



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE INDICADORES DE
SUSTENTABILIDAD EN LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO,
MUNICIPIO DE HUATUSCO, VERACRUZ**

ADAN CABAL PRIETO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2018

La presente tesis, titulada: **Desarrollo y evaluación de indicadores de sustentabilidad en la microcuenca del río Sonso, municipio de Huatusco, Veracruz**, realizada por el alumno **Adan Cabal Prieto**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS

AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. OCTAVIO RUIZ ROSADO

ASESOR:


DR. CESÁREO LANDEROS SÁNCHEZ

ASESOR:


DR. ELISEO GARCÍA PÉREZ

ASESOR:


DRA. ANTONIA MACEDO CRUZ

ASESOR:


DR. ESTEBAN ESCAMILLA PRADO

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EN LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO, MUNICIPIO DE HUATUSCO, VERACRUZ

ADAN CABAL PRIETO, DR.

Colegio de Postgraduados, 2018

Se determinó la calidad del agua del Río Sonso mediante el monitoreo y evaluación de nueve parámetros de calidad, que son influenciados por la acción de las actividades antropogénicas, tales como: descarga de aguas residuales de beneficios de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), manejo de los agroecosistemas y las actividades domésticas de los habitantes de la microcuenca. El estudio muestra que la temperatura del agua, el total de sólidos disueltos, la turbidez, el pH, el contenido de oxígeno disuelto, nitratos, y fosfato total en las aguas del Río Sonso, se ajustan o cumplen con los estándares nacionales e internacionales establecidos en la norma oficial mexicana (NOM-127-SSA1-1994), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Reglamento Gubernamental No. 82/2001 clase II; mientras que la demanda bioquímica de oxígeno, los coliformes totales y fecales rebasan los límites permisibles. El índice de calidad del agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF-WQI) osciló entre 69 y 71, lo que le corresponde la categoría “buena” y “mediana”. Por otra parte, se construyó un índice de la sustentabilidad a nivel microcuenca a partir del manejo de los agroecosistemas, basado en seis indicadores: a) agrobiodiversidad, b) cantidad de materia orgánica, c) prácticas de manejo que provisionan condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos, d) prácticas de manejo para evitar o reducir pérdida de suelo, e) tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades, y f) manejo para el control de arvenses. De una población de 543 productores que habitan en la microcuenca del Río Sonso, se seleccionaron aleatoriamente a 153 productores para la evaluación de los indicadores a través de la aplicación de entrevista dirigida a los agricultores para la evaluación de cinco indicadores; el indicador cantidad materia orgánica en el suelo se realizó mediante el método de Walkley Black. Los resultados obtenidos demostraron que la microcuenca del Río Sonso se encuentra en la categoría manejo sustentable bajo de acuerdo con la escala de manejo sustentable construida. En base a los resultados descritos se confirma la hipótesis de que la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso está siendo afectada a través de las actividades antropogénicas referidas.

Palabras clave: Indicador, sustentabilidad, microcuenca, Jamapa

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF INDICATORS OF SUSTAINABILITY IN THE RIO SONSO WATERSHED, MUNICIPALITY OF HUATUSCO, VERACRUZ

ADAN CABAL PRIETO, DR.

Colegio de Postgraduados, 2018

The water quality status of the Sonso River was determined through the monitoring and evaluation of nine quality parameters, presumably affected by the action of the anthropogenic activities, such as: discharge of wastewater from coffee processing (*Coffea arabica* L. and *Coffea canephora* P.), agriculture through the management of agroecosystems and domestic activities. The study shows that water temperature, total dissolved solids, turbidity, pH, dissolved oxygen content, nitrates, and total phosphate, are within by the national and international standards established in the official Mexican standard (NOM-127-SSA1-1994), the World Health Organization (WHO) and Government Regulation No. 82/2001 class II; even though the biochemical oxygen demand, the total and fecal coliforms are outside the permissible limits. The obtained Water Quality Index of the National Sanitation Foundation (NSF-WQI) ranged from 69 to 71, which corresponds to the category "good" and "medium". On the other hand, a sustainability index was created at the micro-basin level based on the management of agroecosystems, based on six indicators: a) agrobiodiversity, b) amount of organic matter, c) management practices that provide optimal edaphic conditions for the development of crops, d) management practices to avoid or reduce soil loss, e) type of management for the control of pests and diseases, and f) management for weed control. From a population of 543 producers that live in the Sonso River microbasin, a sample of 153 producers were randomly selected for the evaluation of the indicators through the application of face to face interviews, that evaluate five indicator. The soil organic matter indicator was evaluated by the Walkley Black method. The results obtained showed that the Sonso River microbasin lays in the low sustainable management category according to the scale of sustainable management. Based on the results described, the hypothesis is confirmed that the sustainability of the Sonso River micro-basin is being affected by the evaluated anthropogenic activities.

Key words: Indicator, sustainability, microbasin, Jamapa

DEDICATORIA

A DIOS por las bendiciones recibidas, por su bondad y su amor hacia nosotros.

A Lucia, mi adorable esposa.

A mis hijos Isis Adara, Ana Lucia, Adan José y Miguel Ángel

A mis padres Domingo y Teresa

A mis hermanos Domingo, Mauricio y Jesús

A mis colegas académicos y personal administrativo del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco y Bachillerato “General Francisco J. Múgica”.

A mis alumnos que me han enseñado tanto.

A todos los productores de la cuenca alta del Río Jamapa, en especial a los habitantes de las microcuencas del municipio de Huatusco, Veracruz.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Doctorado en Ciencias en el programa Agroecosistemas Tropicales.

Al Programa de Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP), por el apoyo otorgado de beca convencional nacional para estudios de Doctorado Ciencias en Agroecosistemas Tropicales en el Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

A la línea de Investigación “Evaluación y rediseño de agroecosistemas” del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz y a la convocatoria de fortalecimiento de cuerpos académicos 2015, por el apoyo económico otorgado para la realización de los análisis de agua y suelo de la presente investigación.

Al Dr. Octavio Ruíz Rosado excelente académico, ser humano, guía y consejero particular; gracias por su invaluable apoyo en mi formación académica, por su amistad y por compartir su espacio de trabajo con sus estudiantes.

Al Dr. Eliseo García Pérez, por su apoyo y amistad; por su invaluable apoyo y guía durante mi formación académica del Doctorado.

A mi consejo particular Dr. Octavio Ruíz Rosado, Dr. Cesareo Landeros Sanchez, Dr. Eliseo García Pérez, Dra. Antonia Macedo Cruz y Dr. Esteban Escamilla Prado, por su valiosa colaboración y sus relevantes aportaciones a la investigación.

Mi agradecimiento a los profesores del Campus Veracruz que contribuyeron en mi formación profesional, al personal administrativo y de apoyo que hicieron mi estancia placentera.

A la generación Híbridos, especialmente a dos grandes amigos y compañeros del Doctorado Salvador Partida Sedas y Victor Daniel Cuervo Osorio.

A todo el personal del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco por el apoyo brindado siempre.

CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema.....	3
2. Hipótesis	4
3. Objetivos.....	4
4. Proceso metodológico general	4
5. Revisión de literatura	7
6. Literatura citada	26
CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO EN EL MUNICIPIO DE HUATUSCO, VERACRUZ	37
1.1. Descripción general	38
1.2. Caracterización del medio físico.....	40
1.3. Descripción de condiciones climáticas	47
1.4. Caracterización socioeconómica.....	50
1.5. Literatura citada	56
CAPÍTULO II. LA CALIDAD DE AGUA COMO INDICADOR DE LA SUSTENTABILIDAD EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS	57
2.1. Introducción	58
2.1.1. La cuenca hidrográfica como sistema	60
2.1.2. El ICA como indicador de la sustentabilidad a nivel cuenca.	61
2.1.3. Génesis, evolución y desarrollo del índice de calidad de agua (ICA).....	68
2.2. Conclusiones	74
2.3. Literatura citada	75
CAPÍTULO III. CALIDAD DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO, VERACRUZ, MÉXICO	83
3.1. Introducción	84
3.2. Materiales y métodos	86
3.3. Resultados y discusión.....	90
3.4. Conclusiones	96

3.5. Literatura citada	97
CAPÍTULO IV. SUSTENTABILIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO EN FUNCIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO AGRONÓMICO DE LOS AGROECOSISTEMAS.....	101
4.1. Introducción	102
4.2. Materiales y métodos	103
4.3 Resultados	108
4.4. Conclusiones	118
4.5. Literatura citada	118
CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	122
1. Conclusiones	122
2. Recomendaciones	122
ANEXO 1. Calidad del agua del Río Sonso.	124
ANEXO 2. Memoria fotográfica de la microcuenca del Río Sonso.....	129

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1.1. Identificación geográfica de las localidades que integran la microcuenca del Río Sonso.	40
Cuadro 1.2. Número de habitantes y grado de marginación para las localidades de la microcuenca del Río Sonso.	40
Cuadro 1.3. Parámetros morfométricos de la microcuenca del Río Sonso.	41
Cuadro 1.4. Tipos de suelo de la microcuenca del Río Sonso.	42
Cuadro 1.5. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca del Río Sonso.	44
Cuadro 1.6. Datos históricos de temperatura y precipitación de la estación 30066 Huatusco de Chicuellar (1907-2001).	48
Cuadro 1.7. Climas presentes en la microcuenca del Río Sonso.	49
Cuadro 1.8. Población económicamente activa en la microcuenca del Río Sonso.	50
Cuadro 1.9. Población de la microcuenca del Río Sonso que cuenta con servicios de salud.	51
Cuadro 1.10. Escuelas de educación pública básica en la microcuenca del Río Sonso.	51
Cuadro 1.11. Porcentaje de la población que asiste a la escuela por grupos de edad y sexo.	52
Cuadro 1.12. Porcentaje de población de ocho años y más que sabe leer y escribir.	53
Cuadro 1.13. Porcentaje de población de 15 años y más con al menos secundaria terminada.	53
Cuadro 1.14. Escolaridad promedio (años) de la población de 15 años y más.	54
Cuadro 1.15. Porcentaje de viviendas que disponen de tecnologías de la información y comunicación.	55
Cuadro 1.16. Porcentaje de viviendas que disponen de servicios.	55
Cuadro 3.1. Parámetros de calidad del agua y métodos de medición.	88
Cuadro 3.2. Puntaje (Wi) de los 9 parámetros de la calidad de agua del NSF-WQI.	89
Cuadro 3.3. Criterios de clasificación según NSF-WQI.	90
Cuadro 3.4. Calidad del agua del Río Sonso.	91
Cuadro 3.5. Valor NSF-WQI del Río Sonso.	96
Cuadro 4.1. Indicadores de manejo agronómico para agroecosistemas sustentables.	105
Cuadro 4.2. Criterios de clasificación según IMASAN y MASA.	107
Cuadro 4.3. Número de productores y superficie cultivada en la microcuenca del Río Sonso.	107
Cuadro 4.4. Agrobiodiversidad en los agroecosistemas de la microcuenca del Río Sonso.	111
Cuadro 4.5. Materia orgánica del suelo en la microcuenca del Río Sonso.	112
Cuadro 4.6. Prácticas que mejoran las condiciones del suelo en la microcuenca del Río Sonso.	113
Cuadro 4.7. Prácticas de manejo para evitar o reducir la pérdida de suelo.	114
Cuadro 4.8. Valoración del tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades.	115
Cuadro 4.9. Valoración del tipo de manejo para controlar las arvenses en el cultivo.	116
Cuadro 4.10. Valor MASA en los agroecosistemas de la microcuenca del Río Sonso.	117

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Metodología general para el desarrollo y evaluación de indicadores de sustentabilidad en la microcuenca del Río Sonso, Municipio Huatusco, Veracruz.	6
Figura 1.1. Localidades de la microcuenca del Río Sonso, Municipio Huatusco, Veracruz.	39
Figura 1.2. Red hídrica de la microcuenca del Río Sonso.	42
Figura 1.3. Tipo de suelo en la microcuenca del Río Sonso.	43
Figura 1.4. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 1984).	45
Figura 1.5. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 1997).	45
Figura 1.6. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 2003).	46
Figura 1.7. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 2010).	46
Figura 1.8. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 2013).	47
Figura 1.9. Climas presentes en la microcuenca del Río Sonso.	48
Figura 1.10. Climograma para la estación meteorológica Huatusco (1907-2001).	49
Figura 3.1. Sitios de muestreo del agua del Río Sonso.	87

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los sistemas de la Tierra están sufriendo cambios a gran escala y están impactando significativamente a los sistemas socioeconómicos, lo que requiere un cambio fundamental para mantener las condiciones actuales (Reid *et al.*, 2010). A pesar de la conciencia sobre los problemas, ha habido un fracaso continuo para mitigar los impactos, como lo demuestra el incumplimiento de todos los objetivos de desarrollo del milenio (Fukuda-Parr *et al.*, 2013).

La humanidad está viviendo mucho más allá de los límites de abastecimiento del planeta, consumiendo los recursos renovables de la Tierra como si tuviéramos más de un planeta para recurrir (Dyllick y Rost, 2017). Según la estimación de la huella global de la humanidad, estamos utilizando los recursos de más de un planeta y medio (WWF, 2016). Si todos consumimos a nivel de los Europeos, necesitaríamos los recursos de tres planetas; a nivel de los consumidores estadounidenses, necesitaríamos más de cuatro planetas (Dyllick y Rost, 2017). Según los resultados de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de las Naciones Unidas, el 60% de nuestros "servicios ecosistémicos" colectivos se han degradado en los últimos 50 años, reduciendo así su valor para las generaciones futuras (MEA, 2005). Por su parte Rockström *et al.*, (2009) concluye que ya hemos superado cuatro de los nueve límites planetarios cruciales (biodiversidad, ciclos de nitrógeno y fósforo, cambio de uso del suelo, cambio climático) que nos permiten vivir una vida sostenida y segura, mientras que otros dos se están acercando a sus límites.

Una visión del desarrollo sustentable debe incluir la importancia del bienestar social como parte integral de nuestro bienestar planetario. La erradicación de la pobreza y la consecución de la justicia social están indisolublemente ligadas a la estabilidad y la renovación ecológicas. Mientras que los límites planetarios proporcionan un techo ambiental definido por los umbrales naturales críticos, también hay límites sociales definidos por las privaciones humanas críticas (Dyllick y Rost, 2017).

En una economía capitalista, las empresas necesitan sustentabilidad financiera, sin embargo, hoy en día es esencial que estas empresas también desarrollen políticas y prácticas de sustentabilidad social y ambiental (Chakrabarty y Wang, 2013).

Cabe destacar que desde la revolución industrial, ha surgido una nueva era, el Antropoceno, en el que las acciones humanas se han convertido en el principal motor del cambio ambiental global (Rockström *et al.*, 2009). El consumo de recursos naturales, ya sea por uso directo o por procesos de producción, generalmente genera un impacto negativo en el medio ambiente, como el uso

excesivo de los recursos y / o la contaminación (Pellicer y Martínez 2016). El uso indebido de los recursos naturales compromete el equilibrio del planeta y la vida humana (Marcon *et al.*, 2017). En cuanto al aspecto ambiental, los estudios han demostrado que los daños causados al medio ambiente pueden ser disminuidos por prácticas comerciales ecológicamente correctas (Lozano *et al.*, 2013), por ejemplo, el agua dulce es un recurso natural clave para el desarrollo de la actividad humana, ya que es esencial para la supervivencia y el bienestar humano; el agua es un factor de producción en la mayoría de los sectores económicos, así como un activo ambiental y social (Martínez *et al.*, 2014).

El desarrollo sustentable y la evaluación de la sustentabilidad han sido de gran interés para académicos y profesionales en las últimas décadas. El concepto de sustentabilidad proviene de la ecología y describe el uso de un sistema natural regenerativo de tal manera que este sistema conserva sus propiedades esenciales y su población naturalmente puede ser reabastecida. En términos más generales, la sustentabilidad es la resistencia de los sistemas y procesos (Zhou *et al.*, 2018). En la presente investigación se efectuó el desarrollo y evaluación de indicadores de sustentabilidad en la microcuenca del Río Sonso, municipio de Huatusco en el estado de Veracruz. Por lo tanto, el primer apartado describe el planteamiento del problema que da origen a la investigación, los objetivos, hipótesis planteadas y la metodología para el desarrollo y evaluación de indicadores de sustentabilidad en la microcuenca del Río Sonso. El segundo apartado Revisión de literatura es el resultado de la investigación del marco teórico conceptual cuyos fundamentos teóricos permitirán establecer a la microcuenca del Río Sonso como sistema; en el marco referencial se aborda a la sustentabilidad con los indicadores y metodologías para el estudio de diferentes niveles jerárquicos en la agricultura. En el Capítulo I se presenta una revisión documental sobre la “Caracterización de la microcuenca del Río Sonso en el municipio de Huatusco, Veracruz” presentando una amplia descripción general, la caracterización del medio físico y socioeconómico de la microcuenca objeto de estudio. El Capítulo 2 se muestra el ensayo: “La calidad de agua como indicador de la sustentabilidad en cuencas hidrográficas”, en donde se describe a la cuenca hidrográfica como un sistema complejo caracterizado por las interacciones de los subsistemas biofísico, económico y sociocultural; además, se analiza la génesis, evolución, desarrollo o aplicación de los Índices de Calidad de Agua (ICA) como indicador ambiental de la sustentabilidad que puede apoyar a la gestión hídrica requerida. En el Capítulo 3 se desarrolla el artículo sobre la calidad de agua en la microcuenca del Río Sonso mediante el monitoreo y

evaluación de nueve parámetros de calidad del agua, presumiblemente afectado por la acción de las actividades antropogénicas que se desarrollan al interior de la microcuenca. En el Capítulo 4 se construye un índice de la sustentabilidad a nivel microcuenca a través del Manejo de los Agroecosistemas, basado en seis indicadores: a) Agrobiodiversidad, b) cantidad de materia orgánica, c) prácticas de manejo que provisionan condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos, d) prácticas de manejo para evitar o reducir pérdida de suelo, e) tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades, y f) manejo para el control de arvenses.

Finalmente, en el apartado de conclusiones y recomendaciones generales se presentan comentarios sobre el proceso de investigación, los resultados obtenidos y sugerencias.

1. Planteamiento del problema

El deterioro de las cuencas hidrográficas se ha convertido en uno de los problemas ambientales, sociales y económicos más importantes de nuestro País; para el caso particular de la microcuenca del Río Sonso, aunque se cuenta con datos generales de la microcuenca a través de información general generada por instituciones gubernamentales (INEGI, CONABIO, CONAGUA, SERMARNAT), es necesario realizar estudios específicos y científicos que generen información valiosa sobre la sustentabilidad de estos territorios a través del desarrollo y evaluación de indicadores, relacionados con las actividades antropogénicas, destacando el manejo de agroecosistemas y la calidad de agua de las corrientes superficiales; derivado de lo anterior se construye el planteamiento del problema de investigación “no existe un esquema de indicadores que permita evaluar la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso”, para que a partir de dicho esquema se plantee el problema de investigación mediante las siguientes preguntas:

¿En qué grado han afectado las actividades antropogénicas a la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso?

¿A que grado afecta el manejo de los agroecosistemas a la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso?

¿Qué indicadores desfavorecen a la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso?

¿Cuál es la calidad del agua de las corrientes superficiales de la microcuenca del Río Sonso?

2. Hipótesis

2.1. General

La sustentabilidad en la microcuenca del Río Sonso está siendo afectada, en mayor grado, por las actividades antropogénicas que ahí se desarrollan, tales como el manejo de los agroecosistemas y la descarga de aguas residuales.

2.2. Particulares

H₁). La calidad del agua está siendo deteriorada como resultado de las descargas de aguas residuales de la agroindustria del café y servicios domésticos sanitarios, lo que, en turno, afecta a la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso.

H₂). La sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso es función del manejo que los productores actualmente practican en los agroecosistemas presentes en la misma y de la calidad del agua.

3. Objetivos

3.1. General

Valorar la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso en función de las actividades antropogénicas.

3.2. Particulares

O₁. Determinar la calidad del agua del Río Sonso, como consecuencia de las actividades antropogénicas siguientes: descarga de aguas residuales de los beneficios de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), manejo de los agroecosistemas agrícolas y el uso doméstico del agua por los habitantes de la microcuenca, y el impacto de éstas en la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso.

O₂. Construir, mediante indicadores de manejo de agroecosistemas y calidad del agua, el índice de sustentabilidad de la microcuenca.

4. Proceso metodológico general

La tesis “Desarrollo y evaluación de indicadores de sustentabilidad en la microcuenca del Río Sonso, municipio de Huatusco, Veracruz”, se aborda desde una visión sistémica, por lo que resulta fundamental visualizar a la microcuenca como un sistema, al respecto Hart 1985, propone que para cualquier estudio debe tenerse en cuenta por lo menos tres niveles jerárquicos: el sistema de interés, los sistemas que están dentro del sistema de interés y el sistema que contiene a estos dos.

Al respecto se considera a la microcuenca del Río Sonso como el sistema de interés, los subsistemas que la integran son los Agroecosistemas de café, el paisaje natural (Bosque de niebla, cuerpos de agua, Áreas sin vegetación) y la población (áreas de vivienda rural -incluye áreas agroindustriales-) y el sistema que integra a la microcuenca con sus subsistemas se llama subcuenca del Río Jamapa.

La sustentabilidad es un concepto complejo en sí mismo, pretende cumplir en forma simultánea varios objetivos o dimensiones: socioculturales, políticas, ambientales, productivas, económicas y temporales; es entonces, un concepto multidimensional; para lograr avanzar, es necesario que la complejidad y la multidimensional de la sustentabilidad sean simplificadas en valores claros conocidos como indicadores.

Para el desarrollo y evaluación de los indicadores a nivel microcuenca fue necesario realizarlo a través de las siguientes etapas (Figura 1):

Etapas:

Etapas 1: Revisión bibliográfica.- Es necesario un desarrollo claro del marco teórico, conceptual y la búsqueda de información existente sobre el sistema a evaluar. Esto permite establecer y definir el marco conceptual y referencial de la sustentabilidad; además los objetivos de la evaluación y la caracterización del sistema de interés a partir de la información disponible y herramientas como los sistemas de información geográfica.

Etapas 2: Planeación.- La planificación es esencial para garantizar que se reduzca el margen de error en cada paso de las metodologías para la evaluación de los indicadores. Es necesario definir los parámetros a evaluar, selección y ubicación de puntos de muestreo, seleccionar y determinar los tamaños de muestra, construir los instrumentos para la recogida de datos, entre otros.

Etapas 3: Trabajo de campo.- La toma de muestras de agua y suelo en la microcuenca para las determinaciones y evaluación de parámetros en campo y laboratorio, así como la aplicación del cuestionario para obtener información sobre el manejo de los agroecosistemas ubicados en la zona de estudio.

Etapas 4: Trabajo gabinete.- Realizar el procesamiento, sistematización y análisis de datos de la información obtenida para la presentación de resultados, discusión, conclusiones y recomendaciones; esta información estará disponible al público en general, investigadores, la academia y tomadores de decisiones.

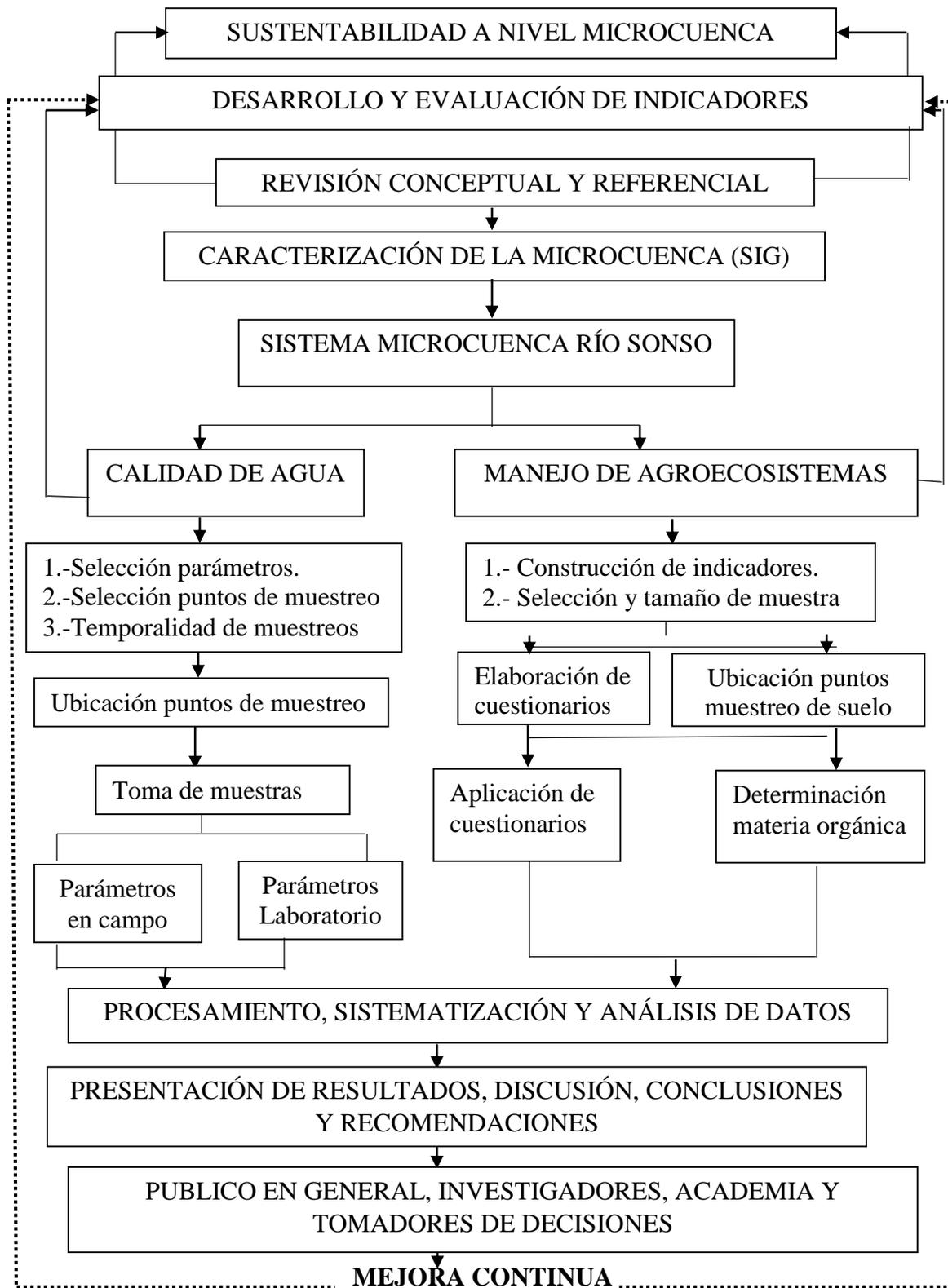


Figura 1. Metodología general para el desarrollo y evaluación de indicadores de sustentabilidad en la microcuenca del Río Sonso, Municipio Huatusco, Veracruz.

5. Revisión de literatura

5.1. Marco teórico conceptual

En esta sección se abordarán los fundamentos teóricos y conceptuales que permitirán establecer los cimientos epistemológicos, teóricos y conceptuales sobre los cuales se pretende estudiar la microcuenca del Río Sonso como sistema, cuyos elementos lo conforman los Agroecosistemas, el paisaje representado en su mayoría por el bosque nativo (bosque de niebla), los cuerpos de agua, áreas sin vegetación, áreas de vivienda rural (incluyendo agroindustrias, centros recreativos, salones sociales) y la población. De las posturas filosóficas: a) empírico-analítica, b) fenomenológica, hermenéutica y lingüística y c) dialéctica o crítica-hermenéutica, se considera pertinente y en sentido amplio sustentar el presente proyecto de investigación bajo la postura empírico-analítica ya que es en esta corriente epistemológica donde “nace” la teoría de sistemas y en la cual se ha desarrollado a través del tiempo.

5.1.1. Postura filosófica

El reduccionismo ha dominado la ciencia y la filosofía durante siglos (Gershenson, 2013b). Desde los tiempos de Galileo, Newton, Descartes y Laplace, la ciencia ha sido reduccionista (Kauffman, 2008). Esto implica que los fenómenos se estudian separando y simplificando sus componentes para predecir los estados futuros de los sistemas. Un ejemplo de esta cosmovisión científica clásica, que aún domina la ciencia y la filosofía, se puede ver en los ejercicios de libros de texto. Los sistemas se suelen aislar, es decir cerrados, se asumen condiciones ideales, y los elementos son "bien comportados" (Gershenson, 2013b).

El enfoque filosófico empirista busca en parte resolver los problemas desde un enfoque reduccionista; durante siglos en esta corriente se fraccionan parte de las realidades con la intención de estudiarlas por separado, inclusive René Descartes escribe en el “discurso del método” que “dividir cada una de las dificultades, en cuantas partes fuere posible y en cuantas requiriese su mejor solución”; sin embargo, ya no es suficiente este enfoque porque la naturaleza humana pertenece al mundo de lo complejo y se requiere estudiar esa complejidad. Los empiristas (positivistas) en su afán de ser duros, no aceptan lo metafísico, aceptan lo real, lo útil, lo certero, lo preciso, la construcción y se valen de la objetividad (o dicen ser objetivos), pero cuando se describe cualquier fenómeno se puede observar desde distintas perspectivas, lo cual tiene una implicación clave: no es posible estudiar un fenómeno de manera puramente objetiva, ya que necesitamos una descripción basada en una perspectiva, la cual está determinada por un

observador. Esto no quiere decir que el observador tenga libertad absoluta en la descripción del fenómeno (Heylighen *et al.*, 2007), sino que el objeto (lo observado), el sujeto (el observador) y la acción de observación (descripción) son interdependientes (Nydahl, 2011), por lo que no se pueden estudiar de manera separada; pero esto no es suficiente, lo complejo también depende de cómo se observe y describa a un sistema.

5.1.2. Teoría de sistemas

Ludwig Von Bertalanffy generó en 1954 la Teoría General de Sistemas, esta teoría es también llamada “paradigma de sistemas” y “enfoque de sistemas” y su objetivo es tener un ámbito para insertar ideas multidisciplinarias y transdisciplinarias. En 1954 se organizó la Sociedad para el avance y la Teoría General de Sistemas y en 1958 su nombre fue cambiado a “Sociedad para la Investigación General de Sistemas”.

La noción de sistemas es tan antigua como la filosofía con el pensamiento socrático y aristotélico; Blaise Pascal (1623-1662) escribió “creo que es imposible conocer las partes, sin conocer el todo, como conocer el todo, sin conocer específicamente las partes”. A George Wilhelm Friedrich Hegel (1770-1831) se le atribuyen los siguientes conceptos: a) El todo es más que la suma de sus partes, b) El todo determina la naturaleza de las partes, c) Las partes no pueden comprenderse si se consideran en forma aislada del todo y d) Las partes están dinámicamente interrelacionadas o son interdependientes.

La teoría general de sistemas tiene características que la definen, adopta un enfoque holístico, provoca la generalidad de leyes particulares, utiliza modelos matemáticos, promueve la unidad en la ciencia y proporciona un marco de referencia coherente para la organización del conocimiento. Los sistemas se integran de un conjunto de elementos que trabajan agrupadamente para lograr el objetivo general del todo. Los fenómenos no sólo deben estudiarse a través del enfoque reduccionista, sino en su totalidad y del sistema del que forman parte a través de su interacción (Austin, 2006).

Por su parte Ruiz 2006a, menciona que al estudiar y analizar los fenómenos y problemas como parte de un sistema permite disponer de un marco multidimensional, integrado por varias disciplinas científicas que incluyen todos los aspectos que intervienen en el fenómeno, y se concentra en las interacciones entre las partes del mismo para lograr una percepción holística o sistémica del fenómeno y los problemas.

La Teoría General de Sistemas se puede aplicar a tres niveles: el científico, para la explicación científica de los sistemas; el tecnológico, que aborda los conflictos que se generan en las interacciones entre sociedad y tecnología y el filosófico, que pretende reorientar el pensamiento mediante un nuevo paradigma científico en contraste con los paradigmas reduccionistas (Bertalanffy 1968 ; Anónimo 2006).

5.1.3. Sistemas complejos

La naturaleza humana pertenece al mundo de lo complejo y este mismo mundo complejo es también parte de la complejidad del universo. Entonces vivir en la complejidad provoca incertidumbre en nuestra mente, porque la complejidad externa es inconmensurable y lo que hacemos es fraccionar parte de las realidades para comprenderlas y utilizar ese conocimiento para hacer la vida más cómoda y dar respuesta a nuestras preguntas existenciales.

En años recientes hemos escuchado hablar con mayor frecuencia sobre complejidad. Pero pareciera que al existir diversidad en discursos sobre el tema, en lugar de generar conocimiento se genera confusión. La raíz etimológica de complejidad viene del Latín *plexus*, que quiere decir entretejido. En otras palabras, algo complejo es difícil de separar, esto es así por qué hay una codependencia entre los componentes de un sistema complejo. El futuro de cada componente, y por lo tanto, del sistema, depende en parte de las interacciones que se dan entre los componentes (Gershenson, 2013b). Por lo tanto, no podemos estudiar de manera aislada a los componentes y esperar comprender el sistema. Por ejemplo, las propiedades de las moléculas de una célula no serán suficientes para comprender las propiedades de un sistema vivo. O bien, las propiedades de las neuronas de un cerebro no nos permitirán comprender la mente. Necesitamos considerar a las interacciones, ya que estas generan información relevante que determina el futuro del sistema. Esta información nueva limita la previsibilidad de los sistemas (Gershenson, 2013a).

Si queremos estudiar a los sistemas complejos implica que tenemos que ir más allá del materialismo, porque las interacciones no son físicas pero son reales, en el sentido de que afectan causalmente el futuro de la materia y la energía. Tratar de describir al mundo en términos de materia y energía es muy limitado. Una alternativa está en describir al mundo en términos de información (Gershenson, 2007). Por un lado, podemos describir cualquier fenómeno en términos de información. Por otro lado, podemos buscar regularidades a distintas escalas para explorar las leyes de la información. Pero vemos que es necesario ir más allá del reduccionismo si queremos estudiar a los sistemas complejos.

5.1.4. El concepto de sistema

El concepto de Sistema seguramente lo hemos escuchado en una conversación informal, un discurso político o hasta en una presentación científica o académica; sin embargo, pocas veces es precisada. Se usa de manera genérica, escuchamos del sistema solar, del sistema nervioso, del sistema digestivo, del sistema de transporte y del sistema de medidas internacionales. Sin embargo, es necesario precisar su significado si se pretende hacer un análisis teórico fincado sobre este concepto.

Según Lilienfeld (1984), este concepto suele tomarse cada vez más vago en su definición e impresionante uso, siendo a veces utilizado en términos de sistemas abiertos, o a veces en el sentido de las teorías de las comunicaciones cibernéticas, otras veces es utilizado en el sentido de modelos de simulación y a menudo, como combinación de todo esto.

Se sabe que el concepto de sistema surge con mayor intensidad durante la Segunda Guerra Mundial. Al terminar la guerra la teoría de sistemas se aplicó a través de la teoría matemática en la investigación operacional para la solución de problemas grandes y complejos, con gran número de variables, principalmente en la programación de la producción, operaciones de carga y descarga, y tráfico. Posteriormente las grandes industrias modernas incorporaron esta nueva disciplina en la planificación empresarial con el nombre de operación de sistemas (Anónimo, 2006).

De acuerdo con Bertalanffy (1968), el concepto de sistema se define como “un complejo de elementos interdependientes e interactuantes”. Más tarde Van Gigch (1990), ratifica al considerarlo como una reunión o conjunto de elementos relacionados.

Para entender el concepto de sistema de una forma práctica se puede comparar con una “caja negra”, con el enfoque “corriente de entrada-corriente de salida”, que considera sólo las interacciones (llegadas o salidas). De esta forma, no hay preocupación por lo que sucede al interior del sistema), a menos de que haya un interés particular por estudiar alguno de los procesos internos (Johansen, 2000). Sin embargo, varios autores coinciden que la complejidad de los sistemas requiere que para su estudio se consideren diversos factores, atributos o propiedades (Ruíz, 1995; Figueroa, 1998; Duval, 1999; Johansen, 2000; Austin 2006; Ruíz 2006).

5.1.5. La cuenca como sistema

Un sistema es un conjunto de elementos en interacción dinámica organizados en función de un objetivo, como territorio constituye un sistema complejo, debido a que contiene una variedad de

componentes, niveles jerárquicos y una alta intensidad de interconexiones es un sistema dinámico, interrelacionado, gobernado por procesos de retroalimentación, auto organizado, adaptativo y dependiente de su historia; si consideramos al componente social como aquel que modifica, transforma y altera este ecosistema para aprovechar de sus bienes y servicios, la problemática ambiental se torna compleja (Moreno y Renner, 2007), ante este escenario Maass, (2004) menciona que “es difícil lidiar con tal complejidad sin caer, por un lado, en las propuestas simplistas condenadas al fracaso ante la imposibilidad de considerar tantos factores involucrados, o por otro lado, en el inmovilismo, consecuencia del miedo a tomar decisiones ante la abrumadora incertidumbre que genera tal complejidad”.

Por otro lado Ruiz (2012), menciona que “la cuenca hidrológica puede ser considerada como un sistema y todo sistema posee una estructura, una función y objetivos. La estructura puede ser conformada por el paisaje agrícola, el paisaje no-agrícola y la infraestructura. La interacción de los elementos de la estructura da como resultado que se tenga la función de la cuenca, y así lograr los objetivos de la misma”.

En este sentido la “cuenca hidrográfica constituye una unidad de análisis indispensable para identificar y evaluar los elementos naturales y antropogénicos, así como las acciones y tendencias que determinan la calidad y disponibilidad del recurso hídrico y por ende las oportunidades de un aprovechamiento permanente, base del desarrollo sostenible” (Vargas, 1996 citado en Rodríguez, 2006).

Según García s/f, “la cuenca hidrográfica se puede considerar como un sistema complejo compuesto por las interacciones de los subsistemas biofísico, económico, social y cultural. En este sistema abierto existen influencias y dependencias entre y hacia los elementos de los subsistemas, lo cual se manifiesta en una dinámica de comportamiento que es compleja y que obliga a analizarla en forma integral. El enfoque sistémico facilita un mejor conocimiento de la estructura y función de la cuenca hidrográfica en términos de definir sus elementos y las relaciones entre ellos”. Por lo tanto, es en las cuencas hidrográficas donde se integran sistemas biofísicos, socioeconómicos y político-administrativos. Los distintos componentes de una cuenca interactúan entre sí, formando un gran sistema natural (Sepulveda y Rojas, 2002; Jouravlev, 2003); en este sentido las cuencas hidrográficas constituyen un espacio territorial idóneo para impulsar políticas orientadas hacia la sostenibilidad con dinámicas descentralizadoras y participativas (Rodríguez, 2006).

Según Rodríguez, 2006 las cuencas tienen una historia referida a la ocupación y uso de sus ecosistemas, lo cual hace que los pobladores desarrollen una identidad, es decir, sentido de pertenencia y lealtad hacia el territorio de la cuenca (subcuenca o microcuenca).

5.1.6. Agroecosistemas

En México Hernández X. 1977, fue el pionero en introducir el concepto de agroecosistema, al cual definió como un ecosistema modificado en menor o mayor grado por el hombre al utilizar los recursos naturales en los procesos de producción agrícola. Sin embargo es importante señalar que desde los años 40 se observan en sus publicaciones un esfuerzo por comprender las interacciones ecológicas y las estrategias humanas de adaptación y manejo de recursos (Astier *et al.*, 2015). En esa década Odum (1972) lo define como un ecosistema modificado por el hombre, en el que la diversidad de especies se transforma, y se distribuye con el fin de hacer eficiente la captación de las diversas formas de energía que entran al sistema, todo con el fin de obtener satisfactores.

