereños.*

AGUA		SUELO	
Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades
Temperatura	°C	Densidad Aparente	g cm <sup>-3</sup>
Conductividad eléctrica	μS cm <sup>-1</sup>	Humedad Gravimétrica	%
pH	Unidades pH	Humedad Volumétrica	%
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	pH	Unidades pH
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>
Dureza de calcio	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Materia orgánica	%
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	Nitrógeno total	%
Nitritos	mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>	Fósforo extractable	mg kg <sup>-1</sup>
Nitratos	mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> L <sup>-1</sup>		
Amonio	mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> L <sup>-1</sup>		
Ortofosfatos	mg P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> L <sup>-1</sup>		
Fósforo total	mg P-total L <sup>-1</sup>		

#### 8.3.1.1 Parámetros hídricos

Las muestras de agua, una vez recolectadas se almacenaron en refrigeración y posteriormente fueron analizadas en el laboratorio, siguiendo los métodos sugeridos en APHA-AWWA-WEF (2012) y por Guerra y Cruz-Flores (2014), realizándose dos repeticiones por cada muestra, al ser el mínimo de réplicas sugeridos en análisis de aguas (APHA-AWWA-WEF, 2012).

- Nitritos (Figura 14a): Se forman durante la biodegradación de nitratos, nitrógeno amoniacal u otros compuestos orgánicos nitrogenados y se utiliza como indicador de contaminación fecal en aguas naturales (Macías et al., 2003). Su presencia en el agua debe considerarse como un indicio fundado de una posible contaminación reciente (dada su inestabilidad) y tal vez de la no potabilidad del agua debido a la toxicidad de este ion (De Miguel y Vázquez, 2006). Para la determinación de éstos, se llevó a cabo el método



del ácido sulfanílico, según lo referido por Guerra y Cruz-Flores (2014), en el que los nitritos presentes, serán medidos colorimétricamente una vez que reaccionen con el ácido sulfanílico diazonizado con el clorhidrato de alfa-naftilamina, formando un color purpura rojizo.

- Nitratos (Figura 14b): La contaminación del agua por nitratos suele ser producto de la fertilización excesiva o de la inadecuada disposición de las aguas residuales, tanto industriales como domésticas (Larios, 2009). El nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos, y en algunos casos ha sido identificado como el determinante del crecimiento de estos; es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales, residuales y residuales tratadas, se presenta generalmente a nivel de trazas en el agua de superficie, pero puede alcanzar niveles elevados en las subterráneas (NMX-AA-079-SCFI-2001, 2001). Para la determinación de ésta forma química del nitrógeno, se siguió el método del ácido fenoldisulfónico referido en Guerra y Cruz-Flores (2014), donde por colorimetría serán determinados los nitratos una vez que reaccionen con el ácido fenoldisulfónico, en donde la intensidad del color, amarillo en éste caso, será proporcional a la concentración del nitrato en la muestra.
- Amonio (Figura 14c): aparece solo como trazas en aguas, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. Este compuesto es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas o inorgánicas nitrogenadas que naturalmente se incorporan al agua. Dado que la presencia de amonio favorece la multiplicación microbiana, su detección en cantidad significativa en el agua se considera como indicio de probable contaminación reciente (De Miguel y Vázquez, 2006). El método seguido fue el método del fenato (Guerra y Cruz-Flores, 2014), en el cual, la reacción entre el amonio, el hipoclorito y el fenol, producirán un color azul, medido por colorimetría.
- Ortofosfatos y Fósforo total (Figura 14d y 14e): se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órganofosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes, procesos biológicos, etc. (NMX-AA-029-SCFI-2001, 1986). En el caso de los ortofosfatos, fueron determinados con el método del fosfomolibdato, donde éstas formas químicas al reaccionar con el ácido molibdico y sufrir reducción por efecto del

cloruro de estaño, adquirirán un color azul, las cuales al ser medidas por colorimetría indicaran la concentración de ellos, siendo ésta proporcional a la intensidad del color adquirido. El fósforo total, también seguirá éste método, pero a diferencia de la determinación de ortofosfatos, al determinar el fósforo total, previamente se debe hacer una predigestión con persulfato de potasio, esto con el fin de hidrolizar los fosfatos presentes (Guerra y Cruz-Flores, 2014).

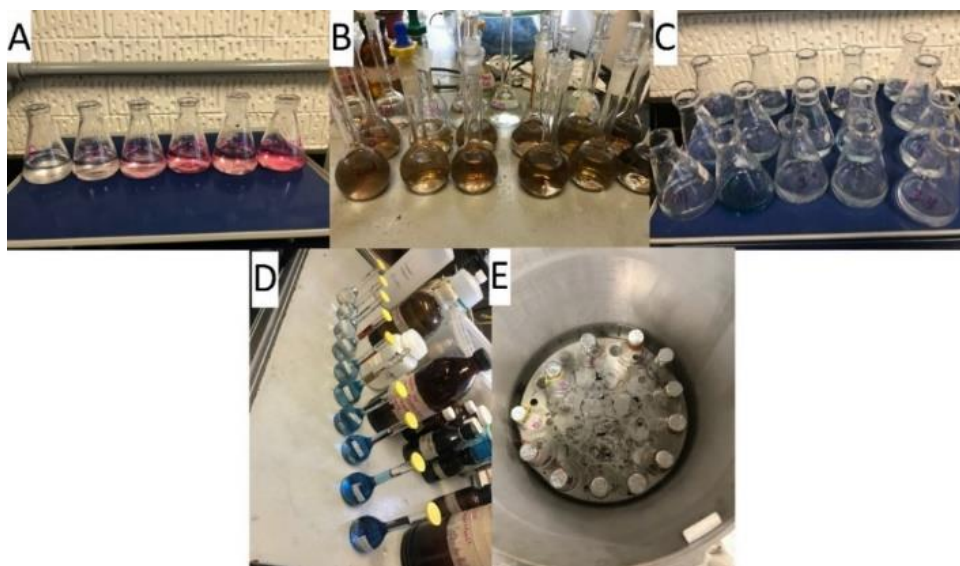


Figura 14. Parámetros químicos del agua determinados en laboratorio. A: Nitritos; B: Nitratos; C: Amonio; D: Ortofosfatos y E: Fósforo total.

### 8.3.1.2 Parámetros edáficos

Posterior a su colecta, las muestras de suelo fueron secadas al sol por aproximadamente una semana en el Invernadero de la FES-Zaragoza y homogeneizadas hasta que lograran pasar por un tamiz de malla #40. Una vez logrado esto, se almacenaron en frascos de plástico hasta su posterior análisis físico y químico, en el cual, los métodos empleados fueron tomados de Guerra y Cruz-Flores (2014) y de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2001). Los parámetros analizados fueron los siguientes (Figura 15):

- Fósforo extractable: El fósforo (P) es un elemento esencial para la vida, siendo fundamental en el metabolismo de los organismos (Tapia-Torres, 2013). Éste elemento puede encontrarse de forma orgánica e inorgánica, siendo la inorgánica la forma en la que se encuentra disponible para las plantas, el fósforo disponible es la forma aprovechable de forma inmediata, siendo los fosfatos que se encuentran en la solución

del suelo (Gueçaimburu et al., 2019). El método de Bray y Kurtz (1945), es ampliamente utilizado en estudios de fertilidad de suelos para la determinación de fósforo disponible en suelos, mismo que fue usado en ésta investigación, de acuerdo con lo descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

- Nitrógeno total: El nitrógeno (N) es uno de los elementos más importantes para la nutrición de las plantas, por lo cual es necesario tener métodos rápidos y confiables para determinar N en el suelo (Jarquín-Sánchez et al., 2011). El método Kjeldahl es el más usado para medir la concentración de nitrógeno total en el suelo (Jarquín-Sánchez et al., 2011), mismo que fue el empleado en éste trabajo a partir de lo propuesto en la NOM-021-SEMARNAT-2000.
- Densidad Aparente: se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, tal cual se encuentra en su emplazamiento natural, incluyendo el espacio poroso (Honorato, 2000). El método empleado para la determinación de esta variable edáfica, fue el método del cilindro, el cual, se considera como el método más sencillo, que consiste en tomar un volumen fijo del suelo sin perturbar y pesarlo una vez seco, por calentamiento en horno a 105° C por periodos de 24 horas, hasta peso constante. La densidad vendrá determinada por la relación entre el peso seco obtenido y el volumen correspondiente (Rubio, 2010).
- pH: logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno de suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo, es expresado en términos de la escala de pH de 0 a 14. Siendo suelos ácidos aquellos que tienen valores de pH menores a 7, neutros valores de 7 y alcalinos mayores a 7 (Lindsay, 1979). Es una de las propiedades químicas más importantes del suelo ya que controla la movilidad de iones, la precipitación y disolución de minerales, reacciones redox, intercambio iónico, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes (Sainz et al., 2010). Su determinación fue realizada siguiendo el método propuesto en Guerra y Cruz-Flores (2014), a partir de una relación 1:2 con agua.
- Conductividad eléctrica: esta propiedad, está determinada por diversos factores, como lo son la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la humedad del suelo, la capacidad de intercambio catiónico, la salinidad, pH, el tipo de suelo, entre otras. (Simón

et al., 2013) Para su determinación hizo siguiendo el método referido en Guerra y Cruz-Flores (2014), el cual se basa en una relación 1:5.

- Humedad volumétrica (HVM) y gravimétrica (HGM): Ambas hacen referencia al contenido de agua en el suelo, la diferencia entre ellas es que la primera es la relación entre el volumen de la fracción líquida y el volumen de la muestra, mientras que la HGM es la relación entre la masa de la fracción líquida (agua) y la masa de la fracción sólida, lo cierto, es que ambas se relacionan a partir de la densidad aparente (Conti, 2000). El método empleado para obtener éstas propiedades fue el sugerido en Guerra y Cruz-Flores (2014).
- Contenido de materia orgánica: es evaluada en el suelo a través del contenido de carbono orgánico con el método de Walkley y Black (1934) (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2001), la importancia de su medición, radica en el papel de ésta propiedad, pues su función como indicador de la salud del suelo y su efecto positivo sobre la sostenibilidad del sistema la hacen una de las propiedades principales en estudios de fertilidad, salud y caracterización de los suelos. Los niveles de MO, dependerán del clima, tipo de suelo y el manejo que se le dé (Sainz et al., 2010)



Figura 15. Parámetros químicos del suelo determinados en laboratorio. De izquierda a derecha: Nitrógeno total, Fósforo extraíble, pH y Contenido de materia orgánica.

Con los valores de los parámetros analizados tanto en campo como en laboratorio, se construyó una base de datos en el programa *Microsoft Office Excel*, esto con el objetivo de facilitar el manejo y análisis de los datos obtenidos, además de poder observar cambios en las variables de forma más oportuna.

## **8.4 Manejo y análisis estadístico**

Toda la información obtenida como resultado del trabajo de campo y de laboratorio correspondiente a los dos afluentes y los 12 sitios de muestreo, fue almacenada en una base de datos realizada con ayuda del programa Microsoft Office Excel, lo cual permitió un óptimo manejo y orden de la información recabada.

Para el análisis estadístico se llevó a cabo en primera instancia un análisis de correlación múltiple considerando todos los valores de las variables determinadas, esto con la finalidad de seleccionar las de mayor correlación, y seleccionando las de mayor representatividad y eliminando aquellas que presentaron colinealidad. Posteriormente se aplicó un análisis de componentes principales, con el objetivo de seleccionar aquellas que tienen mayor impacto en la variabilidad de estos ecosistemas.

Más adelante, se compararon las variables utilizadas para definir la calidad ecológica en función del uso del suelo, inicialmente se propuso realizarlo a través de un análisis de varianza, siempre y cuando el comportamiento de los datos cumpliera con los supuestos necesarios de normalidad y homocedasticidad, al no ser esto así, fue necesario realizar la comparación a través de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Por último, se llevó a cabo un análisis de correlaciones múltiple, ésta vez entre los componentes principales obtenidos y las calificaciones del índice QBR, con el propósito de identificar el conjunto de variables que tuviera mayor influencia en éste índice. Finalmente, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple, igualmente entre los valores de índice QBR y los componentes principales con los que se correlacionó, mismo que fue empleado para la elaboración de un modelo matemático que nos permitiera saber si a partir de las variables hídricas y edáficas es posible obtener un resultado similar del índice QBR bibliográfico.

## 9. Resultados y discusión

### 9.1 Caracterización de los sitios y estado ecológico de la ribera

En el Cuadro 7 se describen las características los doce sitios estudiados, que tienen su origen en el Volcán Iztaccíhuatl a través de dos afluentes que fluyen en dirección opuesta. El afluente con dirección poniente, pertenece a la Subcuenca de La Compañía y va desde los 2530 hasta los 3900 m s.n.m., mientras que en el afluente que fluye con dirección oriente, es parte de la Subcuenca Nexapa y se consideró en el intervalo altitudinal de 4010 a 2260 m s.n.m.

El uso de suelo fue descrito en campo, mediante la observación de la cobertura de vegetación dominantes y la diversidad y magnitud de las actividades desarrolladas en cada sitio.

*Cuadro 7. Caracterización de los sitios de estudio monitoreados.*








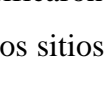
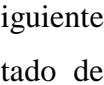
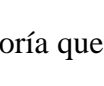
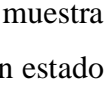
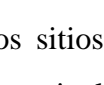
Sub cuenca	Sitio	Altitud (m s.n.m.)	Coordenadas UTM		Uso de Suelo (INEGI, 2016)	Uso de Suelo observado
			X	Y		
LCA	Joya Alta	3900	537032	2116867	Pradera de alta montaña	Pastizal montano
LCA	Alcalica Alta	3800	536209	2116433	Bosque de Pino	Forestal
LCA	Alcalica	3150	533340	2115448	Bosque de Oyamel	Forestal
LCA	Alcalica 2	3000	532272	2115274	Bosque de Oyamel	Forestal perturbado
LCA	Alcalica Vivero	2810	529827	2115051	Bosque de Pino	Forestal Agrícola
LCA	Tomacoco	2530	527364	2112824	Agrícola Anual	Agropecuario
NXP	Cascada VW	4010	537660	2116000	Pradera de alta montaña	Pastizal montano
NXP	Vallecito	3840	537750	2115023	Pradera de alta montaña	Forestal
NXP	Apatlaco	3630	539298	2113136	Bosque de Pino	Forestal
NXP	Buenavista	3300	542050	2111210	Bosque de Pino	Forestal perturbado
NXP	S. Xalizintla	2680	547778	2111758	Agrícola Anual	Agropecuario
NXP	Nealtican	2260	558446	2106140	Agrícola Anual	AUM*

LCA: La Compañía, NXP: Nexapa, AUM: Agrícola-Urbano-Minero.

Respecto a la aplicación del índice QBR para el establecimiento del grado de conservación de la vegetación ribereña en el PNIP y su área de influencia, éste índice mostró de forma clara y sencilla, las condiciones de conservación actuales; resultó una útil herramienta que es sencilla de aplicar, no requiere de equipo sofisticado o técnicas complejas y la inversión de tiempo para la evaluación es moderada, cuyos resultados son altamente confiables. Sin embargo, éste índice fue desarrollado para ríos mediterráneos, lo que hace necesario tomar en cuenta algunas consideraciones al momento de su aplicación para ecosistemas diferentes, tal es el caso de ésta investigación, ya que, al trabajarse en sitios cuyas características son propias de la alta montaña, hay apartados que deben puntuarse de forma diferente; por ejemplo, no penalizar la ausencia de un estrato arbóreo multiespecífico en ríos de alta montaña, tal como sugieren Carrascosa & Munné (2000).

Los valores registrados para el cálculo del índice QBR de cada sitio, se describen de forma general en el cuadro 8. Los doce puntos de monitoreo fueron clasificados en alguna de las cinco categorías que el índice QBR asigna en función de su calidad, lo cual indica las modificaciones que la vegetación ha tenido en la zona de estudio.

Cuadro 8. Puntajes QBR de los sitios de estudio.

Sub cuenca	Sitio	Grado de Cubierta	Estructura de la cubierta	Calidad de la cubierta	Grado de Naturalidad del canal fluvial	QBR total	Color
LCA	Joya Alta	25	25	25	25	100	
LCA	Alcalica Alta	25	25	25	25	100	
LCA	Alcalica	20	15	20	25	80	
LCA	Alcalica 2	20	20	15	25	80	
LCA	Alcalica Vivero	20	15	20	25	70	
LCA	Tomacoco	5	0	15	0	20	
NXP	Cascada VW	25	25	25	25	100	
NXP	Vallecito	25	25	25	15	90	
NXP	Apatlaco	25	15	25	25	90	
NXP	Buenavista	25	20	20	15	80	
NXP	S. Xalizintla	0	15	0	10	25	
NXP	Nealtican	0	10	0	10	20	

LCA: La Compañía, NXP: Nexapa

En la primera categoría como sitios con estado de conservación MUY BUENO se clasificaron tres sitios – Cascada VW, Joya Alta y Alcalica Alta – lo que se interpreta como aquellos sitios que no presentan alteraciones de su estado natural, cinco más fueron registrados en la siguiente categoría, – Vallecito, Apatlaco, Buenavista, Alcalica y Alcalica 2 – con un estado de conservación BUENO, en el que sólo se observaron ligeras perturbaciones; en la categoría que presenta un estado de conservación MODERADO, se ubicó a Alcalica Vivero, que muestra alteraciones importantes en fase incipiente; Santiago Xalizintla fue clasificado como un estado DEFICIENTE, con alteraciones fuertes. Finalmente, Tomacoco y Nealtican, los dos sitios localizados en la zona más baja en cada una de las subcuencas, fueron identificados con un nivel de conservación MALO, ya que muestran degradación extrema.

Los resultados indican que los sitios con mejores condiciones ecológicas y sus consecuentes favorables calificaciones en el índice QBR, fueron aquellos que se ubican en la zona de mayor altitud dentro del área de estudio, sobre los 3000 m s.n.m. Estos resultados concuerdan con numerosos estudios que consideran el factor altitudinal como uno de los más importantes en la

determinación de la calidad de las riberas (Jacobsen et al., 1997; Suárez y Vidal-Abarca, 2000; Fernández et al., 2009; Sirombra y Mesa, 2012; Lujan et al., 2013; Villamarín et al., 2014; Posada y Arroyave, 2015; Rodríguez-Téllez et al., 2016; Almarales et al., 2017), esto debido a que en altitudes bajas, la accesibilidad a ellos y su cercanía a asentamientos humanos o poblados, los hace vulnerables al desarrollo de actividades productivas como la ganadería y la agricultura, contrario a los sitios de mayor altitud, donde su difícil accesibilidad y características topográficas, hacen que el establecimiento de actividades sea más difícil de desarrollarse.

### 9.1.1 Subcuenca La Compañía

#### Joya Alta

Ubicada en la ladera occidental del Volcán Iztaccíhuatl, el sitio Joya Alta corresponde al de mayor altitud dentro de la subcuenca de la Compañía, alcanzando los 3,900 m s.n.m. de altitud (Figura 16). Su uso de suelo es forestal y se encontró como vegetación dominante especies de los géneros *Festuca sp.* y *Muhlenbergia sp.*, cuya cobertura domina gran extensión del paisaje, ya que en una muy pequeña proporción y de manera muy dispersa se encontraban árboles de *Pinus hartwegii*, sin embargo, éstos se situaban lejos del cauce. También se encontraron en este sitio algunos individuos de *Lupinus sp.*, *Penstemon gentianoides*, *Cirsium ehrenbergii* y *Eryngium proteiflorum*.



Figura 16. Sitio de estudio Joya Alta



La pendiente que presenta el terreno es ligeramente inclinada (10-14%), mientras que la del afluente es de 18%. La temperatura ambiente registrada osciló de los 4 a los 18°C, mientras que la del agua se registró en un intervalo de 3 a 11.7°C. Este afluente, es un arroyo permanente que se nutre principalmente del deshielo del volcán Iztaccíhuatl, de condensación orográfica y la precipitación pluvial, no se encuentra alterado, el ancho del cauce fluctuó entre 0.4 y 1.1 metros, mientras que la profundidad de éste no supera los 50 centímetros. Posee una orilla bien consolidada, con rocas y vegetación. La ribera está delimitada por una ladera elevada en el lado derecho del afluente, respecto al flujo de corriente.

La calidad ecológica en éste sitio es de las mejores a lo largo de éste estudio, alcanzando una puntuación de 100, clasificándose con el color AZUL, misma que coincide con la establecida por Mena (2018) en un sitio cercano de condiciones similares; los aspectos que determinaron su puntaje se describen en el Cuadro 9.

*Cuadro 9. Desglose de puntaje QBR en Joya Alta.*

<b>Localidad: Joya Alta</b>	<b>Fecha: 3 de mayo 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones.
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, cobertura mayor al 80% considerando la pradera de alta montaña.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de árboles entre el 25 y 50%. Sin embargo, el zacatonal recubre gran parte de la cubierta.
Calidad de la cubierta	10 puntos, alta presencia de helófitos (zacatonal). 25 puntos, poca diversidad de especies pero todas son autóctonas, lo cual beneficia.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, el canal no ha sido modificado.
<b>Total de puntos</b>	<b>95 puntos</b>

En éste sitio, el zacatonal distintivo de la pradera de alta montaña recubre gran parte de la cubierta vegetal, por lo que se aplicó el criterio de vegetación propia de la zona y no afectó su calificación en el apartado grado de cubierta. Así mismo, la riqueza de especies no es alta, pero al ser característico del ecosistema, esto no influyó en una baja calificación. Dadas las condiciones físicas del sitio, no hay signos de perturbación antrópica haciendo de él, uno de los sitios mejor conservados en el estudio.

### **Alcalica Alta**

A los 3,800 m s.n.m. y en la parte baja de un valle (Figura 17), éste sitio posee un uso de suelo forestal, con una vegetación dominada por zacatonal en ecotono con inicio del Bosque de Pino de alta montaña (*Pinus hartwegii*). El terreno posee una pendiente de 2.6%, mientras que el del cauce fue de 1.75%. La temperatura ambiente alcanza un máximo de 17°C, mientras que, en el cauce, el agua corre a 6-7° de temperatura. En éste sitio, la presencia de grandes árboles contribuye al volumen de agua que corre en el cauce, alcanzando anchuras de 1.3 m y volúmenes de agua que alcanzan velocidades de 0.2 a 0.4 m seg<sup>-1</sup>.



*Figura 17. Sitio de Estudio Alcalica Alta*

De igual forma se encontró un buen estado ecológico de la vegetación, entrando en la categoría AZUL con 95 puntos (Cuadro 10); la localización de éste sitio, es el factor que le permite mantener una excelente calidad y naturalidad. En este sitio también se hizo la excepción en el apartado de grado de cubierta vegetal, ya que la vegetación predominante continúa siendo el zacatonal. En ésta parte del Parque Nacional, se encontraron algunos signos de perturbación, puesto que el acceso al punto está facilitado por un camino y turistas acceden a él con mayor facilidad, mismos que no restaron puntos por su mínimo efecto al ecosistema, pero sin duda deben tomarse en cuenta por su potencial riesgo.

*Cuadro 10. Desglose de puntaje QBR en Alcalica Alta.*

<b>Localidad: Alcalica Alta</b>	<b>Fecha: 3 de mayo 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones.
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, cobertura mayor al 80%, considerando la paradera de alta montaña.
Estructura de la cubierta	10 puntos, la cobertura arbórea es menos al 50% pero la presencia del zacatonal es mayor al 80%. 10 puntos, alta presencia de helófitos en las orillas. 5 puntos, conexión buena entre estrato arbustivo y arbóreo con el sotobosque.
Calidad de la cubierta	10 puntos, el número de especies autóctonas. 10 puntos, existe una continuidad de la comunidad a lo largo del río mayor al 75% de la ribera.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, no hay alteración del canal del río.
<b>Total de puntos</b>	<b>95 puntos</b>

## Alcalica

Éste sitio posee una elevación de 3,150 m s.n.m. Se encuentra en el fondo de una gran cañada en la parte izquierda en referencia al cauce la cual delimita la ribera, mientras que de lado derecho hay una pequeña pendiente (Figura 18).



*Figura 18. Sitio de estudio Alcalica*

Este sitio fue catalogado con una calidad BUENA, con un puntaje de QBR total de 80 puntos (Cuadro 11), este sitio se encuentra fuera del parque, lo cual lo hace vulnerable a modificaciones antrópicas, sin embargo, su altitud y difícil accesibilidad lo protegen de éstas.

*Cuadro 11. Desglose de puntaje QBR en Alcalica*

<b>Localidad: Alcalica</b>	<b>Fecha: 4 de mayo 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	10 puntos, cubierta vegetal entre el 50 y 80%. 10 puntos, conectividad entre el bosque de ribera y el ecosistema forestal adyacente de total.
Estructura de la cubierta	10 puntos cobertura arbórea entre el 25 y 50%, y de arbustos es mayor al 25%. 10 puntos, alta presencia de halófitos en la orilla -5 puntos, el sotobosque recubre más del 50%.
Calidad de la cubierta	25 puntos, diversidad de especies autóctonas buena.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, el canal del río no ha sido modificado.
<b>Total de puntos</b>	<b>85 puntos.</b>

## Alcalica 2



*Figura 19. Sitio de estudio Alcalica 2*

Sitio ubicado en el límite de los 3,000 m s.n.m. (Figura 19), la temperatura oscila entre los 15 y los 17° C. El uso de suelo aquí es forestal, con un bosque mixto que comienza a tener cierto grado de perturbación. Los grandes árboles ya no dominan y la vegetación secundaria, arbustiva principalmente, es la que mayor cobertura abarca. El terreno es accidentado con una pendiente inclinada del 20%, mientras que en el cauce ésta ronda al 11%. El arroyo posee un ancho de 2 metros, y el agua en el corre a una velocidad promedio de 1.5 m seg<sup>-1</sup>.

En éste sitio, el puntaje total de QBR es de 75 puntos (Cuadro 12), el bosque mantiene un estado ecológico natural, la conectividad es buena, aunque no suficiente para garantizar el desarrollo de los diversos procesos ecológicos y las funciones ambientales de protección del cauce, ya que, en un lado de la ribera, ésta se interrumpe por la presencia de un camino que corta por algunos metros esa continuidad.

*Cuadro 12. Desglose de puntaje QBR en Alcalica 2.*

<b>Localidad: Alcalica 2</b>	<b>Fecha: 4 de mayo 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	10 puntos, cobertura aproximada entre el 70 y 75%.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de árboles entre el 50 y 75%. 10 puntos, presencia de helófitos mayor al 50%.
Calidad de la cubierta	10 puntos, número de especies autóctonas (Abetos y encino). 10 puntos, existe una continuidad de la comunidad a lo largo del río de al menos 3 m de ancho, uniforme y ocupando más del 75% de la ribera.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, el canal no ha sido modificado.
<b>Total de puntos</b>	<b>75 puntos.</b>

### **Alcalica Vivero**

Éste sitio se encuentra en el límite del área forestal, ya en el área de influencia del parque, a una altitud de 2800 m s.n.m. (Figura 20). El uso de suelo registrado fue forestal-agrícola, puesto que es una zona de transición en donde las actividades humanas comienzan a presentarse. La vegetación es secundaria y con especies introducidas que modifican el ambiente natural. La temperatura ambiental se encontró oscilando los 20° C y la del agua en promedio de 11° C. La pendiente del terreno es de 20% y en el cauce de 10%. El cauce se expande hasta 5 metros y el agua fluye a una velocidad promedio de 0.5 m seg<sup>-1</sup>.



Figura 20. Sitio de estudio Alcalica Vivero

Su estado ecológico fue considerado en la categoría AMARILLO, la cual enfatiza el inicio de alteración importante en el ecosistema con 65 puntos totales (Cuadro 13).

Cuadro 13. Desglose de puntaje QBR en Alcalica Vivero

<b>Localidad: Alcalica Vivero.</b>	<b>Fecha: 4 de marzo 2019.</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, cobertura vegetal mayor al 80%. -5 puntos, conectividad baja (entre el 25 y 50%) entre el bosque de ribera y el bosque adyacente.
Estructura de la cubierta	10 puntos, porcentaje de árboles entre el 50 y 75%. 10 puntos, presencia de helófitos mayor al 50%.
Calidad de la cubierta	10 puntos, poca diversidad de especies autóctonas. 5 puntos, existe continuidad de la comunidad a lo largo del río. 5 puntos, número de especies de arbustos. -5 puntos, presencia de especies introducidas pero no forman comunidades.
Grado de naturalidad del canal fluvial	10 puntos, las terrazas adyacentes han sido modificadas.
<b>Total de puntos</b>	<b>65 puntos.</b>

En éste sitio, existe un contraste entre los dos lados del afluente, puesto que, en un lado la vegetación de ribera sólo es una franja paralela al río, metros después, se encuentra un campo de cultivo, anulando la conectividad entre la vegetación de ribera y el ecosistema forestal adyacente (Figura 21) Otro aspecto que redujo puntos, fue la presencia de especies alóctonas, aunque éstas no forman comunidades.

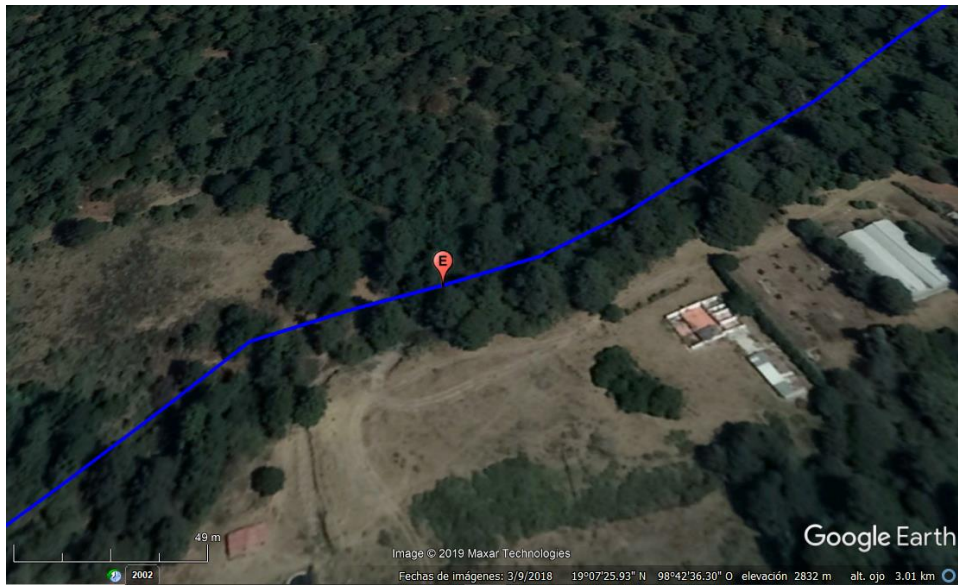


Figura 21. Contraste entre ambos márgenes del afluente en el sitio Alcalica Vivero.

## Tomacoco

Ubicado a los 2,500 m s.n.m. y ya con un alto grado de perturbación, éste sitio está completamente modificado (Figura 22). El uso de suelo es agropecuario y este es el sitio más cercano a asentamientos urbanizados. Domina la vegetación secundaria con árboles no nativos y arbustos como *Prunus salicifolia* (Capulín) y *Senecio sp.*, ambas especies indicadoras de perturbación. El terreno presenta una pendiente de 8% y el canal de 13%. La temperatura ambiente va de los 15 a los 20° C mientras que el agua registró un promedio de 10°. Un aspecto importante a considerar de éste sitio es que, en algunas visitas el cauce estaba seco, puesto que, en partes previas la explotación del agua era tal, que acababa con el flujo de éste recurso.



Figura 22. Sitio de estudio Tomacoco

El índice QBR en este sitio encontró la peor puntuación (Cuadro 14), como consecuencia del desarrollo de actividades antrópicas, que han propiciado una degradación extrema.

Cuadro 14. Desglose de puntaje QBR en Tomacoco.

<b>Localidad: Tomacoco</b>	<b>Fecha: 3 de marzo 2019.</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	10 puntos, cobertura de entre 50 y 80% (75% aproximadamente), mayormente de herbáceas. -5 puntos, conectividad entre el bosque de ribera y ecosistema forestal adyacente inferior al 50%.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de los árboles entre el 25 y el 50% y de arbustos superior al 25% 5 puntos, presencia de helófitos en orillas. -10 puntos, existe una distribución regular de los árboles, no hay linealidad.
Calidad de la cubierta	5 puntos, poca diversidad de especies autóctonas. 5 puntos. presencia de arbustos. -5 puntos, presencia de especies alóctonas. -5 puntos, presencia de estructuras de origen antrópico. -5 puntos, existen vertidos de basura.
Grado de naturalidad del canal fluvial	5 puntos, alteración y estructuras rígidas modificando el canal del río -10 puntos, presencia estructura transversal al lecho del río.
<b>Total de puntos</b>	<b>10 puntos</b>



La pérdida de cobertura ocasionada por la sustitución de la vegetación ribereña por cultivos o asentamientos en este sitio es la causa principal de ésta degradación. Así mismo la modificación del cauce, con estructuras sólidas que lo alteran y canalizan, es una característica que afecta ésta puntuación o la presencia de vertidos de basura disminuyó la puntuación final (Figura 23).



*Figura 23. Alteraciones en Tomacoco. A: Presencia de cultivos, B: estructuras sólidas cercanas al cauce, C: vertidos de basura.*

## 9.1.2 Subcuenca Nexapa

### Cascada VW



*Figura 24. Sitios de estudio Cascada VW*

Para la subcuenca Nexapa, éste sitio fue el de mayor altitud, localizándose a 4010 m s.n.m. (Figura 24). El uso de suelo aquí es de pradera de alta montaña, donde la vegetación

predominante es el zacatonal, con presencia de especies de los géneros *Festuca sp.* y *Muhlenbergia sp.* El sitio está bordeado por algunos individuos de pino de alta montaña (*Pinus hartwegii*) y otras especies como *Lupinus sp.*, *Cirsium sp.*, *Eryngium sp.* Se caracteriza por ser una cascada extremadamente inclinada con una pendiente de 40-60%. Las temperaturas promedio fueron fue de 9° C la ambiental y del agua desde 3 a 5° C.

El ancho del cauce promedio es de 1 metro y la velocidad de corriente fluctuó entre 0.1 - 0.2 m seg<sup>-1</sup>. Al estar en alta montaña, la apariencia del agua es bastante buena, no hay rasgo de alteración sobre el recurso y el canal posee un grado de naturalidad alto.

La situación ecológica es de las mejores a lo largo del estudio, alcanzando una puntuación de 100 (Cuadro 15), clasificándose con el color AZUL, la cual coincide con la establecida por Mena (2018) para un sitio cercano.

Cuadro 15. Desglose de puntaje QBR en Cascada VW

<b>Localidad: Cascada VW</b>	<b>Fecha: 15 de junio 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, tomando en cuenta la pradera de alta montaña como la vegetación dominante.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura arbórea entre 25 y 50%. 10 puntos, presencia de helófitos en orillas.
Calidad de la cubierta	5 puntos, Buena conexión entre zona de arbustos y árboles con el sotobosque. 25 puntos, número de especies diferentes arbustos autóctonos; pese a no tener una gran diversidad, todas son autóctonas.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, el canas del río no ha sido modificado.
<b>Total de puntos</b>	<b>100 puntos</b>

En éste sitio, la vegetación dominante es el zacatonal distintivo de la pradera de alta montaña, a ésta altitud se encuentran los últimos individuos de *Pinus hartwegii*, pero específicamente en el sitio, el estrato arbóreo es nulo, sin embargo, la densidad de las gramíneas presentes, hacen que la cobertura sea total. La diversidad de vegetación es poca, sin embargo, al ser este un rasgo característico del ecosistema, no disminuyó la calificación del índice.

Dadas las condiciones físicas del sitio, no hay signos de perturbación antrópica haciendo de este lugar, uno de los mejor conservados en el estudio.

## Vallecito

Ubicado a los 3,840 m s.n.m. (Figura 25), muestra en el entorno el punto de inicio de una población abundante de *P. hartwegii*, sin embargo, éstos individuos se encuentran lejos del margen del río y comparten la dominancia de la cobertura con el zacatonal presente. Se encuentra en el descenso de una ladera, con un relieve bastante irregular, y forma un pequeño valle, con encharcamientos y pequeños afloramientos de agua subterránea que lo convierten en una ciénega en algunos meses del año, principalmente en la temporada de lluvias.

La temperatura ambiental aquí se registró de entre 10 y 15° C, mientras que en el agua el promedio fue de 7° C. El arroyo es una corriente permanente y casi inalterada, salvo por algunas estructuras de madera que lo dividen en segmentos para detener materiales grandes que puede acarrear el agua, pero sin alterar su flujo. El ancho promedio del cauce fue de 1 metro y su velocidad de corriente de 0.3 m seg<sup>-1</sup>, con una pendiente de 3%.