El agroecosistema basado en la teoría general de sistemas, se considera como un sistema abierto que posee estructura, componentes, entradas, salidas y la función e interacción entre sus elementos; en el cual se realiza intercambio de materia, energía e información con la finalidad de lograr un objetivo en particular; Chiavenato (1997), menciona que el agroecosistema es considerado un sistema abierto por que tiene relación permanente con su entorno, mediante el intercambio de materia, energía, información e interacción constante entre el sistema y el ambiente.

Por su parte, Marten (1988) aporta al concepto cuando dice que para definir el agroecosistema es preciso conocer sus propiedades, ya que de ellas nace el objetivo de su existencia, estas propiedades son: Productividad (cantidad de alimento), estabilidad (consistencia en la producción), sustentabilidad (mantenimiento de un nivel específico de producción a largo plazo), equidad (distribución uniforme de la producción) y autonomía (autosuficiencia del agroecosistema).

FAO 1984 define a los agroecosistemas como los ecosistemas, que se utilizan en la agricultura, comprenden policultivos, monocultivos y sistemas mixtos, como sistemas agropecuarios, agroforestales, sistemas agrosilvopastoriles, la acuicultura, pastizales, praderas y agostaderos.

Los agroecosistemas pueden ser considerados como verdaderos sistemas cibernéticos cuyo objetivo es aumentar el valor social, esto se logra a través de una variedad de estrategias que combinan diferentes niveles de productividad, estabilidad, sostenibilidad y equidad (Conway, 1987).

Ruiz 1995, señala que en el agroecosistema se conceptualiza como un ecosistema modificado por el hombre donde interactúan factores socioeconómicos y tecnológicos para la utilización de los recursos naturales con fines de producción para la obtención de alimento y servicios en beneficio del hombre, la dimensión del agroecosistema depende del nivel al que se quiera analizar o de las necesidades docentes, de investigación y desarrollo, pudiendo considerarse desde el nivel animal o planta, hasta el nivel planeta.

Autores como Wood *et al* 2000 definen al agroecosistema como un recurso biológico y natural, un sistema administrado por los seres humanos con el objetivo principal de producir alimentos, así como otros bienes no alimentarios de utilidad social y servicios ambientales. Sans 2007 menciona que los ecosistemas agrícolas o agroecosistemas desde una perspectiva social se denominan sistemas antropogénicos, porque en estos espacios ocurren interacciones complejas entre procesos sociales externos e internos y entre procesos biológicos y ambientales.

Vilaboa *et al* 2009 y Martínez *et al* 2011 se distingue al conceptualizar al agroecosistema como una construcción lógica. Vilaboa *et al* (2009) menciona que el enfoque y concepto de agroecosistema se utiliza en relación a su perspectiva de acción y objeto de estudio; ya que éste es un modelo abstracto y método de investigación que permite representar la unidad de estudio para explicar la realidad. El agroecosistema es un modelo conceptual que representa a la realidad agrícola, cuyo sistema psíquico (productor) es el receptor de la autopoiesis del sistema agricultura (Casanova *et al.*, 2016).

El agroecosistema puede definirse como un sistema abierto, con estrechas relaciones entre diferentes organismos coparticipes de la actividad agrícola, influenciados todos ellos por los aspectos socioeconómicos, tecnológicos y ambientales (Ruiz, 2006b). Lima *et al.*, 2008, ha propuesto al agroecosistema como la unidad básica de estudio y acción para el desarrollo de una agricultura sustentable. Los procesos dentro del agroecosistema se optimizan mediante interacciones que emergen de combinaciones específicas y temporales de cultivos, animales y árboles; se complementan por manejos naturales y con pocos aditivos al suelo (Altieri y Nicholls, 2007). Considerando a la teoría de sistemas, Conway 1985 comenta que existen niveles jerárquicos, en este sentido, los agroecosistemas pueden ubicarse a diferente escala jerárquica o espacial, que va de una parcela hasta el planeta. Este enfoque surge como una necesidad de la insuficiente capacidad de las disciplinas para resolver los problemas teóricos, especialmente en las ciencias biológicas y sociales (Faden y Beauchamp, 1986; Chiavenato, 1997). Su propósito es

analizar los fenómenos desde una perspectiva más amplia, focalizando el conjunto de problemas desde varios ángulos dependientes entre ellos (Vandermeer, 2003).

La noción de agroecosistema representa una forma de percibir la agricultura, en particular sus relaciones medio ambiente-producción, en términos de sistemas (Wei Xu *et al.*, 2001). El concepto de sistema se ha definido de varias maneras en función del objetivo y el interés del investigador individual (Conway, 1985). Un agroecosistema puede ser definido como una unidad funcional, que produce productos agrícolas y proporciona servicios rurales, lo que incluye un conjunto de elementos relacionados con la agricultura y las interacciones entre esos elementos; por ejemplo, la tierra agrícola, el trabajo, el capital y la gestión pueden ser identificados como los elementos de entrada para un agroecosistema a nivel de finca (Ilbery, 1985). Estos elementos se interrelacionan entre sí e interactúan con atributos externos; las interacciones internas y externas determinan las diversas funciones de un agroecosistema (Wei Xu *et al.*, 2001). Smit y Smithers 1994, proponen un modelo para describir la relación entre los componentes del agroecosistema, el modelo identifica tres dimensiones esenciales que constituyen un agroecosistema: las dimensiones ambiental, económica y humana. Estas dimensiones existen en los agroecosistemas a diferentes escalas. La idea fundamental de este enfoque es analizar la complejidad de un agroecosistema caracterizando cada componente por separado y explorando la relación entre esas partes, la comprensión de un agroecosistema como un todo depende en gran medida de cómo las interacciones inherentes entre estas dimensiones son reconocidas y generalizadas (Wei Xu *et al.*, 2001). Los agroecosistemas pueden definirse a diferentes escalas espaciales, desde parcelas de campo hasta el globo terráqueo entero (Conway, 1985), un agroecosistema a un nivel inferior (por ejemplo, un agroecosistema a nivel de finca) es un subsistema de un agroecosistema a un nivel superior (por ejemplo, un agroecosistema regional). A través de varias escalas, los agroecosistemas pueden estar compuestos de diferentes componentes y exhibir diferentes interacciones entre los componentes, una comprensión completa de las características funcionales y estructurales de un agroecosistema puede depender en parte de cómo los hallazgos en diferentes estudios se integran a través de escalas (Wei Xu *et al.*, 2001).

Al ser enfocado como un sistema posee estructura, componentes, entradas, salidas y función entre sus elementos y sus componentes, los cuales forman un todo como tal, en donde se realiza intercambio de energía, materia e información con la finalidad de lograr un objetivo en particular que coincide con los productos de salida: alimentos, materias primas y servicio; este presenta

distintos niveles de diversidad (Harrington, 1996); dentro de sus características se encuentran la productividad, estabilidad, sustentabilidad, equidad (Conway, 1987) y mantiene un enfoque de autonomía (Marten, 1988).

La estructura de un agroecosistema se denomina composición y distribución de los componentes del sistema (Wei Xu *et al.*, 2001). El enfoque en la caracterización estructural se ha relacionado con el tipo y la composición de los recursos biofísicos, el patrón y la distribución social y económica, y la forma del paisaje biofísico y humano (Burel y Baudry, 1995). La composición estructural y la distribución de los componentes del agroecosistema varían entre los diferentes tipos de agroecosistemas a diferentes escalas (Smit y Smithers, 1994). La estructura del agroecosistema también cambia con el tiempo debido a la influencia de diversos factores dentro y fuera de un agroecosistema (Ilbery, 1991). Según Wei Xu *et al.*, 2001 la importancia de la estructura del agroecosistema es doble: a) En primer lugar, la existencia y distribución de componentes estructurales proporciona una base fundamental sobre la cual un agroecosistema puede funcionar en absoluto. En los sistemas de producción de cultivos, por ejemplo, el suelo es un componente de recursos básicos que retiene la humedad y proporciona sustancias minerales para que la planta pueda realizar varios procesos biológicos y crecer. Los estados estructurales del suelo, tales como el contenido orgánico en el suelo o el espesor de la capa superficial del suelo, son factores cruciales para determinar el funcionamiento biofísico de la producción agrícola. En segundo lugar, la estructura del agroecosistema está directamente ligada a las necesidades de la sociedad; por ejemplo, una estructura de recursos biodiversificada proporciona una oportunidad para satisfacer una variedad de necesidades para diferentes personas (Burton *et al.*, 1993). Por lo tanto, el establecimiento de la composición estructural y morfología del agroecosistema es significativo no sólo en el apoyo a varias funciones del agroecosistema, sino también en la prestación de servicios a las necesidades de las personas (Wei Xu *et al.*, 2001).

Para la presente investigación es necesario conceptualizar el concepto de sustentabilidad a nivel microcuenca, por lo que se define como “la satisfacción de las necesidades de la población en el tiempo, dentro su límites biofísicos, a través del flujo de recursos, bienes y servicios producto de los componentes del sistema (agroecosistemas, paisaje natural y población); considerando que no se perjudique ambientalmente los recursos naturales por actividades antropogénicas y que socioeconómicamente se alcancen para la población niveles aceptables de salud, educación e ingreso para su desarrollo”.

5.2. Marco referencial

5.2.1. Sustentabilidad

La Conferencia sobre Medio Ambiente de la ONU realizada en Estocolmo en 1972, figura como el antecedente a la formulación del concepto de Desarrollo Sustentable (Pierre, 2005) , sin embargo, fue hasta el año 1987 con la pronunciación del informe “Nuestro Futuro común” que el grupo denominado "Comisión Brundtland", después de intensas consultas a nivel internacional, refiere el concepto como "*el proceso que permite satisfacer las necesidades de la población actual sin comprometer la capacidad de atender las necesidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*"(Harlem y Khalid, 1988; Arias, 2003; Bifani, 2007). La generalidad con que fue formulada la definición de Desarrollo Sustentable la hizo poco clara para su operatividad, interpretándose en formas diferentes que han dado lugar a largos debates. Según Pierre 2005, esto se debe a que existen diferencias que mantienen tres de las principales corrientes de pensamiento que participaron en este concepto: a) La corriente ecologista conservacionista o sustentabilidad fuerte, cuya propuesta es el crecimiento económico y poblacional cero, b) El ambientalismo moderado o sustentabilidad débil, que basa su idea en aceptar el crecimiento económico con márgenes de conservación y c) La corriente humanista crítica, que plantea la transformación social considerando las capacidades propias de la población, el potencial ecológico de las regiones y la pluralidad de soluciones ante el fenómeno de la diversidad.

Luego de las múltiples interpretaciones de la sustentabilidad y el desarrollo es evidente el vacío conceptual que ha ocasionado el uso indiscriminado de los términos en distintas especialidades y actividades, a tal grado que hasta 1995 se habían identificado más de 137 definiciones, teniendo como resultado mayor confusión para su comprensión y operación (Casas y Velásquez, 1995). Las formas múltiples en que puede ser interpretado y usado obedece a un amplio rango de intereses y causas (Elliot, 1999), por ejemplo, Tyrtania 2009, menciona que después de la crisis petrolera en 1973 hubo discusiones globales que convergieron en la retórica oficial sobre el desarrollo sustentable, concepto en que se encuentra la solución de los problemas ambientales del planeta. Después de dos décadas del informe "Nuestro futuro común", el término sustentabilidad, se ha incorporado en las agendas de diversos actores tanto del ámbito público como privado, en la política como en la academia, de las organizaciones no gubernamentales (ONG´s) y de tan diversos actores del sector social (Astier y Hollands, 2005). Por lo tanto, la sustentabilidad es un concepto complejo, controversial, multidimensional y en evolución, a partir del cual se evidencia la

necesidad imprescindible de un proceso de transformación estructural, que permita integrar medioambiente con desarrollo, y a la vez economía con ecología. La necesidad de este proceso de transformación se deriva del mal uso de los recursos por el hombre, generado por el cambio social global debido al aumento de la población, el crecimiento económico, el avance tecnológico y la pobreza (Jiménez, 1989; Bell, 2016).

La sustentabilidad es uno de esos términos que deben su amplia aceptación, en parte, a su ambigüedad, todos están de acuerdo en alcanzarla (en teoría), pero nadie sabe bien de que se trata, por lo tanto, no se puede medir progresos, ni retrocesos (Sarandon, 2000).

La preocupante insostenibilidad del actual modelo de desarrollo humano ha generado la toma de conciencia junto con la necesidad de investigar sobre cómo evaluar y medir el estado de sostenibilidad (o insostenibilidad) de cada modelo de desarrollo y producción a distintas escalas, con el propósito final de implementar técnicas o tecnologías que mejoren o minimicen el impacto ambiental (FMAM, 2000). En otras palabras existe la necesidad de transformar el concepto de sustentabilidad en definiciones y estrategias operacionales que puedan ser utilizadas para evaluar el impacto de distintas acciones en la sustentabilidad de los sistemas (López *et al.*, 2005). Por lo tanto, el objetivo de la evaluación de sustentabilidad es proporcionar a los tomadores de decisiones, una valoración de ámbito local a global que integre los sistemas de naturaleza y sociedad a corto y largo plazo, a fin de coadyuvar a determinar qué acciones deben o no deben ser emprendidas para favorecer una sostenible relación entre sistemas (Kates *et al.*, 2001; Devuyst *et al.*, 2010; Ness *et al.*, 2007); entre ellos los agroecosistemas como fuente de alimentos, fibras u otros productos útiles para la sociedad.

La sustentabilidad es un concepto complejo en sí mismo por que pretende cumplir con varios objetivos en forma simultánea que involucran dimensiones productivas, ecológicas o ambientales, sociales, culturales, económicas y fundamentalmente temporales; para lograr avanzar, es necesario que la complejidad y la multidimensional de la sustentabilidad sean simplificadas en valores claros, objetivos generales conocidos como indicadores. No existe una sola forma de encarar la evaluación de la sustentabilidad ya que esta depende del objetivo o el tipo de pregunta que se busca responder. En la evaluación de la sustentabilidad hay dos posibilidades: la evaluación *per se* y la evaluación comparativa (Sarandón, 2002).

Sin embargo, la sustentabilidad requiere ser valorada con el propósito final de implementar técnicas o tecnologías que mejoren o minimicen el impacto ambiental, para ello deben emplearse

escalas de medición ordinales, que permitan su categorización. Indicadores e índices surgen como la base de las metodologías de evaluación de sustentabilidad, debiendo cumplir una serie de requisitos para ser de utilidad. Entre estos requisitos, la integración de las tres dimensiones de la sustentabilidad (económica, social y ambiental) es básica (Toro *et al.*, 2010). Es importante que los indicadores sean sensibles a un amplio rango de situaciones, que puedan variar en el tiempo y en lo posible es deseable que los indicadores tengan la habilidad predictiva, sencillos de interpretar, de fácil recolección y uso y aportar a la evaluación de la sustentabilidad (Sarandón, 2002).

La construcción de los indicadores consta de tres etapas: fundamentación, estandarización y ponderación. En la fundamentación se describe lo que cada indicador va a evaluar y qué información brinda respecto a la sustentabilidad relacionado con la dimensión en la cual se encuentra. La estandarización permite integrar varios indicadores de distinta naturaleza, en otros más sintéticos o robustos. La ponderación consiste en dar a cada descriptor, indicador o subindicador un peso relativo de acuerdo con su importancia o influencia (Gargaloff *et al.*, 2010). Las aproximaciones y contrastes aquí mencionados, son enfoques parciales desde diversos ángulos y posturas teóricas, muestran que en la práctica acercarse a la operacionalización del concepto de sustentabilidad, es una tarea muy compleja y que previamente se debe clarificar un marco teórico al respecto (Sánchez, 2012).

5.2.2. Metodologías para evaluar sustentabilidad

Uno de los mayores retos que enfrenta la discusión del desarrollo sustentable es diseñar marcos operativos que permitan evaluar de manera tangible la sustentabilidad de diferentes proyectos, tecnologías, agroecosistemas y cuencas hidrográficas. El reto es considerable, pues hacer operativo el concepto de sustentabilidad implica simultáneamente un serio esfuerzo teórico y cierta dosis de pragmatismo (Maserá *et al.*, 2000). A continuación se pretende resumir aportaciones de autores que han contribuido con metodologías al desarrollo sustentable:

- i. Por su parte Harrington 1992, propone el índice denominado *Productividad Total de Factores (Total Factor Productivity)*, que se obtiene a partir de la relación entre todas las salidas o beneficios y todas las entradas (costos ambientales a corto y largo plazo) del sistema.
- ii. Taylor 1993, propone un *índice de sustentabilidad por Productos (Farmer Sustainability Index)*, en función de las acciones o estrategias que adopta cada productor y que tienen una

influencia sobre la sustentabilidad del sistema (control de plagas, control de la erosión, mantenimiento de la fertilidad del suelo, entre otros).

- iii. La Unión Mundial para la Naturaleza (IUCN) y el Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo (IDRC), desarrollaron y aplicaron en diferentes estudios de caso un conjunto de cuatro métodos para analizar el progreso hacia la sustentabilidad tanto de los sistemas de manejo como de las organizaciones o instituciones involucradas en ellos (IUCN-IDRC, 1995; IUCN, 1997).
- iv. El marco desarrollado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) propone una metodología sistémica para la derivación de indicadores a partir de una extensiva revisión bibliográfica sobre el concepto de sustentabilidad y sus diferentes variantes, definiendo cuatro categorías de análisis: a) la base de recursos del sistema; b) la operación del sistema propiamente; c) otros recursos exógenos al sistema (de entrada o salida), y d) la operación de otros sistemas exógenos (de entrada o de salida) (De Camino y Muller, 1993; Muller, 1995).
- v. Marco de evaluación del Manejo Sustentable de Tierras elaborado por FAO, es la propuesta más elaborada sobre metodologías de evaluación, constituye uno de los más importantes esfuerzos a escala internacional dirigido a la evaluación de sustentabilidad y, junto con sus aplicaciones a diferentes estudios de caso (Gameda y Dumanski, 1994), ha sido un documento básico para la elaboración de la metodología MESMIS.
- vi. Se propone un índice de sostenibilidad de cuencas (WSI), en el que utiliza una función de la presión-estado-respuesta (OECD 2003), en el integra las cuestiones hidrológicas (H), medio ambiente (E), la vida (L) y la política de recursos hídricos (P). En el desarrollo del WSI utilizaron criterios de selección de cuatro indicadores (H,E,L,P) en un esquema matricial. Como resultado se obtuvo el WSI que numéricamente está dado por $WSI=(H+E+L+P)$, en donde los indicadores tienen el mismo peso, ya que su importancia relativa no puede ser establecida prioritariamente pues los cuatro son componentes esenciales en la sostenibilidad de la cuenca (Henrique Chaves y Alipaz, 2006).
- vii. El Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), su objetivo principal es brindar un marco metodológico para evaluar la sustentabilidad de diferentes sistemas de manejo de recursos naturales a escala local (parcela, unidad productiva, comunidad). El MESMIS propone

siete atributos básicos de sustentabilidad: Productividad, Estabilidad, Resiliencia, Confiabilidad, Adaptabilidad (flexibilidad), Equidad, Autodependencia (autogestión). Para facilitar la aplicabilidad del marco de evaluación en términos prácticos, se considera el grado de sustentabilidad de los sistemas de manejo de recursos naturales –y por lo tanto, el punto de partida para la derivación de indicadores- dependerá de satisfacer cinco atributos generales: (a) Productividad; (b) estabilidad, confiabilidad y resiliencia; (c) adaptabilidad; (d) equidad; y (e) autodependencia (autogestión) (Masera *et al.*, 1999).

5.2.3. Cuencas y microcuencas

Según Cotler, 2010 la forma de percibir a nuestro país como ciudadanos o investigadores tomadores de decisiones van a tener un impacto directo y profundo de cómo planteamos y atendemos sus problemas y soluciones. Necesitamos ver al país a través de aquellos elementos que más que dividirlo, lo unen y uno de estos elementos son los ríos que fluyen desde las montañas y mesetas, entrelazan valles con costas, transportando nutrientes, compuestos orgánicos que alimentan planicies y deltas, espacios que han dado lugar a una próspera historia agrícola, a la vez que han mantenido abundantes ecosistemas. Las cuencas constituyen un complejo mosaico de ecosistemas, naturales y manejados, donde se reconocen los vínculos entre los territorios de las zonas altas y bajas, cuyas externalidades, transportadas por los cursos de agua, crean una conexión física entre poblaciones alejadas unas de otras.

La primera delimitación de las cuencas hidrográficas en nuestro país fue establecida por Antonio García Cubas, posteriormente siguieron diversos esfuerzos institucionales para delimitar, cada vez con más exactitud, estas unidades hidrográficas (Mollard y Vargas, 2005). En el año 2007 se generó un primer mapa consensado de cuencas hidrográficas entre tres instituciones gubernamentales: INEGI-INE-CONAGUA.

En México los estudios se han centrado especialmente en los ecosistemas, generando en los últimos años importantes y exhaustivos análisis sobre las causas de su deterioro, el estado y las tendencias de los servicios ecosistémicos y recomendaciones de política pública (Sarukhán *et al.*, 2009). Varios documentos señalan las áreas, regiones, ecosistemas o estados donde se manifiestan los principales problemas ambientales (SEMARNAT, 2012; Coll Hurtado, 2007. El Programa Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2001-2006 identificó “cuencas hidrológicas prioritarias” basándose en las unidades reconocidas por la CONAGUA en 1998 (Carabias y Landa, 2005). Considerando la biodiversidad marina y epicontinental, la CONABIO identificó 111

regiones hidrológicas prioritarias, considerando como unidad de análisis a las cuencas hidrológicas (Arriaga *et al.*, 2000).

Las actividades humanas y la creciente demanda por bienes como alimento, vivienda, agua potable y servicios ambientales generan constantemente, y en amplias escalas geográficas, una presión sobre los recursos naturales con grandes impactos, la mayoría de ellos negativos, sobre la estructura, funcionamiento y distribución de los mismos (Challenger y Dirzo, 2009; Vitousej *et al.*, 1997); de ahí la importancia de estudiar los actividades antropógenicas y su nivel de impacto sobre la microcuenca en el marco de la sustentabilidad.

5.2.4. Indicadores de sustentabilidad

5.2.4.1. Calidad de agua

La contaminación de origen natural y antrópico de las fuentes de agua limitan su aprovechamiento principalmente para el consumo humano; herramientas de diagnóstico rápidas y representativas como los índices de calidad del agua (ICA) garantizan una evaluación integral del recurso, fundamental en la toma de acciones para manejo y control del riesgo sanitario a través de los diferentes procesos de potabilización (Torres *et al.*, 2010).

Los índices de calidad, calculados a partir de la medición de ciertas variables ambientales, proveen de un concepto preliminar para diagnosticar el estado sanitario de las corrientes, y se emplean como herramientas para analizar tendencias, especificar condiciones ambientales, ayudar en decisiones gubernamentales y en la evaluación de programas de control, entre otros (Canter, 1998). A nivel mundial se han desarrollado diferentes ICA's, (Horton, 1965), desarrolló índice de calidad del agua, seleccionando y pesando muchos parámetros. Destaca también el de la National Sanitation Foundation (ICA– NSF), desarrollado por Brown *et al.*, 1970, para ríos de Estados Unidos y ampliamente empleado, validado o adaptado en diferentes estudios internacionales, esta metodología calcula los pesos promedios de algunos parámetros predefinidos, normalizados en una escala de 0 a 100 y multiplicados por sus respectivos pesos.

Brown y Maccllelland (1973), propone una versión modificada del "WQI" (Water Quality Index) que fue desarrollada para la NSF con la finalidad de adaptar un sistema para comparar ríos de diferentes regiones del país, conocido como ICA.

Provemcher y Lamontagne (1977), definen un índice de calidad para cualquier uso de agua, simplemente determinando las especificaciones requeridas por dicho uso.; este indicador incluye diversas características físicas y químicas.

Dinius 1987, desarrolló un ICA similar teniendo como valor agregado el planteamiento de rangos de clasificación basados en usos específicos, entre los que se destaca el del consumo humano (Conesa, 1997), modificó el método de la Fundación de Sanidad Nacional (NSF) y propuso el índice de calidad del agua subjetivo (ICAsub) que incluía una constante subjetiva “k”.

Melloul y Collin (1998), desarrollan un índice para valorar la calidad del agua del acuífero (IAWQ) considerando parámetros como Cl^- y NO_3^- ; el índice propuesto evalúa numéricamente la calidad del agua para cualquier uso, se establece como una suma de pesos multiplicados por los índices respectivos de los diversos parámetros “i” para cada elemento.

Por otro lado, Pesce y Wunderlin 2000, desarrollan el índice llamado WQImin, este es la media aritmética de tres parámetros ambientales, oxígeno disuelto (OD), turbiedad (T) y fósforo total (PT), normalizados mediante curvas de Conesa (Conesa, 1997).

Henrique Chaves y Alipas (2006), menciona que en calidad del agua la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5 , en mg L^{-1}) es información que a menudo es disponible en las cuencas hidrográficas, y esta se correlaciona con otros parámetros importantes como el oxígeno disuelto, la turbidez y las concentraciones de contaminantes, por lo que la DBO_5 puede ser seleccionado como el parámetro de calidad. Si otros parámetros de la calidad del agua son más críticos que DBO_5 (por ejemplo, nitrógeno) en la cuenca, podrían ser utilizados como el indicador de la calidad del agua.

Para evaluar la calidad del agua existen diversos tipos de parámetros, estos pueden ser físicos, químicos y biológicos. Los parámetros físicos del agua responden a los sentidos (sólidos suspendidos, turbidez, color, sabor, olor y temperatura); los parámetros químicos de la calidad del agua están relacionados con la capacidad de este líquido como solvente universal (sólidos disueltos totales, el oxígeno disuelto, la dureza, los nutrientes, materia orgánica, los metales, cloruros, fluoruros) y los parámetros biológicos están vinculados al agua como un hábitat de miles de especies (Arellano y Guzman, 2002).

5.2.4.2. Manejo de Agroecosistemas de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.).

Las dos bebidas de infusión más comunes en el mundo, el té (*Camellia sinensis*) y el café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), se cultivan en los trópicos y subtrópicos en todo el mundo (Nakay y Lacey, 2017). El café es cultivado en los trópicos por unos 20 millones de agricultores de más de 80 países de África, Asia y América Latina y generó más de US \$ 173.000 millones en 2012 (ICO, 2014, citado por Vega *et al.*, 2015). La producción mundial de café en 2014 fue

8.808.062 toneladas (Nakay y Lacey, 2017). Los cinco principales productores por tonelada de exportación son Brasil (2.720.520), Vietnam (1.650.000), Colombia (696.000), Indonesia (411.000) y Etiopía (6000) (ICO, 2015).

El café es uno de los productos más valiosos que se comercializan legalmente en el mundo (FAO, 2010), teniendo relevancia para muchas economías nacionales (O'Brien y Kinnaird 2003). Entre 14 y 25 millones de familias participan activamente en la producción de café y millones más dependen del café para su sustento (Lewin *et al.*, 2004).

Aproximadamente 400 mil millones de tazas de café se sirven por año en todo el mundo (Illy, 2002). Mientras que el café se consume en todo el mundo, pocas personas conocen el viaje extenso tomado por la bebida; de semilla a copa, este viaje emplea a más de 25 millones de personas, desde agricultores y trabajadores hasta tostadores y distribuidores (Donald, 2004). Estos productores hacen una contribución significativa, aunque actualmente no calculada, a las 8,2 millones de toneladas producidas en 2008 (FAO, 2010).

La mayoría de los productores, estimados en más del 70%, son pequeños agricultores que cultivan menos de 10 hectáreas (Lewin *et al.*, 2004); sin embargo, en Mesoamérica (incluyendo México y Centroamérica), la mayoría de los productores de café son sustancialmente más pequeños que el estándar de 10 ha utilizado para delinear a un pequeño productor (Jha *et al.*, 2011), un informe de 2002 publicado por una oficina regional de las Naciones Unidas reporto que más del 68% de esta región son micro-productores que manejan menos de 2 hectáreas de café (CEPAL, 2002).

Como cultivo comercial, el cultivo del café ganó popularidad en el Viejo y luego en el Nuevo Mundo, y floreció bajo los regímenes coloniales de los siglos XIX y XX. Los patrones de producción del café y los estilos de gestión han cambiado drásticamente en los últimos dos siglos y continúan cambiando (Jha *et al.*, 2011).

El café no cubre tanta superficie terrestre como otras tierras agrícolas, la producción de café es de aproximadamente 3,6 millones de hectáreas (FAO, 2002), la importancia ecológica del café es una consecuencia de donde se produce, en lugar de cuánta tierra está en producción (Perfecto *et al.*, 2007).

La producción de café en los últimos 50 años, tanto la producción como el consumo han aumentado considerablemente; algunos países productores de café han visto beneficios considerables a través de mayores rendimientos y volúmenes crecientes de ventas, pero muchos, especialmente los pequeños productores, que producen la mayor parte del café del mundo, también se enfrentan a

desafíos crecientes por el cambio climático y las condiciones naturales de crecimiento más difíciles (FAO, 2015).

Aproximadamente el 95% de los productores de café mexicano (65.5% de la superficie total de producción) son pequeños productores, la mayoría de los cuales aún manejan el café bajo sombra tradicional en la cual están presentes varias especies y manejan menos de 5 ha cada uno (Rice y Ward 1996).

En México, el café se cultiva sobre las vertientes del Golfo de México y del Pacífico en el centro y sur del país, de acuerdo al nivel de manejo y a la estructura de la vegetación, es posible distinguir cinco principales sistemas de producción de café en México: dos tradicionales donde el café se produce bajo la sombra de la vegetación original, uno intermedio donde la sombra la proveen árboles no nativos, y dos “modernos” (monocultivos con y sin sombra); en México las áreas productoras de café se localizan en porciones de gran importancia biogeográfica y ecológica; entre el 60 y 70% de las áreas cafetaleras se encuentran bajo manejo tradicional; y por lo menos 14 de 155 regiones prioritarias recomendadas para su conservación se sobreponen o están próximas a áreas con café bajo sombra y manejo tradicional (Moguel y Toledo, 1999).

El café se cultivaba tradicionalmente bajo un dosel de sombra denso y diverso, pero la intensificación reciente incluye la reducción de la densidad y diversidad de árboles de sombra y el uso de agroquímicos (Moguel y Toledo, 1999). Sin embargo, los agroecosistemas de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.) se destacan por su potencial de conservación, pero la intensificación de la gestión del café elimina la biodiversidad y puede restringir los servicios de los ecosistemas (Philpott *et al.*, 2006); no siempre, la intensificación de la gestión de sombra se acompaña de aumentos en el uso de agroquímicos sintéticos (por ejemplo, plaguicidas, fungicidas, herbicidas y fertilizantes) (Jha *et al.*, 2011).

A escala local y paisajística, la diversidad biológica mantenida dentro de los agroecosistemas cafetaleros ofrece una gama de servicios de aprovisionamiento y regulación de ecosistemas, tales como almacenamiento de agua, polinización de flores de café y control de plagas (Lin, 2007). A nivel regional, las plantaciones de café de sombra contribuyen a la regulación de servicios como la conservación del agua, la ordenación de cuencas hidrográficas, la conservación del suelo y la prevención de deslizamientos de tierra (Jha *et al.*, 2011). A escala global, la gestión de la vegetación del café afecta la capacidad de un productor para calificar para la certificación

"orgánica" o "amigable para los pájaros" (Philpott *et al.*, 2007) o potencialmente obtener créditos de carbono (Dossa *et al.*, 2008).

Las plantaciones de café bajo sombra son cada vez más valoradas por sus contribuciones a la conservación de la biodiversidad y al suministro de servicios ecosistémicos; en los cultivos de café de sombra, al igual que en otros paisajes, los servicios de los ecosistemas funcionan a diferentes escalas espaciales (locales, regionales y globales), por lo que los beneficios ecológicos y económicos obtenidos de estos servicios dependen de la composición de las partes interesadas en múltiples escalas espaciales, además, estos agroecosistemas de café de sombra pueden respaldar una sustancial biodiversidad nativa, gran parte de la cual contribuye al aprovisionamiento, regulación y apoyo de los servicios ecosistémicos, incluyendo el suministro de leña, servicios de polinización y control de plagas, control de erosión y fijación de nitrógeno (Jha *et al.*, 2011).

El café se cultiva bajo una copa de árboles de sombra garantiza la longevidad del agroecosistema, apoya la biodiversidad y proporciona a las comunidades una amplia gama de servicios ecosistémicos (Jha *et al.*, 2011); el café cultivado bajo la sombra del dosel original de los bosques o selvas predomina en México, y es producido fundamentalmente por pequeños productores, muchos de los cuales pertenecen a alguna cultura indígena (Moguel y Toledo, 1999).

Los sistemas agroforestales, como el café bajo sombra, han recibido atención por su potencial para almacenar y retener niveles relativamente altos de carbono (Roncal-García *et al.*, 2008). Los servicios ecosistémicos proporcionados por el café de sombra se producen a escalas locales, regionales y globales, incluyendo la polinización, el control de la erosión y el secuestro de carbono, respectivamente (Jha *et al.*, 2011). Se ha demostrado que el aumento de la diversidad de árboles de sombra no afecta directamente a los rendimientos de café (Peeters *et al.*, 2003).

El café fue cultivado tradicionalmente bajo un dosel de sombra denso y diverso, pero la intensificación reciente incluye la reducción de la densidad y diversidad de árboles de sombra y el uso de agroquímicos (Mas y Dietsch 2003). En un proceso respaldado en gran medida por el Instituto Mexicano del Café (INMECAFE), los agroecosistemas de café de todo el país transformaron sus fincas de café tradicionales en monocultivos de sombra, con efectos drásticos sobre la biodiversidad y aumentos temporales de los rendimientos, transformando drásticamente el paisaje (Nestel, 1997). El aumento de los insumos químicos en los agroecosistemas del café tiene costos bien documentados para la biodiversidad y los hábitats que bordean los sistemas agrícolas intensivos (Perfecto *et al.*, 1996).

Dentro de las parcelas de café, los agricultores en todo el mundo a menudo incorporan un gran número de plantas diferentes, como frutas (naranja, plátano, mango, aguacate), nueces (por ejemplo, macadamia), árboles para madera o leña y cultivos de exportación adicionales (pimienta negra, canela, clavo de olor) (Philpott *et al.*, 2007; Rice, 2008).

La heterogeneidad del paisaje y la estructura de la vegetación pueden aumentar la riqueza y abundancia de aves dentro de los agroecosistemas aumentando el número de nichos ecológicos (Heikinnen *et al.*, 2004; De La Montaña *et al.*, 2006). Por ejemplo, la riqueza de aves fue mayor en los cafetales sombreados que en monocultivos de café (Perfecto *et al.*, 2004).

La importancia económica del café para los latinoamericanos se ha demostrado aún más por las crisis de precios internacionales en los mercados del café (Calo y Wise, 2005). Entre 1999 y 2002, los precios del café, determinados por el mercado de materias primas de la Bolsa de Nueva York, alcanzaron mínimos de 0,42 / lb (FAO, 2002), los precios más bajos en 100 años en términos reales (Calo y Wise, 2005).

6. Literatura citada

- Altieri M.A. y Nicholls C.I. 2007 Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación. *Ecosistemas*. 16:3-12.
- Anónimo. 2006. Teoría de sistemas. In: <http://www.sctsystemic.com/teoriasistemas.htm>.
- Arellano D. J. y Guzmán P. J.E. 2002. Introducción a la Ingeniería Ambiental. Alfaomega Grupo Editor/ IPN, México, D.F. 184 p.
- Arias, M. 2003. Desarrollo Sustentable una propuesta ante la desilusión del progreso.pp: 1-12. <http://www.anea.org.mx/docs/Arias-DS-Desilusion.pdf>. (Consulta:13 de febrero de 2015).
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez, y E. Loa, E. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 611 p.
- Astier CM, Argueta Q, Orozco-Ramírez Q, González S.M.V., Morales H.J., Gerritsen P.R.W., et al., 2015. Historia de la agroecología en México. *Agroecología*. 10: 9-17.
- Astier, M., & Hollands, J. 2005. Sustentabilidad y campesinado. Seis experiencias agroecológicas en Latinoamérica. Mundiprensa, GIRA A. C. México D. F. 404 p.
- Austin M., T. (11 de Enero de 2006). Teoría de sistemas y sociedad. La página del Profe Tomás Austin M. Ciencias Sociales en la red, para todas las necesidades. Obtenido de 5.-Austin M., T. 2006. Teoría de sistemas y sociedad. La página del Profe.Tomás Austin M. Ciencias Sociales http://www.geocities.com/tomaustin_cl/soc/sistema.htm.Austin

- Bell, M. M. and Loka L. A. 2016. An invitation to environmental sociology. Fifth edition. Sage publications, Inc, 512 p.
- Bertalanffy L., V. 1968. Teoría General de los Sistemas. México, D.F. : Fondo de Cultura Económica, pp: 1-24.
- Bifani, P. 2007. El Desarrollo Sustentable. In: Medio Ambiente y Desarrollo. Ed. Universitaria. México. pp: 106-137.
- Brown, R., McClelland, N., Deininger, R., & Tozer, R. A. 1970. Water Quality Index – Do We Dare?. Water and Sewage Works. 11:339-343.
- Brown, R., & MacClelland, N. 1973. Water Quality Index. Application in the Kansas River Basin. 46th. Conf., Water Poll. Fed., Cleveland, Ohio. pp:339-343.
- Burel, F. and Baudry, J., 1995. Species biodiversity in changing agricultural landscape: a case study in the Pays of Auge, France. Agric. Ecosyst. Environ. 55: 193–200.
- Burton, P.J., Balisky, A.C., Coward, L.P., Cumming, S.G., Kneeshaw, D.D., 1993. The value of managing for biodiversity. The For. Chron. 68:225-237.
- Calo M. and Wise T. A. 2005. Revaluing peasant coffee production: organic and fair trade markets in Mexico. Global Development and Environment Institute, Tuft University, 61 p.
- Canter, L. 1998. Manual de evaluación del impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de estudios de impacto. . Madrid, España: Mc Graw Hill. pp: 154-162, 231-294.
- Carabias, J., y Landa R. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México., UNAM, Colegio de México, Fundación Gonzalo Rio Arronte, México, D.F. 211 p.
- Casanova, L., Martínez, J., López, S., & López, G. (2016). De von Bertalanffy a Luhmann: Deconstrucción del concepto “agroecosistema” a través de las generaciones sistémicas. Revista Mad. 35: 60-74.
- Casas, D. E., & Velásquez., M. A. 1995. “Agroecología: Desarrollo Sustentable y Educación Agricultura Sustentable”; En: IV Curso sobre Desertificación y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe. PNUMA, FAO y Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, D.F. pp: 173-180.
- CEPAL. 2002. Globalización y desarrollo. CEPAL, vigesimonoveno período de sesiones Brasilia, Brasil. 396 p.
- Chakrabarty, S., Wang, L. 2013. Climate change mitigation and internationalization: the competitiveness of multinational corporations. Thunderbird International Business. Review, 55 (6): 673-688.
- Challenger, A. R., & Dirzo, R. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad, In: Capital natural de México . Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio, CONABIO, México, D.F. pp:37-73.
- Chiavenato, I. 1997. Teoría de sistemas In: Introducción a la Teoría General de la Administración. Cuarta edición. McGraw-Hill. pp: 725-761.