Figura 25. Sitio de estudio Vallecito

Éste sitio se clasificó en la categoría VERDE con 90 puntos y fue el único de los cuatro sitios dentro del Parque Nacional que no alcanzó la categoría más alta (Cuadro 15).

Cuadro 16. Desglose de puntaje QBR en Vallecito.

Localidad: Vallecito	Fecha: 15 de junio 2019
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, >80% de cubierta vegetal en la zona de ribera, tomando en cuenta la pradera como vegetación dominante.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de árboles entre el 50 y 75 %.
Calidad de la cubierta	10 puntos, alta concentración de helófitos. 5 puntos, buena conexión entre la ribera y el sotobosque.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, número de especies diferentes de árboles y arbustos, pese a no existir gran diversidad, todas las especies presentes son autóctonas. -10 puntos, existen estructuras sólidas dentro del lecho del río.
<b>Total de puntos</b>	<b>90 puntos</b>

La disminución del puntaje, se debió a la presencia barreras sólidas de madera dentro del canal, las cuales sirven para retener materiales suspendidos en el agua. Igualmente, la presencia de animales de ganado y sus restos fecales fueron observados al lado del afluente (Figura 26).

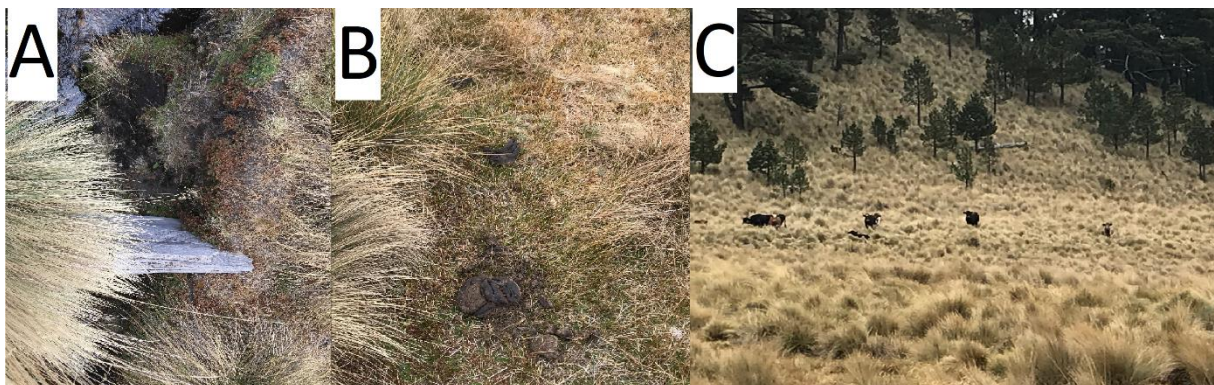


Figura 26. Afectaciones en Vallecito. A: Estructuras transversales al cauce, B: desechos de animales, C: presencia de animales de ganado

## Apatlaco

A los 3600 metros de altitud y en el límite del Parque Nacional (Figura 27), éste sitio se caracteriza por un uso de suelo forestal, en donde *Pinus hartwegii* es la especie dominante y junto a *Festuca sp.* y *Muhlenbergia sp.* dominan la cobertura de ésta zona, con la presencia de musgos y hepáticas adyacentes al cauce del río sobre las rocas. Otros géneros encontrados en el lugar, pero poco abundantes fueron *Cirsium sp.* y *Lupinus sp.*

La temperatura ambiente registrada se mantuvo entre 9 y 13° C. El terreno es accidentado (25.30%), el lado derecho del cauce se encuentra limitado por una elevación mientras que, en el lado izquierdo, si bien la pendiente es inclinada, si permite el desarrollo de vegetación y la escorrentía. El cauce está bien delimitado por vegetación y rocas, y su ancho fluctuó de 1.7 a 2.8 metros, y en promedio una velocidad de 0.5 m seg<sup>-1</sup> y una temperatura de entre 7 y 9° C.



Figura 27. Sitio de estudio Apatlaco

Apatlaco se ubicó en la categoría VERDE con un puntaje de 90 (Cuadro 17), el tipo geomorfológico de la ribera y la poca conectividad entre ella y el bosque adyacente en un lado del afluente fue la causa de esa pérdida de puntos.

Cuadro 17. Desglose de puntaje QBR en Apatlaco.

<b>Localidad: Apatlaco</b>	<b>Fecha: 14 de junio 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, más del 80% de cubierta vegetal de la zona de ribera.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de árboles entre el 50 y 75%. 5 puntos, buena conexión entre la zona de árboles y arbustos con el sotobosque.
Calidad de la cubierta	25 puntos, psee a no haber gran diversidad, las especies son autóctonas.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, el canal del río no ha sido modificado.
<b>Total de puntos</b>	<b>90 puntos.</b>

## Buenvista

Se ubica en media montaña (3300 m s.n.m.) (Figura 28), el relieve es accidentado; las laderas asociadas al cauce son bastante inclinadas (pendiente de 20%). La vegetación se conforma por especies de coníferas (*P. hartwegii* y algunos de *Abies religiosa*) y alta densidad de zacatonal, aunque en menor proporción que sitios con mayor altitud. La temperatura ambiente es de 15-18°C. El río no se ve modificado en su cauce y el ancho del cauce tuvo un promedio de 1.5 m, con pendiente moderada de 8% y la velocidad con la que el agua fluye es de 0.5 m seg<sup>-1</sup>.



Figura 28. Sitio de estudio Buenvista

Su estado ecológico fue situado en la categoría VERDE, es decir, bosque ligeramente perturbado (Cuadro 18). El aspecto que restó puntos fue la estructura de la cubierta, puesto que la conectividad se ha visto modificada con la presencia de cabañas e infraestructura que va en aumento, pertenecientes a un parque ecoturístico y a una zona de desarrollo turístico rústico dentro de la zona de ribera.

Cuadro 18. Desglose de puntaje QBR en Buenvista.

<b>Localidad: Buenvista</b>	<b>Fecha: 14 de junio 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	25 puntos, >80% de la cubierta vegetal de la zona de ribera, además.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de árboles entre 50 y 75%.

	5 puntos, en la orilla hay presencia de entre el 25 y el 50% de helófitos.
	5 puntos, existe buena conexión entre la zona de arbustos y la de árboles con el sotobosque.
Calidad de la cubierta	25 puntos, alta presencia de especies autóctonas.
Grado de naturalidad del canal fluvial	25 puntos, el canal del río no ha sido modificado
	-10 puntos, existen diversas estructuras en la zona superior e inferior del río.
<b>Total de puntos</b>	<b>85 puntos.</b>

Otros aspectos observados, pero sin efecto notorio en la calificación fueron la presencia de basura, algunas plantas introducidas y mangueras de extracción de agua en el cauce del río (Figura 29), mismo que se usa en el desarrollo ecoturístico y que provee de agua a las cabañas y que, pese a no modificar el trayecto del canal, si causa perturbación y es una señal de alarma por el riesgo potencial de uso de agua con el aumento del número de cabañas en la zona. Éste puntaje coincide con el propuesto por Mena (2018) quien trabajo en esta zona.

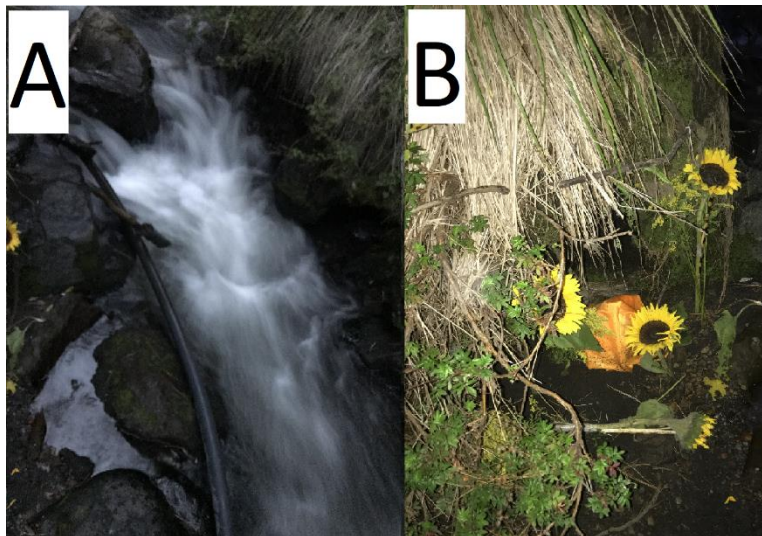


Figura 29. Perturbaciones en el sitio Buenavista. A: extracción de agua, B: plantas introducidas.

### Santiago Xalizintla

Ubicado en una altitud donde se encuentran asentamientos humanos (2600 m s.n.m.) (Figura 30), éste sitio tiene un uso de suelo agrícola y presencia de vegetación es secundaria (Figura 25). En el estrato arbóreo se registraron *Pinus teocote*, *P. ayacahite*, *P. pseudostrobus*, *Quercus sp.*, *Arbutus xalapensis* y abundante vegetación arbustiva y herbácea. Al localizarse en la zona

baja de la subcuenca la pendiente del terreno es baja (5%), lo que reduce el riesgo de erosión en las laderas y la entrada de materia al cauce. La temperatura promedio fue de 25°C. En época de estiaje, el flujo de agua se ve notoriamente disminuido y aunque no desaparece, es un claro reflejo de la explotación que el recurso sufre en éste punto de la subcuenca. Es importante resaltar que en zonas aledañas también es posible observar actividades ganaderas, turísticas y recreativas.



Figura 30. Sitio de estudio Santiago Xalizintla

En éste sitio, las condiciones ecológicas sufren un cambio de radical con respecto a los sitios del mismo afluente en altitudes superiores, esto se refleja en la puntuación de éste sitio que, con 30 puntos, fue asignado en la categoría ANARANJADA, que indica calidad deficiente y una alteración importante (Cuadro 19).

Cuadro 19. Desglose de puntaje QBR en Santiago Xalizintla

<b>Localidad: Santiago Xalizintla</b>	<b>Fecha: 14 de junio 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	5 puntos, entre el 10 y el 50% de cubierta vegetal en la zona ribera. -5 puntos, conectividad entre el bosque de ribera y el ecosistema forestal adyacente entre el 35 y el 50%.
Estructura de la cubierta	10 puntos, porcentaje de árboles entre el 35 y 50%, mientras que los arbustos superan el 25%.



---

Calidad de la cubierta	5 puntos, presencia de helófitos entre el 25 y 50%. 5 puntos, conexión entre la zona de arbustos y árboles. 5 puntos, no hay gran cantidad de especie autóctonas. 5 puntos, existe continuidad entre árboles y arbustos entre el 50 y 75%.
Grado de naturalidad del canal fluvial	5 puntos, alta presencia de arbustos. - 10 puntos, existen especies introducidas que forman comunidades.
<b>Total de puntos</b>	<b>35 puntos.</b>

---

La presencia de cultivos en la zona aledaña a la ribera (Figura 31), disminuye la puntuación total puesto que modifica la cobertura vegetal y reduce la vegetación ribereña a sólo franjas aledañas al río, también disminuye la conectividad con los bosques adyacentes.



*Figura 31. Alteraciones en Santiago Xalizintla.*

Esto mismo se ha reportado en diversos trabajos, donde plantaciones afectan éstos aspectos y reducen los puntajes del índice. López-Delgado et al. (2015), reportan que bajas calificaciones en sitios con cultivos aledaños, mientras que la ausencia de ellos provoca un alto grado de cobertura (80%) y conectividad mayor al 50%. Viera-Llaneros et al. (2010), encontraron que, riberas en valles y zonas aledañas a aldeas, la vegetación ribereña se reduce a una pequeña franja

en uno o ambos márgenes del cauce, perdiendo total conectividad con el ecosistema natural adyacente.

### **Nealtican**

El sitio más bajo altitudinalmente (2,200 m s.n.m.), se encuentra en una zona urbanizada, con actividades variadas como agricultura, ganadería e incluso minería, al ser una zona de explotación de la cantera. La vegetación es secundaria con presencia de pinos (*Pinus teocote* y *P. pseudostrobus*), así como individuos de *Buddleja*, *Ricinus communis* (higuerilla), *Prunus serotina*, *Wigandia urens*, entra otra gran variedad de arbustos y herbáceas. La pendiente del terreno es de 9% y la del cauce de 5 a 6%. En éste sitio la calidad del agua está visiblemente dañada, su color y olor muestran un alto grado de perturbación, la ribera está totalmente modificada, hay descargas de agua directas al río y las actividades que se realizan en la zona, no ayudan a su mitigación



*Figura 32. Sitio de estudio Nealtican.*

Este sitio es uno de los dos que se encuentran en degradación extrema, ubicándose en el bloque ROJO, con solo 20 puntos (Cuadro 20). Lamentablemente se encuentra en una zona de fácil acceso, por lo que el desarrollo de actividades agropecuarias, paso de maquinaria, introducción

de especies, desvío de caudal, vertidos de basura y establecimiento de viviendas o asentamientos urbanos en áreas aledañas al cauce, es fácil de desarrollarse.

*Cuadro 20. Desglose de puntaje QBR en Nealtican.*

<b>Localidad: Nealtican</b>	<b>Fecha: 14 de junio 2019</b>
Bloque	Puntaje / Observaciones
Grado de cubierta de la zona de ribera	5 puntos, entre el 10 y el 50% de cubierta vegetal en la zona de ribera. -10 puntos, no existe conectividad entre la ribera y el ecosistema forestal adyacente.
Estructura de la cubierta	10 puntos, cobertura de árboles entre el 25 y 50% (30% aproximadamente) y cantidad de arbustos mayor al 25%. 5 puntos, presencia de helófitos en la orilla de entre el 25 y 50%. -5 puntos, los árboles y arbustos presentes, se distribuyen en manchas sin formar comunidades.
Calidad de la cubierta	0 puntos, sin presencia de árboles autóctonos. - 10 puntos, especies alóctonas forman comunidades. -5 puntos, presencia de estructuras construidas por el hombre. -10 puntos, presencia de vertidos de basura.
Grado de naturalidad del canal fluvial	10 puntos, modificaciones en las terrazas del río que modifican el canal.
<b>Total de puntos</b>	<b>20 puntos.</b>

La presencia de cultivos (maíz) incrementa la aparición de desechos, con alteraciones en el bosque y cuerpo de agua, la construcción de caminos para facilitar el desarrollo de las actividades antrópicas es otras de las alteraciones comunes (López-Delgado et al. 2015; Almarales et al. 2017). En particular en este sitio, la extracción de material rocoso, lo cual modifica el cauce, aumenta la sedimentación y la formación de bancos de arena reduciendo con esto la biodiversidad y alterando los hábitats ribereños (Naiman et al., 1993).



*Figura 33. Alteraciones en Nealtican. A: Extracción de rocas, B: paso de vehículos pesados, C: vertido de aguas residuales al río*

## 9.2 Variación del índice QBR en función del Uso de Suelo

A partir de las visitas a los sitios, se definieron los usos de suelo observados en cada uno de ellos, en total, fueron descritos 6 diferentes usos que se le da al suelo, de los cuales Pastizal Montano está presente en los sitios Joya Alta y Cascada VW y es definido por la vegetación predominante en ellos; Forestal fue encontrado en los sitios Alcalica Alta y Alcalica dentro de la subcuenca La Compañía y Vallecito y Apatlaco en la subcuenca Nexapa. Este uso de suelo se dio en función a los diferentes estratos de bosque, ya sea de bosque de pino de alta montaña o bosque de pino-encino. La siguiente categoría corresponde a “Forestal Perturbado” cuyas características refieren a sitios donde sigue dominando el bosque, pero en donde comienzan a presentarse ligeras perturbaciones, los dos sitios con este uso de suelo fueron Buenavista y Alcalica 2, mismos que ya se encuentran fuera del área protegida. El siguiente para la subcuenca de La Compañía es el Forestal-Agrícola, y corresponde al sitio Alcalica Vivero; en este sitio, como se describió anteriormente, por un lado, existe un estrato de vegetación ligeramente perturbada, pero por otro, ya hay una fuerte presencia de cultivos, por lo que dichas alteraciones fueron consideradas a la hora de definir el uso que se le da al suelo.

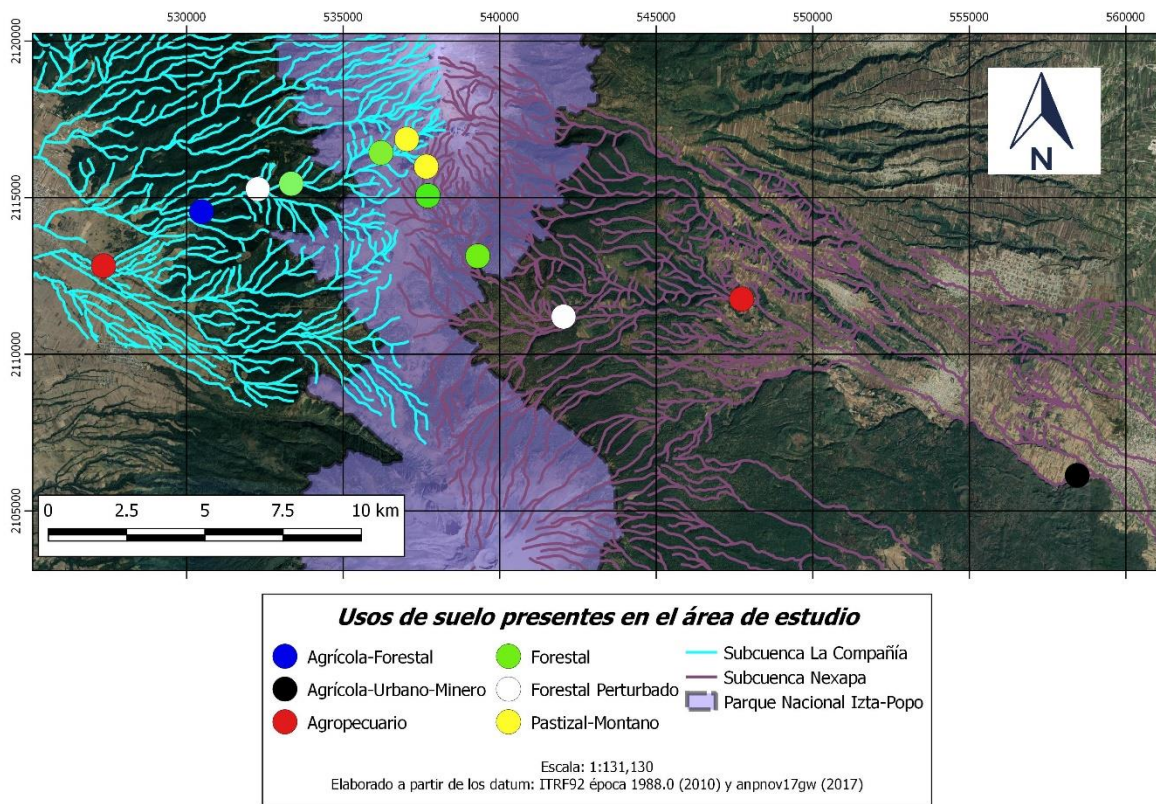


Figura 34. Usos de suelo presentes en el área de estudio

El siguiente es un uso agropecuario, presente en ambas subcuencas, en los sitios de Tomacoco y Santiago Xalizintla; en ellos pese a existir mancha de vegetación, la presencia de actividades agrícolas y ganaderas, son las dominantes, reflejándose en ellos, la accesibilidad y la creciente presencia de poblados en ellos. Por último, en la subcuenca de Nexapa, se encuentra el uso de suelo “Agrícola-Urbano-Minero”, donde como su nombre lo indica, estas actividades son las que mayor presencia tienen en el sitio de estudio Nealtican

En función de los usos de suelo encontrados, se realizó la comparación del promedio de acuerdo al puntaje del índice QBR obtenido. En la Figura 35, se pone de manifiesto cómo, conforme los usos de suelo presentan alteraciones antrópicas, los puntajes en el índice QBR disminuyen, reflejando la pérdida de calidad ecológica de los sitios estudiados, consecuencia de la pérdida de vegetación natural, modificaciones al cauce, entre otros aspectos.