- Coll - Hurtado, A. 2007. Nuevo Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico, D.F. 430 p.
- Conesa, V. 1997. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 800 p.
- Conway, G.R., 1985. Agroecosystem analysis. *Agric. Admin.* 20: 31–55.
- Conway, G.R. 1987 The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems* 24: 95-117
- Cotler Avalos, H. 2010. Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización. Impreso y Hecho en México.: D.R. © Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. ISBN 978-607-7655-07-7. 232 p.
- De Camino y Muller. 1993. Sostenibilidad de la agricultura y los recursos naturales. Bases para establecer indicadores. Serie documentos de Programas Núm. 38. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-GTZ. 134 p.
- De La Montaña E, Rey-Benayas J.M. and Carrascal L. M. 2006. Response of bird communities to silvicultural thinning of Mediterranean maquis. *Journal of Applied Ecology*.43:651–659.
- Devuyt, D., Hens, L.W. and Walter De Lannoy (2010). How green is the city? Sustainability assessment and the management of urban environments. Columbia University Press. New York, 488 p.
- Dinius, S. H. 1987. Design of an Index of Water Quality. *Water Resources Bulletin*, Vol. 23, No. 11, pp: 833-843.
- Donald PF (2004) Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. *Conserv Biol.* 18:17–37.
- Dossa EL, Fernandes ECM, Reid WS, Ezui K.2008.Above- and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agroforest Syst.* 72:103–117
- Duval, G. 1999. Teoría de sistemas. Una perspectiva constructivista. In: *Perspectivas en las teorías de sistemas*, coordinado por Santiago Ramírez. . Siglo XXI Editores. pp: 62-82.
- Dyllick T. y Rost Z. 2017. Towards true product sustainability, *Journal of Cleaner Production*, 162:346-360.
- Elliot, J. 1999. *An Introduction to Sustainable Development*. . Londres: Zed Books. 283 p.
- Faden, R. and Beauchamp T. 1986 *A history and theory of informed consent*. New York Oxford University Press 237 p.
- FAO 1984 *Proteger y producir conservación del suelo para el desarrollo*. Roma Italia
- FAO (Food and Agriculture Organization).2002. *Agricultural production statistics*. FAO, Rome. Available from <http://apps.fao.org/>. (Consultado enero 2017).
- FAO (Food and Agriculture Organization).2010. *FAOSTAT: Crops*. Resource document.<http://faostat.fao.org/site/570/default.aspx#ancor>. (Consultado enero 2017).

- FAO (Food and Agriculture Organization) (2015). Statistical Pocketbook Coffee 2015 . FAO, Rome. Available from <http://www.fao.org/>. (Consulta enero 2017).
- Figueroa S., B. 1998. Principales conceptos en sistemas agrícolas. . Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Alianza para el campo. Instituto Nacional de Capacitación Rural. pp: 3-49.
- FMAM. 2000. Contribuciones del fondo para el medio ambiente mundial al programa 21. www.gefweb.org. (Consulta 13 de enero 2015).
- Fukuda-Parr Sakiko, Joshua Greenstein, David Stewart 2013 How Should MDG Success and Failure be Judged: Faster Progress or Achieving the Targets?, *World Development*, 41:19-30.
- Gameda y Dumanski. 1994. Framework for evaluation of sustainable land management: case studies of two rainfed cereal-livestock land use systems in Canada. En: 15th World Congress of soil Science, Vol. 6a. pp: 410-421
- García, C. W. (s/f). El sistema complejo de la cuenca hidrográfica. <http://www.unalmed.edu.co/~poboyca/documentos/>. (Consulta 25 de Junio de 2015).
- Gargaloff, N. A., Abbona, E. A., & Sarandón, S. J. 2010. Análisis de la racionalidad ecológica en agricultores hortícolas de La Plata, Argentina. *Rev. Bras. de Agroecología*. 5(2): 288-302.
- Gershenson, Carlos. 2007. «The world as evolving information». Proceedings of International Conference on Complex Systems ICCS2007. Boston, MA, USA.: <http://arxiv.org/abs/0704.0304>. (Consulta: 28 de Marzo 2014).
- Gershenson, C. 2013a. «Facing complexity: Prediction vs. adaptation» Massip-Bonet, Àngels; Bastardas-Boada, Albert (ed.). *Complexity Perspectives on Language, Communication and Society*. . Springer, 3-14. <<http://arxiv.org/abs/1112.3843>> (Consulta: 28 Marzo 2014).
- Gershenson, C. 2013b. «The implications of interactions for science and philosophy». *Foundations of Science*, 18:781–790, doi 10.1007/s10699-012-9305-8 Early view. <http://arxiv.org/abs/1105.2827> (Consulta: 28 Marzo 2014).
- Harlem, B. G., & Khalid, M. 1988. *Nuestro futuro común*. Madrid, España.: Alianza. 460 p.
- Harrington, L. 1996. Diversity by design: conserving biological diversity through more productive and sustainable agroecosystems. In: *Biodiversity and sustainable Agricultura Workshop*. August 14-17. Swedish Scientific Council on Biological Diversity. Ekenas, Sweden. pp:25-70.
- Harrington, J. 1992. Measuring sustainability: Issues and alternatives. . *Journal for Farming Systems Research-Extension* 3, número 1:1-20 pp.
- Hart, R. D. 1985. *Conceptos básicos sobre agroecosistemas*. Turrialba, Costa Rica: CATIE. pp: 67-78.
- Heikinen RK, Luoto M, Virkkala R, Rainio K. 2004. Effects of habitat cover, landscape structure and spatial variables on the abundance of birds in an agricultural – forest mosaic. *J Appl Ecol*. 41:824–35.

- Henrique Chaves, M. L., & Alipaz, S. 2006. An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resour Manage. Water Resour Manage.* 21:883–895.
- Hernández X. E. 1977. El agroecosistema: Concepto central en el análisis de la enseñanza, la investigación y la educación agrícola en México. En E. Hernández (Ed.), *Agroecosistemas de México: contribuciones a la enseñanza, investigación y divulgación agrícola*. Chapingo México, Colegio de Postgraduados. pp :11-12.
- Heylighen, F., Cilliers, P., & Gershenson, C. 2007. Heylighen, «Complexity and Philosophy» Bogg, Jan; Geyer, Robert (ed.). *Complexity, Science and Society*. Oxford/. New York. Radcliffe Publishing, 117-134.: Heylighen, Francis; Cilliers, Paul; Gershenson, Carlos (2007). «Complexity and Philosophy» Bogg, Jan; Geyer, Robert (ed.). *Complexity, Scien* <<http://arxiv.org/abs/cs.CC/0604072>> (Consulta: 28 marzo 2014).
- Horton, R. K. 1965. An index number system for rating water quality. *J. Water Poll. Control Fed.* 37: 300–305.
- Houghton, R. 1994. The worldwide extent of land-use change. *Bioscience.* 44:305-313.
- ICO, 2015. Total coffee production by all exporting countries in 2014. http://ico.org/new_historical.asp. (Consulta: enero 2017).
- Ilbery, B.W., 1985. *Agricultural Geography: A Social and Economic Analysis*. Oxford University Press, New York. 386 p.
- Ilbery, B.W., 1991. Farm diversification as an adjustment strategy on the urban fringe of the west Midlands. *J. Rural Studies.* 7:207–218.
- Illy E. 2002. The complexity of coffee. One of life’s simple pleasures is really quite complicated *Scientific American* 6:86–91.
- Instituto Nacional de Estadística. Geografía e Informática (2001) *Diccionario de datos edafológicos*. 40 p.
- IUCN, I. U. 1997. *International Union Un Enfoque para la Evaluación del Progreso hacia la Sustentabilidad. Serie: Herramientas y Capacitación*. Cambridge, Reino Unido: UICN - IDRC. 63 p.
- IUCN-IDRC, I. U.–I. 1995. *International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources Assessing progress towards sustainability: A new approach*. En: *A sustainable world: Defining and measuring sustainable world: Defining and measuring sustainable development*. Trzyna T.C., 152-72. California, EUA: IUCN/ICEP. 272 p.
- Jha S., Bacon C.M., Philpott S.M., Rice R.A., Méndez V.E., Läderach P. 2011. A Review of Ecosystem Services, Farmer Livelihoods, and Value Chains in Shade Coffee Agroecosystems. In: Campbell W., Lopez Ortiz S. (eds) *Integrating Agriculture, Conservation and Ecotourism: Examples from the Field. Issues in Agroecology – Present Status and Future Prospectus*, vol 1. Springer, Dordrecht. pp:141-208.
- Jiménez, H. L. 1989. *Medio ambiente y desarrollo sostenible*. IEPALA. Barcelona. 203 p.

- Johansen, B. O. 2000. *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. . Limusa, S. A. de C.V. Grupo Noriega Editores. 167 p.
- Jouravlev, A. 2003. *Los municipios y la gestión de los recursos hídricos*. Santiago de Chile: CEPAL, Serie Recursos Naturales e Infraestructura No 66. http://www.cepal.org/es/search?as_q=Los%20municipios%20y%20la%20gesti%C3%B3n%20de%20los%20recursos%20h%C3%ADdricos. (Consulta: 25 de Junio de 2015).
- Kates, R. C., Corell, R. H., Jaeger, C. L., McCarthy, J. S., Bolin, B. D., Faucheux, S. G., Mooney, H. 2001. *Sustainability science*. , Science, 292: 641-642.
- Kauffman, S. A. 2008. *Reinventing the sacred: A new view of science, reason, and religion*. New York: Basic Books, 320 p.
- Lambin, E., Baulies, X., Bockstael, N., Fischer, G., Krug, T., Leemans, R., Vogel, C. 1999. *Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) Implementation Strategy*, 205 p.
- Lewin B, Giovannucci D, Varangis P. 2004. *Coffee markets: new paradigms in global supply and demand*. World Bank, Washington, DC. Resource document <http://documents.worldbank.org/curated/en/899311468167958765/pdf/283000REVISED0Coffee1Markets01PUBLIC1.pdf>. (Consulta Enero 2017).
- Lilienfeld, R. 1984. *Teoría de sistemas. Orígenes y aplicaciones en ciencias sociales*. . México: Editorial Trillas. 342 p.
- Lima, T. P. A., Martínez, C. A. G., Vargas, P. L., Rodríguez, S. L. M. y C. J. G. Cruz. 2008. *Construcción local de indicadores de sustentabilidad regional. Un estudio de caso en el semidesierto del norte de México*. *Región y Sociedad*, 20(43):25-60.
- Lin BB. 2007. *Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture*. *Agric For Meteorol* 144:85-94
- López Ridaura, S., Keulen, H. I., & Leffelaar, P. 2005. López-Ridaura, S., Keulen, H., *InterMultiscale methodological framework to derive criteria and indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems*. *Environ. Dev. Sustain.*, 7: 51-69.
- Lozano, R., Carpenter, A., Satric, V., 2013. *Fostering green chemistry through a collaborative business model: A Chemical Leasing case study from Serbia*. *Resources Conservation and Recyclin*. 78:136-144
- Maass, J. M. 2004. *La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: un análisis del problema de escala*. En: H. Cotler (comp.) *El manejo integral de cuencas en Mexico. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. (Instituto Nacional de Ecología ed.). México, D.F. 348 p.
- Marcon A., Fleith de Medeiros J, José Luis Duarte R. J. L. 2017. *Innovation and environmentally sustainable economy: Identifying the best practices developed by multinationals in Brazil*, *Journal of Cleaner Production*, 160:83-97.
- Marten G.G. 1988 *Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment*. *Agricultural Systems*. 26: 291-316.

- Martínez, D. J. P, Gallardo L., F., Bustillo, L., & Pérez, A. 2011. El agroecosistema, unidad de estudio y transformación de la diversidad agrícola en Veracruz. En A. Cruz (Ed.), La biodiversidad en Veracruz. Volumen I. Xalapa: Universidad Veracruzana- Instituto de Ecología A.C. 542 p.
- Martínez-Paz, J.M., Pellicer-Martínez, F., Colino, J., 2014. A probabilistic approach for the socioeconomic assessment of urban river rehabilitation projects. *Land Use Policy* 36:468–477.
- Mas A.H. and Dietsch T.V. 2003. An index of management intensity for coffee agroecosystems to evaluate butterfly species richness. *Ecol. Appl.* 13:1491–1501.
- Masera, O., Astier, M., & López-Ridaura, S. 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales, el marco de evaluación MESMIS. México: Masera, O., M. Astier y S. López-Ridaura. Sustentabi Mundiprensa, GIRA A. C., Instituto de Ecología UNAM. 109 p.
- Masera, O., Astier, M., & López-Ridaura, S. 2010. Sustentabilidad y sistemas campesinos. Cinco experiencias de evaluación en el México rural. Capítulo II: El marco de evaluación MESMIS. En O. Masera, & S. López-Ridaura (Edits). 346 p.
- Mather, J.R. , J., & Sdasyuk, G. 1991. Global change: geographical approaches. University of Arizona Press: Tucson. 85(16): 5986–5991
- Millenium Ecosystem Assessment (MEA), 2005. Ecosystems and Human Wellbeing: Opportunities and Challenges for Industry. World Resources Institute, Washington D.C. 155 p.
- Melloul, A. J., & Collin, M. 1998. A proposed index for aquifer waterquality assessment: the case of Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management.*, 54:131-142.
- Moguel P. and Toledo V.M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology.* 13: 11–21.
- Mollard, E., & S. Vargas. 2005. Introducción, In: Vargas S. y E. Mollard (eds.) Problemas socioambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México. . IMTA-IRD, México. 387 p.
- Moreno, A., & Renner, I. 2007. Gestión integral de cuencas, la experiencia del proyecto regional cuencas andinas. (A. Moreno , & I. Renner, Edits.) GTZ Lima-Perú,: Centro Internacional de la Papa (CIP), Redcapa, Ministerio Federal de Economía y Desarrollo. 236 p.
- Muller, S. 1995. Evaluating the sustainability of agriculture at different hierarchical levels: A framework for the definition of indicators. Scientific Workshop on Indicators of Sustainability. Alemania. pp:1-50
- Nakai M. and Lacey L.A. 2017 Chapter 15: Microbial Control of Insect Pests of Tea and Coffee. Microbial Control of Insect and Mite Pests. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803527-6.00015-9> pp: 223-235
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. 2007. Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., AndeSurvey: Categorizing tools for sustainability assessment. *Ecol. Econ.* 60:498- 508.

- Nestel David. 1995. Coffee in Mexico: international market, agricultural landscape and ecology, *Ecological Economics*, 15:165-178.
- Nydahl, O. 2011. *The Great Seal: Limitless Space & Joy: The Mahamudra View of Diamond Way Buddhism*. San Francisco: Firewheel Publishing, 240 p.
- O'Brien T.G. and Kinnaird M.F. 2003. Caffeine and conservation. *Science* pp:300-587
- OECD. 2003. *OECD Environmental indicators: development, measurement and use*. Reference paper. Paris, France, 50 p.
- Odum E.P. 1972 *Ecología Tercera edición*, Editorial Interamericana. México, D.F. 308 p.
- Peeters Liza Y.K., Lorena Soto-Pinto, Hugo Perales, Guillermo Montoya, Mario Ishiki. 2003). Coffee production, timber, and firewood in traditional and -shaded plantations in Southern Mexico, *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 95:481-493.
- Pellicer M. F. y Martínez P. J. M. 2016 The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level, *Science of The Total Environment*. 571: 561-574.
- Perfecto I. Rice R.A. Greenberg R, VanderVoort ME. 1996. Shade coffee: A disappearing refuge for biodiversity. *Bioscience*. 46: 598-608
- Perfecto I, Vandermeer JH, Bautista GL, Nuñez GI, Greenberg R, Bichier P, Suzanne Langridge .2004. Greater predation in shaded coffee farms : the role of resident neotropical birds. *Ecology*. 85:2677–2681.
- Perfecto I., Armbrecht I., Philpott S.M., Soto-Pinto L., Dietsch T.V. 2007. Shaded coffee and the stability of rainforest margins in northern Latin America. In: Tscharntke T., Leuschner C., Zeller M., Guhardja E., Bidin A. (eds) *Stability of Tropical Rainforest Margins*. Environmental Science and Engineering (Environmental Science). Springer, Berlin, Heidelberg. pp:227-263.
- Pesce, S. F., & Wunderlin, D. A. 2000. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba city (Argentina) on Suquia river. . *Water Res*. 34: 2915–2926.
- Philpott, S.M., Perfecto, I. y Vandermeer, J. 2006. Effects of management intensity and season on arboreal ant diversity and abundance in coffee agroecosystems *Biodiversity and Conservation*. 15: 139-155.
- Philpott SM, Bichier P, Rice R, Greenberg R. 2007. Field-testing ecological and economic benefits of coffee certification programs. *Conserv Biol*. 21:975–985
- Pierre, N. 2005. Historia del concepto de desarrollo sustentable. In: Pierri, N. y G. Foladori. (Eds.) *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable*. . Colección América Latina y el Nuevo Orden Mundial. México. pp: 27-79.
- Pimm, S.L. y Raven. 2000. Biodiversity – Extinction by numbers. *Nature* 403:843-845
- Provemcher, M., & Lamontagne, M. P. 1977. *Méthode de détermination d'un indice d'appréciation de la qualité des eaux selon différentes utilisations*. Ministère de Richesses Naturelles, Quebec. 225 p.

- Reid, W., Chen, D., Goldfarb, L., Hackmann, H., Lee, Y., Mokhele, K., & Schellnhuber, H. 2010. Earth system science for global sustainability: Grand challenges. *Science*, 330(6006) pp: 916–917.
- Rice R. and Ward J. 1996. Coffee, conservation, and commerce in the Western Hemisphere (White Paper 2). Smithsonian Migratory Bird Center, Washington, DC. 51 p.
- Rice A. Robert. 2008. Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products, *Agriculture, Ecosystems & Environment*.128:212-218.
- Rodríguez, B. F. 2006. Cuencas Hidrográficas, descentralización y desarrollo regional participativo. *Revista de las Sedes Regionales [en línea]*, VII (Sin mes), 2215-2458. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66612867008>> ISSN 2215-2458.(Consulta: 25 de Junio de 2015).
- Roncal-Garcia S, Soto-Pinto L, Castellanos-Albores J, Ramirez-Marcial N, de Jong B. 2008. Agroforestry systems and carbon stocks in indigenous communities from Chiapas, Mexico.*Interciencia* 33:200–206.
- Rockström, J., Steffen W., Noone K., Persson A., Chapin S. F., Lambin F. E., Lenton M- T., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber J.H., Nykvist B., Wit A. C., Hughes T., Leeuw vVan Der S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder K.P., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell W. R., Fabry J. V., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P. y Foley A. J. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461:472-475.
- Ruíz, R. O. 1995. Agroecosistema: El término, concepto y su definición bajo el enfoque agroecológico y sistémico. II Seminario Internacional de Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 9 p.
- Ruiz R., O. 2006a. Enfoque de sistemas y agroecosistemas. En: López, *et al.*,(eds). *Agroecología y Agricultura orgánica en el Trópico*. México (UNACH). Tunja, Boyacá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Universidad Autónoma de Chiapas. pp: 27-35.
- Ruiz, R. O. 2006b. Indicadores de sustentabilidad agroecológica. En: López, B. O., Ramírez, G. S., Ramírez, G. M., Moreno, B. G. y Alvarado, G. A. E. (eds.). *Agroecología y Agricultura Orgánica en el trópico*. Universidad Autónoma de Chiapas. México, D.F. pp: 59-67.
- Ruíz, R. 2012. La cuenca hidrográfica como un sistema: Perspectivas de desarrollo. IV Coloquio Jurídico Internacional del Agua . México, D.F. <http://www.conagua.gob.mx/coloquio/> (Consulta: 20 de Junio de 2015).
- Sala, O., Chapin, F., Armesto, J., Berlow, E., & Bloomfield, J. 2000. Biodiversity – Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*. 287: 1770-1774.
- Sánchez, M. P. 2012. Evaluación de la sustentabilidad del Agroecosistema maíz en la región de Huamantla, Tlaxcala. Tesis Profesional de Doctorado en Ciencias en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional. Colegio de Postgraduados Campus Puebla, 249 p.
- Sarandon, S. J. 2000. ¿Se puede medir la sustentabilidad agrícola? *Revista Horticultura Internacional*, España, Abril 2000. 144 p.

- Sarukhán J. *et al.*, 2009. Capital natural de México. Síntesis: Conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F. 104 p.
- SEMARNAT, S. D. 2012. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales, México, D.F. 382 p.
- Smit, B., Smithers, J., 1994. Sustainable agriculture and agroecosystem health. In: Nielson, N.O. (Ed.), Proceedings of an International Workshop on Agroecosystem Health, University of Guelph, Guelph, Ontario. pp: 31–38.
- Sepúlveda, S., & Rojas, P. 2002. Elementos del desarrollo sostenible. En: Chavarria Hugo, Sepúlveda Sergio y Rojas Patricia: Competitividad Cadenas Agroalimentarias y Territorios Rurales. San José: IICA.
- Taylor, D. M. 1993. Creating a farmer sustainability index: A Malaysian case study. American Journal of Alternative Agriculture 8, núm. 4:175-184.
- Toro, P., García, A., Gómez, C. A., Perea, J., Acero, R., & Rodríguez, E. V. 2010. Evaluación de la sustentabilidad en Agroecosistemas. Revista Archivos de zootecnia, Vol. 59 (R), pp: 71-94.
- Torres, P., Cruz, C. H., Patiño, P., Escobar, J. C., & Pérez, A. 2010. Aplicación de índices de calidad de agua - ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. Ingeniería e Investigación Vol. 30 no. 3, diciembre. pp:86-95.
- Turner, I., Meyer, W., & Skole, D. 1994. Global Land-Use/Land-Cover Change: Towards an Integrated Program of Study. . *Ambio* 23 (1): 91-95.
- Tyrantia, L. 2009. Evolución y sociedad Termodinámica de la supervivencia para una sociedad a escala humana. . UAM-Iztapalapa, Juan Pablos Editor, México D. F. 368 p.
- Vandermeer, J. H. 2003 Tropical Agroecosystems 1a edición. CRS Press, United States of America. pp:1-9.
- Van Gigch, J. 1990. Teoría general de sistemas. 7ª. Reimpresión. México: Trillas. México. pp: 15-44 y 234-249.
- Vega, F.E., Infante, F., Johnson, A.J. 2015. The genus *Hypothenemus*, with emphasis on *H. hampei*, the coffee berry borer. In: Beetles, B. (Ed.), Biology and Ecology of Native and Invasive Species. Academic Press, San Diego, pp: 427–494.
- Vilaboa-Arroniz, J., Díaz-Rivera, P., Ruiz-Rosado, O., Platas-Rosado, D., González-Muñoz, S., & Juárez-Lagunes, F. 2009. Caracterización socioeconómica y tecnológica de los agroecosistemas con bovinos de doble propósito de la región del Papaloapan, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10:53-62.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*. 277: 494-499.

- Wei Xu, Julius A Mage 2001 A review of concepts and criteria for assessing agroecosystem health including a preliminary case study of southern Ontario, In *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 83:215-233.
- Wood S. K. Sebastian, Zcherr S.J. 2000. *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Agroecosystems*. International Food Policy Research Institute and World Resources Institute, Washington, D.C. USA. 125 p.
- WWF. 2016. *Living Planet Report 2016. Risk and Resilience in a New Era*. WWF International, Gland, Switzerland. http://awsassets.panda.org/downloads/lpr_living_planet_report_2016.pdf (Consulta: 5 Septiembre 2017).
- Zhou Haibo, Yi Yang, Yao Chen, Joe Zhu 2018 Data envelopment analysis application in sustainability: The origins, development and future directions, *European Journal of Operational Research*. 264: 1-16

CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO EN EL MUNICIPIO DE HUATUSCO, VERACRUZ

Resumen

Este trabajo presenta y analiza las características morfométricas y socioeconómicas de la microcuenca del Río Sonso, ubicada en el municipio de Huatusco, Veracruz; para tal efecto, se emplearon base de datos, cartas topográficas, cartas climáticas, cartas de uso de suelo y vegetación (escala 1:250000) del INEGI. Los principales parámetros morfométricos de la microcuenca fueron obtenidos con el uso del software ArcGis® versión 10.2 y en él se calcularon los principales componentes fisiográficos; destacando que la microcuenca abarca una superficie de 18.71 km² con un perímetro de 19.95 km, presenta una cota máxima de 1900 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una cota mínima de 1040 msnm, presenta una altitud media de 1368 msnm y una pendiente promedio de 26.88%. Los climas que se presentan son los semicálido húmedo del grupo C - (A)C(fm) y (A)C(m), registrando para el periodo 1907-2001 una temperatura máxima promedio de 27.9 °C correspondiente al mes de mayo, la temperatura mínima promedio corresponde al mes de enero con 9.8 °C y una precipitación promedio anual de 1937.9 mm. La altitud se encuentra de los 1040 – 1136 msnm. La microcuenca presenta dos diferentes grupos de suelos, los andosoles húmicos y acrisol ortico. El Río Sonso es la corriente superficial principal – y por ende perene-, cuenta con una longitud de 8.77 kilómetros. En relación a las características socioeconómicas el número de habitantes de la microcuenca asciende a 4362 de los cuales el 49.28% son hombres y el 50.71% mujeres, con una densidad de 296.5 habitantes km⁻² (INEGI, 2010); la población sin derechohabencia asciende al 56.6%; se cuenta con 17 escuelas de educación básica (INEGI-SEP, 2013), el índice de marginación de las siete localidades que integran a la microcuenca (Rincón Ramírez, Tlamatoca, Novillero, Michapa, Manzana dos Colonia Chicuellar, Cinco de Mayo e Ixpila) se encuentran en la clasificación alta (CONAPO, 2010).

Palabras clave: Río Sonso, microcuenca, parámetros morfométricos.

Abstract

This work presents and analyzes the morphometric and socioeconomic characteristics of the Sonso River microbasin, located in the municipality of Huatusco, Veracruz; data base, topographic charts, climatic charts, land use and vegetation charts (scale 1: 250000) of INEGI were used. The main morphometric parameters of the microbasin were obtained and physiographic components were calculated with the use of the software ArcGis® version 10.2. The watershed covers an area

of 18.71 km² with a perimeter of 19.95 km, has a maximum height of 1,900 meters above sea level (msnm) and a minimum height of 1,040 meters above sea level, has an average altitude of 1368 meters above sea level and an average slope of 26.88%. The climates are the semi-warm humid of the group C - (A) C (fm) and (A) C (m), data for the period 1907-2001 showed an average maximum temperature of 27.9 ° C for the month of May, the minimum average temperature to the month of January with 9.8 ° C and an average annual rainfall of 1937.9 mm. The altitude fluctuates from 1040 to 1136 msnm. The microbasin presents two different groups of soils, the humic andosols and Acrisol ortico. The Sonso River is the main perennial surface current, with a length of 8.77 kilometers. In relation to the socioeconomic characteristics, the number of inhabitants of the watershed are 4362, of which 49.28% are men and 50.71% are women, with a density of 296.5 inhabitants km⁻² (INEGI, 2010); 56.6% of the population lack medical services; there are 17 basic education schools (INEGI-SEP, 2013), the seven localities of the watershed, such as: Rincón Ramírez, Tlamatoca, Novillero, Michapa, Manzana dos Colonia Chicuellar, Cinco de Mayo and Ixpila are classified as highly social marginalized (CONAPO, 2010).

Key words: Sonso River, microbasin, morphometric parameters.

1.1.Descripción general

El municipio de Huatusco se ubica entre los paralelos 19° 04' y 19° 13 de latitud norte; los meridianos 96° 41' y 97° 04' de longitud oeste; la altitud sus localidades varía desde 400 hasta 2000 metros sobre el nivel del mar. Colinda al Norte con el estado de Puebla y los municipios de Totutla, Sochiapa y Comapa; al este con los municipios de Comapa y Zentla; al sur con los municipios de Zentla, Tepatlaxco, Ixhuatlán del Café y Coscomatepec; al oeste con el municipio de Coscomatepec y el estado de Puebla. La superficie total del municipio es de 202.5 km² lo que representa el 0.3 % del territorio estatal, con una densidad de 296.5 habitantes km⁻² (INEGI, 2010). En relación con la microcuenca del Río Sonso, esta se encuentra en su totalidad dentro del Municipio de Huatusco y el Río del mismo nombre atraviesa siete localidades: Rincón Ramírez, Manzana dos (Colonia Chicuellar), Tlamatoca, Novillero, Michapa, Manzana dos (Colonia Chicuellar), Cinco de Mayo e Ixpila, forma parte de la cuenca del Río Jamapa en la parte central del estado de Veracruz. Cabe señalar que Rincón Ramírez y Manzana dos forman parte de la localidad de Tlamatoca (Figura 1.1).

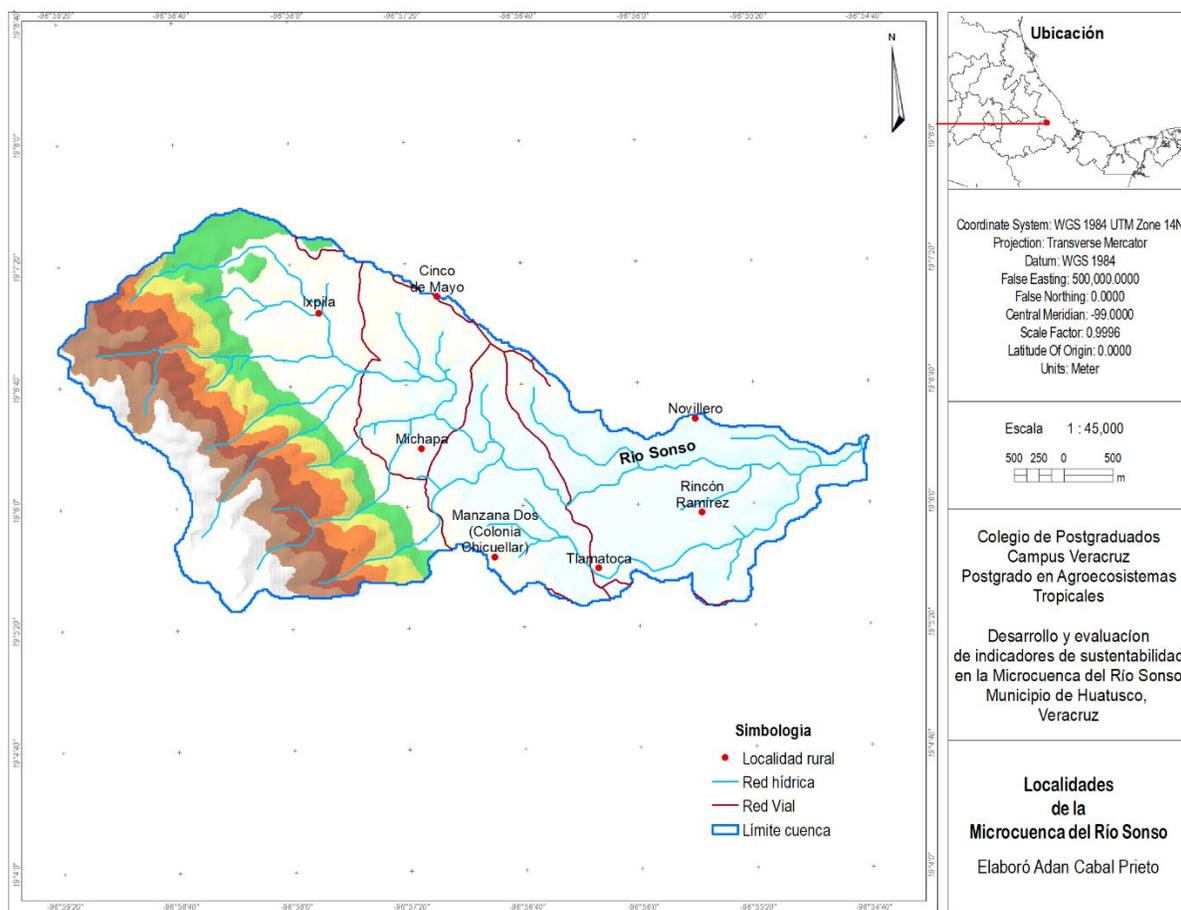


Figura 1.1. Localidades de la microcuenca del Río Sonso, Municipio Huatusco, Veracruz.

La microcuenca del Río Sonso se ubica entre las coordenadas $096^{\circ} 55' 38''$ a $096^{\circ} 57' 50''$ de longitud (ubicación de la localidad al oeste del meridiano de Greenwich) y $19^{\circ} 05' 57''$ a $19^{\circ} 07' 04''$ de latitud (ubicación de la localidad al norte del Ecuador).

Posee una superficie de 18.71 km^2 – ó 1871 hectáreas- y una altitud que va de los 1,040 msnm en la parte más baja a los 1136 msnm en las partes más altas (Cuadro 1.1). El número de habitantes de la microcuenca asciende a 4362 de los cuales el 49.28% son hombres y el 50.71% mujeres. Las localidades que representan el mayor número de habitantes son Tlamatoca e Ixpila, con 1479 y 1424 habitantes respectivamente; el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) clasifica a estas localidades por el número de habitantes como de tamaño 4 (1000 a 2499 habitantes); de acuerdo a CONAPO 2010, el grado de marginación de las siete localidades se encuentran en la clasificación alto (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.1. Identificación geográfica de las localidades que integran la microcuenca del Río Sonso.

Municipio	Clave de Localidad	Nombre de la localidad	Longitud	Latitud	Altitud
	0039	Rincón Ramírez	96° 55' 38''	19° 05' 57''	1040
	0031	Tlamatoca	96° 56' 14''	19° 05' 39''	1051
	0017	Novillero	96° 55' 40''	19° 06' 28''	1059
Huatusco	0038	Michapa	96° 57' 15''	19° 06' 19''	1079
	0086	Manzana dos	96° 56' 50''	19° 05' 43''	1110
	0073	Cinco de mayo	96° 57' 09''	19° 07' 09''	1126
	0014	Ixpila	96° 57' 50''	19° 07' 04''	1136

Fuente: INEGI 2010, Censo de población y vivienda 2010. Principales Resultados por Localidad.

Cuadro 1.2. Número de habitantes y grado de marginación para las localidades de la microcuenca del Río Sonso.

Entidad Federativa	Municipio	Localidad	Número de habitantes			Índice de marginación
			Total	Hombres	Mujeres	
		Rincón Ramírez	151	76	75	Alto
		Tlamatoca	1479	742	737	Alto
		Novillero	215	99	116	Alto
		Michapa	699	346	353	Alto
Veracruz	Huatusco	Manzana dos	104	54	50	Alto
		Cinco de Mayo	290	139	151	Alto
		Ixpila	1424	694	730	Alto
		Total	4362	2150	2212	

Fuente: INEGI 2010, Censo de población y vivienda 2010. Principales resultados por localidad.

1.2. Caracterización del medio físico

La microcuenca del Río Sonso abarca una superficie de 18.71 km² y un perímetro de 19.95 km, presenta una cota máxima de 1900 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una cota mínima de 1040 msnm, de acuerdo con datos obtenidos en las cartas topográficas del INEGI y mediante su manipulación en el programa informático ArcGis® Versión 10.2, la microcuenca presenta una

altitud media de 1368 msnm y una pendiente promedio de 26.88. En el Cuadro 1.3 se indican los principales parámetros morfométricos de la microcuenca, fueron obtenidos con el uso del software Arc Gis® versión 10.2 y en él se calcularon los principales componentes fisiográficos.

Cuadro 1.3. Parámetros morfométricos de la microcuenca del Río Sonso.

Descripción	Unidad	Valor
	De la superficie	
Área	Km	18.34
Perímetro	Km	19.95
Cota máxima	mt	1900
Cota mínima	mt	1040
	Coordenadas del centroide (WGS:1984_14N)	
X	UTM	715324.368
Y	UTM	2113969.153
Z	msnm	1368
	Altitud	
Altitud media	msnm	1368
Altitud más frecuente	msnm	1085.23
Altitud de frecuencia media	msnm	1304.34
	Pendiente	
Pendiente promedio de la cuenca	%	26.88

El Río Sonso es una corriente superficial principal – y por ende perene- de la microcuenca del mismo nombre, cuenta con una longitud de la red hídrica de 8.77 kilómetros y corresponde a una red de orden 4; de acuerdo a los datos obtenidos a través de la manipulación de datos cartográficos analizados con apoyo del software Arc Gis® versión 10.2 (Figura 1.2).

La microcuenca presenta dos diferentes grupos de suelos, los Andosoles húmicos y Acrisol ortico (Cuadro 1.4 y Figura 1.3). De acuerdo a (INEGI, 2001) el suelo del tipo Andosol húmico (Th), es un suelo de origen volcánico, ligero por su densidad aparente menor de 0.85 y color claro a oscuro, presenta una con capa superficial oscura, con buen contenido de materia orgánica, pero pobre en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na), en cambio los suelo Acrisol Órtico (Ao) es un suelo ácido de climas húmedos, con un subsuelo arcilloso muy pobre en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na) y sin ninguna otra propiedad particular; particularmente en este tipo de suelo de la microcuenca cuenta con una capa Lítica profunda (LP).

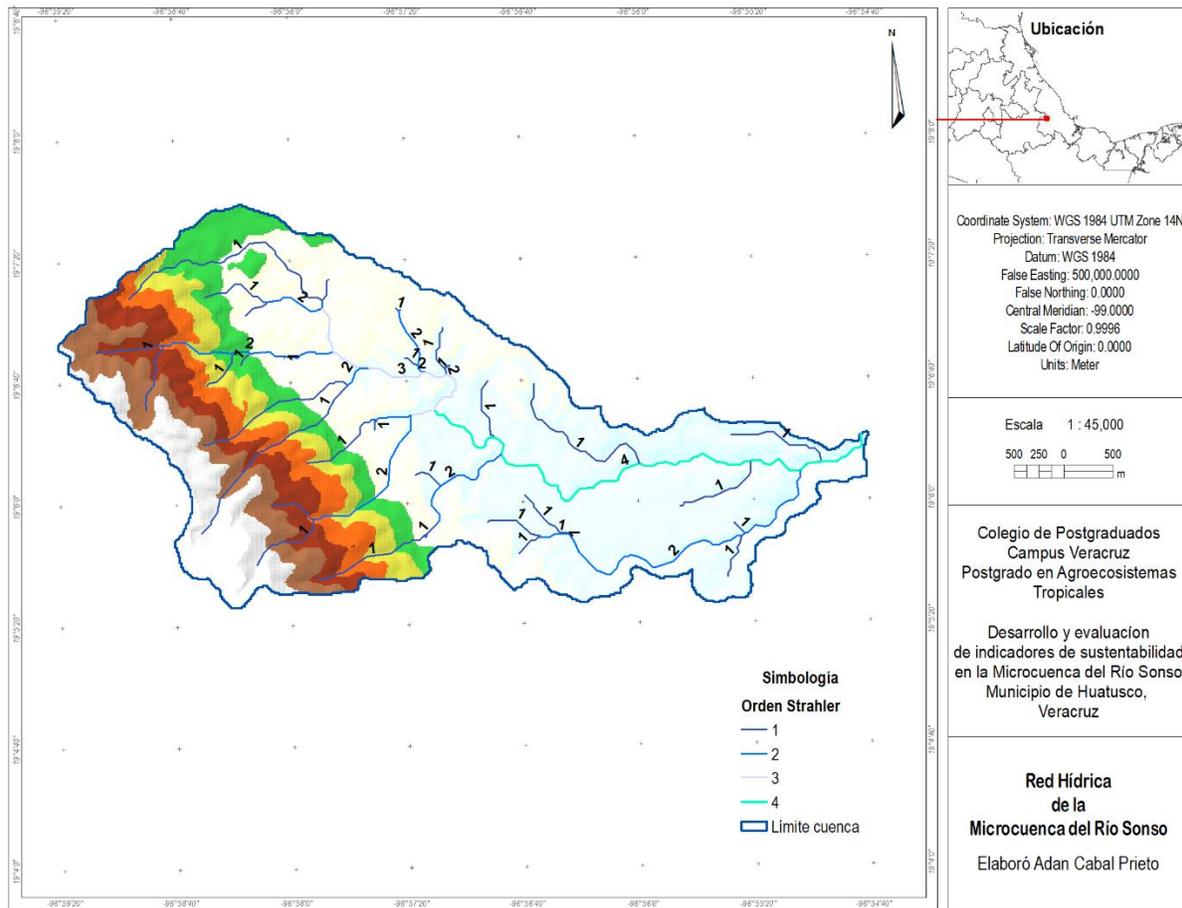


Figura 1.2. Red hídrica de la microcuenca del Río Sonso.