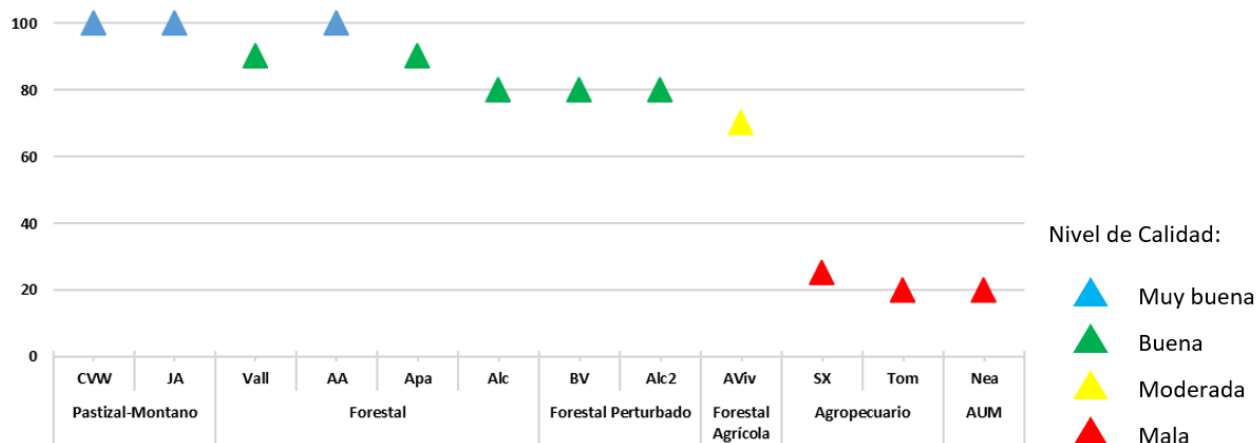


Figura 35. Relación Índice QBR - Uso de Suelo. CVW: Cascada VW, JA: Joya Alta, Vall: Vallecito, AA: Alcalica Alta, Apa: Apatlaco, Alc: Alcalica, BV: Buenavista, Alc2: Alcalica 2, AViv: Alcalica Vivero, SX: Santiago Xalizintla, Tom: Tomacoco, Nea: Nealtican.

Los sitios con menor puntaje corresponden a lugares donde el uso de suelo ha sido modificado y se ha destinado a desarrollo urbano, agrícola o ganadero, lo que ha generado un cambio importante en el paisaje, así mismo, el incremento demográfico en la zona y la falta de un ordenamiento y control de éste crecimiento, ha provocado un deterioro ambiental y pérdida de biodiversidad.

## 9.3 Propiedades físicas y químicas de los afluentes y suelos ribereños

### 9.3.1 Suelos Ribereños

En el Cuadro 21 se presentan el promedio y desviación estándar obtenidos para cada una de las propiedades físicas y químicas del suelo de los sitios en observación, ésta información brinda una visión general de la condición ambiental encontrada en los suelos monitoreados a lo largo de éste estudio. Es importante recalcar que se realizaron dos muestreos edáficos semestralmente.

En función de la densidad aparente, los suelos fueron clasificados a partir de lo propuesto en la NOM-021-SEMARNAT-2000, ubicando a los suelos de Cascada VW, Vallecito y Apatlaco, en la categoría de “orgánicos y volcánicos” con densidades cercanas a  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , otros como Tomacoco, Alcalica, Alcalica 2, Buenavista y Santiago Xalizintla, en la categoría arcillosos ( $1.0\text{-}1.19 \text{ g cm}^{-3}$ ) y tres más, Nealtican, Alcalica Alta y Joya Alta, dentro de la categoría arenosos ( $1.32 \text{ g cm}^{-3}$ ). Un aspecto a destacar es que, en sitios poco perturbados, la densidad aparente es mayor, como Joya Alta, Alcalica Alta y Alcalica, la cual debería ser menor a  $1 \text{ g cm}^{-3}$  (Siebe et al. 2006).

Cuadro 21. Valores de los Indicadores de Calidad de Suelo analizados.

	Sitio	pH (Unidades pH)		Conductividad Eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ )		Densidad Aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )		Humedad Gravimétrica (%)		Humedad Volumétrica (%)		Materia orgánica (%)		Nitrógeno total (%)		Fósforo disponible ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )	
		$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S
Nexapa	Cascada VW	5.4	0	1.24	1.58	0.72	0.42	84.65	64.88	37.26	19.92	3.49	2.44	0.12	0.06	10.43	7.12
	Vallecito	5.5	0.35	0.96	0.23	0.90	0.17	63.22	29.34	51.86	11.28	3.02	0.44	0.08	0.03	42.46	12.46
	Apatlaco	5.4	0.10	0.83	0.78	0.90	0.90	76.77	23.26	63.35	7.95	2.95	1.21	0.13	0.03	11.44	3.57
	Buenavista	6.1	0.47	0.59	0.20	1.05	0.35	35.92	8.37	35.42	7.94	1.63	1.09	0.13	0.05	32.89	20.7
	S. Xalizintla	6.5	0.07	0.71	0.35	1.02	0.42	97.94	118.48	51.44	28.78	1.27	1.11	0.09	0.04	30.53	4.14
	Nealtican	6.3	0.25	1.34	0.79	1.52	0.23	24.58	8.52	36.56	10.7	1.43	0.46	0.04	0.01	77.78	13.28
	Joya Alta	4.6	0.3	0.36	0.1	1.43	0.06	91.89	11.43	131.09	14.89	1.34	1.2	0.11	0	5.86	2.58
	Alcalica Alta	5	0.29	0.86	0.27	1.25	0.28	122.58	64.33	135.02	25.19	1.70	1.62	0.09	0.05	10.40	7.32
	Alcalica	5.7	0.33	1.06	0.52	1.15	0.27	183.95	103.35	199.47	98.76	3.48	0.74	0.09	0.03	29.92	12.97
	Alcalica 2	6.9	0.18	0.77	0.27	1.02	0.24	124.54	38.67	117.18	9.03	2.93	1.75	0.10	0.04	29.41	15.5
La Compañía	A. Vivero	5.9	0.21	1.70	0.9	1.03	0.02	120.57	9.99	123.34	8.22	4.27	1.48	0.24	0.08	33.82	11.47
	Tomacoco	6.5	0.13	2.62	1.34	1.08	1.13	124.62	30.33	127.99	13.31	3.46	2.02	0.17	0.07	63.43	38.82

Respecto a los niveles de pH, se clasificaron como moderadamente ácidos (5.1-6.5) y neutros (6.6-7.3). Los valores más ácidos se encontraron en suelos volcánicos, mientras que los alcalinos en sitios con un manejo influenciado por actividades antrópicas. En cuanto a la humedad, hay una notoria diferencia entre afluentes, siendo los sitios del afluente “La Compañía”, los que mayor humedad presentaron, tanto gravimétrica como volumétrica.

La conductividad fue muy diversa a lo largo de los sitios, de acuerdo la clasificación propuesta por la USDA (1999), los suelos se clasifican como “no salinos” y “muy ligeramente salinos”,

únicamente el sitio Tomacoco posee suelos “ligeramente salinos”; con problemas relacionados con respuestas microbianas, en especial procesos de nitrificación/desnitrificación y respiración/amonificación (USDA, 1999).

En función las concentraciones de materia orgánica, la NOM-021-SEMARNAT-2000 proporciona valores de referencia para suelos de origen volcánico, y de acuerdo con ellos, todos los suelos estudiados presentan niveles muy bajos, con contenidos de MO menores al 4%, salvo Alcalica Vivero con 4.29%.

En lo que a nutrientes se refiere, los suelos presentaron contenidos de nitrógeno desde muy bajos (menores a 0.05%) en Nealtican, bajos (0.05-0.15%) en Cascada VW, Vallecito, Aplatlaco, Buenavista, Santiago Xalizintla, Joya Alta, Alcalica Alta y Alcalica y contenidos altos (0.2 - 0.29 %) sólo en Alcalica Vivero y Tomacoco. El fósforo disponible tuvo un comportamiento similar puesto que las concentraciones fueron diversas, con contenidos bajos que son aquellos con valores menores a 15 mg/Kg, los cuales se presentaron en los sitios Cascada VW, Apatlaco, Joya Alta y Alcalica Alta. Así mismo, valores medios (15 – 30 mg/Kg) en Alcalica y Alcalica 2 y altos (concentraciones mayores a 30 mg/Kg) en Vallecito, Buenavista, Santiago Xalizintla, Nealtican, Alcalica Vivero y Tomacoco. Esto difiere con lo encontrado en estudios previos en la zona, cuyos autores encontraron concentraciones bajas de éste nutrimento en sitios cercanos (Ayala, 2011; Cortés y Vega, 2013).

### **9.3.2 Afluentes Ribereños**

En el Cuadro 22, se presentan el promedio y la desviación estándar de las características físicas y químicas analizadas en los afluentes ribereños de cada uno de los sitios estudiados. Estos indicadores, permiten conocer el estado ecológico en cada sitio, puesto que pueden ser comparados con valores de referencia propuestos para cada variable en normas o decretos oficiales y su interpretación a partir de lo propuesto en investigaciones previas.

Los pH encontrados en las aguas de nuestros puntos de estudio son neutros, con valores desde los 7 a los 7.6, estos se encuentran dentro del rango aceptado en la NOM-127-SSA1-1994, la cual establece los límites permisibles para uso y consumo humano de éste recurso y da un valor de referencia de entre 6.5 y 8.5.

Cuadro 22. Valores de los Indicadores de Calidad de agua analizados.

	Joya Alta		Alcalica Alta		Alcalica		Alcalica 2		Alcalica Vivero		Tomacoco*	
	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S
Temperatura (°C)	8.3	4.58	8	1.30	7.3	1.01	8.6	1.05	10.1	1.18	10.4	0.78
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}^3$ )	57	19.47	93.4	8.86	73.4	8.18	72.1	7.06	72.7	6.15	66	2.08
pH (unidades pH)	7.1	1.01	7.5	0.46	7.1	0.51	7.4	0.32	7.5	0.26	7.6	0.31
Oxígeno Disuelto ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ )	7.9	0.59	8.05	0.33	9	0.91	8.6	1.1	7.95	0.64	7.57	1.16
Alcalinidad ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	121.5	158.77	125.4	169.26	40.4	13.41	38	4.25	40.1	3.35	40	3.99
Dureza de Calcio ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	38.7	10.57	40.3	7.09	40.4	6.95	43.8	8.2	40.5	9.15	36.8	9.1
Dureza Total ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	64.6	9.57	65.8	10.73	62	7.02	66.4	8.66	60.7	15.94	58.3	10.83
Nitritos ( $\text{mg N-NO}_2^- \text{ L}^{-1}$ )	0.005	0	0.0014	0	0.0010	0	0.0029	0	0.0105	0.01	0.0051	0
Nitratos ( $\text{mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ )	0.4203	0.41	0.4310	0.41	0.4488	0.39	0.4818	0.41	0.4434	0.37	0.1066	0.06
Amonio ( $\text{mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )	0.0345	0.05	0.1000	0.18	0.5009	0.78	0.0593	0.09	0.1631	0.24	0.0661	0.07
Ortofosfatos ( $\text{mg P-PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$ )	0.0651	0.02	0.1100	0.04	0.0766	0.02	0.0551	0.02	0.0505	0.02	0.0307	0.01
Fósforo total ( $\text{mg P-total L}^{-1}$ )	0.6972	0.41	0.7841	0.47	0.6911	0.55	0.7618	0.45	0.6851	0.51	0.3684	0.07
	Cascada VW		Vallecito		Apatlaco		Buenavista		Santiago Xalizintla		Nealtican	
	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S	$\bar{x}$	S
Temperatura (°C)	5.5	1.45	6.3	1.43	8.8	0.58	9.7	1.23	11.5	1.61	14.2	2.07
Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}^3$ )	50.8	7.61	41.5	7.19	46.3	4.31	45.8	5.89	84.7	35.59	270.8	107.64
pH (unidades pH)	7	0.39	7	0.54	7.2	0.04	7.3	0.48	7.2	0.24	7.4	0.19
Oxígeno Disuelto ( $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ )	7.9	1.04	8.2	1.12	7.3	1.65	7.5	2.5	7.6	1.54	6.2	2.18
Alcalinidad ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	61.3	67.30	68.2	59.35	41.3	9.15	38	11.79	65.1	26.52	142.6	55.97
Dureza de Calcio ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	41.9	30.14	34.8	8.27	43	6.31	50.1	11.65	54.6	19.7	83.6	23.57
Dureza Total ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	59	16.09	58.2	13.55	64.8	3.77	67.8	67.77	75	26.81	108.4	24.97
Nitritos ( $\text{mg N-NO}_2^- \text{ L}^{-1}$ )	0.0001	0	0.0001	0	0	0	0.0002	0	0.0025	0.002	0.0046	0.002
Nitratos ( $\text{mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ )	0.4573	0.23	0.4498	0.21	0.4084	0.18	0.4778	0.28	0.4959	0.18	0.6047	0.23
Amonio ( $\text{mg N-NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$ )	0.0307	0.06	0.0533	0.08	0.0613	0.07	0.0617	0.06	0.1823	0.15	3.1962	1.56
Ortofosfatos ( $\text{mg P-PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$ )	0.123	0.08	0.0772	0.04	0.0483	0.01	0.0414	0.01	0.0972	0.04	0.3208	0.30
Fósforo total ( $\text{mg P-total L}^{-1}$ )	0.5311	0.30	0.5548	0.08	0.5588	0.15	0.4984	0.11	0.7235	0.4	1.5072	0.62

\*En Tomacoco sólo fue posible muestrear durante los meses de septiembre y noviembre

La suma del contenido de los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio más los aniones carbonato, bicarbonato, sulfato y cloruro, son de importancia biológica puesto que son indicadores de diversos aspectos relacionados con las condiciones limnológicas de las aguas, por ejemplo, la composición específica de la comunidad biológica, particularmente de las algas, está afectada por la composición iónica de las aguas (Wetzel, 1981). Además, las concentraciones de los iones como el calcio o el sulfato pueden ser indicadoras de procesos que se desarrollan en la interfase agua-sedimento. Es por ello que el estudio de la dinámica química de esta interfase es de gran importancia debido a que los sedimentos pueden ser sumideros o una fuente interna de aporte de nutrientes. Otro aspecto a considerar es que la concentración de algunos iones puede verse muy alterada por la presencia de focos contaminantes. Para conocer el contenido de estos cationes y aniones, medir la alcalinidad, la conductividad eléctrica y la dureza del agua resulta de gran ayuda.



Respecto a la alcalinidad, a partir de lo sugerido por Kevern et al. (1996), los sitios bajo estudio poseen agua con alcalinidad baja y media; es importante mencionar que los valores más altos fueron encontrados en Nealtican, en el afluente de Nexapa, y en Joya Alta y Alcalica Alta, en el afluente La Compañía, esto es interesante, puesto que en estos dos sitios, las concentraciones que modificaron el promedio fueron las registradas en el muestreo del mes de mayo, mientras que en los otros meses, la alcalinidad promedio en Joya Alta fue de  $32 \text{ mg L}^{-1}$  y en Alcalica alta de 32.4, por lo cual se infiere que en el mes de mayo, en la temporada de lluvias, el acarreo de materiales de manera longitudinal y transversal por efecto de las lluvias, y su ingreso al afluente fue muy abundante y permitió que la concentración de bicarbonatos incrementara notablemente.

La conductividad eléctrica tuvo pocas fluctuaciones, las cuales se presentaron en los sitios más perturbados, como Nealtican y Santiago Xalizintla, el primero con un incremento bastante importante respecto a los demás sitios. Respecto a la clasificación propuesta por Jenkins et al. (1983), en todos los puntos se presentan condiciones excelentes, mientras que Nealtican entra dentro de la categoría buena (Cuadro 23).

*Cuadro 23. Calidad del agua de acuerdo a su conductividad (Jenkins et al., 1983).*

<b>Grado</b>	<b>Conductividad máxima en <math>\mu\text{S cm}^{-1}</math> a <math>25^\circ\text{C}</math></b>
Excelente	< 250
Buena	250 – 750
Permisible	750 - 2,000
Dudosa	2,000 - 3,000
Inservible	> 3,000

La NOM-127-SSA1-1994, establece una concentración máxima de  $\text{CaCO}_3$  (dureza total) de  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , límite que no fue superado, por lo que las aguas de los sitios analizados se clasifican como blandas, sin embargo, los valores más altos de dureza, fueron encontrados en Nealtican y Santiago Xalizintla, atribuyéndose esto a la alta presencia de sedimentos dentro del cauce.

Los valores de oxígeno disuelto más bajos fueron en Tomacoco y Nealtican, los factores naturales que influye en éstas concentraciones son la temperatura y la altitud, sin embargo, por las características de los sitios, otros factores que pueden estar influyendo en las bajas concentraciones son de origen antrópico, como la entrada al cauce de desechos orgánicos vegetales, animales y humanos, ocasionando que bacterias aerobias ejerzan acción para degradar dicha materia, utilizando el oxígeno para degradarla (Margalef, 1983), esto en el caso de

Tomacoco, mientras que en Nealtican, las actividades mineras de extracción pueden ocasionar entradas minerales al cauce, misma que puede también influir en los niveles de OD.