Cuadro 1.4. Tipos de suelo de la microcuenca del Río Sonso.

Tipo de suelo	Hectáreas	Superficie	Porcentaje
Acrisol ortico	1702.61		91
Andosol húmico	168.39		9

Fuente: Carta Edafológica 1:1000000 INIFAP-CONABIO, 1995

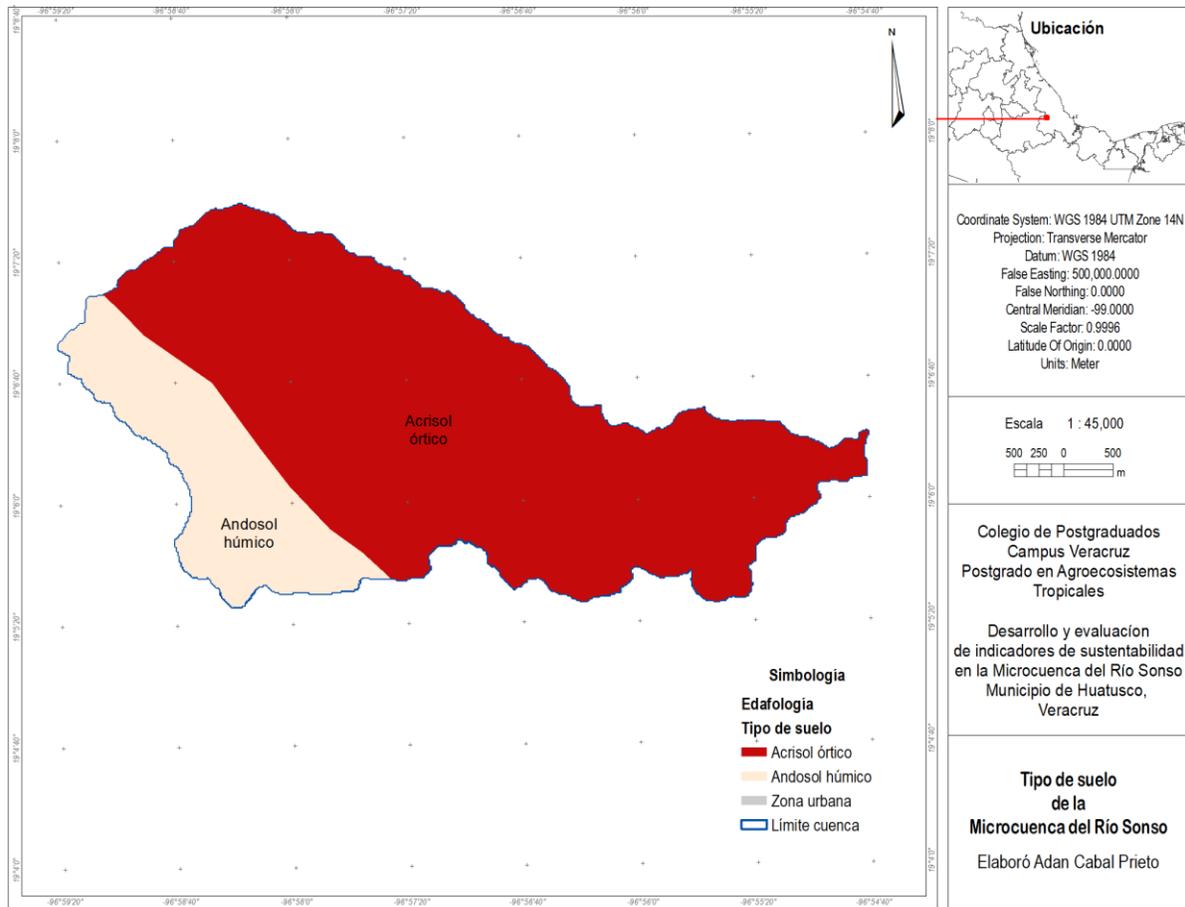


Figura 1.3. Tipo de suelo en la microcuenca del Río Sonso.

En relación al uso de suelo y vegetación y con base en la información del INEGI, se obtuvieron los conjuntos de datos espaciales a una escala de 1:250000, consultando la series I-V bajo la fuente antes mencionada se observa que la zona de estudio cuenta con tres tipos de vegetación: Bosque mesófilo de montaña, agricultura de temporal permanente y agricultura de temporal semipermanente. Los conjuntos espaciales se encuentran disponibles en vector (carta E14-3 Veracruz); con apoyo de los recursos en línea del INEGI se obtuvieron las capas vectoriales de cada serie.

El formato del conjunto de datos vectoriales es de proyección cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 14 norte con sistema geodésico de referencia NAD27. Para la obtención

precisa de los tipos de vegetación y su uso se realizó un recorte de cada serie con respecto a la zona de estudio, obteniendo la información del Cuadro 1.5.

Cuadro 1.5. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca del Río Sonso.

Año	Serie	Clave	Entidad	Tipo	Área calculada (hectáreas)
1984	I	BM	Bosque	Bosque mesófilo de montaña	643.546
		TP	Área agrícola	Temporal	799.012
		TSP	Área agrícola	Temporal	342.376
1997	II	BM	Bosque	Bosque mesófilo de montaña	530.145
		TP	Área agrícola	Temporal	858.281
		TSP	Área agrícola	Temporal	396.507
2003	III	IEFF	ECF	-	657.874
		TP	APF	Agricultura de temporal	839.972
		TSP	APF	Agricultura de temporal	287.087
2010	IV	IEFF	ECF	-	649.413
		TP	APF	Agricultura de temporal	843.904
		TSP	APF	Agricultura de temporal	291.617
2013	V	IEFF	ECF	-	635.623
		TP	APF	Agricultura de temporal	819.796
		TSP	APF	Agricultura de temporal	329.581

ECF: Ecológica-Florística-Fisonómica, APF: Agrícola-Pecuaria-Forestal

Visualmente no se logra apreciar un cambio en el uso de suelo y vegetación con este tipo de información ya que esta misma fue elaborada a una escala de 1:250000 y la zona de estudio es de un área de 1785 hectáreas, por lo que los cambios no son evidentes (Figuras 1.4 - 1.8).

La serranía de Ixpila y Tlamatoca se encuentra dentro de límites de la microcuenca del Río Sonso, el cerro de Ixpila es el más alto de la región y en el se cultiva con gran intensidad el café (Cano y Arcos, 1998).

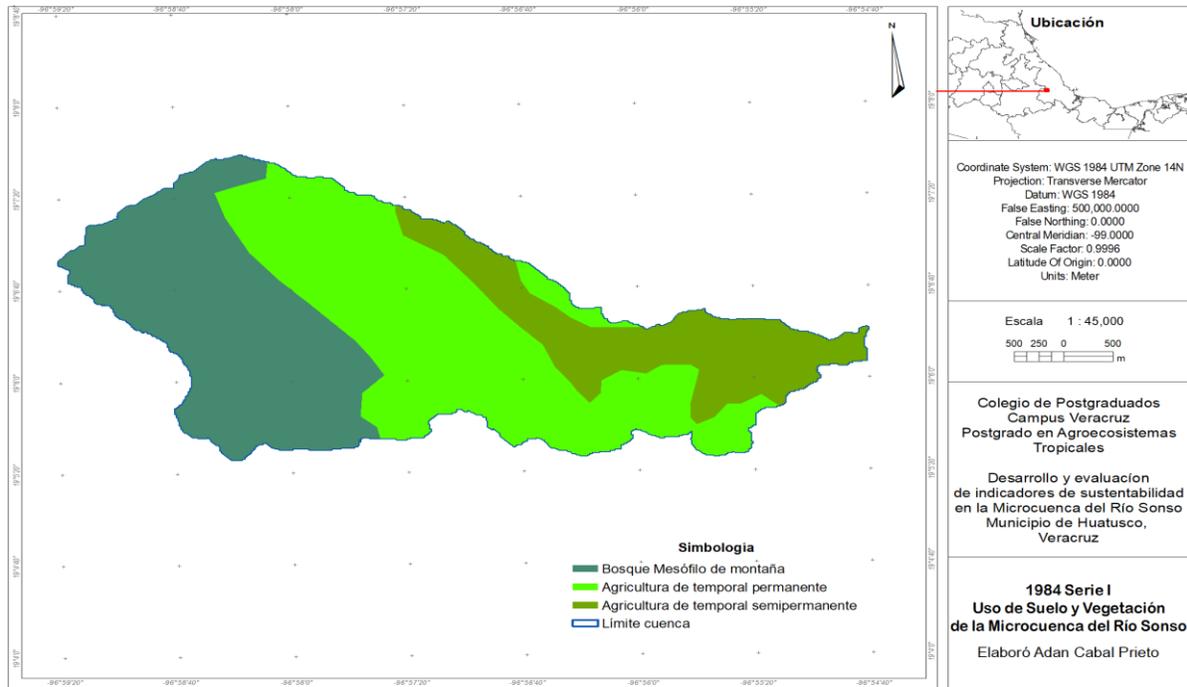


Figura 1.4. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 1984).

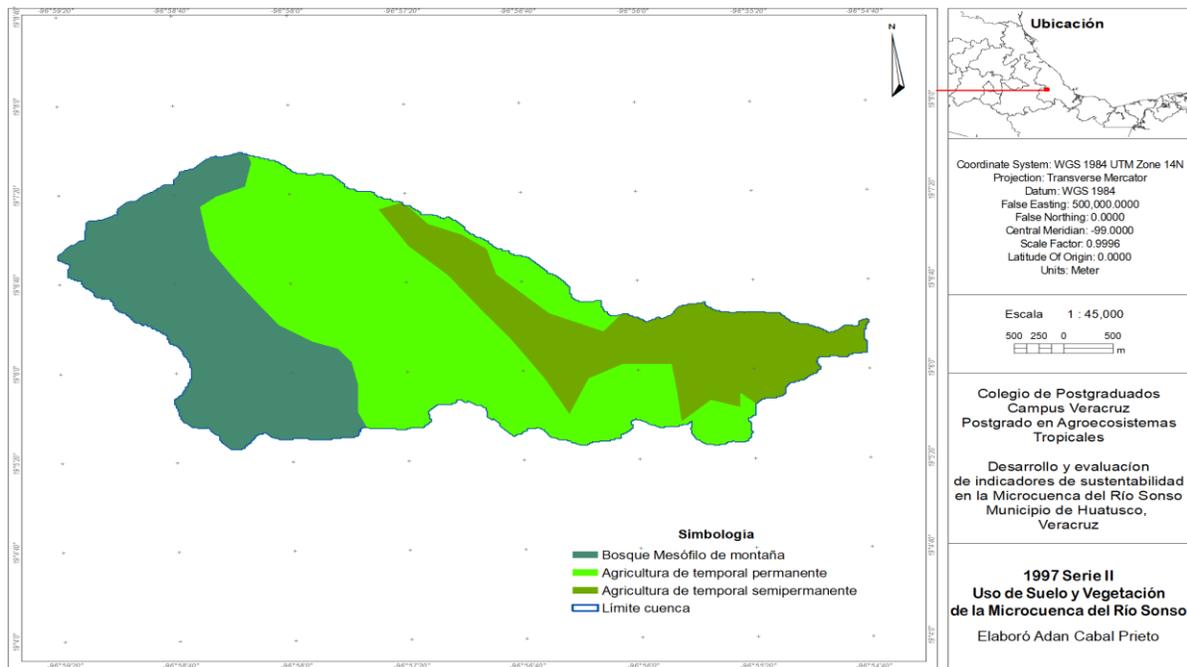


Figura 1.5. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 1997).

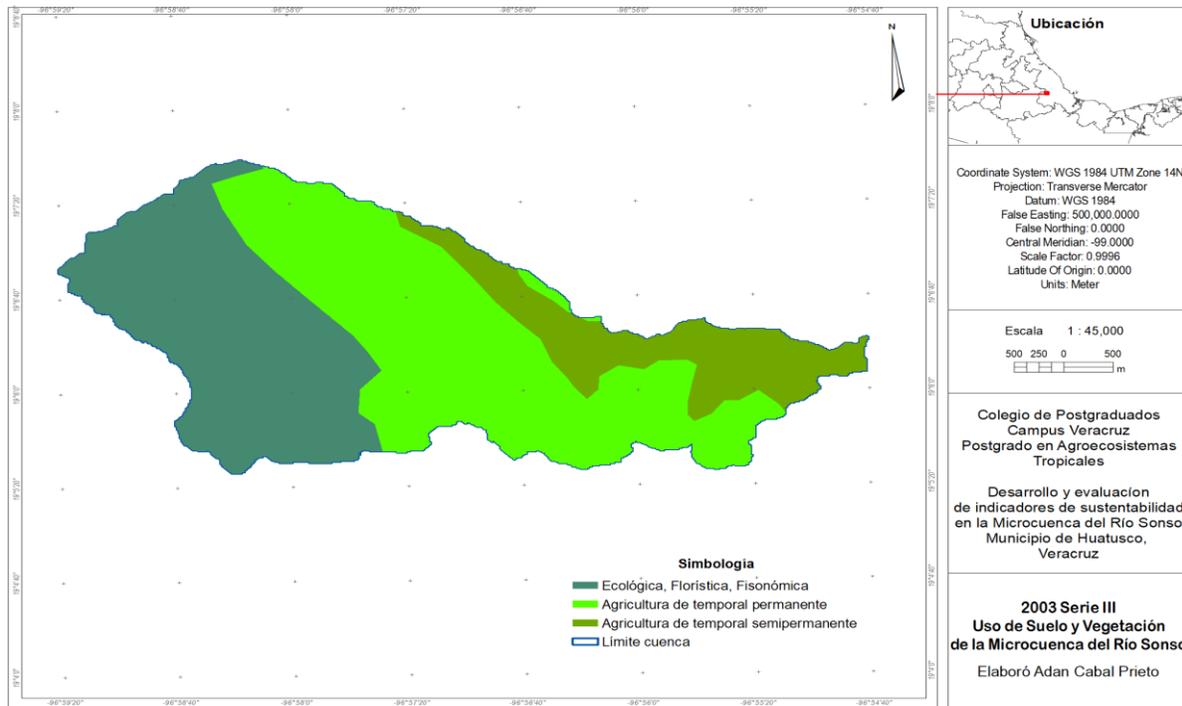


Figura 1.6. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 2003).

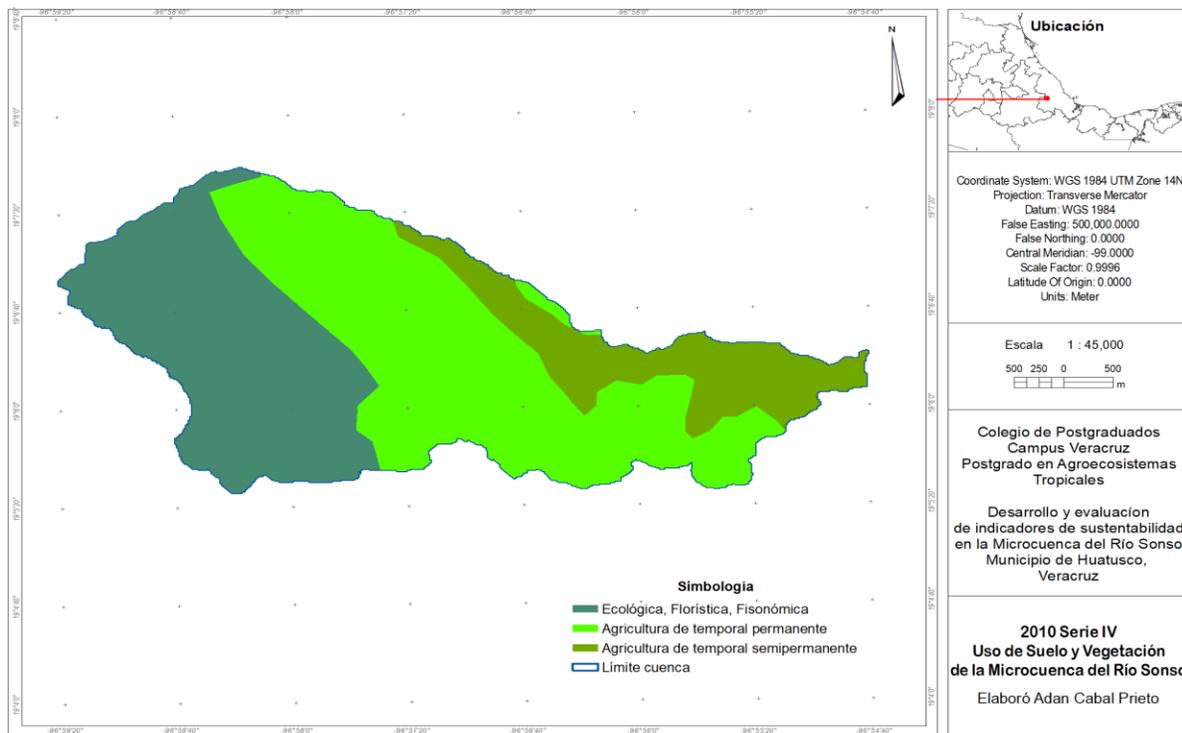


Figura 1.7. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 2010).

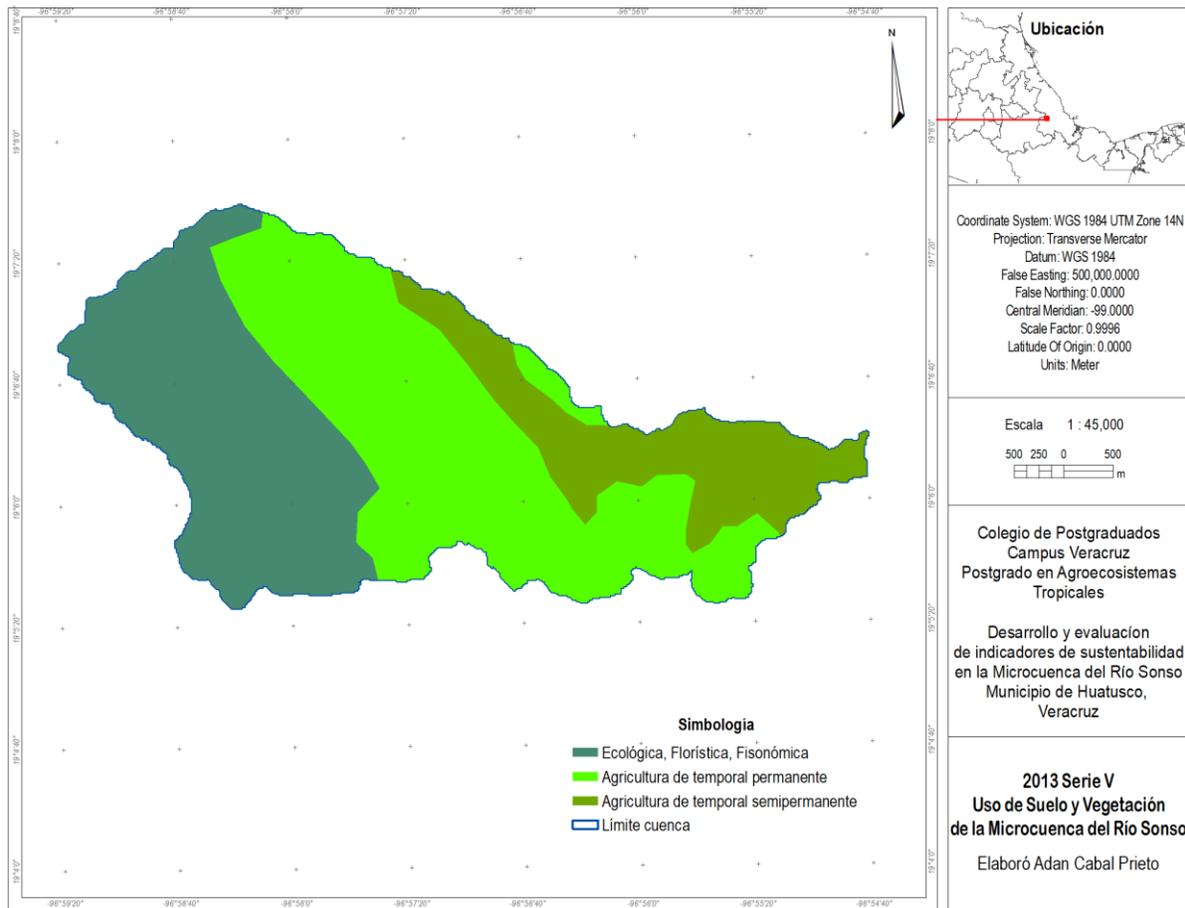


Figura 1.8. Uso de suelo y vegetación en la microcuenca del Río Sonso (año 2013).

1.3. Descripción de condiciones climáticas

En el municipio de Huatusco se encuentra localizada la estación meteorológica con clave 030066 ubicada a una altitud de 1284 msnm. Registra para el periodo 1907-2001 una temperatura máxima promedio de 27.9 °C correspondiente al mes de mayo, la temperatura mínima promedio corresponde al mes de enero con 9.8 °C y una precipitación promedio anual de 1937.9 mm (Cuadro 1.6). Los climas que se presentan son los semicálido húmedo del grupo C - (A)C(fm) y (A)C(m) - (Figura 1.9).

Cuadro 1.6. Datos históricos de temperatura y precipitación de la estación 30066 Huatusco de Chicuellar (1907-2001).

Ciudad	Huatusco	Temperatura (° C) y precipitación	
Estado	Veracruz	Temperatura máxima promedio	27.9
Estación	30066	Temperatura mínima promedio	9.8
Coordenadas geográficas		Precipitación máxima	340.4
Latitud	19.15 N	Precipitación mínima	40.8
Longitud	96.960 W	Precipitación total promedio anual	1937.9
Altitud	1284 msnm		
Periodo de observación			
Temperatura	94 años		
Precipitación	94 años		

Fuente: Sistema ERIC III, base de datos CLICOM, el banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

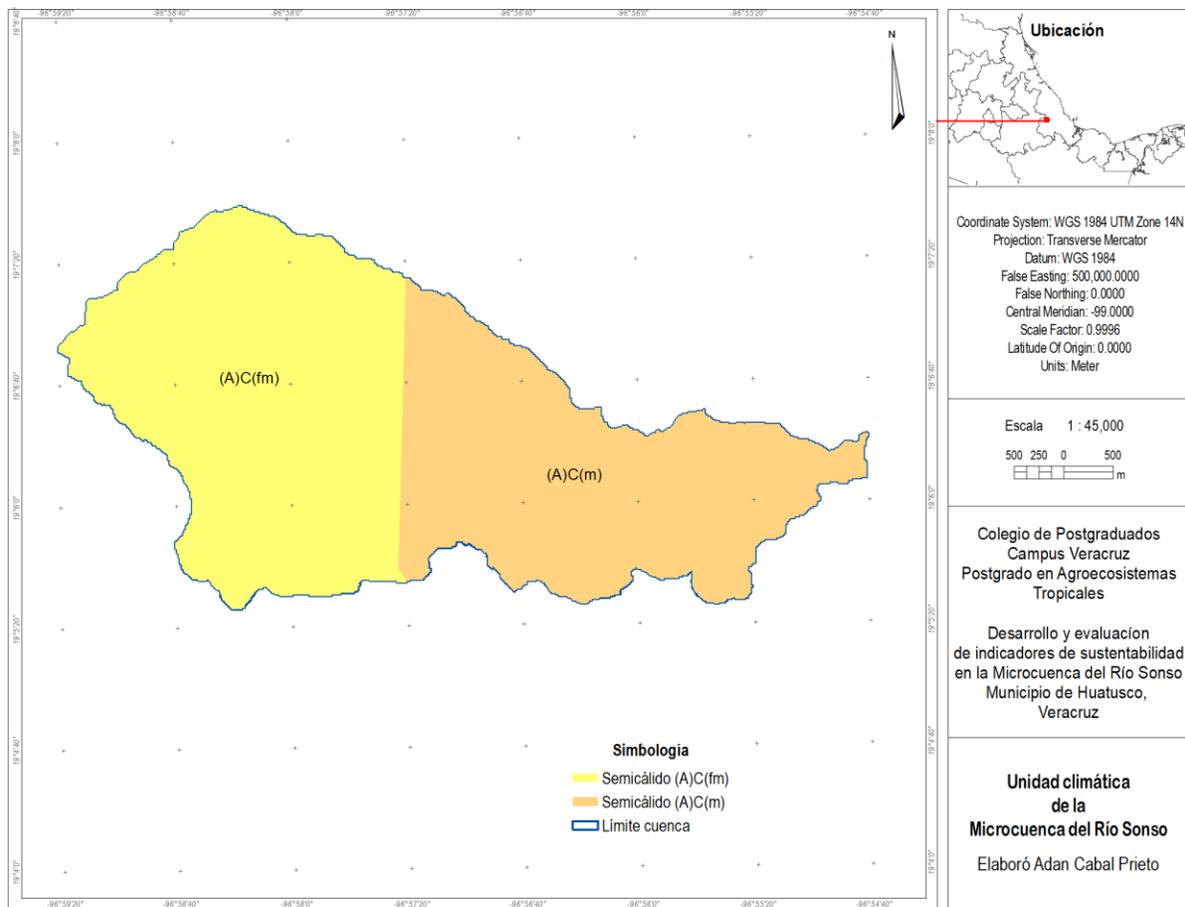


Figura 1.9. Climas presentes en la microcuenca del Río Sonso.

En la Figura 1.10 se muestra el climograma para la estación meteorológica referida, elaborada a partir de las precipitaciones y temperaturas promedio mensuales de los años 1907 a 2001.

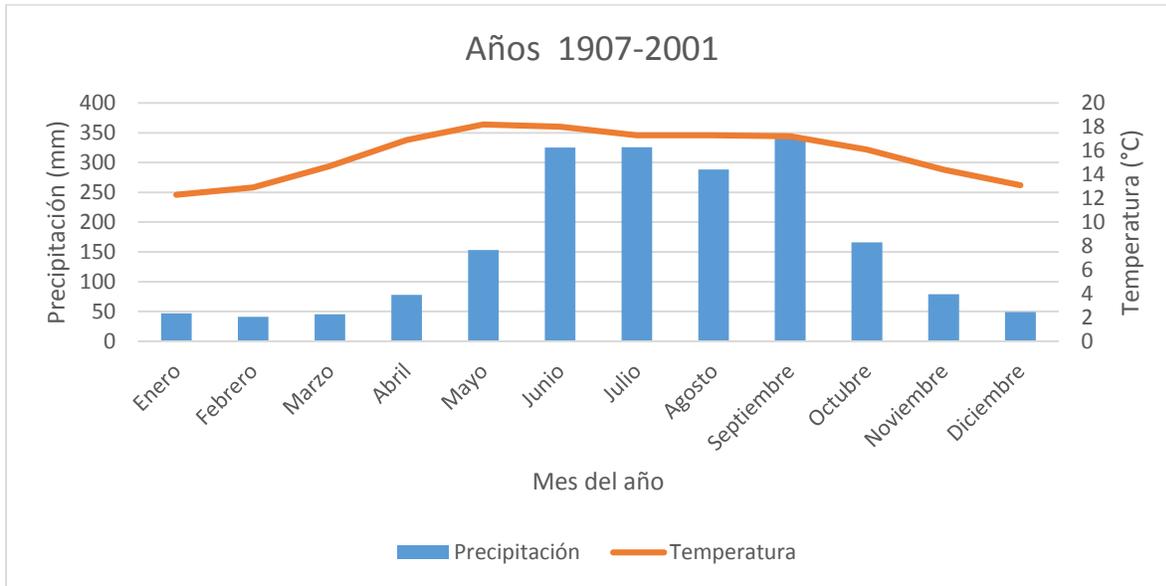


Figura 1.10. Climograma para la estación meteorológica Huatusco (1907-2001). Fuente: Sistema ERIC III, base de datos CLICOM, el banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

De acuerdo con la descripción de datos del Cuadro 1.7, obtenidos de la carta Climática 1:250,000 del INEGI, en la microcuenca se encuentran el clima semicálido húmedo con dos variaciones o características diferentes (INEGI, 2000).

Cuadro 1.7. Climas presentes en la microcuenca del Río Sonso.

Tipo de clima	Descripción
(A)C(fm)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. Precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.
(A)C(m)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18 °C, temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. Lluvias de verano, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

1.4. Caracterización socioeconómica

Atributos económicos

De acuerdo al INEGI 2010, la población de personas de 12 años o más era de 3093 habitantes, lo que representa el 70.9% de la población total que habita en la microcuenca, de estas el 32.8% corresponde a la población económicamente activa (PEA) (Cuadro 1.8).

Cuadro 1.8. Población económicamente activa en la microcuenca del Río Sonso.

Localidad	POBTOT	P_12YMAS	P_12YMAS_M	P_12YMAS_F	PEA	PEA_M	PEA_F
Rincón	151	118	55	63	46	42	4
Ramirez							
Manzana	104	81	40	41	40	33	7
dos							
Novillero	215	158	73	85	71	61	10
Cinco de	290	201	91	110	90	71	19
Mayo							
Michapa	699	494	231	263	214	177	37
Ixpila	1424	965	462	503	439	393	46
Tlamatoca	1479	1076	529	547	533	425	108
Total	4362	3093	1481	1612	1433	1202	231

Fuente: INEGI 2010.

POBTOT: Población total, P_12YMAS: Personas de 12 a 130 años de edad, P_12YMAS_M: Hombres de 12 a 130 años de edad, P_12YMAS_F: Mujeres de 12 a 130 años de edad, PEA: Población económicamente activa, PEA_M: Población masculina económicamente activa, PEA_F: Población femenina económicamente activa.

Servicios de Salud

En el Cuadro 1.9 se detalla que la población sin derechohabiencia que asciende al 56.6%, solamente el 43.4% cuenta o son derechohabientes a servicios de salud (94.7 derechohabiente del Seguro Popular o Seguro Médico para una Nueva Generación, 4.8 % derechohabiente del IMSS, 0.42% población derechohabiente del ISSSTE (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado) y 0.08% población derechohabiente del ISSSTE estatal (Institutos de seguridad social de los estados ISSSET, ISSSEMyM, ISSSTEZAC, ISSSPEA o ISSSTESON).

Cuadro 1.9. Población de la microcuenca del Río Sonso que cuenta con servicios de salud.

Localidad	POBTOT	PSINDER	PDER_SS	PDER_IMSS	PDER_ISTE	PDER_ISTEE	PDER_SEGP
Rincón Ramirez	151	128	23	5	0	0	18
Manzana dos	104	91	13	0	0	0	13
Novillero	215	17	198	0	0	0	198
Cinco de Mayo	290	50	240	10	0	0	230
Michapa	699	522	177	5	5	0	167
Ixpila	1424	418	1006	6	1	1	998
Tlamatoca	1479	1241	238	65	2	0	171
Total microcuenca	4362	2467	1895	91	8	1	1795

Fuente: INEGI 2010. POBTOT: Población Total, PSINDER: Población sin derechohabiencia a servicios de salud, PDER_SS : Población derechohabiente a servicios de salud, PDER_IMSS: Población derechohabiente del IMSS, PDER_ISTE: Población derechohabiente del ISSSTE (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado), PDER_ISTEE : Población derechohabiente del ISSSTE estatal, PDER_SEGP: Población derechohabiente del seguro popular.

Educación y alfabetismo

La microcuenca del Río Sonso cuenta con 17 escuelas de educación básica, todas son públicas (INEGI-SEP 2013). La mayoría de las escuelas se concentran en las localidades de mayor población. La matrícula en educación básica asciende a 1153 alumnos de los cuales el 79.4 % son atendidos en las localidades de Tlamatoca e Ixpila. La totalidad de la matrícula es atendida por 60 profesores (Cuadro 1.10).

Cuadro 1.10. Escuelas de educación pública básica en la microcuenca del Río Sonso.

Área geográfica	Nombre de la localidad	Centros de trabajo	Personal	Maestros	Alumnos
300710039	Rincón Ramirez	2	2	2	16
300710086	Manzana dos	2	3	3	34
300710017	Novillero	1	1	1	7
	Cinco de Mayo	0	0	0	0
300710038	Michapa	3	8	8	180
300710014	Ixpila	4	23	21	427
300710031	Tlamatoca	5	30	25	489
	Total microcuenca	17	67	60	1153

Fuente: INEGI-SEP 2013. Censo de Escuelas, Maestros y Alumnos de Educación Básica y Especial 2013.

Por otro lado, se tiene que los mayores porcentajes de la población que asiste a la escuela es para las edades de 6 a 11 años de edad (93.4% en promedio). Para la población de 3 a 5 años la asistencia a la escuela es de apenas el 38.5% en promedio, por lo que se infiere que el 61.5 % de los niños en esta edad no asisten a la educación Preescolar (Cuadro 1.11).

Cuadro 1.11. Porcentaje de la población que asiste a la escuela por grupos de edad y sexo.

Localidad	Sexo	Edad en años						
		3 a 5	6 a 11	12 a 14	15 a 17	18 a 24	25 a 29	30 o más
Rincón	Hombres	4	12	6	5	3	0	0
Ramírez	Mujeres	1	5	5	8	3	0	0
	Porcentaje	55.6	100	100	86.7	22.2	0	0
	Manzana dos	Hombres	1	7	3	2	0	0
Novillero	Mujeres	0	7	2	2	0	0	0
	Porcentaje	50	93.3	100	40	0	0	0
	Hombres	0	15	10	2	0	0	0
Cinco de mayo	Mujeres	1	16	4	8	1	0	0
	Porcentaje	9.1	96.9	82.4	58.8	4.2	0	0
	Hombres	ND	ND	ND	4	2	ND	ND
Michapa	Mujeres	ND	ND	ND	5	5	ND	ND
	Porcentaje	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Hombres	8	55	19	9	2	0	0
Ixpila	Mujeres	10	34	19	6	3	1	2
	Porcentaje	32.7	91.8	77.6	44.1	5.1	1.6	1
	Hombres	17	108	38	16	0	0	0
Ixpila	Mujeres	23	89	41	21	5	1	1
	Porcentaje	35.7	83.5	64.8	35.9	2.5	1.1	0
	Hombres	24	114	52	33	15	2	0
Ixpila	Mujeres	21	93	46	26	4	1	4
	Porcentaje	47.9	95	87.5	52.7	9.1	1.9	1

Fuente: INEGI. Censo de población y vivienda 2010. ND: No disponible.

En el Cuadro 1.12 se puede observar que a medida que aumenta la edad de la población de 15 a 64 años el porcentaje de la población que sabe leer y escribir disminuye drásticamente, por ejemplo, para el rango de edad de 65 años o más en la localidad manzana dos (Colonia Chicuellar) solamente el 28.6% sabe leer o escribir. Las localidades Rincón Ramírez y Manzana dos (Colonia Chicuellar) presentan los mayores porcentajes para su población de 8 a 14 años que sabe leer y escribir (100 % respectivamente), Ixpila presenta el 78.2 % para esta variable siendo la localidad con el porcentaje menor. El nivel de educación es “bajo” ya que solamente en promedio el 34.4 % de la población de la microcuenca de 15 a 17 años termina la secundaria, para la población de 18 a 22 años, en la localidad Novillero el 83.3 % logra terminar la secundaria y para Ixpila solamente lo logra el 40.9 % de su población (Cuadro 1.13). Además, el grado promedio de escolaridad de la población de 15 años es de apenas 3.75 años para la Localidad de Ixpila y de 6.6 para Rincón Ramírez (Cuadro 1.14).

Cuadro 1.12. Porcentaje de población de ocho años y más que sabe leer y escribir.

Localidad	Sexo	Edad en años		
		8 a 14	15 a 64	65 o más
Rincón Ramirez	Hombres	16	46	2
	Mujeres	7	49	1
	Porcentaje	100	95	42.9
Manzana dos	Hombres	8	33	1
	Mujeres	7	31	1
	Porcentaje	100	92.8	28.6
Novillero	Hombres	21	45	0
	Mujeres	16	68	1
	Porcentaje	97.4	87.6	16.7
Cinco de Mayo	Hombres	ND	ND	ND
	Mujeres	ND	ND	ND
	Porcentaje	ND	ND	ND
Michapa	Hombres	67	163	15
	Mujeres	67	193	12
	Porcentaje	92.6	88.1	65.9
Ixpila	Hombres	116	274	16
	Mujeres	110	277	9
	Porcentaje	78.2	71.7	33.3
Tlamatoca	Hombres	129	376	15
	Mujeres	112	376	10
	Porcentaje	92.3	85.2	30.9

Fuente: INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

Cuadro 1.13. Porcentaje de población de 15 años y más con al menos secundaria terminada.

Localidad	Sexo	Edad en años				
		15 a 17	18 a 22	23 a 29	30 a 59	60 o más
Rincón Ramirez	Hombres	2	6	3	5	1
	Mujeres	5	10	3	4	0
	Porcentaje	46.7	80	46.2	20	7.1
Manzana dos	Hombres	1	0	0	2	0
	Mujeres	1	7	1	1	0
	Porcentaje	20	43.8	8.3	11.1	0
Novillero	Hombres	4	4	6	6	0
	Mujeres	5	6	10	8	0
	Porcentaje	52.9	83.3	61.5	19.7	0
Cinco de Mayo	Hombres	ND	ND	ND	ND	ND
	Mujeres	ND	ND	ND	ND	ND
	Porcentaje	ND	ND	ND	ND	ND
Michapa	Hombres	5	14	21	12	6
	Mujeres	5	21	9	6	0
	Porcentaje	29.4	50	33.7	9.2	0
Ixpila	Hombres	5	19	13	6	1
	Mujeres	12	33	12	1	0
	Porcentaje	16.5	40.9	17.7	1.9	0.9
Tlamatoca	Hombres	24	51	25	19	0
	Mujeres	22	56	39	27	1
	Porcentaje	41	69.9	39.8	11.1	0.8

Fuente: INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

Cuadro 1.14. Escolaridad promedio (años) de la población de 15 años y más.

Localidad	Sexo	Promedio
Rincón Ramírez	Hombres	6.8
	Mujeres	6.4
Manzana dos	Hombres	4.8
	Mujeres	5.2
Novillero	Hombres	5.1
	Mujeres	5.8
Cinco de Mayo	Hombres	5.5
	Mujeres	5.8
Michapa	Hombres	5.4
	Mujeres	4.7
Ixpila	Hombres	3.8
	Mujeres	3.7
Tlamatoca	Hombres	5.2
	Mujeres	5.1

Fuente: INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC'S)

En el Cuadro 1.15 se muestran las tecnologías de la información y comunicación que disponen las viviendas en las viviendas de las localidades de la microcuenca (computadora, teléfono, teléfono celular e internet), los mayores porcentajes le corresponden al teléfono celular, por ejemplo, del total de viviendas en la localidad Rincón Ramírez el 57.6 % disponen de celular, en contraparte solo el 22.5 % de las viviendas de la localidad de Ixpila cuentan con esta tecnología.

Para el resto de las TIC'S los porcentajes de disposición en las viviendas en las localidades son muy bajos, para la computadora el porcentaje de disposición en las viviendas va del cero al 4.5%, mientras que la disposición de internet en las viviendas va del 0 al 1% y para el teléfono fijo oscila del 0 al 20.7%.

Cuadro 1.15. Porcentaje de viviendas que disponen de tecnologías de la información y comunicación.