En cuanto a los valores de nitrógeno, en sus diversas especies químicas, los nitritos y nitratos presentaron concentraciones dentro de los máximos permitidos en normas mexicanas para agua de uso y consumo humano. La NOM-127-SSA1-1994, sugiere una concentración máxima de nitrógeno como nitritos de  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ , y de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de nitrógeno en su forma química de nitratos. Respecto al nitrógeno amoniacal, la concentración permitida máxima en aguas para uso humano, es de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$ , la cual fue superada por considerablemente en Nealtican, el cual presentó un promedio de  $\text{N-NH}_4^+$  de  $3.19 \text{ mg L}^{-1}$ . El origen de este nutriente es diverso, pero en particular desde antes de este sitio, la descarga de aguas domésticas, agrícolas con heces de animales, basura y fertilizantes es evidente, motivo por el cual la alta cantidad de materia orgánica presente que se degrada en el agua y que, por las condiciones anaeróbicas, no logra completar un proceso de nitrificación, acumulándose en ésta forma química, lo cual es indicio de contaminación reciente y riesgosa (Quintero et al., 2010). En concentraciones menores, sitios como Santiago Xalizintla y Alcalica Vivero también hay indicios de éste tipo de contaminación.

Para el fósforo, la NOM-001-SEMARNAT-1995, sugiere diversas concentraciones de este nutrimento, las cuales varían de acuerdo al uso que se le vaya a dar al recurso, por ejemplo, para el riego agrícola y uso público urbano se limita a  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de fósforo total, misma que ninguno de nuestros sitios supera, aunque nuevamente Nealtican y Tomacoco presentan las concentraciones más altas en cada afluente, reflejando la entrada al afluente de fertilizantes o desechos domésticos como detergentes, productos que contienen compuestos fosfatados de manera abundante y que son responsables en muchos casos de la contaminación de los sistemas acuáticos.

#### **9.4 Análisis de Correlación Múltiple.**

Para el análisis de los datos, en primer lugar, se realizó un análisis de correlación múltiple con todas las variables estudiadas en esta investigación, tanto de agua como de suelo. El objetivo de este análisis fue identificar aquellas variables que dieran información semejante con base en la colinealidad y de acuerdo a este criterio hacer la reducción del número de variables, con

argumentos estadísticos. Así, fueron extraídas del ACP, variables que presentaran un coeficiente de correlación  $r > 0.7$ , con nivel de significancia  $p < 0.05$  (Cuadro 24).

A partir de lo anterior, en los sistemas acuáticos se encontró una alta colinealidad entre la dureza de calcio y la dureza total en agua con un  $r = 0.8164$  y en las temperaturas ambiente y de agua una correlación significativa igual a  $0.7725$ . estas correlaciones eran esperadas, puesto que la temperatura ambiental, será determinante en la temperatura del cauce, asimismo, el contenido de calcio en el contenido total de carbonatos.

Del mismo modo, en el suelo se encontró alta colinealidad en las humedades gravimétricas y volumétricas entre ambos lados del cauce, esto ha sido reportado debido a la relación que ambos parámetros tienen con la densidad aparente (Monroy et al. 2017).

Cuadro 24. Análisis de correlación múltiple

	T agua	C.E. Agua	pH Agua	O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> L <sup>-1</sup>	P total L <sup>-1</sup>	pH suelo	C.E. suelo	MOS (%)	N total (%)	P suelo
T agua		0.6285	0.0162	-0.5095	0.5331	0.2530	0.4132	0.3826	0.5775	0.1696	-0.3818	-0.0623	0.5527
C.E. agua	0.6285	<b>0.0000</b>	0.7713	0.0000	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0000</b>	0.2617	<b>0.0000</b>
pH agua	0.0162		0.1071	-0.4574	0.7474	0.1359	0.5949	0.4913	0.3911	0.2110	-0.3184	-0.3640	0.5631
mg	0.7713	0.0533		0.0000	<b>0.0000</b>	<b>0.0141</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
O <sub>2</sub> L <sup>-1</sup>	0.0162	0.1071	0.2101		0.1448	0.1593	0.0975	0.0594	0.1704	0.1639	-0.0361	0.1241	0.1573
mg	0.7713	0.0533	<b>0.0001</b>		<b>0.0088</b>	<b>0.0039</b>	0.0789	0.2846	<b>0.0020</b>	<b>0.0030</b>	0.5166	<b>0.0251</b>	<b>0.0044</b>
CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	-0.5095	-0.4574	0.2101	-0.2266		-0.1580	-0.1179	-0.0599	-0.1901	-0.0857	0.1979	0.1181	-0.2731
mg	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0001</b>		<b>0.0000</b>	<b>0.0042</b>	<b>0.0333</b>	0.2806	<b>0.0006</b>	0.1226	<b>0.0003</b>	<b>0.0330</b>	<b>0.0000</b>
mg	0.5331	0.7474	0.1448	-0.2266		0.0228	0.4295	0.5435	0.3621	0.0408	-0.3779	-0.2944	0.4026
mg	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0088</b>	<b>0.0000</b>		0.6815	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.4632	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
mg	0.2530	0.1359	0.1593	-0.1580	0.0228		0.0986	0.4020	0.0593	-0.1148	-0.1036	-0.1145	0.0458
NO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	<b>0.0000</b>	<b>0.0141</b>	<b>0.0039</b>	<b>0.0042</b>	0.6815		0.0753	<b>0.0000</b>	0.2856	<b>0.0383</b>	0.0618	<b>0.0388</b>	0.4095
mg	0.4132	0.5949	0.0975	-0.1179	0.4295	0.0986		0.5093	0.3793	0.2011	-0.2664	-0.4005	0.6133
NH <sub>4</sub> L <sup>-1</sup>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.0789	<b>0.0333</b>	<b>0.0000</b>	0.0753		<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0003</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
mg P	0.3826	0.4913	0.0594	-0.0599	0.5435	0.4020	0.5093		0.1900	0.0404	-0.2290	-0.2643	0.3119
total L <sup>-1</sup>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.2846	0.2806	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>		<b>0.0006</b>	0.4674	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
pH suelo	0.5775	0.3911	0.1704	-0.1901	0.3621	0.0593	0.3793	0.1900		0.4414	-0.0501	0.0587	0.7172
C.E. suelo	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0006</b>	<b>0.0000</b>	0.2856	<b>0.0000</b>	<b>0.0006</b>		<b>0.0000</b>	0.3670	0.2909	<b>0.0000</b>
MOS (%)	0.1696	0.2110	0.1639	-0.0857	0.0408	-0.1148	0.2011	0.0404	0.4414		0.5735	0.3903	0.4900
N total (%)	<b>0.0021</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0030</b>	0.1226	0.4632	<b>0.0383</b>	<b>0.0003</b>	0.4674	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>
P suelo	-0.3818	-0.3184	-0.0361	0.1979	-0.3779	-0.1036	-0.2664	-0.2290	-0.0501	0.5735		0.5037	-0.0295
(%)	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.5166	<b>0.0003</b>	<b>0.0000</b>	0.0618	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.3670	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>	0.5956
(%)	-0.0623	-0.3640	0.1241	0.1181	-0.2944	-0.1145	-0.4005	-0.2643	0.0587	0.3903	0.5037		-0.2346
(%)	0.2617	<b>0.0000</b>	<b>0.0251</b>	<b>0.0330</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0388</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.2909	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>		<b>0.0000</b>
(%)	0.5527	0.5631	0.1573	-0.2731	0.4026	0.0458	0.6133	0.3119	0.7172	0.4900	-0.0295	-0.2346	
(%)	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.4095	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	0.5956	<b>0.0000</b>	

Valor negro: Fuerza de correlación

Valor rojo: Significancia de la correlación

Otros de los parámetros en suelo con alta asociación significativa fueron el contenido de MO y la conductividad eléctrica, la pendiente del terreno y la densidad aparente ( $r = 0.7310$ ). Así como el pH y fósforo disponible en el suelo; a éstas dos propiedades se les ha atribuido una importante relación, puesto que, dependiendo del pH del suelo, las formas aprovechables de fósforo estarán disponibles para las plantas (Conti, 2000).

Otras variables que mostraron alta colinealidad en el suelo, fueron los valores de pH, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica, esto entre los márgenes del río, sin embargo, para un mejor análisis, éstas variables se mantuvieron en el manejo de datos.

## 9.5 Análisis de Componentes Principales.

Una vez discriminadas las variables que mostraron colinealidad en el análisis de correlación múltiple, catorce variables (agua: T°, pH, C.E., O.D., Dureza total, Nitratos, Amonio, Fósforo total; de suelo: pH, C.E., % Nt, % MOS, P Suelo y D. Ap.), fueron consideradas para realizar el análisis de componentes principales (ACP), cuya metodología busca las combinaciones lineales de las variables totales observables, que puedan utilizarse para resumir los datos, es decir, que expliquen las diferencias entre las observaciones, casi con la misma efectividad que toda la base de datos y sean no correlacionadas, para no reiterar información. Tales combinaciones lineales se denominan Componentes Principales (Yengle, 2012).

Al realizar éste análisis, se obtuvieron catorce componentes, de los cuales, cuatro fueron componentes principales, puesto que sus eigenvalores presentaron valores iguales o mayores a uno y en conjunto, explican el 70.258% de la variabilidad de los datos originales (Cuadro 25).

*Cuadro 25. Análisis de Componentes Principales.*

<b>Número de Componente</b>	<b>Eigenvalor</b>	<b>% de varianza</b>	<b>% acumulado</b>
<b>1</b>	4.9589	35.421	35.421
<b>2</b>	2.3762	16.973	52.394
<b>3</b>	1.3340	9.529	61.923
<b>4</b>	<b>1.1669</b>	<b>8.335</b>	<b>70.258</b>
<b>5</b>	0.9915	7.082	77.341
<b>6</b>	0.8199	5.857	83.197

En el Cuadro 26, se muestra el peso que tiene cada variable en los cuatro componentes, ya sea positivo o negativo, dichas variables fueron estandarizadas en el análisis para un óptimo resultado.

Cuadro 26. Peso de las variables en cada componente principal.

	Componente 1	Componente 2	Componente 3	Componente 4
<b>T Agua</b>	0.352867	-0.0858229	-0.243582	0.219033
<b>C.E. Agua</b>	0.393277	-0.013441	-0.0689678	-0.0597975
<b>pH Agua</b>	0.0679992	-0.124228	0.618995	0.10672
<b>O.D.</b>	-0.192131	0.0188171	0.622236	-0.25175
<b>Dureza total</b>	0.341558	0.0495823	0.0539174	-0.113774
<b>Nitratos</b>	0.108778	0.0899032	0.164035	0.804897
<b>Amonio</b>	0.337079	-0.0222867	0.183128	-0.230281
<b>Fósforo total</b>	0.285976	0.0830389	0.274332	0.243439
<b>pH Suelo</b>	0.251649	-0.372118	-0.0562262	0.00125891
<b>C.E. Suelo</b>	0.0731525	-0.575709	0.036141	-0.0628064
<b>% MOS</b>	-0.217885	-0.4533	0.0471677	0.0555988
<b>% Nt</b>	-0.186356	-0.37086	0.0207157	0.23
<b>P Suelo</b>	0.323729	-0.306662	-0.0139869	-0.155914
<b>D. Ap.</b>	0.315752	0.227511	0.140191	-0.127825

El componente 1 está influenciado principalmente por parámetros hídricos, tales como, la temperatura, la conductividad eléctrica, la dureza total y amonio; así mismo, el fósforo extractable del suelo tiene un peso importante en éste componente (Figura 36). Las variables edáficas de conductividad, relacionada con la salinidad y contenido de materia orgánica, tienen mayor influencia en el Componente 2 (Figura 36), en menor grado el % de nitrógeno total y el pH también influyen en éste componente.

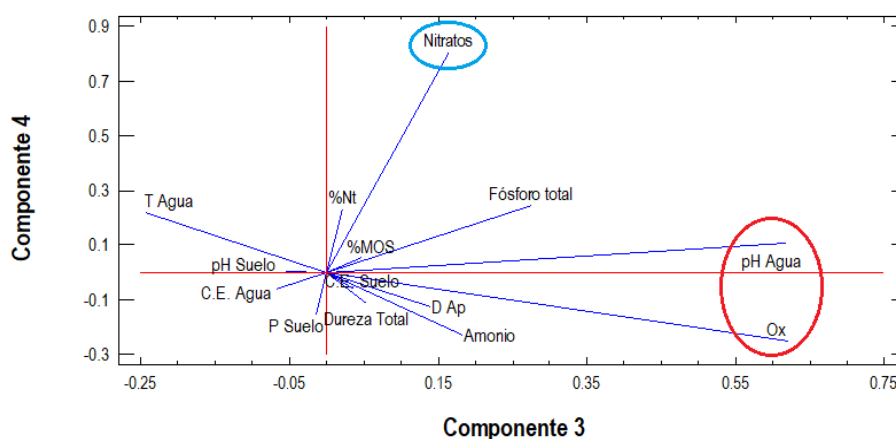


Figura 36. Gráfico de pesos de los componentes 1 y 2.

Respecto al componente 3, dos variables muestran un peso importante en él, el pH del agua y el oxígeno disuelto (Figura 37), para el componente número 4, el contenido de nitratos es la variable que mayor peso tiene (Figura 37).

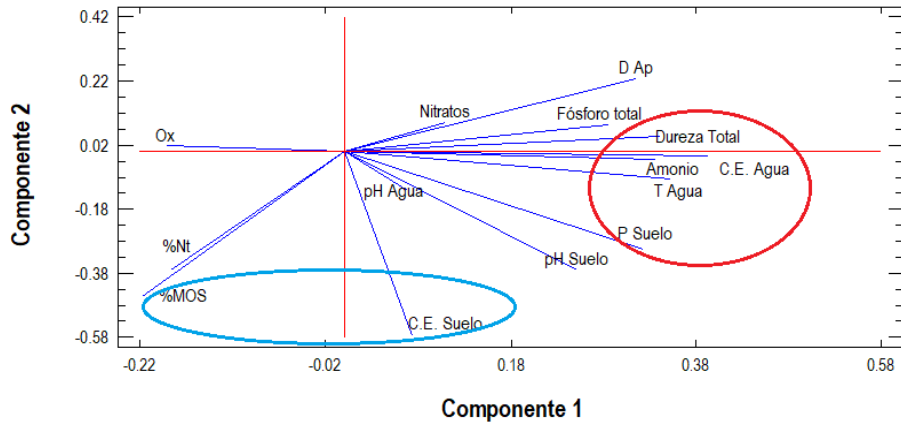


Figura 37. Gráfica de pesos de los componentes 3 y 4.

## 9.6 Variación de las principales propiedades hídrico-edáficas en función del Uso de Suelo

Obtenidas las diez variables de mayor peso en el estudio, resultantes del análisis de componentes principales, se llevó a cabo un análisis de varianza con el propósito de comparar que variables son afectadas por los cambios en el uso de suelo. Éste análisis arrojó que las diez variables no cumplen con los supuestos necesarios de normalidad y homocedasticidad, inclusive algunas después de ser estandarizadas, por lo que fue requerida la implementación de una prueba no paramétrica, en éste caso la prueba de Kruskal-Wallis, que permitió conocer con un nivel de confianza del 95% y valores de  $p\text{-value} \leq 0.05$ , y saber si hay diferencias en las distribuciones de una variable en el estudio de poblaciones a partir de las medianas de los grupos (Gómez-Gómez et al., 2003).

La temperatura del agua arrojó diferencias estadísticamente significativas entre los usos de suelo ( $p\text{ value} = 0$ ), encontrándose sólo dos usos de suelo con comportamiento similar, éstos son el forestal perturbado y el agrícola forestal (Figura 38). Si bien es cierto que uno de los aspectos que mayor condicionan la temperatura del cauce es la temperatura ambiental, misma que está dada principalmente por la variación del gradiente altitudinal en la zona de estudio, los cambios en el uso de suelo ocasionan la pérdida de la cobertura y sustitución de la vegetación ribereña, lo cual hace que el cauce pierda la protección que las plantas otorgan a través de la sombra que proyectan sobre el curso del agua, influyendo en el flujo de radiación lumínica y controlando

así la temperatura cauce e interviniendo en su microclima (Granados-Sánchez et al., 2006; Guevara et al., 2008).

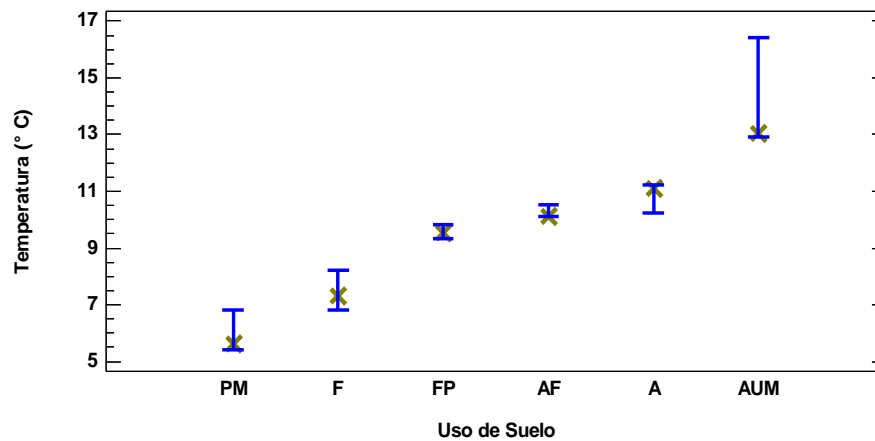


Figura 38. Variación de la temperatura del agua en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

En la conductividad eléctrica, relacionada con la concentración de sales presentes en el cauce, se encontraron diferencias significativas entre los usos de suelo ( $p \text{ value} = 0$ ) (Figura 39), sin embargo, la mayor fluctuación y los mayores valores fueron registrados en el uso de suelo “Agrícola Urbano Minero”, donde la alta presencia de sólidos totales disueltos en el cauce, incrementó la conductividad (De Miguel-Fernández, 2012). El valor máximo en este sitio fue de  $404 \mu\text{S cm}^{-1}$ , reportado en el mes de abril, mismo que coincide con la velocidad del cauce más baja y la temperatura ambiental más alta reportadas, por lo que el escaso caudal y la alta temperatura, pueden haber influido en la solubilidad y dilución de las sales y los aportes iónicos residuales, presentando estos altos registros de conductividad (Moraña, 1998; Isasmendi et al., 2007).