Localidad	Cantidad	Computadora	Teléfono	Teléfono celular	Internet
Rincón	Número de viviendas	1	1	19	0
Ramírez	Porcentaje	3	3	57.6	0
Manzana	Número de viviendas	1	2	10	0
dos	Porcentaje	4.5	9.1	45.5	0
Novillero	Número de viviendas	0	5	10	0
	Porcentaje	0	11.4	22.7	0
Cinco de	Número de viviendas	0	11	12	0
Mayo	Porcentaje	0	ND	ND	0
Michapa	Número de viviendas	3	0	65	1
	Porcentaje	2.1	0	45.1	0.7
Ixpila	Número de viviendas	0	1	57	0
	Porcentaje	0	0.4	22.5	0
Tlamatoca	Número de viviendas	8	62	126	1
	Porcentaje	2.7	10.7	42	1

Fuente: INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

Vivienda

Los servicios de los que disponen las localidades pertenecientes a la microcuenca son agua entubada dentro de la vivienda, drenaje, servicio sanitario y electricidad; la disposición de agua entubada va del 59.1 % (Novillero) al 100% (Manzana dos Colonia Chicuellar). Manzana dos, cuenta con los cuatro servicios al 100 %. Generalmente la disposición de servicios de drenaje, servicio sanitario y electricidad en las viviendas van del 59.1 % al 100 % (Cuadro 1.16).

Cuadro 1.16. Porcentaje de viviendas que disponen de servicios.

Localidad	Cantidad	Computadora	Teléfono	Teléfono celular	Internet
Rincón	Número de viviendas	1	1	19	0
Ramírez	Porcentaje	3	3	57.6	0
Manzana	Número de viviendas	1	2	10	0
dos	Porcentaje	4.5	9.1	45.5	0
Novillero	Número de viviendas	0	5	10	0
	Porcentaje	0	11.4	22.7	0
Cinco de	Número de viviendas	0	11	22.7	0
Mayo	Porcentaje	0	ND	ND	0
Michapa	Número de viviendas	3	0	65	1
	Porcentaje	2.1	0	54.1	0.7
Ixpila	Número de viviendas	0	1	57	0
	Porcentaje	0	0.4	22.5	0
Tlamatoca	Número de viviendas	8	62	126	1
	Porcentaje	2.7	20.7	42	1

Fuente: INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

1.5. Literatura citada

- Cano Vazquez, N., y Arcos Hernandez, J. 1998). Monografía Huatusco. Monografía, 76. Huatusco, Xalapa, Veracruz, México, Editorial Graphic´s. 58 p.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2010. Base de datos Veracruz de Ignacio de la Llave: Población total, indicadores socioeconómicos, índice y grado de marginación y lugar que ocupa en los contextos nacional y estatal por localidad, 2010. http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010. (Consulta: 22 de Septiembre 2017).
- ERIC II. 1999. Extractor rápido de información climatológica de México. Vol. 2.0. CNA-IMTA (Disponible en CD).
- INEGI 2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Diccionario de datos climáticos. Aguascalientes, Aguascalientes. 53 p.
- INEGI 2010. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2010. Censo de Población y Vivienda, 2010 (Informe nacional y estatales), México. <http://www.censo2010.org.mx>. (Consulta: Enero 2016).
- INEGI 2013. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Secretaria de Educación Publica - INEGI-SEP . 2013. Censo de escuelas, maestros y alumnos de educación básica y especial. <http://www.censo.sep.gob.mx/>. (Consulta año 2017).
- INEGI 2017. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/Default.aspx>. (Consulta:enero 2017).

CAPÍTULO II. LA CALIDAD DE AGUA COMO INDICADOR DE LA SUSTENTABILIDAD EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Resumen

La preocupación internacional sobre los recursos hídricos urge que se tomen medidas de gestión fundamentadas científicamente. En este documento se describe a la cuenca hidrográfica como un sistema complejo caracterizado por las interacciones de los subsistemas biofísico, económico y sociocultural; además, se analiza la génesis, evolución, desarrollo o aplicación de los Índices de Calidad de Agua (ICA) como indicador ambiental de la sustentabilidad que pueda apoyar a la gestión hídrica requerida. Al respecto, diversas organizaciones gubernamentales, instituciones y universidades a nivel mundial, tales como: la Organización de las Naciones (ONU), la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD), el Foro Económico Mundial, la Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos (EPA), la Directiva sobre el agua de la Unión Europea, el Centro para la Red Internacional de Información sobre Ciencias de la Tierra (CIESIN) de la Universidad de Columbia, el Centro de Derecho Ambiental y Política de la Universidad de Yale entre otros, abordan al ICA como parámetro importante en los análisis de la sustentabilidad en cuencas hidrográficas de las corrientes de agua superficiales o subterráneas. Las principales diferencias en varios ICA's presentados se basan en la forma de la integración estadística y la interpretación de los valores de los parámetros; las variables más utilizadas son el oxígeno disuelto, pH, turbidez, sólidos disueltos totales, nitratos, fosfatos, metales, entre otros. Por lo tanto, el ICA es un elemento con bases científicas sólidas que coadyuva a la gestión integral de los recursos hídricos y se sugiere sea herramienta clave para apoyar estrategias para el desarrollo sustentable siendo la calidad del agua un factor principal para el bienestar de la sociedad.

Palabras clave: Índice Calidad del Agua, Sustentabilidad ambiental, Sistema complejo, cuenca hidrográfica.

Abstract

The international concern about water resources urges that scientifically based management measures be taken. This document describes the river basin as a complex system characterized by the interactions of the biophysical, economic and socio-cultural subsystems; In addition, it analyzes the genesis, evolution, development or application of the Water Quality Indexes (ICA) as an environmental sustainability indicator that can support water management strategies. In this

regard, the Organization of the Nations (UN), the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), the World Economic Forum, the Environmental Protection Agency the United States (EPA), the EU Water Directive, the Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) at Columbia University, the Center for Environmental Law and Policy at the University of Yale, among others, address ICA as an important parameter in sustainability analyzes in watersheds of surface or underground watercourses. The main differences in several ICA's presented are based on the form of the statistical integration and the interpretation of the values of the parameters; the most used variables are dissolved oxygen, pH, turbidity, total dissolved solids, nitrates, phosphates, metals, among others. Therefore, the ICA is an element with solid scientific bases that contributes to the integral management of the water resources and it is suggested as a key tool to support strategies for the sustainable development being the water quality a main factor for the welfare of the society.

Key words: Water quality index, Environmental sustainability, Complex system, hydrographic basin.

2.1. Introducción

El agua es un recurso renovable dinámico, su disponibilidad en calidad y cantidad adecuada es muy importante para la vida humana y otros fines; el agua no es sólo el espejo del medio ambiente, sino que también refleja a la sociedad que la rodea y ahí se acumulan todos los "pecados" de la humanidad, Sarala y Uma (2013); se considera que la calidad del agua es un factor importante para juzgar los cambios del medio ambiente que están fuertemente asociados al desarrollo económico y social (Darapu, *et al.*, 2011).

El agua es un recurso natural valioso, los recursos hídricos superficiales son limitados; el crecimiento exponencial de la población y la demanda resultante de agua requieren una cuidadosa planificación de la gestión de los recursos hídricos disponibles. La urbanización, la industrialización, la mala gestión de la tierra y la contaminación del medio ambiente han impuesto presión sobre este recurso (Suresha y Nagesh, 2015).

La rápida urbanización y el crecimiento industrial se han traducido en continua demanda del consumo del vital líquido por un lado y en el aumento de aguas residuales domésticas sin tratamiento, los residuos sólidos y efluentes industriales que se vierten a los ríos, por el otro lado;

de aquí que los niveles de contaminación ya comprometen la salud pública y los medios de vida de las familias pobres o vulnerables (DGWR, 2007).

A consecuencia de enfermedades relacionadas con el agua, en los países en desarrollo mueren alrededor de 1.8 millones de personas cada año a causa de enfermedades diarreicas (incluido el cólera); el 90 % son niños menores de 5 años; el 88% de las enfermedades diarreicas se atribuye al abastecimiento de agua insalubre, el saneamiento inadecuado y la higiene, como lo reporta la Organización Mundial para la Salud (WHO por sus siglas en inglés) desde el año 2004. La evaluación de la calidad y disponibilidad de agua en los países en desarrollo se ha convertido en un asunto crítico en los últimos años, sobre todo debido a la preocupación de que el agua dulce será escasa en un futuro próximo (Darapu, *et al.*, 2011).

De los recursos naturales, el agua es indiscutiblemente esencial y valioso, fundamental en las civilizaciones, siendo testigo de la historia de la humanidad. El interés primordial del agua ha sido la cantidad, y es hasta las últimas tres décadas del siglo XX que surge la preocupación de la importancia de su calidad; sin embargo, expresar la calidad del agua es más difícil que expresar su cantidad, ya que la calidad del agua es un atributo de múltiples parámetros: físicos, químicos y biológicos (Sarkar y Abbasi, 2006).

Las cuencas hidrográficas son altamente vulnerables a la contaminación debido a la absorción y el transporte de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas; por lo tanto, es importante monitorear la calidad del agua para determinar controles de la contaminación (Simeonov *et al.*, 2003; Simeonova *et al.*, 2003). La mayoría de las actividades humanas que se realizan en la cuenca afectan la calidad de agua, directamente a través de la descarga de aguas residuales o indirectamente a través del cambio del uso del suelo, Tsegaye *et al.*, (2006); la contaminación del agua no sólo afecta a la calidad, también amenaza a la salud humana, el desarrollo económico, y la prosperidad social (Milovanovic, 2007). Cuando existe deterioro en la calidad de agua causada por las actividades humanas en las zonas de aguas arriba se reduce la capacidad de uso de los recursos para los interesados en las zonas de aguas abajo (Ali, 2010).

El uso sustentable del agua se ve afectada por la contaminación de fuentes puntuales y fuentes difusas (Wang y Choi, 2005), por lo que los análisis de variación espacio-temporal de la calidad del agua y la identificación de las fuentes de contaminación en las cuencas y los ríos es muy importante para la protección de los recursos hídricos y la utilización sustentable, Xua *et al.*, (2012).

Debido a las condiciones generales de la calidad del agua ya sea superficial o subterránea, es difícil explicarla con algunos parámetros debido a la variabilidad espacial de múltiples contaminantes; por lo tanto, existe una amplia gama de indicadores que pueden ser evaluados y otros pueden ser adoptadas en el futuro, Shabbir y Saeed (2015); sin embargo, la calidad del agua se define socialmente en función de su uso previsto o deseado. Diferentes estándares de calidad del agua se establecen para diferentes usos, y estas normas se mantienen a través de un continuo monitoreo de la calidad que es el paso más importante en la gestión de los recursos hídricos, no sólo para la existencia humana, sino también para la integridad de los ecosistemas en su conjunto (Shabbir y Saeed, 2015).

En esta revisión se abordan elementos que consideran a la cuenca hidrográfica como un sistema, en el cual el agua es su elemento integrador, se argumenta la necesidad de considerar al ICA como un indicador ambiental de la sustentabilidad a ese nivel jerárquico, considerando la génesis, evolución y desarrollo del Índice de Calidad del agua (ICA) y su aplicación.

2.1.1. La cuenca hidrográfica como sistema

Un sistema es un conjunto de elementos en interacción dinámica, organizados en función de un objetivo; la cuenca como territorio, constituye un sistema complejo, debido a que contiene una variedad de componentes, niveles jerárquicos y una alta intensidad de interconexiones; es un sistema dinámico, interrelacionado, gobernado por procesos de retroalimentación, auto-organizado, adaptativo y dependiente de su historia (Moreno y Renner, 2007).

Ruiz (2012) menciona que “la cuenca hidrológica puede ser considerada como un sistema y todo sistema posee estructura, función y objetivos. La estructura está integrada por el paisaje agrícola, el paisaje no-agrícola y la infraestructura. La interacción de los elementos de esa estructura da como resultado que se tenga la función de la cuenca, y así lograr los objetivos de la misma”. La “cuenca constituye una unidad de análisis indispensable para identificar y evaluar los elementos naturales y antropogénicos, así como las acciones y tendencias que determinan la calidad y disponibilidad del recurso hídrico y por ende las oportunidades de un aprovechamiento permanente, base del desarrollo sustentable” (Rodríguez, 2006).

A la cuenca se le puede considerar como un sistema complejo compuesto por las interacciones de los subsistemas biofísico, económico y sociocultural. En este sistema abierto existen influencias y dependencias entre y hacia los elementos de los subsistemas, lo cual se manifiesta en una dinámica de comportamiento que es compleja y que obliga a analizarla en forma integral. El enfoque

sistémico facilita un mejor conocimiento de la estructura, función y objetivos de la cuenca en términos de definir sus elementos y las relaciones entre ellos.

Al considerar al componente social como aquel que modifica, transforma y altera la cuenca hidrográfica, para aprovechar sus bienes y servicios, la problemática ambiental se torna compleja; ante este escenario Maass (2004) menciona que “es difícil lidiar con tal complejidad sin caer, por un lado, en las propuestas simplistas condenadas al fracaso ante la imposibilidad de considerar tantos factores involucrados, o por otro lado, en el inmovilismo, consecuencia del miedo a tomar decisiones ante la abrumadora incertidumbre que genera tal complejidad”. Es en las cuencas en donde se integran los sistemas biofísicos, socioculturales, económicos y político-administrativos. Los distintos componentes de la cuenca interactúan entre sí, formando un gran sistema complejo (Sepúlveda y Rojas, 2002 y Jouravlev, 2003); las cuencas hidrográficas constituyen un espacio territorial idóneo para impulsar políticas orientadas hacia la sustentabilidad con dinámicas descentralizadoras y participativas; las cuencas como territorios tienen una historia referida a la ocupación y uso de sus ecosistemas, lo cual hace que los pobladores desarrollen una identidad; es decir, un sentido de pertenencia y lealtad hacia el territorio que habitan, Rodríguez (2006). Siendo un sistema se puede y debe conocer cada uno de sus elementos para contribuir a un mejor funcionamiento o interacción con otros elementos del sistema.

2.1.2. El ICA como indicador de la sustentabilidad a nivel cuenca.

Durante generaciones, el mundo parecía tan grande como para ser inagotable, pero entre el crecimiento de la población y la escala con la que la ciencia y la tecnología han multiplicado los impactos, los límites planetarios de repente parecen muy cerca o ya han sido superados, Moldan *et al.*, (2012). Existe una necesidad de que los indicadores de sustentabilidad capten la dinámica de los cambios y sus tendencias, es necesario capturar la interacción dinámica entre los diferentes procesos, sectores ambientales, tendencias sociales y económicas. Pues, como lo comenta Dahlv (2012), ninguna parte del sistema terrestre existe en aislamiento, y la toma de decisiones debe enfocarse a conservar, mantener o mejorar la sustentabilidad a diferentes niveles jerárquicos. Y es conveniente tomar en cuenta a Carabias y Landa (2005), que menciona que uno de los mayores retos a los que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI es el de tener acceso a suficiente agua limpia, el agua se está convirtiendo, en muchas regiones del mundo, en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y su biodiversidad, e incluso para la estabilidad social y política.

La Conferencia sobre Medio Ambiente de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) realizada en Estocolmo en 1972, figura como el antecedente a la formulación del concepto de Desarrollo Sustentable, Pierre (2005), la Comisión Brundtland definió el desarrollo sustentable como “un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de los recursos para satisfacer las necesidades de las generaciones futuras”, WCED (1987); Harlem y Khalid (1988); Arias (2003); Bifani (2007). A menudo, el desarrollo sustentable ha sido interpretado como un desarrollo social y económico, pero también debería ser sustentable desde el punto de vista ambiental, Comisión Brundtland (1987). En los últimos años se ha reconocido que la sustentabilidad ambiental tiene sus propios méritos como concepto de importancia, Dahl, (2012); Moldan *et al.*, (2012), por lo que el desarrollo sustentable se ve influenciado por tres aspectos principales: medioambientales, económicos y sociales (Litman, 2008; Tanguay *et al.*, 2010).

El desarrollo sustentable se ha convertido en una preocupación importante para los formuladores de políticas y planificadores, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, desde la publicación de "Nuestro futuro común" por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de Brundtland, 1987" (Quaddus y Siddique, 2001). Después de dos décadas del informe "Nuestro futuro común", el término sustentabilidad, se ha incorporado en las agendas de diversos actores tanto del ámbito público como privado, en la política como en la academia, en las organizaciones no gubernamentales (ONG's) para diversos actores del sector social, Astier y Hollands (2005). Por lo tanto, es menester considerar que la sustentabilidad es un concepto complejo, controversial, multidimensional y en evolución, a partir del cual se evidencia la necesidad imprescindible de un proceso de transformación estructural, que permita integrar desarrollo con medioambiente, y a la vez economía con ecología. La necesidad de este proceso de transformación se deriva del inadecuado y a veces irresponsable uso de los recursos por el hombre, generado por el cambio social global debido al aumento de la población, el crecimiento económico, el avance tecnológico y la pobreza.

La preocupante insostenibilidad del actual modelo de desarrollo ha generado la toma de conciencia junto con la necesidad de investigar sobre cómo evaluar y medir el estado de sustentabilidad de cada modelo de desarrollo y producción a distintas escalas, con el propósito final de implementar técnicas o tecnologías que mejoren o minimicen el impacto ambiental, FMAM (2000). En otras palabras, existe la necesidad de transformar el concepto de sustentabilidad en definiciones y

estrategias operativas que puedan ser utilizadas para evaluar el impacto de distintas acciones en la sustentabilidad de los sistemas, López *et al.*, (2005); para lograr avanzar, es necesario que la complejidad y la multidimensionalidad de la sustentabilidad sean simplificadas en valores claros conocidos como indicadores (Sarandón, 2012).

Los indicadores son ampliamente utilizados para evaluar el progreso de los proyectos, las políticas, metas y objetivos establecidos, Jain y Tiwari (2017). La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define a los indicadores como medidas estadísticas de sustentabilidad social, ambiental y económica, Haghshenas y Vaziri (2012). Inclusive la Agenda 21 hace hincapié en el papel de los indicadores del desarrollo sustentable en la toma de decisiones; en el capítulo 40 establece que "es necesario desarrollar indicadores del desarrollo sustentable para proporcionar bases sólidas para la toma de decisiones en todos los niveles y contribuir a la sustentabilidad autorreguladora de los sistemas integrados del medio ambiente y desarrollo", ONU (1992). Los indicadores ayudan a evaluar, simplificar, estudiar tendencias, comunicar problemas, comparar lugares y situaciones (Boyko *et al.*, 2012).

La comunicación es la función principal de los indicadores y estos deben permitir o promover el intercambio de información sobre el tema que abordan, además los indicadores siempre simplifican una realidad compleja. Los indicadores ambientales proporcionan información sobre fenómenos que se consideran típicos y / o críticos para la calidad ambiental, deben constituirse en un parámetro de fácil comprensión que describan la integridad ambiental o la condición de presión o deterioro de un elemento del ambiente (agua, aire, suelo), Smeets y Weterings (1999), los indicadores de presión permiten describir las presiones antropogénicas. Y como indica Olafson *et al.*, (2014) un índice de sustentabilidad medioambiental podría estructurarse para incluir los seis subíndices siguientes: Calidad de agua y contaminación, calidad del aire y contaminación, intensidad del uso de la tierra, agricultura y pesca, biodiversidad, los bosques y la degradación del suelo.

La OCDE ha explorado indicadores que abarcan un amplio espectro de factores ambientales, entre ellos el cambio climático, la contaminación atmosférica, la calidad del agua, la eliminación de desechos, el uso de materiales y los recursos naturales, OCDE (2002); OCDE (2003), en relación a estos indicadores la humanidad pronto podría acercarse a los límites del uso global de agua dulce, el cambio en el uso de la tierra, la acidificación del océano y la interferencia con el ciclo global

del fósforo; cambio climático, tasa de pérdida de biodiversidad e interferencia con el ciclo del nitrógeno ya han transgredido sus límites (Moldan *et al.*, 2012).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) define una cuenca sana como aquella en la que "la cobertura de la tierra natural apoya los procesos hidrológicos y geomórficos dinámicos dentro de su rango natural de variación; el hábitat de tamaño y conectividad suficientes para contribuir con el desarrollo de las especies acuáticas y ribereñas nativas y la calidad del agua apoya comunidades biológicas saludables, US EPA (2012); esta definición abarca seis atributos: Condición del paisaje, hábitat, hidrología, geomorfología, calidad del agua y la condición biológica (EPA, 2014).

La mejor manera de evaluar la integridad de los recursos hídricos es evaluar el grado en que las aguas proporcionan usos benéficos. Los usos importantes definidos por la sociedad pueden incluir el suministro de agua, recreación y otros usos, así como la preservación de opciones futuras para el uso del recurso (Karr, 1981).

La importancia del ICA es apreciado en los recursos hídricos ya que desempeñan un papel importante en el medio ambiente, además este índice ha sido reconocido como uno de los 25 indicadores del Índice Global de Desempeño Ambiental (EPI). El EPI se basa en categorías de políticas bien establecidas que cubren la salud pública ambiental y la vitalidad de los ecosistemas que se centran en el cambio climático, la calidad y cantidad de agua, la contaminación del aire, la biodiversidad, los cambios de uso del suelo, la deforestación y la sustentabilidad de la agricultura y la pesca, EPI (2010).

En sus reportes anuales sobre los riesgos globales, el Foro Económico Mundial introdujo, desde el año 2011, la categoría ambiental está dentro de las cinco de mayor impacto al lado de las categorías económica, geopolítica, social y tecnológica, Celaya *et al.*, (2017). En la actualidad, los temas de agua, de energía y de biodiversidad son prioritarios a nivel global (WEF, 2017).

La Huella de Agua (HA) es un indicador relativamente nuevo que cuantifica el uso del agua dulce como factor de producción, Hoekstra (2003), se integra de tres componentes representados por colores según el uso/fuente del agua, Hoekstra *et al.*, (2011). El agua verde es el agua de lluvia almacenada como humedad del suelo. La huella de agua verde es el volumen de agua verde consumida durante el proceso de producción, especialmente en la evapotranspiración de cultivos. El agua azul es la superficial y el agua subterránea, y la huella del agua azul es la cantidad de agua proveniente de estos recursos naturales. La huella de agua gris es un indicador de contaminación

de agua dulce. Por lo tanto, la HA no sólo mide la cantidad de recursos hídricos utilizados, como la mayoría de los indicadores antes mencionados, Monzonís *et al.*, (2015), sino que también toma en cuenta el agua verde y la contaminación (Lovarelli *et al.*, 2016).

El agua dulce es un recurso natural clave para el desarrollo de la actividad humana, ya que es esencial para la supervivencia y el bienestar humano; el agua es un factor de producción en la mayoría de los sectores económicos, así como un activo ambiental y social, Martínez *et al.*, (2014). De hecho, el acceso a agua limpia y saneamiento es un derecho humano en sí mismo (ONU, 2010). La Comisión Europea a través de la Directiva marco sobre el agua, reconoce la necesidad y el valor de la vigilancia biológica, Clarke *et al.*, (2003); siendo un requisito cada vez mayor, tanto en Europa como en todo el mundo, el evaluar la calidad de los ríos, que están sometidos a presiones conflictivas debido a las demandas de agua para consumo humano y las necesidades de la biota de agua dulce, Boon y Howell (1997). Siempre habrá una necesidad de monitorear la calidad del agua de los ríos a través de un programa integral de evaluaciones químicas, especialmente cuando el agua se extrae para fines de consumo (Clarke *et al.*, 2003).

Con el fin de promover prácticas sustentables, la evaluación de las cuencas hidrográficas en el contexto de la salud humana y de los ecosistemas es un tema de gran interés tanto para los hidrólogos como para los ecologistas, Hoque *et al.*, (2012). Los datos de calidad del agua recolectados de la red de riego suelen servir como base para esta evaluación ya que se han establecido concentraciones umbrales aceptables para varios constituyentes dependiendo de su impacto en el ecosistema, US EPA (2006). Un método para evaluar la salud de las cuencas hidrográficas se desarrolla empleando medidas de fiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad, Hoque *et al.*, (2012). El método potencial para evaluar la salud de las cuencas hidrográficas con respecto a la calidad del agua fue propuesto por (Hoque *et al.*, 2012.)

El Índice de Sustentabilidad de las Cuencas Hidrográficas (HELP), es un indicador integrado basado en la condición de Hidrología, Medio Ambiente, Vida y Política; el indicador de hidrología contiene dos conjuntos de subindicadores: cantidad de agua y calidad de agua, IHE-UNESCO (2001). HELP está creando un nuevo enfoque para la gestión integrada de cuencas mediante la creación de un marco para la gestión de cuencas bajo tres indicadores: Presión, estado y respuesta (PER). La estructura del enfoque PER incorpora relaciones causa-efecto y, por lo tanto, proporciona una comprensión más amplia de la cuenca que un índice que sólo examina al Estado, Firdaus *et al.*, (2014). El índice HELP fue establecido por la UNESCO en 1999 y se ha aplicado

en cuencas hidrográficas en varios países, como la cuenca de Murrumbidgee en Australia, Khan (2004), la cuenca del Río Verdadero en Brasil, Chaves y Alipas (2007), la cuenca del Río Elqui en Chile, Cortés *et al.*, (2012) y la cuenca de Batang Merao en Indonesia (Firdaus *et al.*, 2014).

Debido a que la gestión sustentable de las cuencas hidrográficas es un desafío central en el contexto del desarrollo sustentable, Swami y Kulkarni (2011), su gestión debe garantizar la seguridad alimentaria y humana y proteger el medio ambiente de las consecuencias negativas, como la degradación de los ecosistemas, la contaminación y el cambio climático (Firdaus *et al.*, 2014).

Aunque el agua se renueva por el ciclo natural del ciclo hidrológico, en algunas regiones esta renovación es menor que las extracciones de agua y / o la contaminación es tan alta que dificulta su uso en el futuro, Pophare *et al.*, (2014). Para salvaguardar la cantidad y calidad de los recursos hídricos para las generaciones futuras, es necesario estudiar y medir cómo el uso actual de los recursos hídricos puede afectar su disponibilidad en el futuro (Pellicer y Martinez, 2016).

Los hidrólogos y los ecólogos están cada vez más conscientes de la importancia de la cuantificación del riesgo para evaluar la salud de las redes de caudales y, por extensión, la cuenca hidrográfica en términos de datos de la calidad del agua. La red de corrientes dentro de una cuenca puede ser vista como un sistema con medidas de cantidad y calidad de agua alineadas a lo largo de la red. Cuando la concentración de un constituyente de la calidad del agua en una ubicación de la corriente no se encuentra bajo la norma especificada para dicho constituyente, el sistema puede ser visto en un estado fallido con respecto a ese componente particular y en ese momento particular (Hoque *et al.*, 2012).

Por citar algunos ejemplos, en el análisis de los indicadores de fiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad realizado por Hoque *et al.*, (2012), revelaron que la salud de la cuenca del Cedar Creek ubicada en Indiana, EE.UU. está en buenas condiciones en general para atrazina, alaclor, amoniaco y fósforo total basado en datos de calidad de agua; sin embargo, se encontró que la cuenca hidrográfica era susceptible a no cumplir con los estándares en sedimentos.

En las cuencas Mae Raem y Mae Sa, provincia de Chiang Mai analizaron la sustentabilidad ambiental de los patrones de uso de la tierra agrícola de las tierras altas; los indicadores ambientales utilizados fueron la fertilidad del suelo, los productos químicos utilizados en los cultivos y la calidad del agua. Las cuencas Mae Raem y Mae Sa, provincia de Chiang Mai tienen problemas de invasión, destrucción de los recursos naturales y el medio ambiente. La remoción del área forestal daña la cuenca y afecta la calidad y cantidad del uso del agua en la agricultura. Los parámetros

para evaluar la calidad del agua fueron Nitratos y la demanda bioquímica de oxígeno (Charnsungnern y Tantanasarit, 2017).

Roboredo *et al.*, (2017), construyeron un índice de la sustentabilidad socioambiental para una cuenca hidrográfica al sur del Amazonas en el cual consideran indicadores de calidad de suelo, variables socioeconómicas y de organización social, vegetación e indicadores de calidad del agua a través de los parámetros oxígeno disuelto, pH, amoníaco, fosfato total, biomasa de algas y la percepción de los agricultores sobre la calidad de agua de los ríos y los arroyos.

Los indicadores utilizados en la evaluación de un territorio determinado pueden ser convertidos en un índice, resumiendo el marco ambiental del área estudiada, Barrientos (2006); Sepúlveda (2008). El índice utilizado para evaluar el desarrollo sustentable debe monitorearse en una escala de tiempo determinada para verificar si los indicadores mejoran, permanecen inalterados o empeoran (Sepúlveda, 2008; Astier *et al.*, 2008).

La cuenca enfrenta muchos problemas que dificultan su sustentabilidad, como la degradación de la tierra, la contaminación del agua, la escasez de agua y varias presiones socioeconómicas. La degradación de los recursos forestales, terrestres y hídricos y las presiones demográficas han llevado a una reducción a largo plazo de la sustentabilidad de las cuencas hidrográficas, que puede ser el mayor obstáculo para el manejo sustentable de las cuencas hidrográficas en la mayoría de los países en desarrollo en los trópicos húmedos (Firdaus *et al.*, 2014).

Los seres humanos también contribuyen como uno de los principales impulsores de los cambios en la hidrología y procesos de las cuencas hidrológicas, Tomer y Schilling (2009) que conducen a una menor disponibilidad de diferentes productos y servicios ecológicos, Mohsen (1999). En un estudio realizado sobre la percepción de los beneficios socioeconómicos del lago Ziway (Etiopía), los encuestados creen que las actividades de la industria, la floricultura y otros proyectos de inversión están degradando la calidad y volumen de agua, además de la población de peces en el lago (Desta *et al.*, 2017).

Landson *et al.*, (1999) desarrollan el índice de condición de la corriente el cual apoya en la gestión a gran escala de las vías fluviales, proporcionando una medida integrada de su condición ambiental; el índice proporciona puntajes para cinco componentes de la condición del arroyo: (a) hidrología (basada en el cambio en el volumen y la estacionalidad del flujo de las condiciones naturales); b) la forma física (basada en la estabilidad de los bancos, la erosión o la degradación de los lechos, la influencia de las barreras artificiales y la abundancia y origen de los desechos

arbolados gruesos, c) zona de ribera (basada en los tipos de plantas, extensión espacial, ancho e intacto de la vegetación ribereña, regeneración de las especies exageradas y condición de los humedales y ríos); d) calidad del agua (basada en una evaluación del fósforo, turbidez, conductividad eléctrica y pH); y e) vida acuática (basado en el número de familias de macroinvertebrados); el Índice de la condición de la corriente puede utilizarse para informar sobre la condición del arroyo, ayudar con el establecimiento de prioridades, juzgar la eficacia a largo plazo de los programas de rehabilitación y ayudar con la gestión adaptativa.

Existen problemas mundiales graves, tanto en cuestiones de seguridad alimentaria y ambientales, Wicke *et al.*, (2008), en relación al ambiente es importante destacar que los ríos son elementos integradores de las cuencas hidrográficas, por lo que la calidad de sus corrientes deben abordarse en el contexto de estos territorios.

2.1.3. Génesis, evolución y desarrollo del índice de calidad de agua (ICA)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico refiere que un indicador cuantifica y simplifica los fenómenos y ayuda a entender la realidad compleja, para ello el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) es el que más se aplica en la evaluación de indicadores, esto permite dar seguimiento a los cambios que se presentan en un sistema socioambiental (OCDE, 2003). El modelo PER está basado en una lógica de causalidad, asume que las actividades humanas ejercen una presión sobre el ambiente afectando la calidad de sus elementos y la cantidad de sus recursos (estado); ante este escenario la sociedad responde a través de políticas ambientales, económicas y sectoriales, así como cambios en la percepción y comportamiento (respuesta social) (OCDE, 1997).

La protección de la calidad del agua es un componente clave en las políticas agrícolas y ambientales para la mayoría de los países de la OCDE, con una variedad de instrumentos utilizados para reducir la contaminación del agua por la agricultura, incluyendo regulaciones, subsidios y consejos de manejo agrícola, OECD (2001); de ahí la importancia de revisar el desarrollo de los ICA en términos de su génesis y evolución, destacando las aportaciones de investigadores como marco de referencia para enmarcar a la calidad del agua como indicador de la sustentabilidad a nivel cuenca.

El concepto de calidad del agua para categorizarla de acuerdo con su grado de pureza o contaminación se remonta a 1848 en Alemania, Dojildo y Best (1993). En el mismo siglo en el Reino Unido fue reconocida la importancia de la calidad de agua para la salud pública, Snow

(1854). Uno de los primeros índices de calidad del agua fue el índice saprobico (IS) que se define como el grado para especificar la carga de materia orgánica fácilmente degradable en aguas corrientes. Desde la propuesta del concepto de calidad en forma del IS transcurren más de un siglo para el desarrollo de índices numéricos que permitan evaluar la calidad del agua.

En 1965, Horton presentó un índice de calidad del agua en forma matemática, seleccionando, clasificando e integrando parámetros físicos, químicos y biológicos del agua. Deriva un ICA basado en ocho características o parámetros (tratamiento de aguas residuales, oxígeno disuelto, pH, densidad de coliformes, conductancia específica, extracto de cloroformo de carbono, alcalinidad y cloruros); asignando escalas de calificación (0 a 100 para cada parámetro) y a cada parámetro se le asignó un factor de ponderación (de 1 a 4) de acuerdo con su impacto relativo (Lumb *et al.*, 2011), otros dos parámetros, la temperatura y la contaminación evidente, aparece en forma de factores multiplicativos (m_1 y m_2) como se muestra en la ecuación (1).

El índice de calidad del agua resultante tiene valores en el rango de 0 a 100, los valores más altos significaban una mejor calidad y viceversa. En términos matemáticos el ICA se expresa como:

$$ICA = \left[\frac{w_1 S_1 + w_2 S_2 + w_3 S_3 + \dots + w_n S_n}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n} \right] m_1 m_2 \quad (1)$$

donde S representa el número de clasificación (también denominado subíndice) asignado a una característica o parámetro que va de 0 a 100, w son factores de ponderación de 1 a 4, n representa el número de parámetros utilizados para evaluar el ICA. En el caso de Horton “n” es igual a 8, m_1 es un factor de corrección para la temperatura (0.5 cuando la temperatura es inferior a 34 ° C, de lo contrario 1), m_2 es el factor de corrección para la contaminación (0,5 o 1).

Uno de los desafíos en el concepto de Horton fue la selección correcta de los parámetros que se incluirían en el ICA. Una versión mejorada del índice fue propuesta por Brown *et al.*, (1970) además de Deininger y Maciunas (1971) con el apoyo de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF) de Estados Unidos. Este nuevo índice se conoce como Índice de Calidad del Agua de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSFWQI) y se expresa matemáticamente como:

$$ICA = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad (2)$$

donde todas las notaciones son como se definen en (1) con los factores de ponderación w_i comprendidos entre 0 y 1 tal que $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = 1$. Se propusieron procedimientos

especiales para "plaguicidas" y "compuestos tóxicos". Si cualquier plaguicida o compuesto tóxico excede su límite superior asignado (por ejemplo, 0,1 mg L⁻¹ para pesticidas), el ICA se registra automáticamente como 0.

El problema de la selección de parámetros a incluir en la fórmula del ICA se resolvió mediante cuestionarios (Brown *et al.*, 1971; Deininger y Maciunas 1971) basados en la técnica Delphi (Linstone y Murray 1975). El cuestionario fue diseñado para combinar las opiniones de un gran panel de expertos en agua. Basados en la encuesta, se presentaron los 11 parámetros más significativos: Demanda de oxígeno (DO), demanda biológica de oxígeno a los cinco días (DBO₅), turbidez (TB), sólidos totales (ST), nitratos, fosfatos, pH, temperatura (T), coliformes fecales (CF), pesticidas y compuestos tóxicos. Se encontró que la formulación aritmética o aditiva, aunque fácil de entender y calcular, carecía de sensibilidad en términos del efecto que tendría un único valor de parámetro negativo en el ICA. Esto llevó a Brown *et al.*, (1973) para proponer una variación de NSFQI en la siguiente forma multiplicativa:

$$ICA = \prod_{i=1}^n S_i^{wi} \quad (3)$$

Otra contribución importante en el desarrollo del ICA fue propuesta por McDuffie y Haney (1973), quienes presentaron un ICA al que llamaron Índice de Contaminación de Río (RPI), incluyen ocho variables contaminantes, pueden incluirse en el índice menos o más de ocho dependiendo de la disponibilidad de datos. Las variables seleccionadas fueron: Déficit porcentual de oxígeno, materia orgánica biodegradable, materia orgánica refractaria, recuento de coliformes, sólidos suspendidos no volátiles (sedimentables), exceso de nutrientes, sales disueltas, y temperatura. El RPI fue calculado como la suma de "n" subíndices, I_i, por el factor de medida = [10/(n+1)]. Matemáticamente, $RPI = \left[\frac{10}{n+1} \right] (\sum I_i^2)$, el índice oscila entre 100 (nivel natural no contaminado) hasta aproximadamente 1,000 (niveles altamente contaminados).

Reconociendo la falta de un sistema financiero contable relacionado con la contaminación del agua en los previos ICA's, Dinius (1972) propuso un ICA que puede cuantificar los costos económicos y el impacto de los esfuerzos para controlar la contaminación del agua. El marco conceptual siguió un patrón similar al de los balances utilizados por los contadores para describir los activos y pasivos de una empresa. El índice utilizó 11 parámetros de calidad del agua: DO, DBO₅, CF, coliformes totales (CT), conductancia específica, cloruros, dureza, alcalinidad, pH, temperatura y color. En la misma década Walski y Parker (1974) presentan un ICA en la que consideraron

específicamente al agua con uso recreativos, dentro de los parámetros elegidos para el cálculo del índice están los sólidos suspendidos, turbidez, nutrientes, grasa, color, olor, pH, temperatura, toxicidad; el ICA varió de 0 (muy mala calidad) a 1 (muy buena calidad).

En Europa, la contribución de los ICA a través de los trabajos de los científicos ha sido basta, se puede citar a Liebman (1969), quien propuso un índice conocido como el método de Múnich, por otro lado Prati *et al.*, (1971) diseñan un índice para expresar el grado de contaminación de las aguas superficiales, para elaborar este índice los autores revisaron los sistemas de clasificación de calidad del agua que se han adoptado en Inglaterra, Alemania, la Unión Soviética, Checoslovaquia, Nueva Zelanda, Polonia y algunos estados de los EE.UU.

Inspirado en los trabajos en Estados Unidos, particularmente el de Brown *et al.*, (1970), la División de Ingeniería del Departamento Escocés inició el trabajo de investigación para el desarrollo de la Scottish ICA en 1973, utilizando el cuestionario (método Delphi), asignando a cada parámetro un peso específico (entre paréntesis), así por ejemplo, DO (0.18), DBO (0.15), amoníaco libre y solución salina (0.12), pH (0.09), nitrógeno oxidado total (0.08), fosfato (0.08), sólidos suspendidos (0.07), la temperatura (0.05), la conductividad (0.06) y *E. coli* (0.12).

El índice se mejoró aún más en forma de un modelo aditivo ponderado, el cual se usó en Inglaterra (Tyson y House 1989). El modelo aditivo ponderado toma la forma:

$$ICA = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n (w_i S_i)^2 \quad (4)$$

También se ha utilizado una versión no ponderada para la agregación de subíndices y se ha denominado el Índice de Toxicidad Acuática (Wepener *et al.*, 1999). En la versión no ponderada del modelo aditivo, todos los subíndices tienen el mismo peso que $w_i = \frac{1}{n}$; haciendo que el modelo (4) sea: $ICA = [\sum(S_i/n)^2]/100$.

Bascaron 1979, contribuye con el desarrollo de un ICA para el uso del agua en la vida acuática y consumo humano (Lumb *et al.*, 2011), usando la siguiente ecuación:

$$ICA = \left(\sum_{i=1}^n C_i * P_i \right) / \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

donde n representa el número total de parámetros, C_i es el valor del subíndice asignado a los parámetros después de la normalización, y P_i es el peso asignado a los parámetros.