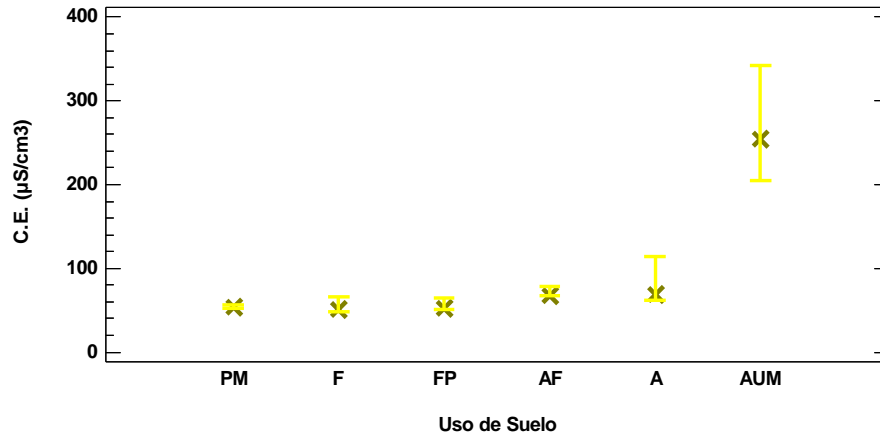


Figura 39. Variación de la conductividad eléctrica del agua en función del Uso de Suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

Los valores de dureza total arrojaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \text{ value} = 0$ ) y se observó un comportamiento que muestra una tendencia a incrementar la dureza total en los usos de suelo modificados (Figura 40). Los valores más altos fueron encontrados en el uso de suelo “Agrícola Urbano Minero”, como consecuencia de la alta mineralización y altos contenidos de sólidos suspendidos totales (De Miguel-Fernández, 2012).

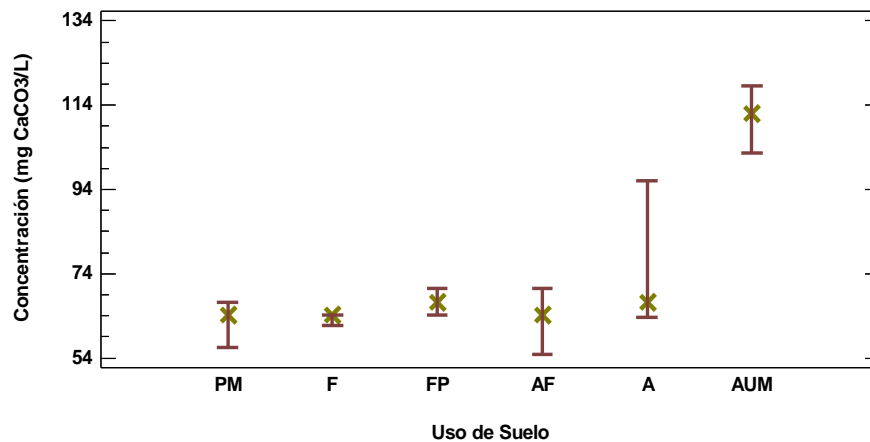


Figura 40. Variación de la dureza total en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

El nitrógeno amoniacal, pese a tener diferencias estadísticamente significativas ( $p \text{ value} = 0$ ), mostró dos grupos estadísticamente homogéneos, ya que sólo el uso de suelo “Agrícola-Urbano-Minero” está teniendo un efecto directo sobre los valores de éste parámetro (Figura 41). Ésta situación es atribuida al alto aporte de materia orgánica que hay en el cauce y a la



descomposición de la misma (IMTA, 2012), lo cual es señal de una alta y reciente contaminación en el afluente (Sardiñas y Pérez, 2004).

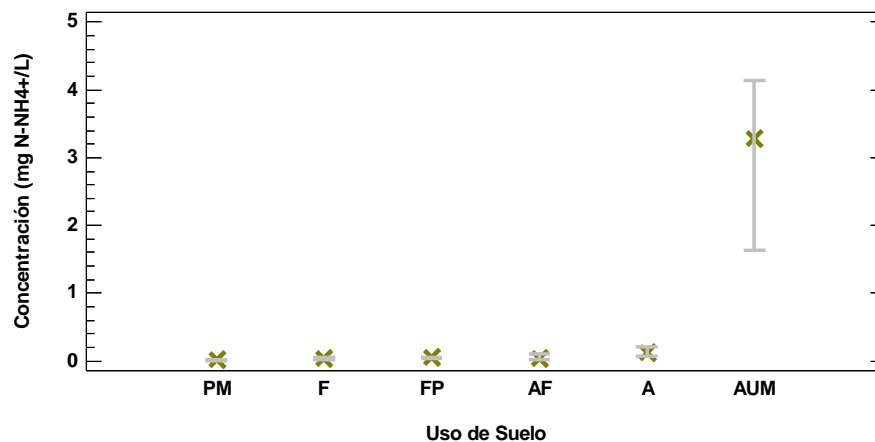


Figura 41. Variación del nitrógeno amoniacal en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

La concentración del fósforo disponible en el suelo también se modificada de forma estadísticamente significativa en función del uso de suelo ( $p$  value = 0). La disponibilidad de este nutrimento en el suelo es influenciada por factores como las propiedades del suelo, de la planta y condiciones ambientales (Campitelli et al., 2010). El fósforo disponible es aquella forma química del fósforo que puede ser aprovechada inmediatamente por las plantas (Johnston y Syers, 2009) y es por ello que se convierte en el segundo nutriente que más frecuentemente limita el crecimiento de las plantas (Gueçaimburu et al., 2019). El comportamiento de las concentraciones, muestra un gran incremento en el uso de suelo “Agrícola-Urbano-Minero” (Figura 42).

Es bien sabido que el fósforo está en el suelo en pequeñas cantidades disponibles para las plantas, por lo que la aplicación de fertilizantes fosfatados es común en usos de suelo con fines agrícolas (Fernández, 2007), sin embargo, es visible el exceso en las concentraciones de éste nutriente en este uso de suelo, lo cual supone una distorsión de los equilibrios ambientales en ese sitio, generando que, a la larga, su acumulación de lugar a un aumento del riesgo de transferencia del fósforo en el suelo a medios acuáticos (Fernández, 2011). Diversos autores han demostrado que sistemas agrícolas incrementan la disponibilidad del fósforo (Oyarzún et al.,

1997; Castro et al., 2010; Posé et al., 2016) poniendo en manifiesto el impacto que tiene el cambio en el uso de suelo sobre la dinámica de éste nutriente.

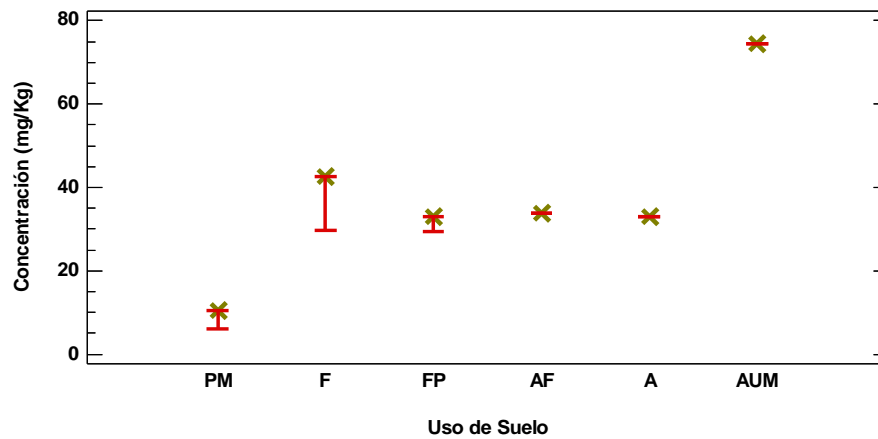


Figura 42. Variación del fósforo disponible del suelo en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

Para la conductividad eléctrica en el suelo, la prueba de Kruskal-Wallis arrojó que existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores en función del uso de suelo ( $p$  value = 0); pese a éstas diferencias, los valores de salinidad en suelo, fueron similares, observándose poca salinidad en ellos y clasificándose como “muy ligeramente salinos” y “despreciables de salinidad” (NOM-021-SEMARNAT-2001) (Figura 43).

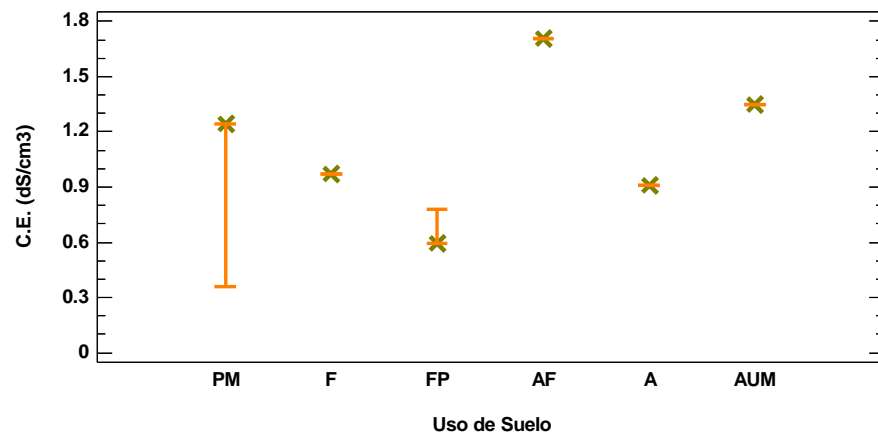


Figura 43. Variación de la conductividad eléctrica del suelo en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

Otro aspecto, es el contenido de materia orgánica, el cual depende principalmente de factores como el clima, la vegetación y la cantidad de desechos orgánicos incorporados al sistema (Ottos, 2015), sin embargo, el papel del relieve, material parental, el tipo y explotación del suelo y las características químicas, físicas y biológicas de éstos, también jugarán un rol importante (Matus y Maire, 2000). La importancia de ésta propiedad radica en su papel en el desarrollo de la vida edáfica y vegetal, puesto que afecta directa e indirectamente diversos procesos biológicos y condiciona las propiedades edáficas del sitio (Gamarra et al., 2018). Pese a encontrarse niveles muy pobres de materia orgánica (NOM-021-SEMARNAT-2001), existe una alta heterogeneidad entre los usos de suelo ( $p\text{ value} = 0$ ) (Figura 44). Se registró un marcado incremento de su contenido en el uso de suelo “Agrícola Forestal”, lo cual indica que la materia orgánica se está descomponiendo lentamente, puesto que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno y éste no puede ser aprovechado por las plantas (Gamarra et al., 2018). Igualmente, hubo un descenso en los contenidos en el uso de suelo “Agrícola-Urbano-Minero”, el cual que puede ser provocado por el incremento de la temperatura y pérdida de la humedad, ya que en ecosistemas fríos, la temperatura tiende a disminuir la actividad microbiológica, reduciendo las tasas de descomposición de la materia orgánica y ocasionando su acumulación, mientras que al incrementarse la temperatura, pasa lo contrario, éstas tasas se incrementan y la materia orgánica es degradada (Arguello, 1991).

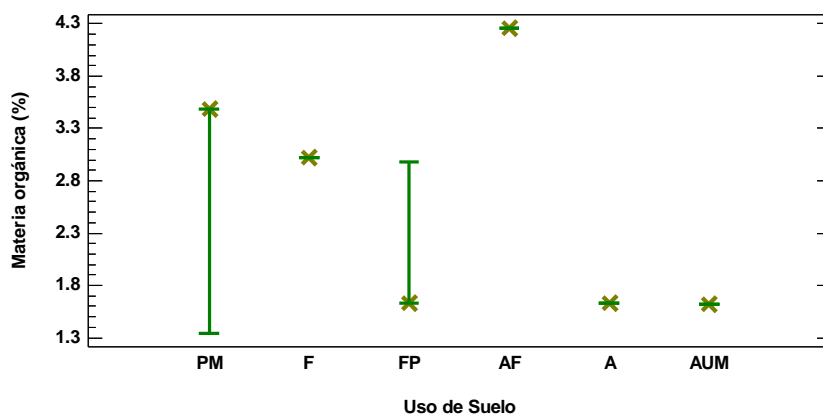


Figura 44. Variación del contenido de materia orgánica del suelo en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

Otro factor es el tipo de vegetación; los aportes en zonas de bosque de coníferas tienden a incrementar la presencia del nitrógeno y materia orgánica (Fassbender, 1975). Se encontró también, una gran variabilidad de los datos en los sitios con uso de suelo “Pastizal Montano” y “Forestal Perturbado”, lo cual puede ser provocado por la pendiente del terreno y el arrastre de la materia.

El pH del agua también mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p\text{ value} = 0$ ), sin embargo, la variación fue menor entre los usos de suelo, encontrándose tres grupos estadísticamente homogéneos (Figura 45). Se observa un incremento en el pH del cauce conforme los usos de suelo son influenciados por actividades antrópicas, sin embargo, las variaciones como se mencionó no son tan importantes, encontrándose valores de neutros a ligeramente alcalinos.

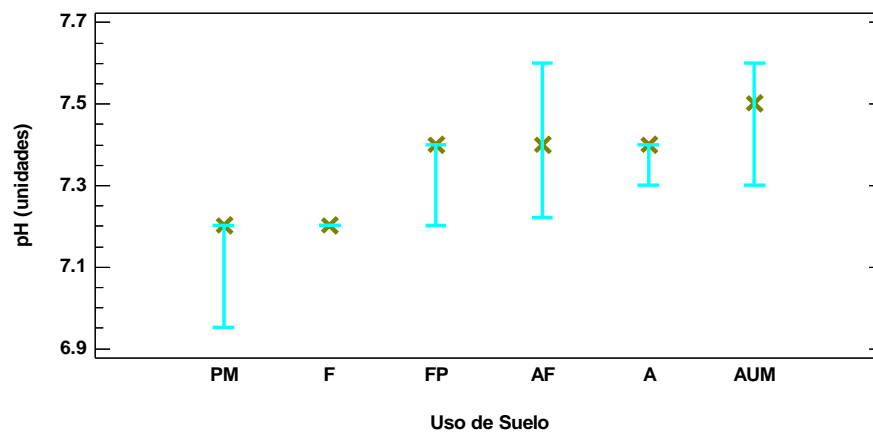


Figura 45. Variación del pH en el agua en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

El comportamiento del oxígeno disuelto mostró que su concentración disminuye conforme los usos de suelo son marcadamente modificados (Figura 46). Si bien su contenido se modifica por la suma de factores como la temperatura, altitud, profundidad del río y turbiedad, disponibilidad de luz y actividad eutrófica (Muñoz et al., 2015), en ésta investigación se encontraron algunos que pueden tener mayor peso en esta variable, en primer lugar se encuentran la altitud y la temperatura del cauce, puesto que a mayor altitud y menores temperaturas de agua la concentración de oxígeno será mayor (IMTA, 2012), a partir de esto, las concentraciones encontradas cumplieron un comportamiento esperado.

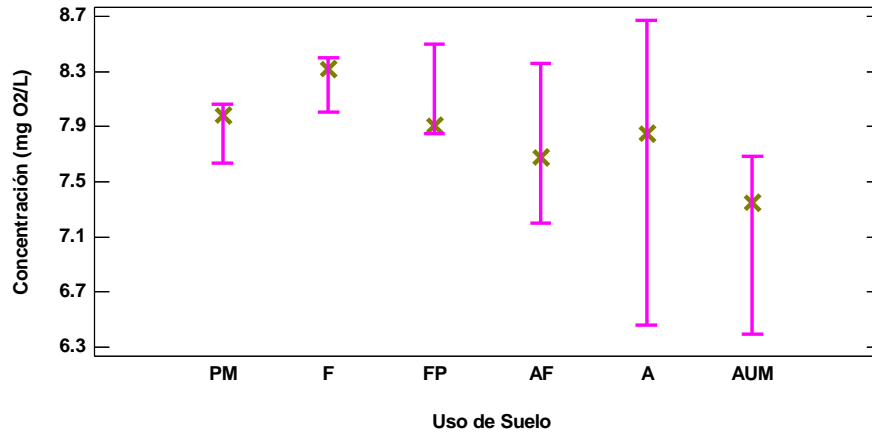


Figura 46. Variación de la concentración del oxígeno disuelto en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

Por último, en el contenido de nitratos, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de ésta forma química del nitrógeno en función del uso de suelo ( $p$  value = 0). Un aspecto positivo, es que las concentraciones presentes fueron bajas ya que una alta concentración es señal de contaminación (Figura 47).

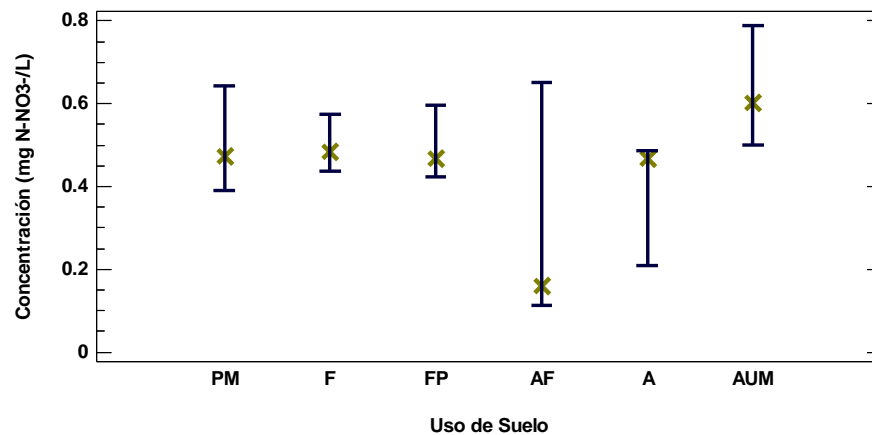


Figura 47. Variación de la concentración de nitratos en el agua en función del uso de suelo. PM: Pastizal-Montano, F: Forestal, FP: Forestal perturbado, AF: Agrícola forestal, A: Agrícola, AUM: Agrícola Urbano Minero.

## 9.7 Índice QBR y la variación de la calidad hídrica-edáfica

### 9.7.1 Análisis de Correlación Múltiple: índice QBR vs. CP's.

Una vez obtenido el conjunto de variables que mayor relevancia tienen en el conjunto de datos a partir del análisis de componentes principales, se corrió un análisis de correlaciones múltiples entre los cuatro componentes (CP's) y los valores obtenidos para el índice QBR, con la finalidad de conocer cuál de ellos y por ende que variables hídricas y edáficas, son las podrían tener mayor relación con éste índice. Dicho análisis arrojó que el CP1 y el CP2 tienen una correlación significativa con el índice QBR ( $p\ value > 0.05$ , nivel de confianza 95%); la fuerza de éstas correlaciones fue mayor entre el CP1 e índice QBR (Cuadro 27).

El CP1 presentó una fuerza de correlación alta pero negativa, es decir, valores altos en las variables que conforman éste componente (T Agua, C.E. Agua, Dureza total, Concentración de N-Amonio y P Suelo) reducirán el puntaje del Índice QBR o viceversa. Esto demuestra la importante tarea que cumple la vegetación para el cuerpo acuático, ya que con un mal manejo en terrenos aledaños, que ocasiona la pérdida de vegetación y por ende de protección y sombreado al cauce, éste tenderá a incrementar su temperatura, así mismo, la conductividad y la dureza total se verá modificada por el aumento de la sedimentación del cauce al estar expuestas y descubiertas las orillas de éste (Naiman et al., 1993) y aspectos más determinantes en la calidad del agua como la concentración de nitrógeno amoniacal y del suelo con el contenido de fósforo se verán incrementados por el uso de fertilizantes o detergentes por actividades ganaderas o agrícolas, lo cual es evidencia de una mala calidad de la ribera (Merrit y Cumins, 1996).

Cuadro 27. Matriz de correlaciones entre Índice QBR y componentes principales.

	Índice QBR	CP1	CP2	CP3	CP4
Índice QBR		-0.7360 0.0000	0.4603 0.0000	0.0162 0.7707	0.0589 0.2890
CP1	-0.7360 0.0000		0.0000 1.0000	0.0000 1.0000	0.0000 1.0000
CP2	0.4603 0.0000	0.0000 1.0000		0.0000 1.0000	0.0000 1.0000
CP3	0.0162 0.7707	0.0000 1.0000	0.0000 1.0000		0.0000 1.0000
CP4	0.0589 0.2890	0.0000 1.0000	0.0000 1.0000	0.0000 1.0000	

Valor verde: Fuerza de correlación de Pearson

Valor rojo: Significancia de la correlación

Respecto al CP2, éste mostró una correlación positiva, es decir, al aumentar los valores de sus variables (C.E. Suelo, %MOS) el puntaje en el índice QBR aumentará. Esto ha sido mencionado por varios autores (Villamarín et al. 2014; Moreno-Jiménez et al. 2017) ya que, altos contenidos de materia orgánica se presentarán en sitios más conservados, donde la vegetación primaria y no alterada aumentarán el aporte de materiales orgánicos. Respecto a la conductividad eléctrica, la cual mide el contenido de sales, es de importancia puesto que un exceso de ellas, es el resultado de un mal uso y manejo del suelo. Además, se ha demostrado que existe una correlación entre niveles de MOS y C.E. (Simón, et al. 2013), ya que el aporte de materia orgánica al suelo, reduce la salinidad de este con el aporte de diversos nutrimentos, además de controlar las condiciones de humedad y temperatura.

### 9.7.2 Análisis de Regresión Lineal Múltiple

Una vez conocidas e interpretadas las interacciones entre la relación de los puntajes del índice QBR y las propiedades hídricas y edáficas, a través de los componentes principales, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple entre los valores del índice QBR de los sitios de estudio y los dos CP's con los que se correlacionó, esto con el propósito de encontrar un modelo matemático que permita realizar estimaciones de las calificaciones del índice QBR a partir de esas variables, donde las variables dependientes 'x' serán los CP's y el índice QBR la variable dependiente 'y'. A partir de éste análisis se obtuvo el siguiente modelo matemático, que ajustado, explica el 75.35% de la variabilidad del índice QBR:

$$\text{Índice QBR} = 72.1626 - 9.51157 * \text{CP1} + 8.59454 * \text{CP2}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \text{CP1} &= 0.352867 * \text{T Agua} + 0.393277 * \text{C.E. Agua} + 0.341558 * \text{Dureza Total} + \\ &0.337079 * \text{Amonio} + 0.323729 * \text{P Suelo} \\ \text{CP2} &= -0.575709 * \text{C.E. Suelo} - 0.4533 * \% \text{ MOS} \end{aligned}$$

Es importante mencionar que, si bien los puntajes QBR calculados con éste modelo son muy parecidos a los determinados en campo, se encontró que si existen diferencias significativas entre ellos, lo que se puede afirmar con el 95% de confianza.

Esto puede observarse en la Figura 48, la razón de ésta diferencia puede ser la diferencia entre el tipo de variables con las que se obtienen uno y otro puntaje, mientras que el índice QBR obtenido en campo es determinado a partir de variables del tipo discretas, el calculado con las variables hídricas-edáficas, es obtenido con variables que son continuas.

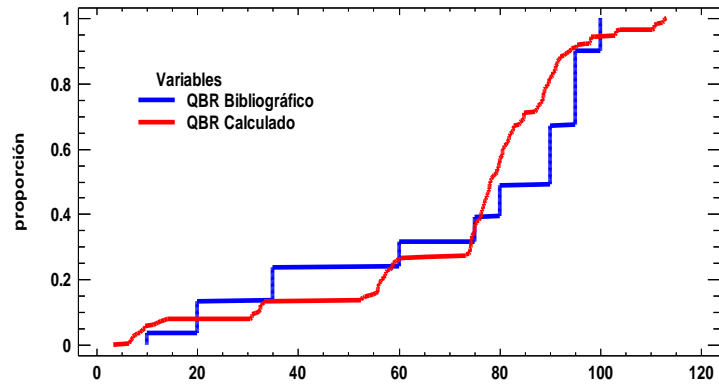


Figura 48. Variación entre el QBR bibliográfico y el QBR calculado



## 10. Conclusiones

- Se identificaron seis diferentes usos del suelo tomando en cuenta los doce sitios de muestreo; de éstos, los usos de suelo que presentaron condiciones de conservación altas, de acuerdo a lo sugerido por Munné (1998) fueron “Pastizal-Montano” y “Forestal”, mientras que los usos “Forestal Perturbado”, “Forestal Agrícola”, “Agropecuario” y “Agrícola-Urbano-Minero”, presentaron diferentes grados de perturbación ecológica, siendo el Agropecuario y el Agrícola-Urbano-Minero los peor conservados.
- El análisis de correlación múltiple, permitió seleccionar catorce propiedades relevantes a partir de las veinte propiedades hídricas, edáficas e hidrológicas, discriminando aquellas que presentaron colinealidad.
- A partir del análisis de componentes principales se extrajeron diez variables tanto hídricas como edáficas, distribuidas en cuatro componentes principales, las cuales describen el 75% de la variabilidad total de éstos sistemas lóticos, estas fueron: la temperatura, la conductividad eléctrica, la concentración de amonio, la dureza total, el pH, el oxígeno disuelto y el contenido de nitratos (hídricas) y conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y contenido de fósforo disponible (edáficas).
- Se comprobó que los cambios en el uso de suelo ocasionan cambios ecológicos significativos, que se reflejan sobre diversas propiedades hídricas y edáficas en ambos afluentes estudiados. Los usos de suelo que mayor impacto causaron en las propiedades mencionadas fueron el “Agropecuario” y “Agrícola-Urbano-Minero”.
- Las principales actividades antrópicas desarrolladas en bajas altitudes que están ejerciendo un efecto negativo en la calidad ecológica de los afluentes y vegetación ribereña son: la agricultura, ganadería-pastoreo, minería y urbanización.
- Las altas concentraciones de fósforo, la deficiencia de nitrógeno y los bajos niveles de materia orgánica resultaron las mayores alteraciones presentes en los suelos estudiados.
- La conductividad eléctrica, y su estrecha relación con el contenido de sólidos, la dureza total y el contenido de nitrógeno amoniacal en el cauce fueron las principales propiedades hídricas afectadas en los afluentes ribereños, esto por el incremento de salinidad y la prevalencia de ambientes reductores en los arroyos, consecuencia de las actividades antrópicas y el cambio en la vocación de los suelos.

- El índice QBR permitió conocer el estado ecológico de la vegetación, la cual presentó disminución de sus valores en función del descenso del gradiente altitudinal, debido a que los sitios en las zonas más bajas, pueden ser más accesibles para que mayor número de usuarios y visitantes lleven a cabo diferentes actividades en ellos, poniendo de manifiesto su vulnerabilidad, a través de la pérdida de su calidad.
- Las principales características de la vegetación que se han visto alteradas como consecuencia de los cambios en el uso de suelo fueron la conectividad entre la vegetación ribereña y el bosque adyacente, la continuidad de la vegetación a lo largo de la ribera de ambos afluentes, la cobertura de la vegetación en sus diferentes estratos y la diversidad de especies, la cual, se incrementaba en sitios perturbados con la presencia de especies alóctonas en los sitios de estudio.
- De igual forma, vertidos de basura, construcciones en terrenos aledaños, modificaciones al canal y presencia de estructuras sólidas, fueron algunas de las mayores problemáticas encontradas en los cauces estudiados y que afectaban la naturalidad fluvial de éste.
- Las propiedades hídricas y edáficas sobre las que mayor impacto ejerce la calidad ecológica de la vegetación, son la temperatura y conductividad eléctrica del agua, la dureza total, el contenido de nitrógeno amoniacal y el contenido de fósforo en el suelo, mismas que presentaron una correlación negativa, es decir, al aumentar éstas, el índice QBR disminuirá. Otras con una correlación significativa, pero de forma positiva, fueron la conductividad eléctrica del suelo y el porcentaje de materia orgánica.
-

## 11. Referencias

Acosta, R., Ríos, B., Rieradevall & Prat, M. (2009). Propuesta de un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de ríos Andinos (C.E.R.A) y su aplicación en dos cuencas en Ecuador y Perú. *Limnética*. 28(1):35-64.

Almarales, A., Castell, M, Fornaris, E., Portyondo, E. & Revilla, Y. (2017). Evaluación de la calidad ecológica de los hábitats de rivera de la cuenca del Río San Juan, Santiago de Cuba, Cuba. *Ciencia en su PC*. 2: 1-22.

Alonso, D., Sierra, P., Arias, F. & Fontalvo, M. (2003). Conceptos y guía metodológica para el manejo integral de cuencas en zonas costeras de Colombia. Manual 1: preparación, caracterización y diagnóstico. Serie de documentos generales de INVEMAR. 94 pp.

APHA, AWWA, WEF. (2012). Standard Methods for examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: American Public Health Association. 1360 pp.

Arguello, H. (1991). La descomposición de la materia orgánica y su relación con algunos factores climáticos y microclimáticos. *Agronomía colombiana*. 8 (2): 384-488.

Ayala M. (2011). Interacción ecológica del sistema agua-suelo en ambientes ribereños del Parque Nacional Izta-Popo y zonas de afluencia (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México.

Balvanera, P. & Cotler H. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, En: CONABIO, Capital Natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio, México. 185-245.

Bautista, A., Etchevers, J., del Castillo, R. & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*. 13 (2): 90-97.

Blanco, J. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Ecosistemas*. 26 (2): 1-9. DOI: 10.7818/ECOS.2017.26-2.01.

Bray, R. & Kurtz, L. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59: 39-45.

Bremer, E. & Ellert, K. (2004). Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta. Alberta Environmentally Sustainable Agriculture. Soil Quality Program. Alberta Agriculture, Food and Rural Development. Symbio AG Consulting. Lethbridge, Alberta. Canada. 32 p.

Bunge, V. & Vichi, F. (2010). Orientación sectorial. En: Cotler, H. (coord.). Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. México. 79-82.

Bunge, V. (2010). La disponibilidad natural de agua en México. En: Cotler, H. (coord.). Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. México. 46-49.

Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Rev. Cienc. Agr.* 33 (2): 117-124. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Calvo, G. (2013). Nueva metodología para valorar la calidad de las aguas superficiales para su uso como clase 2 en Costa Rica. *Tecnología en marcha*. 26 (2): 9-19. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1399>

Campitelli, P., Aoki, A., Gudelj, O., Rubenacker, A. y Sereno, R. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del Suelo*. 28 (2): 223-231

Cantú, C., Estrada, J., Salinas, M., Marmolejo, J. & Estrada, A. (2013). Vacíos y omisiones en conservación de las ecorregiones de montaña en México. *Rev. Mex. Cien. For.* 4 (17): 10-27.

Cañizales-Velázquez P., Alanís G., Jiménez J., Alanís E., Aranda R., Mata M. & Uvalle J. (2009). Efecto de la actividad turística en la diversidad y estructura del bosque de galería en el noreste de México; IX Congreso mexicano de recursos forestales. Oaxaca, México.

Carmona-Jiménez, J. & Caro-Borrero, A. (2017). The last peri-urban rivers of the Mexico Basin: establishment of potential reference conditions through the evaluation of ecological quality and biological indicators. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 88 (2): 425-436. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2017.03.019>

Carrascosa, V. & Munné, A. (2000). Qualificació dels boscos de ribera andorrans. Adaptació de l'índex QBR als d'alta muntanya. Habitats-Centre de Biodiversitat. *IEA*. 1: 413.

Castro, A., Menjívar, J., Barrios, E., Asakawa, N., Borrero, G., García, E. & Rao, I. (2010). Dinámica del nitrógeno y el fósforo del suelo bajo tres sistemas de uso de la tierra en laderas de Honduras. *Acta Agronómica*. 59 (4): 410-419. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag>.

Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J. & Díaz, D. (2014). Indicadores de la Calidad del Agua: Evolución y Tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*. 10 (17): 11-124.

Castro-Nogueira, L. (2002). Integración territorial de espacios naturales y protegidos y conectividad ecológica en paisajes mediterráneos. Dirección General de la RENP. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Ceccon E. (2003). Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrológicas. *Ciencias*. 72: 56:53.

Colegio de Postgraduados. (2013). Suelo. Protejamos el suelo que nos da vida. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. 23 p.

Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) (1992). Ley de Aguas Nacionales. Comisión Nacional del Agua. Diario Oficial de la Federación. 01 de diciembre de 1992. México. Consultado en: [normateca.gob.mx/Archivos/50\\_D\\_2773\\_19-08-2011.pdf](http://normateca.gob.mx/Archivos/50_D_2773_19-08-2011.pdf)

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2013). Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Programa de Manejo. México, D.F., México. 190 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2011). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. Compendio informativo. México, D. F. 132 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018a). Atlas de agua en México. México. 143 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018b). Estadísticas del Agua en México. México. 303 pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2017). Estadísticas del agua en México, Edición 2017. SEMARNAT: México. 291 pp.

CONABIO (1998). La diversidad biológica de México: Estudio de país, 1998. Comisión para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. 341 pp.

Conti, M. (2000). Principios de edafología. 2da. Ed. Facultad de Agronomía, Argentina. 430 pp.

Cortés, A. y Vega, K. (2013). Variaciones de Carbono, Nitrógeno y fósforo en sitios con distinto uso de suelo en dos sistemas ribereños del Río Amecameca (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México.

Cotler, H. & Caire, G. (2009). Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México, Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP, WWF, Organización Mundial de Conservación, México.

Cotler, H. (Coord). (2010). Las cuencas en México. Diagnóstico y priorización. Pluraria, México, 231 pp.

Cotler, H., Sotelo, E., Dominguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. & Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*. 83: 5-71.

Cruz-Flores, G., Guerra-Hernández, E., Valderrábano-Gómez, J., López-López, A., Santiago-Aguilar, I., Castillejos-Cruz, C., Campos-Lince, L., Etchevers-Barra, J., Hidalgo-

Moreno, C., Sandoval-Aparicio, J., & Mendoza-Cariño, M. (2019). Ecosistemas ribereños. En: Paz-Pellat, F., Hernández-Ayón, J., Sosa-Ávalos V. & Velázquez-Rodríguez, A. (Eds.). Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. México. 328-349.

Cuevas, M., Garrido, A., Pérez, J. & Uira, D. (2010). Procesos de cambio y uso de suelo y degradación de la vegetación natural. En: Cotler, H. (coord.). Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización. México. 96-103.

De Miguel Fernández, C. (2012). Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Digital Universitaria Moa. Moa, Holguín, Cuba. 374 pp.

De Miguel, C. & Vázquez, Y. (2006). Origen de los nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2$ ) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*. 22 (3): 1-9.

Denzin, C., Taboaba, F. & Pacheco-Vega, R. (Eds.) (2017). El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica. Friedrich-Ebert-Stiftung. Ciudad de México, México. 256 pp.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (1996). Guía para la evaluación de la calidad de y salud del suelo. Instituto de Calidad de Suelos. 88 pp.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 82 pp.

Devenish, C, Hofstede, R y Saravia, M. (2012). Las montañas en nuestro lugar: La importancia de las montañas para el desarrollo sostenible antes y después de Río+20. *Revista Virtual REDEMES*. 6 (1): 11-18.

DOF. (1933). Diario Oficial de la Federación 12 de julio de 1933

DOF. (1937). Diario Oficial de la Federación 19 de febrero de 1937

Díaz-Pascacio, E., Ortega-Argueta, A., Castillo-Uzcanga, M. & Ramírez-Marcial, N. (2018). Influence of land use on the riparian zone condition along an urban-rural gradient

on the Sabinal River, Mexico. *Botanical Sciences*. 96 (2): 180-199. DOI: <http://dx.doi.org/10.17129/botsci.1858>

Dourojeanni, A., Jouravlev, A. & Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y práctica, Naciones Unidas, Santiago de Chile.

Dufour S. & Rodríguez-González P. (2019). Riparian zone / riparian vegetation definition: principles and recommendations. Report, COST Action CA16208 CONVERGES, 20 p.

Ellison, D., Morries, C., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D. & Gutierrez, V. (2017). Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*. 43: 51-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>.

Elosegi, A. & Díez, J. (2009). La estructura física e los cauces fluviales. En: Elosegi, A & Sabater S. (Eds.). Conceptos y técnicas de ecología fluvial. España. 71-84.

Encina, A. e Ibarra, J. (2000). La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. *Población y desarrollo*. 25: 5.10.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2009). Los boques y el agua. Estudio FAO Montes 155. Roma, Italia.

Fassbender, H. (1975). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2<sup>da</sup>. Ed. IICA. San José, Costa Rica. 420 pp.

Fernández, L., Rau, J. & Arriagada, A. (2009). Calidad de la vegetación ribereña del río Maullín (41°28'S y 72°59'W) utilizando el índice QBR. *Gayana Botánica*. 66 (2): 269-278. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432009000200011>.

Fernández, M. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA*. 41 (2): 51-57.

Fernández, M. (2011). Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. *Gestión de Residuos Orgánicos de Uso Agrícola*. Enero: 25–31.



Galeano-Rendón, E., Monsalve-Cortes, L. & Mancera-Rodríguez, N. (2017). Evaluación de la calidad ecológica de quebradas andinas en la cuenca del río Magdalena, Colombia. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 20 (2): 413-424.