Steinhart *et al.*, (1982) desarrollaron el Índice de calidad ambiental (EQI) de los Grandes Lagos de América del Norte, seleccionaron nueve variables que representaban los parámetros físicos, químicos, tóxicos y biológicos; las variables propuestas fueron: conductancia específica, cloruro, fósforo total, coliformes fecales, clorofila a, sólidos en suspensión, contaminación estética, contaminantes inorgánicos tóxicos y contaminantes orgánicos tóxicos.

La mayoría de la información presentada tiene una mayor relevancia para el uso de agua para la vida acuática, usos recreativos y muy sutilmente el agua para consumo humano. Es por ello que Bhargava (1985), derivó las ideas del concepto de evaluación del ICA avanzado por Brown *et al.*, 1970 para clasificar la calidad del agua exclusivamente para consumo humano en sistemas público de suministro de agua. Las variables que considera se pueden dividir en cuatro grupos; en el primer grupo incluye la concentración de organismos coliformes para representar la calidad bacteriana del agua potable, el segundo grupo de variables incluye tóxicos y metales pesados, el tercer grupo de variables incluye los materiales que causan efectos físicos como el olor, color, turbidez, y las otras cualidades estéticas que son factores importantes en la aceptación por parte del público y la confianza en un sistema de abastecimiento público de agua y finalmente un cuarto grupo de variables que incluye las sustancias orgánicas e inorgánicas no tóxicas tales como cloruros, sulfatos, agentes espumantes, hierro, manganeso, zinc, cobre, y sólidos totales disueltos. Él utilizó la siguiente forma de un modelo multiplicativo:

$$ICA = \left[\prod_{i=1}^n f_i \right]^{1/n} \quad (6)$$

Dinius (1987), formuló un índice de la calidad de agua para evaluar el nivel de contaminación en agua dulce, debido a que uno de los retos era el de seleccionar contaminantes significativos y su nivel de concentración; Dinius aborda este problema mediante el método Delphi en cuatro rondas, utilizando un panel de siete científicos expertos en el tema, ellos determinan que contaminantes deben incluirse en el índice, la relación entre la cantidad de estos contaminantes en el agua, la calidad resultante del agua y la importancia de cada variable de contaminación en cada uso del agua (abastecimiento público de agua, recreación, pescado, mariscos, la agricultura y la industria) y la contaminación global, propone un índice multiplicativo para evaluar los contaminantes juntos en un solo sistema.

En Nueva Zelanda Smith (1990) desarrolla un ICA para cuatro usos del agua (tres clases de uso dominantes: baño, suministro de agua, y el desove de peces, y una clase de usos generales), los

parámetros utilizados para la evaluación ICA fueron: DO, sólidos en suspensión, turbidez, temperatura, DBO₅ (sin filtrar), amoníaco y coliformes fecales con la excepción de que el amoníaco sólo estaba incluido en el suministro de agua y coliformes fecales no se incluye en el desove de peces.

Más tarde Dojildo *et al.*, (1994) proponen la fórmula del modelo armónico expresada en (7), como una forma de refinar la estructura matemática del ICA propuesto en la década de 1970; la ecuación ha sido aplicada en el Río Vistula en Polonia clasificando a la calidad de agua como muy limpia (75-100), limpia (50-75), contaminado (25-50) y muy contaminado: 0-25.

$$ICA = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i^{-2} \right]^{-0.5} \quad (7)$$

En la provincia de Quebec, Canadá (Hèbert, 2005), probó el índice de calidad bacteriológica y física (IQBP) para evaluar la calidad del agua con fines de natación y recreación, con la siguiente formula:

$$IQBP = \min(IF_1, IF_2, IF_3, \dots, IF_7) \quad (8)$$

en la que IF1:subíndice para coliformes fecales; IF2:subíndice para el fósforo total; IF3:subíndice para nitrito-nitrato, IF4:subíndice para el nitrógeno amónico; IF5 :subíndice para clorofila; IF6: subíndice para turbidez; y IF7:subíndice para sólidos en suspensión.

Recientemente se ha utilizado en la evaluación de los ICA el método estadístico de análisis multivariado, el cual permite determinar la contribución de varios factores en un simple evento o resultado, esto permite discernir los parámetros importantes en la evaluación del índice. El método es simple, barato y preciso que podría ser utilizado en lugar de las técnicas complicadas para fusionar las variables de calidad del agua en los índices utilizables (Saeedi *et al.*, 2010; Sedeño y López, 2007). Además, el Departamento de Medio Ambiente de Malasia (Shuhaimi- Othman *et al.*, 2007) ha presentado un ICA por basado en la función matemática del modelo siguiente:

$$ICA = 0.22(DO_{Si}) + 0.19(DBO_{Si}) + 0.16(COD_{Si}) + 0.15(AN_{Si}) + 0.16(DSS_{Si}) + 0.12(pH_{Si}) \quad (8)$$

donde el subíndice *Si* es la función de subíndice asociada a cada uno de estos parámetros (DO, DBO, demanda química de oxígeno, nitrógeno amónico, sólidos disueltos en suspensión y pH).

El desarrollo de software también se ha orientado para el cálculo de índices de calidad, Sarkar y Abbasi, (2006). Existen varios trabajos de investigación en donde se han utilizado ampliamente los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección para evaluar la calidad del agua

en el mundo, por ejemplo, Shabbir y Saeed, (2015) en Pakistán, Kumar *et al.*, (2014) en la India, Gamvroula *et al.*, (2013) en Grecia y Aydi *et al.*, (2013); Ketata *et al.*, (2013) en Túnez. Los SIG son una herramienta poderosa para el desarrollo de soluciones en la evaluación de la calidad del agua, los problemas de los recursos hídricos, la determinación de la disponibilidad y la gestión de los recursos hídricos del agua a escala regional o local (Nag y Saha, 2014).

Mantener en mente que la importancia vital de la biodiversidad, el agua, la energía y la seguridad alimentaria en el mantenimiento de los servicios humanos y ambientales ha sido reconocida en numerosos foros nacionales e internacionales, tales como: la Cumbre de las Naciones Unidas sobre la Tierra de 1992 en Río de Janeiro, la Cumbre Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sustentable 2002 en Johannesburgo, la Conferencia Sustain 2010-2012 en Kioto, el simposio Río 1-16 y el Congreso Mundial de la Energía, es motivo de generar conciencia de que la sustentabilidad de la estructura, función y objetivos de una cuenca hidrográfica es un requisito esencial para el futuro sustentable y la seguridad humana (Firdaus *et al.*, 2014), esto contando con indicadores de calidad del agua confiables y al alcance de la tomadores de decisión y la sociedad en general.

2.2. Conclusiones

Se considera a la cuenca hidrográfica como un sistema, en donde la interacción de recursos naturales, industriales, actividades agropecuarias, forestales y asentamientos humanos es evidente dentro de un complejo de relaciones en la cual el recurso agua es un factor determinante, en este sistema complejo se dan interacciones entre sus subsistemas biofísicos, económicos y socio-culturales, que determinan e influyen en la calidad del agua de las corrientes superficiales y subterráneas.

Las actividades humanas y la creciente demanda por bienes como alimento, vivienda, agua potable y servicios ambientales generan presión sobre los recursos existentes en la cuenca hidrográfica, de ahí la importancia de estudiar las actividades antropogénicas y su nivel de impacto sobre estos territorios en el marco de la sustentabilidad.

Los ICA garantizan una evaluación integral del recurso agua de las cuencas hidrográfica, forma parte del esquema de indicadores de la sustentabilidad a nivel cuenca, permitiendo evaluar a través de variables fisicoquímicas y biológicas el estado actual del agua, monitorear su calidad a través del tiempo para la toma de acciones a corto, mediano y largo plazo. Además, el ICA genera

información sobre los problemas medioambientales apoyando al desarrollo y toma de decisiones de políticas públicas; la identificación de los factores clave que causan presión sobre el medio ambiente y la sensibilización de la sociedad sobre las cuestiones ambientales ocasionadas por las presiones antrópicas a las corrientes de aguas.

Se ha de tomar en cuenta que el monitoreo del estado de la calidad de agua a partir de parámetros fisicoquímicos es económicamente costoso, lo que dificulta mediciones sistematizadas a largo plazo, y muestra cierta debilidad del ICA por la escasez de datos, situación que restringe parcialmente la evaluación de la sustentabilidad ambiental a nivel cuenca hidrográfica. Esto crea una coyuntura para desarrollar y aplicar métodos de análisis multivariado que integre indicadores de riesgo de bajo y confiable costo económico que evidencien a tiempo las fuentes de deterioro de la calidad del agua relacionadas con las actividades antrópicas que se desarrollan en la cuenca, para tomar medidas al respecto siempre tendientes a un manejo sustentable de la cuenca hidrográfica.

Agradecimientos

El autor principal agradece al Programa de Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP) por el apoyo otorgado de beca convencional nacional para estudios de Doctorado Ciencias en Agroecosistemas Tropicales en el Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

2.3. Literatura citada

- Ali, F. M. 2010. Water quality evaluation system to assess the status and the suitability of the Citarum river water to different uses. *Environ Monit Assess.* 168: 669–684.
- Arias, M. 2003. Desarrollo Sustentable una propuesta ante la desilusión del progreso. pp:1-12.
- Astier M. y Hollands, J. 2005. Sustentabilidad y campesinado. Seis experiencias agroecológicas en Latinoamérica. Mundiprensa, GIRA A. C. México D. F. 404 p.
- Astier M.; Masera O.R. y Galván M.Y. 2008. Evaluación de sustentabilidad: un enfoque dinámico y multidimensional. Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y sustentable, España. 200 p.
- Aydi W.; Saidi S.; Chalbaoui M.; Chaibi S. and BenDhia H. 2013. Evaluation of the Groundwater Vulnerability to Pollution Using an Intrinsic and a Specific Method in a GIS Environment: Application to the Plain of Sidi Bouzid (Central Tunisia). *Arabian Journal for Science and Engineering.* 38: 1815-1831.
- Barrientos, F.R. 2006. El diseño de indicadores e índices para evaluar el aporte de las fincas agropecuarias a la sostenibilidad ambiental: análisis de caso en la Microregión Platanar-La Vieja, cuenca del Río San Carlos, Costa Rica. *Revista Pensamiento Actual.* 6:23–39.

- Bhargava, D. 1985. Expression for drinking water supply standards. *J. Environ Eng. Div.* 111 (3):304–316.
- Bifani, P. 2007. El Desarrollo Sustentable. In: *Medio Ambiente y Desarrollo*. Ed. Universitaria. México pp:106-137.
- Boon, P.J. and Howell, D.L. (Eds.) 1997. *Freshwater Quality: Defining the Indefinable*. The Stationery Office, Edinburgh . 352 p.
- Boyko C.T.-, Mark R. G., Austin R.G. B.; Brown J.; Bryson R. J.; Butler D.; Caputo S.; Caserio M.; Coles R.; Cooper R.; Davies G.; Farmani R.; Hale J; Chantal Hales A.C.; Hewitt N.; Dexter V.L.H.; Jankovic L.; Jefferson I.; Joanne M. L.; Rachel L. D.; MacKenzie A. R.; Fayyaz A. M.; Pugh A.M.T.; Sadler P. J.; Duncan W. J.C. and Rogers D.F.C. 2012. Benchmarking sustainability in cities: The role of indicators and future scenarios, *Global Environmental Change*. 22: 245-254.
- Brown R.M.; McClelland R. and Tozer, R.N. 1970. A water quality index—Do we dare?. *Water Sew Works*. 10: 339-343.
- Brundtland Commission, 1987. *Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development*. UN Documents Gathering a Body of Global Agreements 200 p.
- Carabias J. y Landa R. 2005. *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, UNAM, El Colegio de Mexico, Fundación Gonzalo Rio Arronte, México D.F. 211 p.
- Celaya L. A.; Luque A. D.; García H. J.; Amozurrutia M. J.A.; Preciado R.J.M.; Laborín Á.J. y Cabanillas L.R.E. 2017. Evaluación de la producción científica de sustentabilidad ambiental en un centro público de investigación del Conacyt (1982-2012), *Revista de la Educación Superior* 46:89-112.
- Charnsungnern M. and Sittichai T. 2017. Environmental sustainability of highland agricultural land use patterns for Mae Raem and Mae Sa watersheds, Chiang Mai province, *Kasetsart Journal of Social Sciences*. 38:169-174.
- Chaves H.M.L. and Alipaz S. 2007. An antegrated indicator based on basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: the watershed sustainability index. *Water Resources Management*; 21(5):883–895.
- Clarke R.T.; Wright F.J. and Furse T.M. 2003. RIVPACS models for predicting the expected macroinvertebrate fauna and assessing the ecological quality of rivers, *Ecological Modelling*, 160: 219-233.
- Cortés A.E.; Oyarzún R.; Kretschmer N.; Chaves H.; Soto G.; Soto M.; Amézaga J.; Rötting T.; Señoret M, M. H. 2012. Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui river basin, North-Central Chile. *Obras y Proyectos*. 12: 57–69.
- Dahl, A.L. 2012. Achievements and gaps in indicators for sustainability, *Ecological Indicators*. 17: 14-19.

- Darapu S.S.K.; Sudhakar, B.; Krishna, K.S.R.; Rao, P. V. and Sekhar, M. C. 2011. Determining Water Quality Index for the Evaluation of Water Quality of River Godavari. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 1:174-182
- Deininger R. and Maciunas, J. 1971. A Water quality index for public water supplies, unpublished report, Department of Environment Health, School of public Health, University of Michigan, Ann Arbor, MI. 6:45-58
- Desta H.; Brook L. and Stellmacher T. 2017. Farmers' awareness and perception of Lake Ziway (Ethiopia) and its watershed management, *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*. 65:61-75.
- Directorate General of Water Resources (DGWR). 2007. Integrated Ciaturum water resources management project: Report on roadmap and program development. In Technical assistance consultant's report. Indonesia: For Directorate General of Water Resources Ministry of Public Works. 204 p.
- Dinius, S. 1987. Design of water quality index. *Water Resour Bulletin, American Water Resources Association*. 23(5): 823-843.
- Dinius, S. 1972. A social accounting system for evaluating water. *Water Resour Res*. 8 (5): 1159-1177.
- Dojlido J.R.J. and Best G. 1993. Chemistry of water and water pollution. Ellis Horwood, series in: *Water and Wastewater Tecjnolofy*. Capitulo 2. pp: 59-204.
- Dojildo, J.R.J. and Woycie, J. 1994. Water Quality Index Applied to rivers in the Vistula. *Environmental Monitoring and Assessment* (33): 33-42.
- Environmental Protection Agency (EPA) 2014. Wisconsin Integrated Assessment of Watershed Health. 111 p.
- Environmental Performance Index (EPI) 2010. Yale Center for Environmental Law & Policy, Yale University, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) Columbia University, in collaboration with World Economic Forum, Geneva, Switzerland and Joint Research Centre of the European. Commission, Ispra, Italy. 87 p.
- Fondo Medio Ambiente Mundial (FMAM). 2000. Contribuciones del fondo para el medio ambiente mundial al programa 21. 64 p.
- Firdaus R.; Nobukazu N. and Aswandi I. 2014 Sustainability Assessment of Humid Tropical Watershed: A Case of Batang Merao Watershed, Indonesia, *Procedia Environmental Sciences*. 20:722-731.
- Gamvroula, D.; Alexakis, D. and Stamatis, G. 2013. Diagnosis of groundwater quality and assessment of contamination sources in the Megara basin (Attica, Greece). *Arabian Journal of Geosciences*. 6:2367-2381.
- Haghshenas H. and Manouchehr V. 2012. Urban sustainable transportation indicators for global comparison, *Ecological Indicators*.15:115-121.
- Harlem B. G. y Khalid M. 1988. *Nuestro futuro común*. Madrid, España. Alianza. 460 p.

- Harkins, R., 1974. An objective water quality index. *J Water Pollut Control Fed.* 46 (3):588–591.
- Hèbert S. 1996. Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physico-chimique de l'eau pour des rivières du Québec. Report of the ministère de l'environnement et de la faune, Québec, QC, Canada 54 p.
- Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12. UNESCOIHE, Delft, The Netherlands pp:11-50.
- Hoekstra A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, H.M. and Mekonnen, H.M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London. 228 p.
- Hoque Y.M.; Shivam T.; Mohamed M. H. and Rao S. G. 2012. Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data, *Journal of Environmental Management.* 109: 101-112.
- Horton, R. 1965. An index number system for rating water quality. *J. Water Pollut Control Fed* 37. 3:300–306.
- Jain D. and Tiwari G. 2017. Sustainable mobility indicators for Indian cities: Selection methodology and application, *Ecological Indicators.* 79:310-322.
- Jouravlev A. 2003. Los municipios y la gestión de los recursos hídricos. Santiago de Chile: CEPAL, Serie Recursos Naturales e Infraestructura No 66. 70 p.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries.*6: 21–27.
- Ketata M.; Moncef G. and Rachida B., 2012. Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Central East Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences.* 5:1379-1390.
- Khan S. 2004. Integrating hydrology with environment, livelihood and policy issues: the Murrumbidgee model. *International Journal of Water Resources Development* 2004. 20 (3):415–429.
- Kumar S.; Thirumalaivasan D. and Radhakrishnan Nisha. 2014. GIS Based Assessment of Groundwater Vulnerability Using Drastic Model. *Arabian Journal for Science and Engineering.* 39: 207-216.
- Ladson A.R.; White L.J.; Doolan, J.A.; Finlayson, B.L.; Hart, B.T.; Lake, P.S. and Tilleard, J.W. 1999. Development and testing of an index of stream condition for waterwaymanagement in Australia. *Freshwater Biology.* 41 (2):453–468.
- López R. S., Keulen H. I. and Leffelaar P. 2005. IterMultiscale methodological framework to derive criteria and indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems. *Environ. Dev. Sustain.* 7: 51-69.
- Lovarelli D.; Jacopo B. and Fiala M. 2016. Water Footprint of crop productions: A review, *Science of The Total Environment.* 548:236-251.
- Liebman, H., 1969. Atlas of water quality, methods and practical conditions. Oldenbourg, Munich.

- Linstone HA, Murray T (1975) The Delphi method: techniques and applications. Addison Wesley, With a Foreword by Olaf Helmer University of Southern California. 618 p.
- Litman, T., 2008. Sustainable transportation indicators, Sustainable Transportation Indicators Subcommittee of the Transportation Research Board. 14 p.
- Lumb A.; Sharma T.C. and Bibeault J.F. 2011. A Review of Genesis and Evolution of Water Quality Index (WQI) and Some Future Directions. Water Qual Expo Health. 3: 11–24.
- Maass, J. M., 2004. La investigación de procesos ecológicos y el manejo integrado de cuencas hidrográficas: un análisis del problema de escala. En: H. Cotler (comp.) El manejo integral de cuencas en Mexico. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. Instituto Nacional de Ecología. 77 p.
- Martínez P. J.; Pellicer-Martínez F., and Colino J. 2014. A probabilistic approach for the socioeconomic assessment of urban river rehabilitation projects, Land Use Policy. 36:468-477.
- McDuffie, B. y Haney, J., 1973. A proposed river pollution index. New York: American Chemical Society, Division of Water, Air and Waste Chemistry. pp:11-21.
- Milovanovic, M., 2007. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. Desalination. 213:159-173.
- Moldan B.; Svatava J.; Hák T. 2012. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets, Ecological Indicators. 17:4-13.
- Moreno, A. D. y Renner, I., 2007. Gestión integral de cuencas, la experiencia del proyecto regional cuencas andinas. GTZ Lima-Perú.; Centro Internacional de la Papa (CIP), Redcapa, Ministerio Federal de Economía y Desarrollo. 234 p.
- Mohsen, A., 1999. Environmental Land Use Change Detection and Assessment Using with Multi temporal Satellite Imagery. Zanzan University, Iran. pp:1-5.
- Nag, K. S. and Sumana S. 2014. Integration of GIS and Remote Sensing in Groundwater Investigations: A Case Study in Gangajalghati Block, Bankura District, West Bengal, India. Arabian Journal for Science and Engineering. 39:5543–5553.
- Organización Naciones Unidas (IHE-UNESCO) 2001. The design and implementation strategy of the HELP initiative. IHP Technical Documents in Hydrology No H00/1 2001. 44:1–65.
- Organización para la cooperación económica y el desarrollo (OCDE) 1997. Desarrollo Sustentable. Estrategias de la OCDE para el siglo XXI, Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico. 35 p.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) .2001. Environmental Indicators for Agriculture. Methods and results Volume 3, Organization for Economic Cooperation and Development. 53 p.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2002. Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth, SGSD (2002)1/FINAL, OECD, Paris. 3 p.

- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) 2003. OECD Environmental Indicators: Development, measurement and use. Reference Paper. OECD, Paris. 252 p.
- Monzonís M. P.; Solera A.; Ferrer J.; Estrela T. and Paredes A.J. 2015. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management, *Journal of Hydrology*. 527:482-493.
- Pellicer M. F. and Martínez P.J.M. 2016. The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level, *Science of the Total Environment* .571:561-574.
- Pophare, A.M.; Lamsoge, B.R.; Katpatal, Y.B. and Nawale, V.P. 2014. Impact of over-exploitation on Subwater quality: a case study from WR-2 Watershed, India. *J. Earth Syst.Sci.* 123:1541–1566.
- Roboredo D.; Pessoa P. B.S.M. and Bleich M.E. 2017. Aggregate index of social–environmental sustainability to evaluate the social–environmental quality in a watershed in the Southern Amazon, *Ecological Indicators*. 63:337-345.
- Sepúlveda, S., 2008. Biograma: metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible de territorios. IICA, San José. 133 p.
- Shuhaimi-Othman M.; Lim E.C. and Mushrifah I. 2007. Water quality changes in Chini Lake, Pahang West Malaysia. *Environ Monit Assess.* 131:279–292
- Prati , L., Pavanell , R. and Pesarin , F., 1971. Assessment of surface water quality by a single index of pollution. *Water Resource.* 5: 741–751.
- Pierre, N. 2005. Historia del concepto de desarrollo sustentable. In: Pierri, N. y G. Foladori. (Eds.) ¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable. Colección América Latina y el Nuevo Orden Mundial. México. pp:27-79.
- Quaddus, M.A. and Siddique, M.A.B. 2001. Modeling sustainable development planning: a multi criteria decision conferencing approach. *Environment International.* 27: 89–95.
- Rodríguez, B. F., 2006. Cuencas Hidrográficas, descentralización y desarrollo regional participativo. *Revista de las Sedes Regionales [en línea], VII (Sin mes), Volumen VII,* pp:113-125.
- Ruíz, R. O., 2012. La cuenca hidrológica como un sistema: Perspectivas de desarrollo, México, D.F. pp:3-10.
- Saeedi M.; Ozeair A.; Farid S. and Hamed M. 2010. Development of groundwater quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, Abril, Issue 1-4.163:327-335.
- Sarala , T. D. and Uma , M. T. 2013. Water quality indices as indicators for potable water. *Desalination and Water Treatment Issue 25-27.* 52:4772-4782.
- Sarandón, S. J. 2002. El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sustentabilidad de los agroecosistemas. En: Santiago J. Sarandón (editor): *Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable: Ediciones Científicas Americanas.* pp:393-414.

- Sarkar C. and Abbasi S.A. 2006. Qualidex - A new software for generating water quality indice. *Environmental Monitoring and Assessment*. 119:201–231.
- Sedeño D.J.E. and López L. E. 2007. Water Quality in the Río Lerma, Mexico: An Overview of the Last Quarter of the Twentieth Century. *Water Resources Management*.21:1797–1812.
- Sepulveda, S. y Rojas, P., 2002. Elementos del desarrollo sostenible. En: Chavarria Hugo, Sepúlveda Sergio y Rojas Patricia: *Competitividad Cadenas Agroalimentarias y Territorios Rurales*. San José: IICA. pp:11-35.
- Shabbir R. and Saeed A. S. 2015. Use of Geographic Information System and Water Quality Index to Assess Groundwater Quality in Rawalpindi and Islamabad. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 40: 2033–2047.
- Smeets, E. and R. Weterings 1999, *Environmental indicators: typology and overview*, European Environment Agency, Copenhagen, Belgium, Technical Report 25. 19 p.
- Simeonov V.; Stratis J.A.; Samara C.; Zachariadis G.; Voutsas D.; Anthemidis A.; Sofoniou M. and Kouimtzis Th., 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research*.37: 4119-4124.
- Simeonova, P.; Simeonov, V. and Andreev, G. 2003. Water Quality Study of the Struma River Basin. *Central European Science Journals*. 2:121-136.
- Smith, D.G. 1990. A better water quality indexing system for rivers and streams. *Water Research*, 24. 10:1237-1244.
- Snow, J., 1854. *On the mode of communication of cholera*. London: Wilson and Ogilvy, 57, Skinner Street, 32 p.
- Steinhart C.E.; Schierow L.J. and Sonzogni W.C. 1982. An environmental quality index for the Great Lakes. *Water Resour Bull* 18.6:1025–1031.
- Suresha, K. R. and Nagesh, M. A. 2015. Experimental Studies on Effect of Water and Soil quality on Crop Yield. *Aquatic Procedia*. 4:1235–1242.
- Swami V.A. and Kulkarni S.S. 2012. Watershed management – a means of sustainable development (a case study). *International Journal of Engineering Science and Technology* 3. 3:2105–2112.
- Tanguay A.; Lefebvre J.F. and Lanoie, P. 2010. Measuring the sustainability of cities: an analysis of the use of local indicators. *Ecological Indicators*. 10:407–418.
- Tomer M.D and Schilling E.K. 2009. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology, *Journal of Hydrology Issue 1*. 376:24-33.
- Tsegaye T.; Sheppard D.; Islam, K. R.; Johnson A.; Tadesse W.; Atalay A. and Marzen L. 2006. Development of chemical index as a measure of in-stream water quality in response to land-use and land cover changes. *Water, Air, and Soil Pollution*. 174: 161–179.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) 2012. *Identifying and Protecting Healthy Watersheds: Concepts, Assessments, and Management Approaches*. U.S. Environmental Protection Agency. 20 p.

- United Nations (UNO) 1992. Agenda 21: The United Nations Programme of Action from Rio. United Nations, New York. 351 p.
- Walski, T. and Parker, F. 1974. Consumer's water quality index. *J Environ Eng Div ASCE* (3). 593-611.
- Wang Y. and Choi W. L. 2005. Long-Term Impacts of Land-Use Change on Non-Point Source Pollutant Loads for the St. Louis Metropolitan Area, USA. *Environmental Management*. 35: 194-205
- World Commission on Environment and Development (WCED) 1987. Our common future. Oxford University Press. 300 p.
- Wicke B.; Sikkema R.; Dornburg V.; Junginger M. and Faaij A. 2008. Drivers of land use change and the role of palm oil production in Indonesia and Malaysia (final report): Utrecht University 119 p.
- World Economic Forum (WEF). (2017). The Global Risks Reports 12th Edition. 78 p.
- World Health Organisation (WHO) 2004. Water Sanitation and Hygiene Links to Health, WHO Press, Geneva. 2 p.
- Xua H. S.; Xua, Z. X.; Wua, W. and Tanga F. F. 2012. Assessment and Spatiotemporal Variation Analysis of Water Quality in the Zhangweinan River Basin, China. *Procedia Environmental Sciences*. 13:1641-1652.

CAPÍTULO III. CALIDAD DE AGUA EN LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO, VERACRUZ, MÉXICO

Resumen

El propósito de este estudio fue determinar la calidad del agua en la microcuenca del Río Sonso mediante el monitoreo y evaluación de nueve parámetros de calidad del agua, presumiblemente afectado por la acción de las actividades antropogénicas que se desarrollan al interior de la microcuenca, tales como: descarga de aguas residuales de beneficios de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), la agricultura a través del manejo de los agroecosistemas y las actividades domésticas de los habitantes de la microcuenca. El estudio muestra que la temperatura del agua, el total de sólidos disueltos, la turbidez, el pH, el contenido de oxígeno disuelto, nitratos, y fosfato total del Río Sonso, se ajustan a los estándares nacionales e internacionales establecidos en la norma oficial mexicana (NOM-127-SSA1-1994), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Reglamento Gubernamental No. 82/2001 clase II; mientras que la demanda bioquímica de oxígeno, los coliformes fecales y coliformes totales están fuera de los límites permisibles. El índice de Calidad NSF-WQI osciló entre 69 y 71, por lo tanto, la calidad del agua del Río se considera en la categoría de “buena” y “mediana”. Con base en los resultados de este índice se concluye que los habitantes de la microcuenca si afectan la calidad del agua del Río Sonso, principalmente por las descargas de las aguas residuales derivadas de las actividades domésticas y la agroindustria de café.

Palabras clave: Sustentabilidad, microcuenca, calidad de agua.

Abstract

The purpose of this study was to evaluate water quality of the Sonso River microbasin affected by anthropogenic activities, such as: discharge of wastewater from coffee processes (*Coffea arabica* L. and *Coffea canephora* P.), management of agroecosystems and domestic activities. The study shows that the water temperature, total dissolved solids, turbidity, pH, dissolved oxygen content, nitrates, and total phosphate of the Sonso River, goes with to the national and international standards established in the official Mexican standard. (NOM-127-SSA1-1994), the World Health Organization (WHO) and Government Regulation No. 82/2001 class II; while the biochemical

oxygen demand, fecal coliforms and total coliforms are outside the permissible limits. The NSF-WQI Quality Index ranged from 69 to 71, therefore, the water quality of the River is considered in the category of "good" and "medium". Based on the results of this index, it is concluded that the inhabitants of the micro-basin do affect the water quality of the Sonso River, mainly by discharging the wastewater derived from domestic activities and the coffee agroindustry.

Keywords: Sustainability, micro basin, water quality.

3.1. Introducción

La microcuenca del Río Sonso pertenece o forma parte de la cuenca del Río Jamapa, la importancia de esta última radica en que en ella se encuentran zonas metropolitanas en continua expansión como las ciudades de Orizaba, Córdoba, Fortín, Veracruz y Boca del Río, además de importantes zonas agrícolas e industriales, las cuales, además de requerir volúmenes graduales de agua provenientes de los cuerpos superficiales y subterráneos adyacentes, generan aguas residuales que de no ser tratadas, pueden vulnerar de manera irreversible estas fuentes de abasto.

En la microcuenca del Río Sonso las superficies de los agroecosistemas en su mayoría son menores de 5 ha y se desarrollan principalmente dos sistemas de producción agrícola: el cultivo de café bajo sombra el cual se encuentra asociado con plantas de interés para el agricultor y en pequeña escala o de traspatio la explotación de especies pecuarias menores, asimismo existen pequeñas agroindustrias dedicadas al procesamiento y beneficio de café.

El Río Sonso es la corriente superficial principal y por ende perenne de la microcuenca del mismo nombre, de acuerdo al procesamiento de datos cartográficos con el software Arc Gis® versión 10.2, ésta cuenta con una longitud de aproximadamente 11 kilómetros y corresponde a una red hídrica de orden 4; la importancia de esta corriente superficial estriba en el suministro de agua para consumo humano y usos agroindustriales de al menos 10 localidades con una población aproximada de 7000 habitantes; además de ser una de las corrientes tributarias del Río Jamapa que desemboca sus aguas en el Golfo de México.

Dada la importancia del aprovechamiento del agua en esta corriente superficial se hace necesario evaluar su calidad, entre otras razones porque existen enfermedades relacionadas con el consumo de la misma, en los países en desarrollo mueren alrededor de 1.8 millones de personas cada año a causa de enfermedades diarreicas (incluido el cólera); el 90% son niños menores de 5 años; además, el 88% de las enfermedades diarreicas se atribuye al abastecimiento de agua insalubre, el

saneamiento inadecuado y la higiene (WHO, 2004); el agua es un recurso renovable dinámico, su disponibilidad con buena calidad y cantidad adecuada es muy importante para la vida humana y otros fines; el agua no es sólo el espejo del medio ambiente, sino que también refleja a la sociedad que la rodea y ahí se acumulan todos los "pecados" de la humanidad (Sarala y Uma, 2013); se considera que la calidad del agua es un factor importante para juzgar los cambios del medio ambiente que están fuertemente asociados al desarrollo socioeconómico (Darapu *et al.*, 2011).

El agua es un recurso natural precioso, los recursos hídricos superficiales son limitados; el crecimiento exponencial de la población y la demanda resultante de agua requieren una cuidadosa planificación de la gestión de los recursos hídricos disponibles. La urbanización, la industrialización, la mala gestión de la tierra y la contaminación del medio ambiente han impuesto presión sobre la producción agrícola (Suresh y Nagesh, 2015); la rápida urbanización y el crecimiento industrial se han traducido en el crecimiento de cantidades de aguas residuales domésticas sin tratamiento, los residuos sólidos y efluentes industriales se vierten a los ríos. Los niveles de contaminación ya comprometen la salud pública y los medios de vida de las familias de pescadores pobres se han puesto en peligro por la mortandad de peces (DGWR, 2007).

Según Darapu *et al.*, (2011), la evaluación de agua en los países en desarrollo se ha convertido en un asunto crítico en los últimos años, sobre todo debido a la preocupación de que el agua dulce será escasa en un futuro próximo.

Las cuencas hidrográficas son altamente vulnerables a la contaminación debido a la absorción y el transporte de las aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas; es importante controlar la contaminación del agua y monitorear su calidad (Simeonov *et al.*, 2003; Simeonova *et al.*, 2003). Cuando existe deterioro de la calidad de agua causado por las actividades humanas en la cuenca alta se reduce la capacidad de uso de los recursos para los interesados en las zonas de la cuenca baja (Ali, 2010).

La mayoría de las actividades humanas que se realizan en la cuenca afectan la calidad de agua, directamente a través de la descarga de aguas residuales o indirectamente a través del cambio del uso del suelo (Tsegaye *et al.*, 2006); la contaminación del agua no sólo afecta su calidad, también amenaza a la salud humana, el desarrollo económico, y la prosperidad social (Mimoza, 2007).

Los análisis de la variación espacio-temporal y la identificación de las fuentes de contaminación del agua en los ríos de las cuencas son importantes para la protección de los recursos hídricos y la

utilización sostenible (Xu *et al.*, 2012; la calidad del agua se ve afectada tanto por la contaminación de fuentes puntuales y fuentes difusas (Wang *et al.*, 2005).

El propósito de la investigación fue determinar la calidad del agua en cinco puntos de muestreo a lo largo del Río Sonso, presumiblemente afectado por la acción de las actividades antropogénicas que se desarrollan al interior de la microcuenca, tales como: descarga de aguas residuales de beneficios de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), la agricultura a través del manejo de los agroecosistemas y las actividades domésticas de los habitantes. La calidad del agua es un indicador de la sustentabilidad que permite evaluar a través de variables fisicoquímicas y biológicas el estado actual de los recursos hídricos de la microcuenca, monitorear su calidad a través del tiempo para la toma de acciones a corto, mediano y largo plazo.

3.2. Materiales y métodos

La investigación se realizó en el Río Sonso, ubicado en el municipio de Huatusco Veracruz, México, la corriente tiene una longitud aproximada de 11 kilómetros y se ubica dentro de la microcuenca del mismo nombre, la ubicación geográfica de la microcuenca corresponde a las coordenadas 19°05'57'' - 19°07'04'' de latitud norte y 096°57'50'' - 096°55'38'' de longitud Oeste; posee una superficie de 18.71 km² y una altitud que va de los 1,040 msnm a los 1136 msnm, en ella habitan 5254 personas (INEGI, 2010).

El Río Sonso tiene varios afluentes que se unen en el pie de monte de las serranías de la localidad denominada Ixpila. Esta corriente superficial fluye a través de cinco localidades ubicadas en la microcuenca y atraviesa las partes centrales de las comunidades, juega un papel muy importante ya que es la fuente principal de agua potable de diez localidades y es tributario del Río Jamapa.

El conjunto de datos utilizados en este estudio se produjo a través del monitoreo de la calidad del agua del Río Sonso. El muestreo mensual se realizó durante un período de tres meses (enero – marzo 2017) con cinco sitios de muestreo que se identifican en la Figura 3.1.

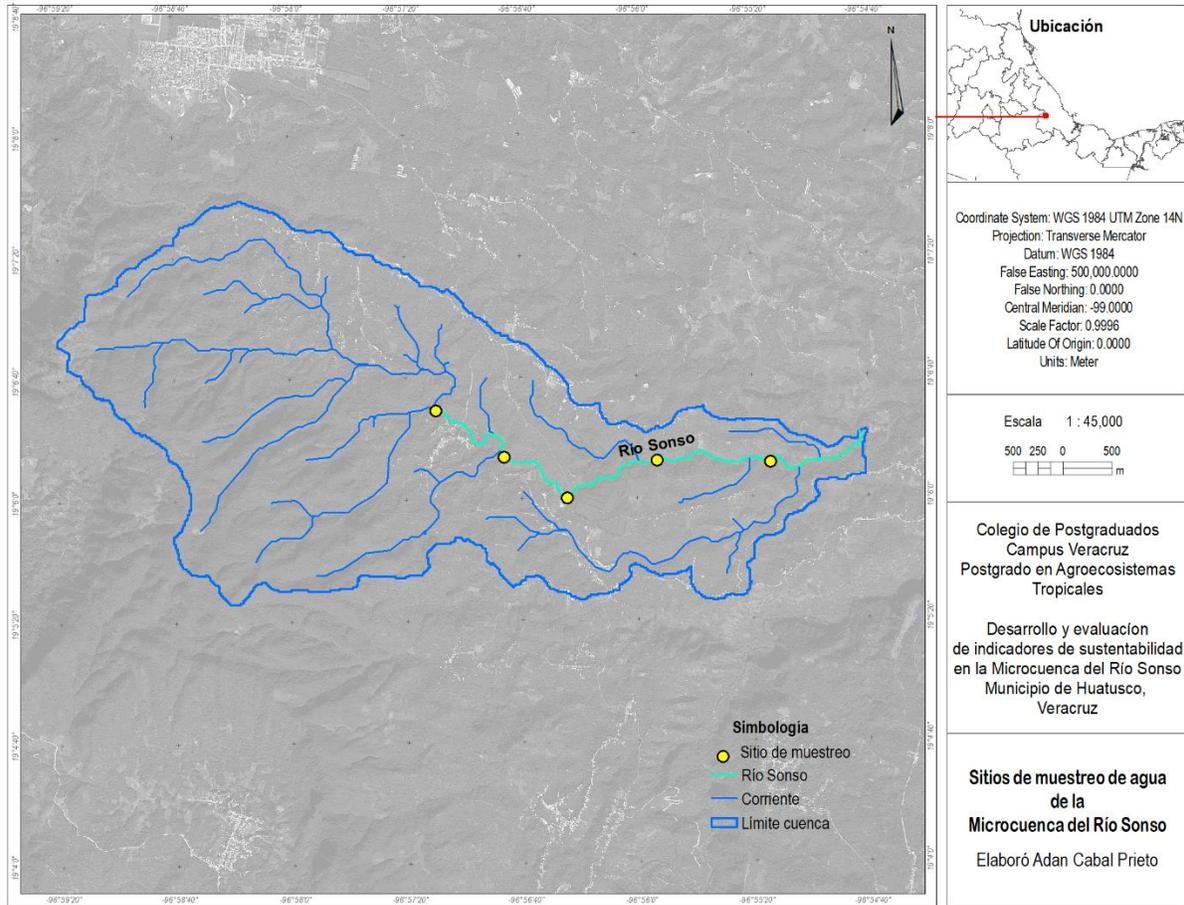


Figura 3.1. Sitios de muestreo del agua del Río Sonso.

Las muestras de agua se analizaron en el Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBoca), se determinó turbidez (TB), fósforo total (FT), coliformes totales (CT), coliformes fecales (*Escherichia coli*) (CF) y demanda bioquímica a los cinco días (DBO₅). In situ se determinaron los parámetros oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrogeno (pH), cambio de temperatura (T °C), nitratos (NO₃) y sólidos totales (ST). Los muestreos se realizaron cada mes durante el periodo de Enero a Marzo 2017. Las muestras de agua se almacenaron en botellas esterilizadas de 1000 ml y se colocaron en una nevera portátil para su posterior traslado al laboratorio como se indica en la NOM-230-SSA1-2002. Los parámetros, métodos y sitios para la medición de la calidad del agua se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Parámetros de calidad del agua y métodos de medición.

No.	Parámetro	Unidad	Método	Sitio de medición
Físicos				
1	Temperatura	°C	Termómetro	<i>In situ</i>
2	Sólidos disueltos totales	mg L ⁻¹	Equipo multiparamétrico ODO™ de YSI	<i>In situ</i>
3	Turbidez	NTU	Turbidímetro T-100 Oaklon® (ISO 90019)	Laboratorio
Químicos				
4	Potencial de hidrógeno	-	pH Metro/ Potenciómetro	<i>In situ</i>
5	Oxígeno disuelto	mg L ⁻¹	Equipo multiparamétrico ODO™ de YSI	<i>In situ</i>
6	Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días	mg L ⁻¹	NMX-AA-028-SCFI-2001	Laboratorio
7	Nitratos (NO ₃)	mg L ⁻¹	Equipo multiparamétrico ODO™ de YSI	<i>In situ</i>
8	Fosfato total	mg L ⁻¹	NMX-AA-029-SCFI-2001	Laboratorio
Microbiológicos				
9	Coliformes totales y fecales	NMP/100 ml	Sustrato Cromogénico Colisure and Quanti – Tray / Quanty – Tray/2000	Laboratorio

El método para evaluar la calidad del agua fue el índice desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento de Estados Unidos (NSF-WQI).

Los datos se analizaron a través del NSF-WQI, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127) referente a la "salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización", las

normas de agua para consumo humano según lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2004) y al Reglamento Gubernamental No. 82/2001 clase II (RG 82/2001).

NSF-WQI

El NSF-WQI es ampliamente utilizado entre los índices de calidad de agua existentes porque permite medir los cambios en la calidad de agua en tramos particulares de los ríos a través del tiempo. Para determinar el NSF-WQI se requiere medir nueve parámetros: DBO₅, OD, nitrato, fosfato total, temperatura, turbidez, sólidos totales, pH y organismos coliformes fecales.

Para este estudio, se evaluaron los nueve parámetros y la asignación de los pesos para cada parámetro se especifica en el Cuadro 3.2. La puntuación de peso (W_i) se multiplica por el valor del subíndice (L_i) de la curva de parámetro- i obtenida por la calculadora de NSF-WQI publicada en Online por la NSF-WQI (<http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>).

La ecuación NSF-WQI, se puede resumir:

$$NSF - WQI = \sum_{i=0}^n W_i * L_i$$

Donde:

NSF-WQI: Índice de calidad de agua; W_i : La puntuación del peso del parámetro i ; L_i : El valor del subíndice i .

Cuadro 3.2. Puntaje (W_i) de los 9 parámetros de la calidad de agua del NSF-WQI.

No.	Parámetro	Peso del parámetro (W_i)
1	Oxígeno disuelto	0.17
2	Ph	0.11
3	Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días	0.11
4	Cambio de la temperatura	0.10
5	Fosfóro total	0.10
6	Nitratos	0.10
7	Turbidez	0.08
8	Sólidos totales	0.07
9	Coliformes totales y fecales	0.16
	Total	1.00

La puntuación NSF-WQI será identificado de acuerdo a los criterios de clasificación del Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Criterios de clasificación según NSF-WQI.

Puntaje de NSF-WQI	Criterio
0-25	Muy mal
26-50	Mal
51-70	Medio
71-90	Bueno
91-100	Excelente

3.3. Resultados y discusión

Temperatura, turbidez, sólidos totales

Los resultados generales de los parámetros de la calidad de agua del Río Sonso se muestran en el Cuadro 3.4. La temperatura del agua del Río Sonso oscila entre 19.47 a 18 °C (presenta un rango de 1.47 °C), por lo que se considera en buenas condiciones de calidad de acuerdo al GR 82/2001, el GR 82/2001 define el límite máximo permisible en 3°C, por lo tanto, las temperaturas del agua en las cinco estaciones siguen cumpliendo con el estándar de calidad.

La turbidez del agua en la parte superior del río denota valores bajos comparados con la corriente del río aguas abajo, esto se debe a que en esta estación de muestreo el río está ubicado a pie de monte entre las serranías de las localidades de Ixpila y Tlamatoca. La turbidez se deriva de materiales suspendidos tales como: barro, arena, materiales orgánicos e inorgánicos y organismos microscópicos. La turbidez del agua en la parte superior del Río Sonso registró 0.47 NTU. La TB en la parte inferior del río registro valores de 3.64 NTU. Existe una relación lineal que muestra que 1 NTU (Unidad Turbídica Nefelométrica) corresponde a aproximadamente 1-2 mg L⁻¹ de sólidos en suspensión (Rügner *et al.*, 2013).

Los mayores datos registrados de TB fueron en las estaciones 2 a 5 oscilando entre 0.96 a 3.64 NTU, en estos sitios los habitantes de las localidades utilizan el agua del río para lavado de ropa y herramientas agrícolas, baño diario y en la estación 5 se descarga de los beneficios los residuos de la pulpa de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.) producto del beneficiado.

Cuadro 3.4. Calidad del agua del Río Sonso.

No.	Parámetro	Unidad	Norma de Calidad	Promedio de cinco muestreos por estación				
				Estacion de muestreo				
Estandares de calidad				1	2	3	4	5
Físicos								
1	Temperatura	(°C)	Desviación 3°C ***	18.00	18.13	18.13	18.63	19.47
2	Sólidos disueltos totales	(mg L ⁻¹)	1,000 * ≤500 **	64.33	63.27	64.13	69.55	127.18
3	Turbidez	(NTU)	5 * ≤ 5 **	0.47	0.96	1.47	1.56	3.64
Químicos								
4	pH	-	6.5-8.5 *	8.04	7.86	7.57	7.56	7.67
5	OD	(mg L ⁻¹)	<4 ***	5.6	6.1	6.9	7.1	7.20
6	DBO ₅	(mg L ⁻¹)	3 ***	27.4	40	42	31.8	40.1
7	NO ₃	(mg L ⁻¹)	10 *** 45 **	0.8	1.2	1.9	2.3	2.6
8	Fosfato total	(mg L ⁻¹)	0.2 ***	0.17	0.1	0.10	0.13	0.17
Microbiológicos								
9	Coliformes totales	NMP/10 0 ml	2 NMP/ 100 ml *	8222	3579	1561	8819	2483
10	Coliformes fecales <i>E. coli</i>	NMP/10 0 ml	No detectable NMP/100 ml *	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia

* Limite máximo permisible según la norma oficial mexicana, NOM-127-SSA1-1994 para su posible uso como agua potable (SSA,1994). ** Limite máximo permisible norma de agua para consumo humano según lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2004). *** Limites máximo permisible según el Reglamento Gubernamental No. 82/2001 clase II.

Los sólidos disueltos totales (SDT) en agua potable consisten principalmente en cloruro, sulfato, carbonatos, sodio, magnesio y calcio. El exceso de sólidos disueltos en el agua potable puede conducir a un sabor desagradable, y la corrosión o incrustaciones en el sistema de distribución de

agua. A concentraciones mayores de aproximadamente 1,000 mg L⁻¹, el sabor del agua se vuelve cada vez más desagradable, en lo que se refiere a aspectos de salud, no hay evidencia de reacciones fisiológicas adversas a niveles de TDS mayores de 1,000 mg L⁻¹ (WHO, 2004).

El total de SDT osciló entre 64.33 – 127.18 mg L⁻¹. La TB más alta se registrò en la estación 5 presentandose ahí tambien los valores maximos de SDT (127.18 mg L⁻¹); la WHO, 2004 y la NOM-127 requiere SDT 1,000 y 500 mg L⁻¹ respectivamente por lo que los SDT de las cinco estaciones aún cumplan con el estandar de calidad; aunque muchas personas disfrutan de aguas altamente mineralizadas que contienen más de 2,000 mg L⁻¹ de TDS (WHO, 2004).

pH, oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno

Como parte de las actividades económicas de los habitantes de la microcuenca existen beneficios o pequeñas agroindustrias dedicadas al beneficiado del café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), a lo largo del cauce del río es hasta las estaciones de muestreo cuatro y cinco que existen este tipo de agroindustrias; una de las agroindustrias que más contamina el agua en los países en vías de desarrollo es la del café (Woldesenbet *et al.*, 2014); la pulpa del café que resulta del beneficio se deposita en las corrientes de agua, lo que eutrofiza los cuerpos de agua, genera un aumento considerable de la demanda bioquímica de oxígeno, aumenta la carga de sólidos totales, disminuye el pH e incrementa la temperatura del agua (Ferrell y Cockerill, 2012; Haddis y Devi, 2008). Para producir un café de mayor calidad utilizan el método húmedo el cual requiere grandes cantidades de agua limpia, en promedio se usa 3000-4000 litros de agua por 240 kg de café (Clay, 2004).

Dependiendo del manejo del efluente, las aguas residuales del proceso de beneficiado del café pueden lixiviar hacia las fuentes de agua subterránea poco profundas o las fuentes de agua potable para las comunidades circundantes.

Un estudio en 2006 sobre la planta de procesamiento de café en la zona de Zimma de Etiopía encontró que las concentraciones de BOD, fosfato, nitrato y sólidos en suspensión de la descarga de fuentes puntuales eran mucho más altas que los límites permisibles por la Organización Mundial de la Salud; la gente de las comunidades que rodeaban esta planta reportó irritación de la piel, problemas de estómago, náuseas y problemas respiratorios por el consumo de agua contaminada (Devi *et al.*, 2008). Por otro lado las instalaciones de procesamiento pequeñas no tienen medios para tratar las aguas residuales antes de liberarlas al medio ambiente y además, hay pocas regulaciones ambientales aplicadas en muchas regiones productoras de café y las que existen no se aplican (Clay, 2004).

Por lo general, el pH no tiene un impacto directo en los consumidores. Es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua, con el pH óptimo requerido frecuentemente en el rango de 7.0-8.5 (WHO, 2004).

El pH varió entre 7.56 - 8.04, los valores numéricos menores se presentan en el muestreo de las estaciones 4 y 5 con valores de de pH 7.56 y 7.67 respectivamente, sin embargo, las cinco estaciones están dentro de los límites establecidos por la NOM-127, por lo tanto el pH del agua de la corriente superficial alcanzan los criterios de buena calidad.

La concentración de oxígeno disuelto refleja el equilibrio entre los procesos productores de oxígeno y los procesos que consumen oxígeno (Masrur, 2017). El contenido de oxígeno disuelto del agua es influenciado por la fuente, la temperatura del agua bruta, el tratamiento y los procesos químicos o biológicos que tienen lugar en el sistema de distribución (WHO, 2011), además de la salinidad, agotamiento de oxígeno, fuentes de oxígeno y otros parámetros de calidad del agua (Masrur, 2017).

La concentración de oxígeno disuelto depende de las actividades físicas, químicas y bioquímicas en el cuerpo de agua, y su medición proporciona una buena indicación de la calidad del agua, los cambios en las concentraciones de oxígeno disuelto pueden ser una indicación temprana de las condiciones cambiantes en el cuerpo de agua (WHO, 1996b).

En relación al oxígeno disuelto (OD) las cinco estaciones de muestreo presentan valores entre 5.6 – 7.2 mg L⁻¹ por lo que se encuentran de acuerdo a las normas en el criterio de buena calidad. El OD es un parámetro frecuentemente utilizados para evaluar la calidad del agua en diferentes embalses y cuencas hidrográficas (Sánchez *et al.*, 2007), este parámetro está fuertemente influenciado por la combinación de características físicas, químicas y biológicas de las corrientes que requieren oxígeno, incluyendo la biomasa de algas, la materia orgánica disuelta, los sólidos suspendidos volátiles de amoníaco y la demanda de oxígeno de los sedimentos (Quinn *et al.*, 2005). Abazar *et al.*, (2017), refiere que en la actualidad el desarrollo industrial y urbano es una de las principales razones para aumentar la contaminación de los ríos. De hecho, no siempre los ríos han sido una fuente de agua para las sociedades, sino que también han sido un lugar para descargar las aguas residuales y fuentes de contaminación (Farhadian *et al.*, 2014). Por lo tanto, la DBO es uno de los parámetros más importantes para la detección de la calidad del agua de los ríos (Dogan *et al.*, 2009), es vital considerarlo para detectar su condición.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba empírica, en la que se utilizan procedimientos estandarizados de laboratorio para estimar las necesidades relativas de oxígeno de aguas residuales, efluentes y aguas contaminadas; los microorganismos utilizan el oxígeno atmosférico disuelto en el agua para la oxidación bioquímica de la materia orgánica, que es su fuente de carbono (WHO, 1996b). La DBO se utiliza como una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica bioquímicamente degradable presente en una muestra (WHO, 1996b; Chapman, 1992). El exceso de concentración de la DBO reduce la concentración de oxígeno disuelto (OD) y crea condiciones de vida inadecuadas para las plantas y animales acuáticos (Radwan *et al.*, 2003), en cambio bajo contenido de DBO indica que el tramo del río está libre de contaminación orgánica (Saksena *et al.*, 2008).

La DBO en el Río Sonso osciló entre 27.4 y 40.1 mg L⁻¹, por lo que se considera muy alta de acuerdo a las normas de calidad establecidas. Alta DBO en el agua es indeseable, ya que reducirá el DO (Radwan *et al.*, 2003). El RG 82/2001 establece la DBO debe ser <3 mg L⁻¹, por lo que la DBO de las cinco estaciones de muestreo han rebasado los criterios de la norma de calidad.

Los altos contenidos de DBO indican que el tramo del río está contaminado por materia orgánica, Fokmare y Musaddiq (2002) registraron un valor alto de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de 20.00 mg L⁻¹ en el Río Purna y dijeron que este río está altamente contaminado debido al enriquecimiento orgánico, la descomposición de las plantas y la materia animal en el río.

Nitratos y fosfato total

Dentro de las afectaciones más importantes a los sistemas fluviales está el enriquecimiento por fosfatos y nitratos, ya que estos favorecen el crecimiento de los microorganismos y plantas que se encuentran en la base de las redes tróficas acuáticas (Rivas *et al.*, 2009). El fósforo en las descargas domésticas proviene principalmente del uso de detergentes y de los excrementos humanos (Teixeira *et al.*, 2013).

La concentración de fosfato en el Río Sonso varió entre 0,10 y 0,17 mg L⁻¹. Ninguna actividad humana afectó significativamente a la concentración de fosfato. La fuente de fosfato en el agua se deriva del desgaste de los minerales de roca, la descomposición de materia orgánica, detergentes, fertilizantes, residuos industriales y desechos domésticos. RG 82/2001 establece que el contenido total de fosfato debe ser ≤ 0,2 mg L⁻¹. Por lo tanto, el fosfato total en las cinco estaciones cumplió con el estándar de calidad.

Las cinco estaciones de muestreo presentaron concentraciones de nitratos en el intervalo de los 0.8 – 2.6 mg L⁻¹, la estación cinco presentó la concentración mayor (2.6 mg L⁻¹). La RG 82/2001 establece que los contenidos de nitrato deben ser ≤ 10 mg L⁻¹, por lo que la concentración de nitrato en las cinco estaciones se encuentra dentro de los estándares de calidad. La presencia de nitratos está altamente relacionada con el manejo de los agroecosistemas por parte de los habitantes de la microcuenca, principalmente el uso y manejo de fertilizantes químicos, las actividades humanas diarias como verter las aguas residuales domésticas, los desechos animales, los residuos agrícolas y agroindustriales, así como la erosión del suelo.

Coliformes totales y coliformes fecales

Las actividades humanas son reconocidas como una de las principales amenazas para los ambientes acuáticos (Allan, 2004). Las descargas domésticas afectan las aguas debido a que transportan contaminantes orgánicos, inorgánicos y microorganismos (Daghrir *et al.*, 2014). El 98% de las aguas residuales domésticas están contaminadas con sólidos suspendidos, compuestos no biodegradables, metales y nutrientes, entre otros (Teixeira *et al.*, 2013).

La presencia de coliformes en el agua es un signo para indicar la posible presencia de contaminación fecal y por lo tanto, la presencia de patógenos; las bacterias coliformes fecales son un subconjunto del grupo de coliformes totales, la razón para la prueba de coliformes fecales es porque este tipo de bacterias sólo existe en el tracto gastrointestinal de animales de sangre caliente; su presencia en el agua podría indicar la contaminación fecal y por lo tanto, la presencia de patógenos (Almeida *et al.*, 2012). Estos patógenos no son fiables porque son difíciles de detectar, pueden causar enfermedades graves como el cólera, la fiebre tifoidea, la salmonela y la disentería (Atlas y Bartha, 1993).

E. coli se encuentra en grandes cantidades en las heces de los seres humanos y de casi todos los animales de sangre caliente; como tal sirve como un índice confiable de contaminación fecal reciente del agua (WHO, 1996a).

Las cinco estaciones de muestreo presentaron concentraciones de coliformes totales, en un rango de 1561 a 8222 NMP/100 ml, por lo que sobrepasan el límite permisible de la NOM-127 que establece 2 NMP/100 ml, por lo que los coliformes totales se encuentran fuera del estándar de calidad. Además, la bacteria *E. coli* tiene presencia en todas las estaciones de muestreo por lo que está fuera de los estándares de calidad, los cuales establecen No detectable NMP/100 ml.

La presencia de coliformes totales y coliformes fecales se debe principalmente a las descargas domésticas de excrementos humanos y animales. Los coliformes fecales (FC) son ampliamente utilizados como indicadores de la contaminación fecal en el agua (Sivaraja y Nagarajan, 2014) y se ha demostrado que están correlacionados positivamente con la presencia de bacterias entéricas patógenas (Culbertson *et al.*, 2014).

Índice de calidad de agua a través de la NSF-WQI

Basado en el análisis utilizado para el cálculo de la NSF-WQI, se presenta la clasificación del agua del Río Sonso en cada estación de monitoreo en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Valor NSF-WQI del Río Sonso.

Estación de muestreo	Puntuación NFS-WQI	Clasificación
1	71	Bueno
2	71	Bueno
3	70	Medio
4	70	Medio
5	69	Medio

La calidad del agua en cada estación presentó valores similares, el rango se situó en las puntuaciones NFS-WQI de 69 - 71; las estaciones 1 y 2 presentan una puntuación NFS-WQI de 71 lo que le corresponde a una clasificación en la categoría de “Bueno”. Las estaciones 3 a 5 alcanzan puntajes NFS-WQI de 69 y 70 que corresponde a la clasificación de calidad de agua en la categoría “Medio”. Esta característica de la calidad del agua es derivada de las acciones de las actividades antropogénicas que se desarrollan al interior de la microcuenca, particularmente las descargas de aguas residuales domésticas y de beneficios de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.) así como el manejo de los agroecosistemas.

3.4. Conclusiones

Las actividades antropogénicas desarrolladas al interior de la microcuenca están afectando la calidad del agua del Río Sonso; los parámetros demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales y coliformes fecales no cumplen con los criterios de calidad establecidos en las normas. El cálculo de la calidad del agua de esta corriente superficial a través del índice NFS-WQI lo ubica en la clasificación “bueno” y “medio”.

Agradecimientos

El autor principal agradece al Programa de Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP) por el apoyo otorgado de beca convencional nacional para estudios de Doctorado. A la línea de Investigación “Evaluación y rediseño de agroecosistemas” del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz y a la convocatoria de fortalecimiento de cuerpos académicos 2015 por el apoyo económico otorgado para la realización de la presente investigación.

3.5. Literatura citada

- Abazar Solgi, Amir Pourhaghi, Ramin Bahmani, Heidar Zarei.2017. Improving SVR and ANFIS performance using wavelet transform and PCA algorithm for modeling and predicting biochemical oxygen demand (BOD), *Ecohydrology & Hydrobiology*, 7: 164-175.
- Ali, F. M., 2010. Water quality evaluation system to assess the status and the suitability of the Citarum river water to different uses. *Environ Monit Assess*, Septiembre, 168: 669–684.
- Allan, J. D. 2004. Landscapes and riverscapes: the influence of land use onstream ecosystems. *Annual. Review of Ecology Evolution and Systematics*, 257–284.
- Almeida C., Oliva G. S., Mallea M. y González P. 2012- A recreational water quality index using chemical, physical and microbiological parameters. *Environmental Science and Pollution Research*. 19: 3400–3411.
- Atlas RM, Bartha R. 1993. *Microbial ecology: fundamentals and applications*. Benjamin/Cummings, Redwood City. 694 p.
- Chapman, D., 1992. *Water Quality Assessments. A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring - Second Edition*. Edited by Deborah Chapman and Hall Ltd, London. 630 p.
- Clay J. 2004. *World agriculture and the environment, a commodity-by-commodity guide to impacts and practices*. Washington DC: World Wildlife Fund-Island Press. 570 p.
- Culbertson, C.W., Huntington, T.G., Stoeckel, D.M., Caldwell, J.M., O'Donnell, C. 2014. *Water Quality and Sources of Fecal Coliform Bacteria in the Meduxnekeag River, Houlton, Maine*. United States Geological Survey. 44 p.
- Daghrir Rimeh, Patrick Drogui, Joel Tshibangu.2014. Efficient treatment of domestic wastewater by electrochemical oxidation process using bored doped diamond anode, *Separation and Purification Technology*. 131: 79-83.
- Darapu, Er. S.S. K., Sudhakar, Er. B., Krishna, K.S.R., Rao, P. V., and Shekhar M. C. 2011. Determining Water Quality Index for the Evaluation of water Quality of River Godavari. *International Journal of Engineering Research and applications (IJERA)*. 1: 174-182.
- Devi Rani, Vijender Singh, Ashok Kumar, COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon, *Bioresource Technology*. 99: 1853-1860.

- Directorate General of Water Resources (DGWR).2007. Integrated Ciatrum water resources management project: Report on roadmap and program development. In Technical assistance consultant's report. Indonesia: Government of republic Indonesia, For Directorate General of Water Resources Ministry of Public Works. 203 p.
- Dogan Emrah, Bülent Sengorur, Rabia Koklu. 2009. Modeling biological oxygen demand of the Melen River in Turkey using an artificial neural network technique, *Journal of Environmental Management*, 90: 1229-1235.
- Farhadian, M., Haddad, O., Seifollahi-Aghmiuni, S., Loa'iciga, H. 2014. Assimilative capacity and flow dilution for water quality protection in rivers. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste* 19: 2-45
- Ferrell J., K. Cockerill. 2012. Closing coffee production loops with waste to ethanol in Matagalpa, Nicaragua, *Energy for Sustainable Development*. 16:44-50.
- Fokmare, A.K. and M. Musaddiq. 2002. A study of physico-chemical characteristics of Kapsi lake and Purna river waters in Akola district of Maharashtra, India. *Nat. Environ. Pollut. Technol.*1: 261-263.
- Haddis Alemayehu, Rani Devi.2008. Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity, *Journal of Hazardous Materials*. 152: 259-262.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2011. Censo de Población y Vivienda, 2010 (Informe nacional y estatales), México. Disponible en: <http://www.censo2010.org.mx>
- Masrur Ahmed A. 2017. Prediction of dissolved oxygen in Surma River by biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand using the artificial neural networks (ANNs), *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 29:151-158,
- Mimoza Milovanovic. 2007. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe, *Desalination*, 213:159-173.
- NOM-127-SSA1-1994. 1994. Norma oficial mexicana: salud ambiental, agua para uso y consumo humano-limites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaria de Economía, México.
- NOM-230-SSA1-2002. Norma oficial mexicana: Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- Quinn N.W.T., Karl Jacobs, Carl W. Chen, William T. Stringfellow.2005. Elements of a decision support system for real-time management of dissolved oxygen in the San Joaquin River Deep Water Ship Channel, *Environmental Modelling & Software*, 20:1495-1504.
- Radwan, M., Willems, P., El-Sadek, A., Berlamont, J.2003. Modelling of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand in river water using a detailed and simplified model. *Int. J. River Basin Manag.* 1 (2):97–103.

- Rivas, Z., Sánchez, J., Troncone, F., Márquez, R., Ledo-de Medina, H., Colina, M., *et al.*, (2009). Nitrógeno y fósforo totales de los ríos tributarios al sistema lago de Maracaibo, Venezuela. *Interciencia*, 34:308–314.
- Rügner, H., Schwientek, M., Beckingham, B., Kuch, B., Grathwohl, P. 2013. Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. *Environmental Earth Sciences*. 69:373–380.
- Saksena DN, Garg RK, Rao RJ. 2008. Water quality and pollution status of Chambal River in National Chambal Sanctuary, Madhya Pradesh. *Journal of Environmental Biology*; 29 (5):701-10.
- Sánchez E., Colmenarejo F. M., Vicente J., Rubio A., García G. M., Travieso L. y Borja R. 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators* 7:315–328.
- Sarala Thambavani D. & T.S.R. Uma Mageswari. 2014. Water quality indices as indicators for potable water, *Desalination and Water Treatment*, pp:25-27.
- Simeonov, V. J.A. Stratis, C. Samara, G. Zachariadis, D. Voutsas, A. Anthemidis, M. Sofoniou, Th. Kouimtzis. 2003. Assessment of the surface water quality in Northern Greece, *Water Research*, 37:4119-4124.
- Simeonova, P., Simeonov, V. & Andreev, G. 2003. Water quality study of the Struma river basin, Bulgaria (1989–1998). *Open Chemistry*, 1(2): 121-136.
- Sivaraja, R., Nagarajan, K. 2014. Levels of indicator microorganisms (total and fecal coliforms) in surface waters of rivers Cauvery and Bhavani for circuitously predicting the pollution load and pathogenic risks. *Cell* 6, pp:455–461.
- Suresh K.R., M.A. Nagesh. 2015. Experimental Studies on Effect of Water and Soil quality on Crop Yield, *Aquatic Procedia*, 4:1235-1242.
- Teixeira-Correia, G., Sánchez-Ortiz, I. A., Gebara, D., Dall’Aglío-Sobrinho, M. y Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aerobios de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 67:172–182.
- Tsegaye, T., Sheppard, D., Islam, K.R., Johnson, A., Tadesse, W., Atalay, A., Marzen, L. 2006). Development of chemical index as a measure of in stream water quality in response to land use and land cover changes. *Water Air Soil Pollut.* 174:161–179
- Wang Y., C. Woonup, M.D. Brian. 2005. Long-term impacts of land-use change on non-point source pollutant loads for the St. Louis metropolitan area, USA, *Environmental Management*. 35:194–205.
- Woldesenbet, A. G., Woldeyes, B. y Chandravanshi, B.S. 2014. Characteristics of wet coffee processing waste and its environmental impact in Ethiopia. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 2:1–5.
- World Health Organization. 1996a. Guidelines for drinking water quality. Health Criteria and Other Supporting Information, vol 2, 2nd edn. WHO, Geneva, Switzerland. 22 p.

- World Health Organization.1996b. Water quality monitoring: a practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes. E&FN Spon, London, UK. 348 p.
- World Health Organization. 2004. Guidelines for drinking water quality: training pack. Protection of the Human Environment. Water, Sanitation and Health Series WHO, Geneva, Switzerland. 540 p.
- World Health Organization.2011. Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth edition. ISBN 978 92 4 1548151. 564 p.
- Xu H.S., Z.X. Xu, W. Wu, F.F. Tang.2012. Assessment and Spatiotemporal Variation Analysis of Water Quality in the Zhangweinan River Basin, China, Procedia Environmental Sciences, 13:1641-1652.

CAPÍTULO IV. SUSTENTABILIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO SONSO EN FUNCIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE MANEJO AGRONÓMICO DE LOS AGROECOSISTEMAS

Resumen

El objetivo del presente trabajo es construir un índice de la sustentabilidad a nivel microcuenca en función del manejo de los agroecosistemas, basado en seis indicadores: a) Agrobiodiversidad, b) cantidad de materia orgánica, c) prácticas de manejo que propician condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos, d) prácticas de manejo para evitar o reducir pérdida de suelo, e) tipo de manejo para el control de plagas, enfermedades y f) manejo para el control de arvenses. De una población de 543 productores que habitan en la microcuenca del Río Sonso perteneciente a la subcuenca alta del Río Jamapa en el Estado de Veracruz, se seleccionaron a través del muestreo aleatorio simple a 153 productores para la evaluación de los indicadores a través de la aplicación de entrevistas a los agricultores. De los seis indicadores, cinco se evaluaron a través de la técnica de la entrevista dirigida en la que se consideran una serie de variables en cada indicador; el indicador cantidad materia orgánica se realizó mediante un análisis de suelo para determinar los porcentajes por el método de Walkley Black. Los resultados obtenidos demostraron que la microcuenca del Río Sonso se encuentra en la categoría manejo sustentable bajo de acuerdo con la escala de manejo sustentable construida. El índice construido permitió confirmar la hipótesis de que la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso está siendo afectada a través de las actividades desarrolladas en el manejo de los agroecosistemas.

Palabras clave: Índice sustentabilidad, microcuenca, Indicadores.

Abstract

The aim of the present work was to develop an index of sustainability at the Micro-watershed level considering agroecosystem management indicators, such as: a) agrobiodiversity, b) quantity of organic matter, c) management practices that provide optimal soil conditions for the development of crops, d) management practices to avoid or reduce soil loss, e) type of management to control pests, diseases, and f) management for weed control. From a population of 543 producers living in the Sonso River Micro Watershed belonging to the upper Jamapa River sub basin in the State of Veracruz, 153 were selected randomly for the evaluation by direct interview that considera five of the six indicators. Soil organic matter was evaluates by the Walkley Black method. The results

showed that the micro watershed of the Sonso River is in the low sustainable management category according to the created sustainable management scale. The constructed index allowed to confirm the hypothesis that the sustainability of the Sonso River watershed is being affected through the activities developed in the management of agroecosystems.

Key words: Sustainability index, micro basin, indicators.

4.1. Introducción

El desarrollo sustentable se ha convertido en un objetivo ampliamente aceptado para la comunidad mundial, ya que en muchas partes del mundo las condiciones ambientales están fuera de control (Liu *et al.*, 2016). La sustentabilidad es un concepto que pretende cumplir con varios objetivos en forma simultánea que involucran dimensiones productivas, ecológicas o ambientales, sociales, culturales, económicas y fundamentalmente temporales; para lograr avanzar, es necesario que la complejidad y la multidimensional de la sustentabilidad sean simplificadas en valores claros, objetivos y generales conocidos como indicadores.

El concepto sustentabilidad es un concepto complejo, controversial, multidimensional y en evolución, a partir del cual se evidencia la necesidad imprescindible de un proceso de transformación estructural, que permita integrar medioambiente con desarrollo, y a la vez economía con ecología (Jiménez, 1989; Bell, 2016). La necesidad de este proceso de transformación se deriva del mal uso de los recursos por el hombre, generado por el cambio social global debido al aumento de la población, el crecimiento económico, el avance tecnológico y la pobreza (Jiménez, 1989), además de las deficientes políticas públicas con intereses a corto plazo sin considerar el desarrollo sustentable a largo plazo para el beneficio de las futuras generaciones. La preocupante insostenibilidad del actual modelo de desarrollo humano ha generado la toma de conciencia junto con la necesidad de investigar sobre cómo evaluar y medir el estado de sostenibilidad (o insostenibilidad) de cada modelo de desarrollo y producción a distintas escalas, con el propósito final de implementar técnicas o tecnologías que mejoren o minimicen el impacto ambiental (FMAM, 2000); en otras palabras existe la necesidad de transformar el concepto de sustentabilidad en definiciones y estrategias operacionales que puedan ser utilizadas para evaluar el impacto de distintas acciones en la sustentabilidad de los sistemas (López *et al.*, 2005).

El objetivo de la evaluación de sustentabilidad es proporcionar a los tomadores de decisiones, una valoración de ámbito local a global que integre los sistemas de naturaleza y sociedad a corto y

largo plazo, a fin de coadyuvar a determinar qué acciones deben o no deben ser emprendidas para favorecer una sostenible relación entre sistemas (Kates *et al.*, 2001; Devuyst *et al.*, 2010; Ness *et al.*, 2007); entre ellos los agroecosistemas como fuente de alimentos, fibras u otros productos útiles para la sociedad. El objetivo general de la presente investigación es diseñar un índice de la sustentabilidad a nivel microcuenca en función de seis indicadores relacionados con el manejo de los agroecosistemas.

4.2. Materiales y métodos

Área de estudio

La microcuenca del Río Sonso se encuentra en su totalidad dentro del Municipio de Huatusco, Veracruz y el Río del mismo nombre atraviesa a cinco localidades: Tlamatoca, Novillero Amatiopa, Michapa, Ixpila y Cinco de Mayo. Se ubica entre las coordenadas 96°55' a 96°59' de longitud oeste y 19°5' a 19°8' de latitud norte. Posee una superficie de 18.34 km² y una altitud que va de los 960 msnm en la parte más baja a los 1,900 msnm en las partes más altas; el número de habitantes de la microcuenca asciende a 5254 de los cuales el 49.3% son hombres y el 50.7% mujeres. Las localidades que representan el mayor número de habitantes son Tlamatoca e Ixpila, con 1479 y 1424 habitantes respectivamente; el INEGI clasifica a estas localidades por el número de habitantes como de tamaño 4 (1000 a 2499 habitantes).

Construcción de indicadores

Se tomaron los seis principios considerados por Altieri (1,999) como básicos para considerar un manejo sustentable del agroecosistema, con un enfoque agroecológico. Sobre esta base se construyen seis indicadores relacionados con el manejo sustentable en agroecosistemas: a) agrobiodiversidad, b) cantidad de materia orgánica, c) prácticas de manejo que provisionan condiciones edáficas óptimas, d) prácticas de manejo para evitar o reducir pérdida de suelo, e) tipo de manejo para el control de plagas, enfermedades y f) manejo para el control de arvenses. Cada indicador tomará en su clasificación la siguiente escala general: Manejo sustentable nulo (1), Manejo sustentable bajo (2), Manejo sustentable medio (3), Manejo sustentable alto (4) y Manejo sustentable deseable u óptimo (5) (Cuadro 4.1).

Indicador 1. Agrobiodiversidad, se considera positivo para el manejo sustentable que exista una mayor diversidad de especies vegetales, animales domésticos y presencia de fauna silvestre en el agroecosistema, la variable a considerar será el número de especies diferentes; así se construirán

cinco escalas de manejo sustentable: a) para el manejo sustentable nulo la presencia de al menos diez especies, b) manejo sustentable bajo de 11 a 20 especies, c) manejo sustentable medio de 21 a 30 especies, d) manejo sustentable alto de 31 a 40 especies y e) manejo sustentable deseable u óptimo mayor a 41 especies.

Indicador 2. Cantidad de materia orgánica. A través del método Walkley Black se determinaron los porcentajes de materia orgánica (m.o) de las muestras de suelo de los agroecosistemas de la microcuenca, los resultados se clasificaron de acuerdo a los porcentajes de materia orgánica: a) cantidades menores al 1% de m.o. (un porcentaje muy pobre) tomaron el valor de 1 o manejo sustentable nulo, b) cantidades de 1 al 2% (porcentaje pobre) se le asigna el valor de 2 o manejo sustentable bajo, c) de 2 a 3% (porcentaje medio) se asigna el valor de 3 o manejo sustentable medio, d y e) cantidades de 3 a 3.5 % o mayores a 3.5 % de m.o., considerados porcentajes altos o ricos en materia orgánica, se les asignará escalas de manejo sustentable alto y deseable u óptimo respectivamente.

Indicador 3. Prácticas de manejo que propician condiciones edáficas óptimas, las variables corresponderán a prácticas de manejo que contribuyen a la sustentabilidad del agroecosistema en particular y de la microcuenca en general, cada variable tomará el valor de 1 si es que se realiza y el valor de 0 si no, con excepción en la variable 2 donde el criterio que se aplicará será de forma inversa. La suma de las cinco variables genera el valor del indicador 3. Variable 1: Aplica o promueve la incorporación de abonos orgánicos. Variable 2.- Uso de herbicidas (si no usa el valor es 1 y si usa es 0). Variable 3. Mantiene la cubierta vegetal en el suelo. Variable 4. Realiza análisis de suelo para la correcta aplicación de abonos y fertilizantes. Variable 5. Uso de mejoradores de suelo.

Indicador 4. Prácticas de manejo para evitar o reducir la pérdida de suelo. Las prácticas de manejo para evitar la erosión del suelo es importante, debido a que los agroecosistemas de la microcuenca se ubican sobre terrenos en laderas con pendientes pronunciadas. Estas variables corresponden a prácticas de manejo que favorecen la sustentabilidad, a cada variable le corresponderá el valor de 1 si se realiza y el valor de 0 si no se lleva a cabo. La sumatoria de los valores de las cinco variables generará el valor del indicador. Variable 1. Cobertura del suelo. Variable 2. Orientación de surcos establecidos de forma inversa a la pendiente. Variable 3. Surcos trazados a curvas de nivel. Variable 4. Establecimiento de terrazas. Variable 5. Establecimiento de barreras muertas o barreras vivas.

Cuadro 4.1. Indicadores de manejo agronómico para agroecosistemas sustentables.

Indicador	Variable	Valor numérico	Escala de manejo sustentable
1.-Agrobiodiversidad.	Número de especies diferentes	<= a 10	Nulo
		11 a 20	Bajo
		21 a 30	Mediano
		31 a 40	Alto
		> =41	Óptimo
2.-Cantidad de materia orgánica.	% Materia orgánica	< a 1.0	Nulo
		1.0 a 2.0	Bajo
		>2.0 a 3.0	Mediano
		>3.0 a 3.5	Alto
		>3.5	Óptimo
3.-Prácticas de manejo que propician condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos.	Número de prácticas	0 a 1	Nulo
		2	Bajo
		3	Mediano
		4	Alto
		5	Óptimo
4. Prácticas de manejo para evitar o reducir la pérdida de suelo	Número de prácticas	0 a 1	Nulo
		2	Bajo
		3	Mediano
		4	Alto
		5	Óptimo
5.-Tipo de manejo para el control de plagas, enfermedades	Tipo de Manejo	1	Nulo
		2	Bajo
		3	Mediano
		4	Alto
		5	Óptimo
6. Manejo para el control de arvenses.	Tipo de Manejo	1	Nulo
		2	Bajo
		3	Mediano
		4	Alto
		5	Óptimo
Σ 30			

Indicador 5. Valoración de acuerdo al indicador tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades. Para este indicador es necesario utilizar una ponderación de 1 a 5 en relación a la técnica utilizada en el control de plagas y enfermedades. Variable 1. Manejo mediante sustancias químicas (Valor 1), Variable 2. Control biológico (Valor 2), Variable 3. Manejo orgánico (Manual y/o biológico) (Valor 3), Variable 4. Manejo integrado de Plagas (MIP) (Valor 4) y Variable 5. Sin presencia de plagas o enfermedades (Valor 5).

Indicador 6. Valoración de acuerdo con el tipo de manejo para control de arvenses. Se usará una ponderación de 1 a 5, la cual tienen una relación directamente proporcional, es decir a mayor valor, mayor es la aportación del manejo de los agroecosistemas a la sustentabilidad de la microcuena. Variable 1: Control químico (uso de herbicidas). Variable 2: Combinación de los siguientes métodos de control: a) químico y físico, b) químico y cultural, c) físico y cultural y d) físico, cultural y químico. Variable 3: Métodos físicos (arranque manual, arranque con azadón, corte con machete y corte con otra herramienta). Variable 4: Combinación de los siguientes métodos de control: a) Físico y cultural y Variable 5: Métodos culturales (rotación de cultivos, preparación del terreno, distancia de siembra o plantación, cobertura viva de cultivos, acolchado, manejo de agua y uso de especies pecuarias menores (por ejemplo, borregos).

A partir de la información de los seis indicadores se construye el índice de manejo sustentable de los agroecosistemas a nivel microcuena (IMASAM), el cual será el promedio del índice de manejo agronómico sustentable de los agroecosistemas (MASA).