Gamarra, C., Díaz, M., Vera, M. & Cabrera, A. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastorales del Chaco paraguayo. *Rev. Mex. de Ciencias Forestales.* 9 (46): 4-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>

García-Fayos, P. (2004). Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. En Valladares, F., *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Madrid: EGRAF S. A. 309-334.

Garrido A., Cuevas, M., Cotler, H., González, D. & Tharme, R. (2010). Evaluación del grado de alteración de los ríos y corrientes superficiales en México. *Investigación Ambiental.* 2 (1): 25-46.

Ghaemi, M., Astaraei, A., Emami, H., Nassiri, M. & Sanaeinejad, S. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *J. Soil Sci. Plant Nut.* 14: 987-1004. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162014005000077>

Giraldo, L. (2002). *Memorias: Hidrología Forestal (Influencia de bosques)*. Departamento de Ciencias Forestales. Medellín, Colombia. 230 pp.

Gómez, S. (2013). Evaluación de la calidad ecológica del agua usando macroinvertebrados acuáticos en la parte alta y media de la cuenca del río Felidia, Valle del Cauca – Colombia. Pasantía Institucional para optar al título de Administrador del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales. Facultad de ciencias básicas, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia.

Gómez-Gómez, M., Danglot-Banck, C. & Vega-Franco, L. (2003). Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas. Cuando usarlas. *Revista mexicana de pediatría.* 70 (2): 91-99.

Goyenola, G. (2007). Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. Consultado el 1 de enero 2020. Disponible en:

[http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso\\_2007/cartillas/tematicas/alcalinidad.pdf](http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/alcalinidad.pdf)

Granados-Sánchez D., Hernández-García M. A. & López-Ríos G. (2006). Ecología de las Zonas Ribereñas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 12 (1): 55-69.

Gueçaimburu, J., Vázquez, J., Tancredi, F., Reposo, G., Rojo, V., Martínez, M. & Introcaso, R. (2019). Evolución del fósforo disponible a distintos niveles de compactación por tráfico agrícola en un argiudol típico. *Chilean J. Agric. Anim. Sci.* 35 (1): 81-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000203>

Guerra-Hernández, E. & Cruz-Flores, G. (Eds.). (2014). Métodos de Evaluación y diagnóstico para agua y suelo. UNAM, FES Zaragoza. 208 pp.

Guevara G., Reinoso G., García J., Franco L., García L., Yara D., Briñez N., Ocampo M., Quintana M., Pava D., Flórez N., Ávila M., Hernández E., Lozano L., Guapucal M., Borrero D. & Olaya E. (2008). Aportes para el análisis de ecosistemas fluviales: una visión desde ambientes ribereños. *Revista Tumbaga*. 1 (3): 109-127.

Hernández-García, M. & Granados-Sánchez, D. (2006). El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl-Zoquiapan y el impacto ecológico-social de su deterioro. *Revista Chapingo. Serie de ciencias forestales y el ambiente*. 12 (2): 101-109

Hidalgo, C., Estrada, I., Guzmán, R., Almaráz, J., Navarro, H. & Etchevers, J. (2017). Indicadores de Calidad de Suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51 (8): 813-831.

Honorato, R. (2000). Manual de Edafología. 4ta. Ed. Alfaomega Grupo Editor. 220 p.

Hudson, N. (1997). Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Departamento de Agricultura y protección del consumidor. FAO.

INEGI-INE-CONAGUA (2007). Mapa de cuencas hidrográficas de México (escala 1:250,000), producto cartográfico derivado de la obra primigenia INE (2003) Cuencas Hidrográficas de México, escala 1:250,000, elaborada por A.G. Priego, E. Isunza, N. Luna y J.L. Pérez.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2012). Acoplamiento de mecanismos de DBO-OD en un modelo CFD para cuerpos de agua. SEMARNAT. México. 100 pp.

Instituto nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2016). Uso del suelo y vegetación de México, (Serie VI). Escala 1:250000.

Isasmendi, S. tracanna, B., Vendramini, F., Nacvarro, M., Barrionuevo, M. & Meoni, G. (2007). Caracterización física y química de ríos de montaña (Tafí del Valle-Tucuman-Argentina). *Limnetica*, 26 (1): 129-142. DOI: 10.23818/limn.26.11

Jacobsen, D., R. Schultz & A.C. Encalada. (1997). Structure and diversity of stream invertebrate assemblages: the influence of temperature with altitude and latitude. *Freshwater Biol.* 38 (2): 247-261. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00210.x>.

Jarquín-Sánchez, A., Salgado-García, S., Palma-López, J., Camacho-Chiu, W. & Guerrero-Peña, A. (2011). Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) y quimiometría. *Agrociencia*. 45 (6): 653-662.

Jenkins, D., Snoesyink, V., Ferguson, J. & Leckie, J. (1983). Química del Agua: manual de laboratorio. Editorial Limusa. México.

Johnston, A. & Syers, J. (2009). A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops*. 93 (3): 14–15.

Karlen, D., Mausbach, M., Doran, J., Cline, R., Harris, R. & Schuman, G. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America J.* 61: 4-10.

Kevern, R., Darrell, L., Kingk, L. & Ring, R. (1996). Lake classification systems, part 1. The Michigan Riparian February.

Kutschker, A, Brand, C. & Miserendino, M. (2009). Evaluacion de la calidad de bosques de ribera en ríos del NO del Chubut sometidos a distintos usos de la tierra. *Ecología Austral*. 19 (1): 19-34.

Lambin, E., Turner, B., Geist, H., Agbola, S., Angelsen, A., Bruce, J... (2001). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*. 11 (4): 261-269. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3).

Larios, L. (2009). Contaminación del agua por nitratos: significación sanitaria. *AMC*. 13 (2)

Lindsay, W. (1979). Chemical equilibria in soil. John Wiley & Sons, New York. 472 p.

López, C. (2017). El estado del agua en México. En: Denzin, C., Taboaba, F. & Pacheco-Vega, R. (Eds.). El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica. Ciudad de México, México. 15-41.

López-Alonso, R. (2005). Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña. *Cimbra*. 362: 20-23.

López-Delgado, E., Vázquez-Ramos, J., Villa-Navarro, F. & Reynoso-Flores, G. (2015). Evaluación de la calidad del bosque de ribera, utilizando un método simple y rápido en dos ríos de bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Revista Tumbaga*. 1 (10): 6-29.

Lujan, N.K., K.A. Roach, D. Jacobsen, K.O. Winemiller, V.M. Vargas, V.R. Ching & J.A. Maestre. (2013). Aquatic community structure across an Andes-to Amazon fluvial gradient. *Journal of Biogeography*, 40 (9): 1715-1728. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.12131>

Luters, J. & Salazar, J. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Buenos Aires: United States Department of Agriculture, CRN-CNIA-INTA. 88 p.

Macías, M., Molina, E., Hernández, L. & Gómez, H. (2003). Determinación de nitratos y nitritos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar. *Revista de la Sociedad Química de México*. 47 (1): 88-92.

Magdaleno, F. & Martínez, R. (2014). Evaluating the quality of riparian forest vegetation: The Riparian Forest Evaluation (RFV) index. *Forest system* 23 (2): 259-272. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2014232-04488>

Mander U., Kuusemets V. & Hayakawa Y. (2005). Purification processes, ecological functions, planning and design of buffer zones in agricultural watersheds. *Ecological Engineering*. 24: 421-432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.01.015>.

Margalef, R. 1983. Limnología. Ediciones Omega, S.A. Barcelona España. 1010 pp.

Matthews, E., Rohweder, M., Payne, R. & Murra, S. (2000). Pilot Analysis of Global Ecosystems: Forest Ecosystems. World Resources Institute, Washington, D.C.

Matus, F. & Maire, C. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agric. Téc.* 60 (2): 112-126. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072000000200003>

Meli, P., Ruiz, L., Aguilar, R., Rabasa, A., Rey-Benayas, J. M. y Carabias, J. 2017. Bosques ribereños del trópico húmedo de México: un caso de estudio y aspectos críticos para una restauración exitosa. *Madera y Bosques*. 23 (1): 181-193. DOI: <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2017.2311118>

Mena, B. (2018). Infiltración de agua en suelos ribereños con distintos tipos de vegetación sobre un sistema fluvial en el Parque Nacional Izta-Popo y zonas de influencia (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, México.

Mendoza, M., Quevedo, A., Bravo, A., Flores, H., De la Isla, M., Gavi, F. & Zamora, B. (2014). Estado ecológico de ríos y vegetación ribereña en el contexto de la nueva ley general de aguas de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 30 (4): 429-439.

Merrit, R. & Cummins, K. (1996). An introduction to the aquatic insects of North America. Kendall-Hunt. Dubuque. 862 pp

Miserendino, M., Casaux, R., Archangelsky, M., Di Prinzio, C., Brand, C. & Kutschker, A. (2011). Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams. *Sci.Total Environ*. 409 (3): 612–624. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2010.10.034](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.034).

Monroy, F., Álvarez, G. & Alvarado, H. (2017). Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja Tinguavita, Paipa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 20 (1): 91-100.

Moreno-Jiménez, V., Castillo-Acosta, O., Gama-Campillo, L., Zavala-Cruz, J. y Ortiz-Pérez, M. O. (2017). Relación de vegetación ribereña y propiedades del suelo en un afluente del río Tacotalpa, Tabasco, México. *Madera y Bosques*. 23(1): 91-109. DOI: <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2017.231510>

Moroña, L. (1998). Estudio de la calidad del agua en un subsistema de ríos de la provincia de Salta sometidos a acción antrópica (Tesis de Magister). Universidad Nacional del Litoral. Argentina.

Munné, A., C. Sola & N. Prat. (1998). QBR: un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera. *Tecnología del agua*. 175: 20-39.

Muñoz, H., Orozco, S., Vera, A., Suárez, J., García, E., Neria, M. & Jiménez, J. (2015). Relación entre oxígeno disuelto, precipitación pluvial y temperatura: río Zahuapan, Tlaxcala México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 6 (5): 59-74.

Naiman R., Decamps, H. & Pollock, M. (1993). The role of riparian corridors in maintaining biodiversity. *Ecological applications*. 3 (2): 209-212. DOI: <https://doi.org/10.2307/1941822>

Naiman R., Décamps H. & McClain M. (2005). Riparia: ecology, conservation, and management of streamside communities. Academic Press. San Diego, California, EUA. 430 pp.

Naiman, R. & Decamps, H. (1990). Aquatic terrestrial ecotones: Summary and recommendations. En R.J. Naiman y H. Décamps (Eds.), *Ecology and management of aquatic - terrestrial ecotones* (pp. 295-301). Carnforth: UNESCO, Paris, and Parthenon Publishing Group.

Namugize, J., Jewitt, G. & Graham M. (2018). Effects of land use and land cover changes on water quality in the uMngeni river catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the earth*. 105: 246-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.013>

NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

NMX-AA-029-SCFI-2001. Que establece la determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

OEPC (1994). Impacts of Federal Programs on Wetlands. Volume 2. Office of Environment Policy and Compliance, US Department of the interior. Washington D.C. 356 pp.

OMS (Organización mundial de la Salud). (2006). Agua, saneamiento y salud.

Ottos, E. (2015). Relación entre el contenido de materia orgánica y nitrógeno total de los suelos de la provincia de Leoncio Prado. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Agraria de la selva.

Oyarzún, C., Campos, H. & Huber, A. (1997). Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en el sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). *Revista Chilena de Historia Natural*. 70 (4): 507-519.

Perevochtchikova, M. (2016). Problemática socio-ambiental de la disponibilidad y la gestión del agua superficial. En: Moncada-Maya, J. & López-López, A. (coord.). Geografía de México. Una reflexión espacial contemporánea, Tomo I. México. 167-180.

Perló, M. & González, A. (2005). ¿Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México,

Coordinación de Humanidades, Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, UNAM y Fundación Friederich Ebert, México.

Posada M. & Arroyave, M. (2015). Análisis de la calidad del retiro ribereño para el diseño de estrategias de restauración ecológica en el Río La Miel, Caldas, Colombia. *Revista EIA*. 12 (23): 117-128.

Posé, N., Baéza, M., Zamuner, E., Di Gernónimo, P. & Del Carmen, C. (2016). Parámetros agronómicos y ambientales de fósforo en suelos molisoles con diferentes usos en la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Acta Agronómica*. 65(4): 375-382. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v65n4.52186>

Quintero, L., Agudelo, E., Quintara, Y., Cardona, S. & Osorio, A. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. *Rev. Gestión y Ambiente*. 13 (3): 51-64.

Revenge, C., Murray, S., Abramovitz, J. & Hammond, A. (1998). *Watersheds of the World. Ecological Value and Vulnerability*, World Resources Institute, Washington, D.C.

Rodríguez-Téllez E., Domínguez-Calleros P., Pompa-García M., Quirozarratia J. & Pérez-López M. (2012). Calidad del bosque de ribera del río El Tunal, Durango, México; mediante la aplicación del índice QBR. *Gayana Bot*. 69 (1): 147-151. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432012000100014>

Rodríguez-Téllez E., García-De-Jalón, D., Pérez-López, M., Torres-Herrera, S., Ortiz-Carrasco, R., Pompa-García, M., Morales-Montes, M., García-García, D., Zamudio-Castillo, E. & Vázquez-Vázquez, E. (2016). Caracterización de la calidad ecológica del bosque de galería del río La Saucedá, Durango, México. *Hidrobiológica*. 26 (1): 35-40.

Rubio, A. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del Parque nacional Los Alcornocales. Proyecto fin de carrera. Escuela Universitaria de Ingeniería técnica agrícola, Universidad de Sevilla. España. 96 pp.

Ruíz K. (2010). Población por cuenca y zona funcional. En: Cotler, H. (coord.). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México. 60-63.



Sainz, H., Echeverría, H. & Angelini, H. (2010). Niveles de materia orgánica y H en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana de Argentina. Buenos Aires. *Informaciones Agronómicas*. 2: 6-12.

Sandoval, J. (2020). Catenas de suelos ribereños del Iztaccíhuatl bajo diferentes tipos de vegetación: origen y captura de carbono (Tesis de maestría). Colegio de postgraduados. Texcoco, Estado de México.

Sardiñas, O. & Pérez, A. (2004). Determinación de nitrógeno amoniacal y total en aguas de consumo y residuales por el método del fenato. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. 42 (2).

Segnini, S. & Chacón, M. (2005). Caracterización fisicoquímica del hábitat interno y ribereño de ríos andinos en la cordillera de Mérida, Venezuela. *Ecotropicos*. 18 (1): 38-61.

SEMARNAT. (2006). Atlas geográfico del medio ambiente y recursos naturales. SEMARNAT, México. 76 p.

Siebe, R., Jahn, R. & Stahr, K. (2006). Manual para la descripción ecológica de suelos en el campo. Serie de publicaciones Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. 2° ed.

Simón, M., Peralta, N. & Costa, J. (2013). Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del Suelo*. 31 (1): 45-55.

Singer, M. & Ewing, S. (2000). Soil Quality. En Handbook of Soil Science (Sumner, M. ed.). CRC Press, Boca Raton, Florida. 271-298.

Sirombra, M. & Mesa, L. (2012). A method for assessing the ecological quality of riparian forests in subtropical Andean streams: QBRY index. *Ecological Indicators*. 20: 324-331. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.021>

SQI-Soil Quality Institute. (1996). Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in

cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.

Steinmann, W., Ramírez-Amezcuca, Y., Arredondo-Amezcuca, L. & Hernández-Cárdenas, R. (2017). Flora Alpina del Centro de México. Instituto de Ecología, A. C. Centro Regional del Bajío. Informe final-SNIB-CONABIO proyecto JF076. Ciudad de México.

Suárez, A. & Vidal-Abarca, R. (2000). Aplicación del índice de calidad el bosque de ribera, QBR (Munné et al., 1998) a los cauces fluviales de la cuenca del río Segura. *Tecnología del Agua*. 201: 33-45.

Tapia-Torres, Y & García-Oliva, F. (2013). La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: una revisión crítica. *Terra Latinoamericana*. 31 (3): 231-242.

Todd, A., Buttle, J. & Taylor C. (2006). Hydrologic dynamics and linkages in a wetland-dominated basin. *Journal of Hydrology*. 319 (1-4): 15-35.

Ubalde, J., Rius, J. & Poch, R. (1999). Monitorización de los cambios de uso del suelo en la cabecera de cuenca de La Ribera Salada mediante fotografía aérea y S.I.G. (El Solsonès, Lleida, España). *Pirineos*. 153: 101-122.

Universidad Nacional Autónoma de México & Comisión Nacional de Derechos Humanos (UNAM y CNDH). (2018). Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos. México. 313 p.

USDA. (2003). A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization. Department of Agriculture, Forest Service, National Technology and Development Program. 187 p.

Valencia-Leguizamón, J. & Tobón, C. Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas*. 26 (2): 10-17. DOI.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.02

Vieira-Laneros R., Servia M., Barca S., Couton M., Rivas S. & Sánchez J. (2010). Índices de calidad de la vegetación de ribera y del hábitat fluvial en los afluentes de la margen española del Baixo Miño. V Simpósio Ibérico Sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Minho. 79–88.

Villamarín, C., Prat, N. & Rieradevall, M. (2014). Caracterización física, química e hidromorfológica de los ríos altoandinos tropicales de Ecuador y Perú. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 42 (5): 1072-1086. DOI: <http://dx.doi.org/10.3856/vol42-issue5-fulltext-12>

Walker, J., Dowling, T. & Veitch, S. (2006). An Assessment of Catchment Condition in Australia. *Ecological Indicators*. 6 (1): 205-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.08.020>

Walkley A. & Black, A. (1934). An examination of the Degtjareff tethod for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci*. 37: 29:38.

Wan, R., Cai, S., Li, H., Yang, G., Li, Z. & Nie, X. (2014). Inferring land use and land cover impact on stream water quality using a Bayesian hierarchical modeling approach in the Xitiaoxi River Watershed, China. *J. Environ. Manag.* 133 (0): 1–11. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.11.035.

Wei, X., Sun, G., Vose, J., Otsuki, K., Zhang, Z. & Smetterm, K. (2011). Forest ecohydrological processes in a changing environment. *Ecohydrology*. 4 (2): 143-347. DOI: 10.1002/eco.218

Wetzel, R. G. 1981. Limnología. Editorial Omega. España. 679 pp.

Wohl, E. (2010). Water resources monograph series. American Geophysical Union. Washington D.C., EUA. 573 pp.

Yengle, C. (2012). Aplicación del análisis de comjeponentes principales como técnica para obtener índices sintéticos de calidad ambiental. *UVC-Scientia*. 4 (2): 145-153.