Estos índices tomarán valores de 1 a 100%, entre más cercano se encuentren al 100% el manejo tiende a la sustentabilidad deseable. Los cálculos matemáticos se realizarán a partir de la ecuación (1 y 2):

Para el cálculo del IMASAM:

$$IMASAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MASA_i \quad (1)$$

Donde:

IMASAM es el índice de manejo sustentable de los agroecosistemas a nivel microcuena; y n es el número de agroecosistemas.

$$\sum_{i=1}^n MASA_i = MASA_1 + MASA_2 + \dots + MASA_n$$

$MASA_i =$ Índice de manejo agronómico sustentable del agroecosistema i

Para el cálculo del manejo de MASA se calcula a partir de:

$$MASA = \sum_{i=1}^6 [(I_1 + I_2 + \dots + I_6)/30] * 100 \quad (2)$$

Dónde:

$\sum_{i=1}^6 (I_1 + I_2 + \dots + I_6)$ es la sumatoria de los valores numéricos de los seis indicadores.

Para este estudio, se evaluaron los 6 indicadores y el peso para cada indicador se considera en igualdad de proporciones. Para el MASA se suman las puntuaciones de los seis indicadores (el valor máximo que puede alcanzar cada indicador es 5) y se divide entre 30 que es el puntaje máximo de los seis indicadores. Los resultados de ambos índices se clasificarán en cuatro categorías (Cuadro 2), que servirán para ubicar el nivel de sustentabilidad: I (< 50%) manejo no sustentable o no deseable, II ($\geq 50\% \leq 66\%$) Manejo sustentable bajo, III ($> 66\% \leq 83\%$) Manejo sustentable medio y IV ($> 83\% \leq 100\%$) Manejo sustentable óptimo o deseable (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Criterios de clasificación según IMASAN y MASA.

Valor numérico	Indices (%)	Escala de manejo sustentable
1 – 14	< 50 %	Manejo no sustentable o no deseable (I)
15 – 19	$\geq 50\% \text{ a } \leq 66\%$	Manejo sustentable bajo (II)
20 - 24	$> 66\% \text{ a } \leq 83\%$	Manejos sustentable medio (III)
25 – 30	$> 83\% \text{ a } \leq 100\%$	Manejo sustentable óptimo o deseable (IV)

Selección de productores y tamaño de muestra

En la microcuenca se destinan a la producción agrícola 847.33 hectáreas las cuales están a cargo de 542 productores; las localidades de Tlamatoca e Ixpila representan el 73.9 % de la superficie y generalmente estos agroecosistemas están dedicados a la producción de café (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Número de productores y superficie cultivada en la microcuenca del Río Sonso.

Localidad	Superficie (Hectáreas)	Número de Productores
Tlamatoca	437.00	292
Ixpila	189.71	156
Michapa	108.82	67
Novillero	107.86	24
Cinco de Mayo	3.94	3
Subtotal:	847.33	542

Fuente: VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (INEGI, 2007) y Censo Nacional Cafetalero 2014.

Se realizaron cinco visitas de reconocimiento a las localidades de la microcuenca, con el objetivo de establecer contacto con los agentes municipales (autoridades locales) y productores locales. De los 542 productores seleccionaron al azar una muestra de 153, para esto se utilizó el muestreo aleatorio simple, con un nivel de confianza del 93% y un porcentaje de error del 7 %. Para la selección de los productores que integran la muestra y con la finalidad de garantizar que todos los elementos de la población muestral tengan la misma probabilidad de ser elegidos se generaron números aleatorios en el programa Excell[®].

Aplicación del cuestionario y entrevista

Durante los meses de febrero a junio del 2017 se aplicó el cuestionario a 153 productores; la recopilación de la información sobre el manejo agronómico de los agroecosistemas se realizó a través de 23 preguntas dirigidas a los productores. El cuestionario consta de tres apartados: a) Datos de identificación del productor, b) datos de identificación de la parcela y c) manejo agronómico de agroecosistemas. Con el apoyo de los productores se realizó un recorrido en cada agroecosistema a fin de registrar las respuestas al cuestionario, determinar las coordenadas geográficas y altitud con un sistema de posicionamiento global GPS 12 (Garmin[®]). La información recopilada se integró en una matriz de datos para su posterior análisis estadístico de tipo descriptivo. En forma simultánea se evaluó el indicador cantidad de materia orgánica por el método de Walkley Black en el laboratorio central de la Universidad Autónoma Chapingo.

4.3 Resultados

Indicadores relacionados con el Manejo Agronómico Sustentable de los Agroecosistemas (MASA)
Indicador 1. Agrobiodiversidad.

En la microcuenca del Río Sonso se desarrollan sistemas de producción agrícola diversos, los cuales confluyen en lo que se ha llamado policultivo de café; en pequeña escala y como parte del agroecosistema café se realiza la explotación de especies pecuarias menores.

Están presentes en la microcuenca al menos 69 especies de plantas establecidas para diferentes usos, los productores buscan árboles que generen beneficios económicos adicionales como los maderables, frutales, ornamentales y fijadores de nitrógeno, entre otros (Robledo, 2015). En relación con los animales domésticos los productores crían tres especies y en lo que se refiere a la presencia de la fauna silvestre al menos han observado 25 especies diferentes en sus cafetales.

Las especies vegetales con mayor presencia en los agroecosistemas cafetaleros de esta microcuenca son las siguientes: Chalahuite (*Inga sp*), grevillea (*Grevillea robusta*), encino

(*Quercus spp.*), ixpepe (*Trema micrantha* L. Blume), vainillo (*Inga vera*), cedro (*Cedrela odorata* L.), encino (*Quercus oleoides* Schltdl. & Cham), amapa prieta (*Tabebuia chrysantha* Jacq. G. Nicholson), encino rojo (*Quercus laurina* Bonpl), fresno (*Fraxinus uhdei* Wenz Lingelsh), cedro blanco (*Cupressus sp.*), izote (*Yucca elephantipes* Hort. ex Regel), pimienta (*Pimenta dioica* (L.) Merr.), chinene (*Persea schiedeana* Nees), aguacate Hass (*Persea americana* Mill.), guayaba (*Psidium guajaba* L.), mandarina (*Citrus reticulata*), limon (*Citrus limon*), guaje (*Leucaena spp.*), guarumbo (*Cecropia obtusifolia* Bert.), nanche (*Byrsonima crassifolia*), nogal (*Junglans pyriformis* Liebm), guanábana (*Annona muricata* L.), chirimoya (*Annona cherimola*), palo de mujer (*Alchornea latifolia* Sw.), rosadillo (*Swietenia macrophylla* King), palo de agua (*Denderopanax arboreus* (L.) Decne. & Planch), jonote (*Heliocarpus donell-smithi* Rose), gusanillo (*Lippia myriocephala* Schl. et. Cham.), pino (*Pinus sp.*), piocha (*Melia azederach* L.), pochote (*Ceiba pentandra*), anayo (*Beilschmiedia anay*), palma coyol (*Acrocomia mexivana* Karw. et Mart), aguacatillo (*Clethra mexicana*), bambú (*Guadua angustifolia*), ocozote (*Liquidambar styraciflua*), alamo (*Populus mexicana* Wesmael), níspero (*Eriobotrya japónica* Thunb. Lindl), arrayán (*Eugenia capulí*), maracuyá (*Passiflora edulis*), uva silvestre (*Vitis spp.*), plátano (*Musa acuminata*, *Musa balbisiana*), maíz (*Zea mays*), hierbamora (*Solanum nigrum* L.), mango (*Mangifera indica* L.), macadamia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche), naranja (*Citrus sp*), anturio (*Anthurium andreanum*), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), calabaza melón (*Cucurbita moschata* Duch ex Poir.), chile (*Capsicum sp.*), tepejilote (*Chamaedorea tepejilote*), vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews), berro (*Nasturtium officinale*), yuca (*Manihot sculenta*), nopal (*Opuntia sp.*), chayote (*Sechium edule*), durazno (*Prunus sp*), hierbabuena (*Mentha spicata*). Los animales domésticos que forman parte de este sistema son gallinas (*Gallus gallus domesticus*), cerdo (*Sus scrofa domestica*) y ganso (*Anser anser domesticus*); la fauna aún es muy diversa por lo que se aún se pueden observar a la ardilla (*Sciurus aureogaster*, *Sciurus deppei*), tlacuache (*Marmosa mexicana*), conejo (*Sylvilagus floridanus*), armadillo (*Dasybus novemcinctus*), mapache (*Procyon lotor*), tejón (*Nasua narica*), tuza (*Orthogeomys hispidus*), zorra (*Urocyon cinereoargenteus*), culebra (*Coniophanes fissidens*, *Drymobius margaritiferus*), coralillo (*Micrurus diastema*) y una diversidad de aves y hormigas.

De las las 69 especies vegetales reportadas en los 153 agroecosistemas cafetaleros se denotan las siguientes generalidades:

- a) El área de las superficies de los agroecosistemas en donde se encuentran presentes estas especies vegetales oscilaron de 0.0655 a 7 hectáreas.
- b) El componente principal utilizado como sombra en los cafetales es el género *Inga*.
- c) Dentro de cada cafetal la variación en su estructura en cuanto al número de especies oscila de 3 a 38 especies diferentes.
- d) De las 60 especies vegetales detectadas, solamente *Citrus sp* y *Musa sp* son predominantes en la mayoría de los agroecosistemas de la microcuenca.
- e) En relación con los animales domésticos los predominantes son *Gallus gallus domesticus*, aunque cada vez su presencia en los cafetales es menor.
- f) La fauna silvestre vista con mayor frecuencia en los cafetales le corresponde a *Sciurus aureogaster*, *Sciurus deppei* y *Marmosa mexicana*.

Escamilla y Díaz (2016) mencionan que los árboles y arbustos que se encuentran bajo el sistema de café en montaña ascienden a 169 especies, las cuales se distribuyen en las principales regiones productoras de café en los estados de Chiapas, Veracruz y Oaxaca. En un trabajo de investigación de 30 cafetales de 1.5 a 3 hectáreas en sistema de policultivo tradicional, Escamilla *et al.*, 2004 detectaron de manera global un total de 55 especies diferentes. En las plantaciones de café existe una alta diversidad y actividad biológica, por lo que constituyen áreas de conservación, protección de biodiversidad y representan valiosos bancos de germoplasma (Escamilla y Díaz, 2016).

En los agroecosistemas de café de la microcuenca del Río Sonso, el 46.7 % de los cafetales tienen como parte de su estructura al menos 10 especies diferentes, el 39.7 % cuenta con 11 a 20 especies diferentes en su finca y solamente seis de las parcelas visitadas tienen de 31 a 40 especies diferentes como parte de los cafetales. El promedio de especies diferentes encontrado en los agroecosistemas de la microcuenca es de 13, con valores máximos de 38 y mínimo de dos especies diferentes (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Agrobiodiversidad en los agroecosistemas de la microcuenca del Río Sonso.

Variable: Agrobiodiversidad*	Agroecosistemas	Escala de manejo sustentable
≤ a 10	73	Nula (1)
11 a 20	62	Baja (2)
21 a 30	12	Media (3)
31 a 40	6	Alta (4)
≥41	0	Óptima (5)

*Número de especies diferentes.

El manejo de las especies del cafetal es una actividad en la que el productor decide lo que siembra o elimina, esto está en función de sus necesidades biológicas, económicas y culturales que lo llevan a diseñar el cafetal con determinadas plantas; este manejo está en constante dinamismo, por ejemplo, recientemente debido a la presencia de la roya del café (*Hemileia vastratrix*) algunos productores decidieron renovar parcial o totalmente sus cafetales eliminando y modificando parte del mosaico vegetal de estos agroecosistemas.

Indicador 2. Materia orgánica en el suelo.

La materia orgánica del suelo (MOS) en su totalidad incluye organismos del suelo, compuestos orgánicos simples, sustancias húmicas grandes y complejas, así como residuos relativamente frescos en diversas etapas de descomposición (Magdoff y Weil, 2004).

Los porcentajes de MOS (Cuadro 4.5) encontrados en las muestras de suelo de la microcuenca, indican que el 73.3 % se ubican en la categoría “alta o rica en materia orgánica (≥ 3.0 %) de acuerdo con la clasificación de Ortiz y Solorio (1990); asimismo estos resultados corresponden a la categoría de sustentabilidad alto y óptimo que se establecieron para esta investigación. Los valores encontrados de MOS reafirman lo mencionado por Beer *et al.*, (1998), donde menciona que la sombra proporcionada por un dosel de árboles en los cafetales contribuye al aporte de materia orgánica para el suelo.

La MOS mejora la capacidad de retención de agua del suelo, aumenta la tolerancia a la sequía de los cultivos, mejora la infiltración disminuyendo la escorrentía (Magdoff y Weil, 2004); además los beneficios de la MOS están presentes en casi todas las propiedades del suelo (químicas, biológicas y físicas), por lo que se le considera como el centro de la salud y la calidad del suelo (Magdoff y Van Es, 2000).

El promedio de MOS encontrado en la microcuenca fue de 3.88%; ningún agroecosistema se encuentra con valores inferiores al 1 % y el mayor porcentaje evaluado corresponde a 9.29%.

Cuadro 4.5. Materia orgánica del suelo en la microcuenca del Río Sonso.

Variable: Materia orgánica del suelo	Categoría*	Agroecosistemas	Escala de manejo sustentable
Valores menores a 1 %	Muy pobre	0	Nulo (1)
Valores entre 1 y 2 %	Pobre	4	Bajo (2)
Valores entre 2 y 3 %	Medio	34	Medio (3)
Valores entre 3 y 3.5	Altos o ricos	28	Alto (4)
Valores mayores a 3.5 %	Altos o ricos	87	Óptimo (5)
		Σ 153	

Fuente: Ortiz y Solorio, 1990*.

Indicador 3. Prácticas de manejo que propician condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos.

La intensificación de la agricultura ha acelerado el uso indiscriminado de pesticidas y fertilizantes químicos, los cuales han afectado negativamente la biota del suelo, la calidad de los productos y la salud humana (Rivera-Becerril *et al.*, 2017); dentro de las prácticas de manejo que ayudan a mejorar las condiciones de suelo se encuentran la incorporación de abonos orgánicos, no usar herbicidas, la cubierta vegetal entre surcos, uso de mejoradores de suelo y análisis de suelo para la correcta aplicación de abonos y fertilizantes.

En la microcuenca del Río Sonso el 67.9% de los agroecosistemas analizados mantienen la cubierta vegetal entre los surcos de los cafetales, esto lo realizan a través del chapeo alto y la incorporación de los residuos vegetales producto de las podas o control de arvenses. Aún el uso de herbicidas sigue siendo recurrente para el control de arvenses, solamente el 47.7% no recurre al uso de herbicidas. El uso de mejoradores de suelo y la incorporación de abonos solo la realizan en 59 y 51 agroecosistemas respectivamente, esto apenas representa el 38 % de la muestra total; al respecto Bahadur *et al.*, 2009 mencionan que el uso de compuestos orgánicos y bio-orgánicos es rentable para la productividad sustentable de los cultivos, la salud del suelo y proporcionan suficiente nutrientes al suelo. Además la fertilización orgánica mediante el uso de estiércol animal ha sido

una de las principales estrategias en la agricultura sustentable, especialmente en la región donde los nutrientes orgánicos en los suelos son pobres (Chiti *et al.*, 2012).

El análisis de suelos no es una práctica importante en estos agroecosistemas ya que solamente el 13.7% de los productores entrevistados refiere que ha realizado este tipo de análisis. Al considerar la suma de las cinco variables (o prácticas de manejo) el 37.2% de los agroecosistemas se encuentran en la escala de manejo nulo, el 28.7% manejo sustentable bajo, 22.2% escala de manejo mediano, el 9.1% manejo sustentable alto y solamente el 2.6 % corresponden a la escala sustentable óptimo es decir cuatro agroecosistemas realizan las cinco prácticas de manejo que mejoran las condiciones edáficas (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Prácticas que mejoran las condiciones del suelo en la microcuenca del Río Sonso.

Variable	Agroecosistemas
Incorporación de abonos orgánicos	51
No uso de herbicidas	76
Cubierta vegetal entre surcos.	104
Realiza análisis de suelo	21
Usa mejoradores de suelo	59
Escala de manejo sustentable	
1:Nulo	57
2:Bajo	44
3:Mediano	34
4:Alto	14
5:Óptimo	4

Indicador 4. Prácticas de manejo para evitar o reducir la pérdida de suelo.

Se consideran cinco actividades que contribuyen a evitar o reducir la pérdida de suelo, entre ellas se encuentran: La cobertura del suelo, orientación de surcos establecidos de forma inversa a la pendiente, surcos trazados a curvas de nivel, establecimiento de terrazas, y establecimiento de barreras muertas o barreras vivas.

Solamente 24 agroecosistemas realizan prácticas de curvas de nivel, 78 de 153 agroecosistemas orientan los surcos en forma inversa a la pendiente y establecen barreras vivas o muertas dentro

de los cafetales. La práctica de cobertura de suelo a través de control de arvenses mediante chapeo alto es significativa debido a que el 67.9% realiza esta actividad en sus cafetales.

Estás prácticas tienen que realizarse de forma conjunta para obtener mejores resultados de lo contrario siempre habrá una mayor posibilidad de erosión, cuando se evalúan estas prácticas de forma integral se tiene que el 69.10 % de los agroecosistemas realizan una o dos actividades, el 24 % realizan al menos tres actividades lo que les permite situarse en la escala de manejo sustentable mediano y solamente 2 de los 153 (0.01 %) realizan las cinco actividades, esto indica que la mayoría de los agroecosistemas se sitúa en una escala de manejo sustentable bajo y nulo lo que muestra que no se están realizando prácticas agronómicas para evitar o reducir la erosión en los agroecosistemas lo que repercute en la sustentabilidad de la microcuenca y de los agroecosistemas previamente dichos (Cuadro 4.7).

Cuadro 4.7. Prácticas de manejo para evitar o reducir la pérdida de suelo.

Variable	Agroecosistemas
Cobertura del suelo	104
Orientación de surcos establecidos de forma inversa a la pendiente	78
Surcos trazados a curvas de nivel	24
Establecimiento de terrazas	32
Establecimiento de barreras vivas o muertas.	78
Escala de manejo sustentable	
1:Nulo	41
2:Bajo	62
3:Mediano	37
4:Alto	11
5:Óptimo	2

Indicador 5. Tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades.

Una diversidad de plagas (patógenos vegetales y parásitos, insectos y ácaros) atacan al café (Waller *et al.*, 2007). Existen aproximadamente tres mil especies de insectos y ácaros asociados con el café, de los cuales más de 850 se alimentan de hojas, tallos, frutos y raíces de la planta; sin embargo, solo 40 ácaros e insectos son considerados como plagas significativas (Bustillo, 2015).

Muchos productores de la microcuenca del Río Sonso han adoptado un enfoque integrado para su control como consecuencia de la resistencia a los insecticidas, la inocuidad de los alimentos y las preocupaciones ambientales (Hazarika *et al.*, 2009); esto difiere de los resultados obtenidos en la microcuenca del Río Sonso en relación con el control de plagas y enfermedades ya que se obtuvo que el manejo químico se utiliza en un 45.5 % lo que equivale de acuerdo a la escala de manejo sustentable en la categoría de nulo.

En contraparte el 32% de los productores han mencionado que los agroecosistemas que manejan no existe la presencia de plagas y enfermedades que afecte de manera importante sus cultivos (Cuadro 4.8), lo anterior se debe a que los productores han realizado la reposición o replantes de cafetos de forma parcial o total debido al reciente problema de roya de café (*Hemileia vastratix*) que ha originado la pérdida de cafetales (incluyendo la sombra), esto ocasionó que en 2015 se perdieran 1.4 millones de sacos, equivalentes a 6 mil millones de pesos (Ávila-Foucat, 2017).

Cuadro 4.8. Valoración del tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades.

Variable	Agroecosistemas
Manejo mediante sustancias químicas	70
Manejo biológico	4
Manejo orgánico	18
Manejo integrado de plagas	12
Sin presencia de plagas y enfermedades	49
Escala de manejo sustentable	
1:Nulo	70
2:Bajo	4
3:Mediano	18
4:Alto	12
5:Óptimo	49

Solamente el 22.2 % utilizan como medio de control de plagas y enfermedades al manejo biológico, manejo integrado de plagas o el manejo orgánico.

Indicador 6.- Tipo de manejo para controlar las arvenses.

El control de arvenses es uno de los aspectos más intensivos de la gestión de plantaciones de café, estas tienen efectos adversos sobre el rendimiento y la producción de plantación de café, debido a la competencia por los recursos disponibles, como la luz, el agua y los nutrientes (Silva y Tomaz 2008). Los deshierbes son de las principales prácticas agrícolas realizadas durante el año en los cafetales de la microcuenca del Río Sonso, estos varían de uno a tres dependiendo de los recursos económicos con los que cuente el productor que generalmente está en función de los precios del café. El 52.2 % utilizan los métodos físicos para el control de arvenses en los cultivos agrícolas, esta actividad se realiza con herramientas como el azadón y machete. El 45.7% de los productores utilizan la combinación del método de control químico y físico, sin embargo, la aplicación de herbicidas es esporádica y una vez al año. El 98.3% de los productores utilizan el método físico o la combinación de método químico y físico como las principales opciones de control de arvenses en los agroecosistemas de la microcuenca, esto sitúa de acuerdo a las escalas de manejo sustentable en la categoría de “bajo” a “mediano” de acuerdo a los criterios establecidos (Cuadro 4.9).

Cuadro 4.9. Valoración del tipo de manejo para controlar las arvenses en el cultivo.

Variable	Agroecosistemas
Método químico (uso de herbicidas).	2
Combinación de los métodos de control químico y físico,	70
Métodos físicos	80
Método de control físico y cultural	1
Métodos culturales	0
Escala de manejo sustentable	
1:Nulo	2
2:Bajo	70
3:Mediano	80
4:Alto	1
5:Óptimo	0

Aunque los productores no utilizan los herbicidas de forma periódica, siendo lo más común la mano de obra, estudios en cafetales en Costa Rica han demostrado que se aplica la misma cantidad

de herbicida por hectárea tanto los pequeños productores como aquellos que cuentan con amplias extensiones (Bellamy, 2011).

Indices MASA e IMASAM

Basado en el índice utilizado para el cálculo del MASA se presenta la clasificación para las escalas de manejo sustentable del manejo agronómico de los agroecosistemas en el Cuadro 4.10.

El índice MASA refleja que el 41.17 % y 49.01 % de los agroecosistemas de la microcuenca se encuentra en la escala de manejo no sustentable o no deseable y manejo sustentable bajo respectivamente, solamente el 9.8% se encuentran en el manejo sustentable medio y ninguno en la categoría de manejo sustentable óptimo o deseable.

Cuadro 4.10. Valor MASA en los agroecosistemas de la microcuenca del Río Sonso.

Puntaje (Valor numerico)	Criterio de desición (%)	Número de Agroecosistemas	Categoría o escala de manejo sustentable
1 – 14	< 50	63	Manejo no sustentable o no deseable (I)
15 – 19	≥ 50 a ≤ 66	75	Manejo sustentable bajo (II)
20 - 24	> 66 a ≤ 83	15	Manejos sustentable medio (III)
25 – 30	> 83 a ≤ 100	0	Manejo sustentable óptimo o deseable (IV)
153			

Al calcular el promedio de los índices del manejo agronómico de los agroecosistemas (MASA) obtenemos que la sustentabilidad de la microcuenca se encuentra en la categoría II (manejo sustentable bajo) al obtener un valor de 51.8. Este resultado es derivado de las actividades del manejo agronómico de los agroecosistemas de la microcuenca, las cuales repercuten en la conservación de la agrobiodiversidad, el mejoramiento o conservación de la calidad del suelo, la erosión del suelo, la resistencia a plagas y enfermedades y la calidad del agua de las corrientes superficiales de la microcuenca.

4.4. Conclusiones

Está claro que el manejo agronómico de los agroecosistemas a través de los seis indicadores evaluados está afectando la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso, con excepción del indicador materia orgánica que presenta valores que permiten situarlo en la escala de manejo sustentable medio, alto y óptimo.

Los indicadores agrobiodiversidad, prácticas de manejo que provisionan condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos, prácticas de manejo para evitar o reducir pérdida de suelo, tipo de manejo para el control de plagas, enfermedades y manejo para el control de arvenses no cumplen con las variables establecidas por lo que la mayoría de los agroecosistemas se encuentran por debajo de la escala sustentable media.

El valor del IMASAN es 51.8 lo que lo ubica en la escala de manejo sustentable “bajo”, lo que indica que la sustentabilidad de la microcuenca está en riesgo y deben de orientarse los esfuerzos para mejorar los indicadores que la afectan por parte de las partes interesadas e informar a los productores que deseen mejorar su agroecosistema.

Agradecimientos

El autor principal agradece al Programa de Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP) por el apoyo otorgado de beca convencional nacional para estudios de Doctorado. A la línea de Investigación “Evaluación y rediseño de agroecosistemas” del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz y a la convocatoria de fortalecimiento de cuerpos académicos 2015 por el apoyo económico otorgado para la realización de la presente investigación.

4.5. Literatura citada

- Altieri, M. A. 1999. Agroecología: Bases Científicas para una Agricultura Sustentable. Montevideo, Uruguay. Nordam - Comunidad. 325 p.
- Ávila-Foucat V. S. 2017. Desafíos del sector primario y políticas públicas sustentables, revista Economía Informa, 402:29-39.
- Bahadur, A. Singh, I., Singh, K.P., Upadhyay, A.K., Roy, M. 2009a. Morpho-physiological, yield and quality traits in lettuce (*Lactuca sativa*) as influenced by use of organic manures and biofertilizers. Indian J. Agric. Sci. 79:282–285.
- Beer J, Muschler R, Kass D, Somarriba E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. Agroforestry Systems 38:139-164.

- Bell, M. M. and Loka L. A. 2016. An invitation to environmental sociology. Fifth edition. Sage publications, Inc. 512 p.
- Bellamy, A.S., 2011. Weed control practices on Costa Rican coffee farms: is herbicide use necessary for small-scale producers? *Agric. Hum. Values*, 28:167-177.
- Bustillo, A.E. 2015. Part II pests. In: Gaitán, A.L., Cristancho, M.A., Castro Caisedo, B.L., Rivas, C.A., Cadena Gómez, G. (Eds.), *Compendium of Coffee Diseases and Pests*. American Phytopathological Society, St. Paul. 75 p.
- Chiti, T., Gardin, L., Perugini, L., Quarantino, R., Vaccari, F.P., Miglietta, F., Valentini, R., 2012. Soil organic carbon stock assessment for the different cropland land uses in Italy. *Biol. Fert. Soils*. 48:9–17.
- Devuyst, D., Hens, L.W. and Walter De Lannoy. 2010. How green is the city? Sustainability assessment and the management of urban environments. Columbia University Press. New York. 488 p.
- Escamilla P., E.; A.L. Licona, V.; S. Díaz, C.; V.H. Santoyo, C.; R. Sosa y L. Rodríguez. 1994. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México. Un análisis tecnológico. *Revista de Historia. Centro de Investigaciones Históricas. Universidad de Costa Rica, Costa Rica*. 30:41-67.
- Escamilla P. E. y Díaz C. S. 2016. Sistemas de cultivo de café en México. CROFUPRO – CENACAFE. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de México. México. 63 p.
- FMAM. 2000. Contribuciones del fondo para el medio ambiente mundial al programa 21. www.gefweb.org. (Consulta: 13 enero 2015).
- Hazarika, L.K., Bhuyan, M., Hazarika, B.N., 2009. Insect pests of tea and their management. *Annual Review of Entomology*. 54: 267–284.
- INEGI. 2007. Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Sistema de consulta de información geoestadística agropecuaria. <http://gaia.inegi.org.mx/sciga/viewer.html>. (Consulta: marzo 2016).
- INEGI. 2010. Censo de Población y Vivienda 2010. México, D.F. Sistema de consulta de información de población y vivienda. <http://www.inegi.org.mx/>. (Consulta: abril de 2016).
- Jiménez, H. L. 1989. Medio ambiente y desarrollo sostenible. IEPALA. Barcelona. 203 p.
- Kates, R. C., Corell, R. H., Jaeger, C. L., McCarthy, J. S., Bolin, B. D., Faucheux, S. G., Mooney, H. (2001). Sustainability science, *Science*, 292: 641-642.
- Liu, X., Liu, G., Yang, Z., Chen, B., & Ulgiati, S. 2016. Comparing national environmental and economic performances through energy sustainability indicators: Moving environmental ethics beyond anthropocentrism toward ecocentrism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 58:1532-1542.
- López Ridaura S., Keulen, H. V., Ittersum M.K.V., Leffelaar, P.A. 2005. Multiscale Methodological Framework to Derive Criteria and Indicators for Sustainability Evaluation

- of Peasant Natural Resource Management Systems. *Environment, Development and Sustainability* Volume 7, pp: 51–69.
- Magdoff, F.R., and H. Van Es. 2000. *Building Soils for Better Crops*, 2nd ed., Sustainable Agriculture Network Handbook No. 4. Burlington, VT. 310 p.
- Magdoff and F, Weil R. 2004. Soil organic matter management strategies. In: Magdoff F, Weil R (eds) *Soil Organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, Boca Raton. pp: 44–65.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. 2007. Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., *AndeSurvey: Categorizing tools for sustainability assessment*. *Ecol. Econ.* 60: 498- 508.
- Ortiz-Solorio, V.B, Ortiz, S.C. 1990. *Edafología*. Séptima edición. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. 394 p.
- Rivera-Becerril, F., van Tuinen, D., Chatagnier, O., Rouard, N., Béguet, J., Kuszala, C., Soulas, G., Gianinazzi-Pearson, V., Martin-Laurent, F., 2017. Impact of a pesticide cocktail (fenhexamid, folpel, deltamethrin) on the abundance of Glomeromycota in two agricultural soils. *Sci. Total Environ.* 577:84–93.
- Robledo, E. 2015. *La diversificación productiva en cafetales del centro de Veracruz*. Centro Regional Universitario de Oriente. UACH. Universidad Autónoma Chapingo. Huatusco, Ver., México. 62 p.
- Silva, A.A., Tomaz, M.A., *et al.* 2008. Manejo integrado de plantas daninhas em lavouras de café. In: Tomaz, M.A. (Ed.), *Seminário para a sustentabilidade da cafeicultura*. <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=25399&secao=Manejo> o. UFES, Alegre. (Consulta: enero 2016)
- Waller, J.M., Bigger, M., Hillocks, R.J. 2007. *Coffee Pests, Diseases and Their Management*. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK. 434 p.

CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

No se encontraron elementos suficientes para rechazar la Hipótesis H1, dado que al determinar la calidad del agua del Río Sonso a través del monitoreo de nueve parámetros de calidad a través del índice NSF.WQI, tres indicadores (demanda bioquímica de oxígeno, coliformes fecales y totales) están fuera de los límites permisibles de calidad del agua de acuerdo a las normas oficiales nacionales e internacionales, lo que origina que el índice de calidad de agua de esta fuente de agua superficial se considere en la categoría “buena” y “mediana”, evidenciando que existe afectación de las actividades antropogénicas a través de la descarga de aguas domésticas y residuales de la agroindustria del café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.), el manejo poco sustentable de los agroecosistemas y las actividades domésticas de los habitantes de la microcuenca. Particularmente las descargas de aguas residuales están planteando riesgo para la calidad de agua para los ecosistemas de aguas abajo y la población que depende del Río como fuente de agua potable.

No se encontraron elementos suficientes para rechazar la hipótesis H2, de los seis indicadores relacionados con el manejo agronómico de los agroecosistemas, los indicadores agrobiodiversidad, prácticas de manejo que provisionan condiciones edáficas óptimas para el desarrollo de los cultivos y prácticas de manejo para evitar y reducir pérdida de suelo, el 88%, 66% y 67 % de los agroecosistemas respectivamente se encuentran en la escala de manejo sustentable “bajo y nulo”. Los indicadores tipo de manejo para el control de plagas y enfermedades, manejo para el control de arvenses se encontraron en las categorías mediano, bajo y nulo. Solamente el indicador materia orgánica presentó valores en la escala de manejo sustentable alto y óptimo para el 75.16% de los agroecosistemas de la microcuenca; por lo tanto, al calcular el índice de manejo sustentable de los agroecosistemas a nivel microcuenca esta se encuentra en la categoría de manejo sustentable “bajo”, por lo consiguiente, las actividades agronómicas desarrolladas al interior de los agroecosistemas están afectando a la sustentabilidad de este territorio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

1. Conclusiones

El índice de manejo sustentable de los agroecosistemas a nivel microcuenca (IMASAM) se encuentra en la categoría “bajo”, así mismo el índice de calidad de agua tomó valores en las categorías “bueno” y “mediano” de acuerdo con las escalas de manejo sustentable construidas.

Por lo tanto, las actividades antropogénicas como el manejo agronómico de los agroecosistemas, las actividades domésticas de los habitantes y la descarga de aguas domésticas y residuales están afectando la sustentabilidad de la microcuenca del Río Sonso.

El desarrollo del trabajo de la tesis permitió el abordaje desde una visión sistémica, particularmente en la representación de la microcuenca como un sistema, en esta se encuentran al menos tres niveles jerárquicos: Los agroecosistemas que la conforman, el paisaje natural y la población. Durante este proceso se aplicaron los conocimientos adquiridos en el programa de Doctorado en Ciencias en Agroecosistemas Tropicales, desde una visión multidisciplinaria por la formación en distintas disciplinas de la ciencia del consejo particular, el cual permitió diferentes perspectivas relativas al objeto de estudio. En este proceso se construyó un índice de manejo agronómico sustentable de los agroecosistemas a partir de indicadores y la evaluación de la calidad de agua como elemento integrador de la microcuenca.

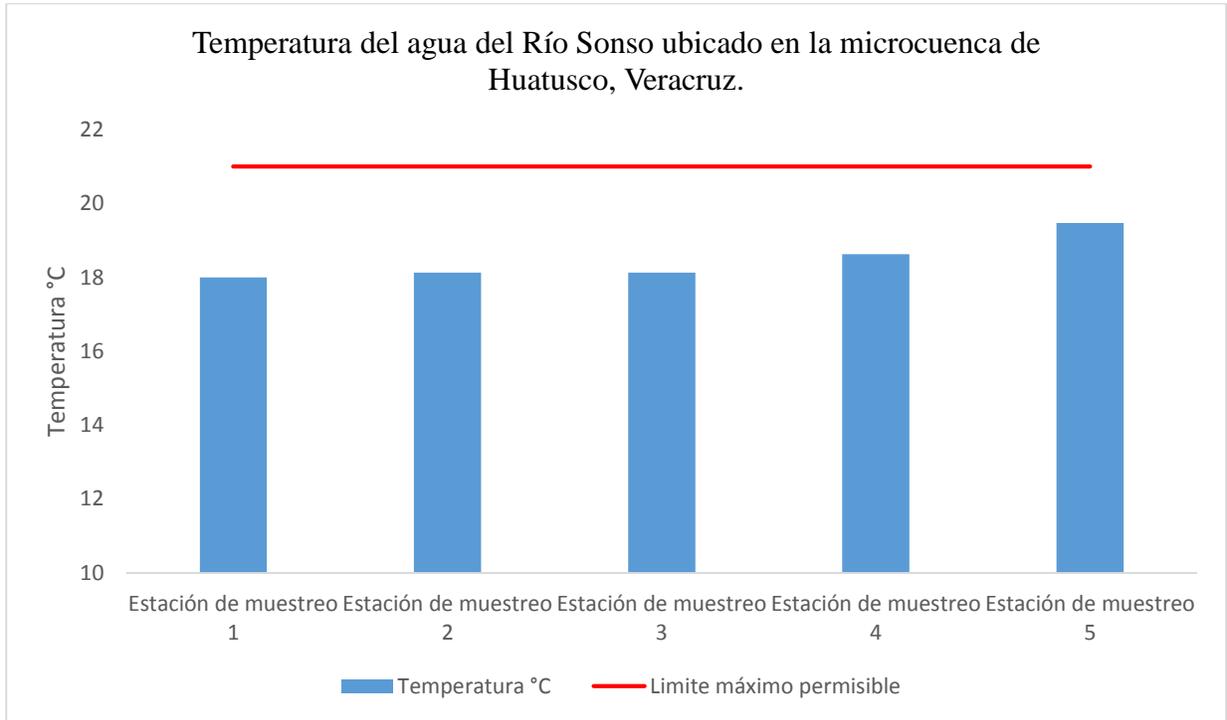
2. Recomendaciones

a) Existe la oportunidad para que a través de las Instancias educativas de educación superior: Universidad Autónoma de Chapingo (CRUO-UACH), la Universidad Politécnica de Huatusco y el Instituto Tecnológico Superior de Huatusco ubicados en la región de estudio, las instancias de los tres niveles de gobierno, los productores y empresarios que habitan en las microcuencas, coordinen los esfuerzos para reducir la contaminación de los ríos, vía descarga de aguas residuales y domésticas; así mismo a través de la capacitación y asesoría técnica coadyuvar a mejorar las prácticas de manejo agronómico de los agroecosistemas; lo anterior con la finalidad de que a través de la gobernanza y enfoque de cuenca se mejore la sustentabilidad de estos territorios.

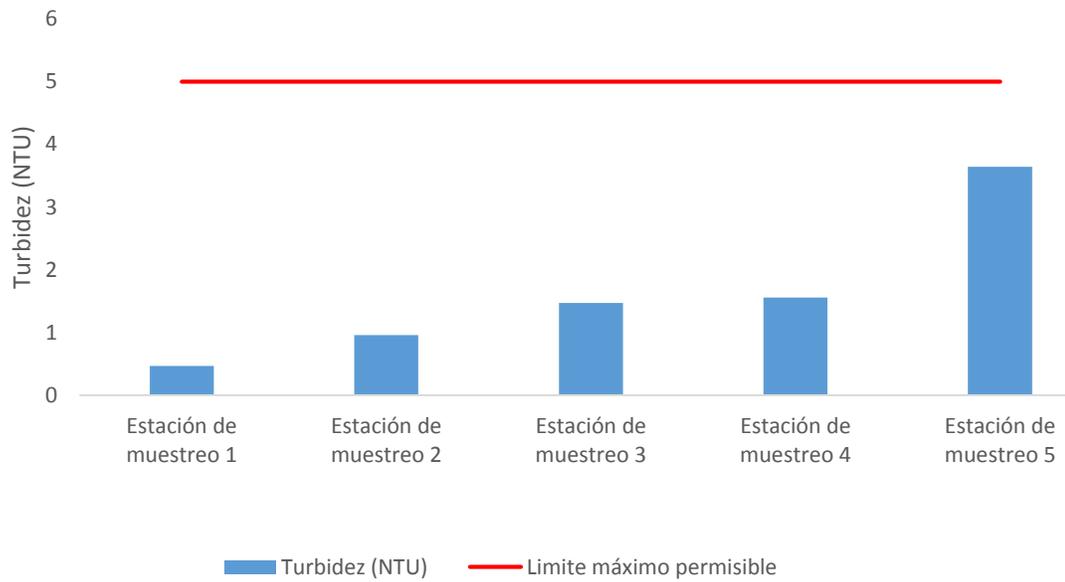
b) Continuar con la evaluación de los indicadores de sustentabilidad, para integrar una base de datos histórica y robusta que permita evaluar la sustentabilidad de las microcuencas a través del tiempo y tener elementos que permitan tomar las decisiones al interior de la microcuenca y la formulación de políticas públicas.

- c) Integrar indicadores de presión confiables y de bajo costo económico que evidencien la sustentabilidad a nivel cuenca hidrográfica, para la toma de decisiones tendientes a un manejo sustentable del territorio.
- d) Considerar otros indicadores socioeconómicos y ambientales que evidencien la sustentabilidad a nivel cuenca hidrográfica.

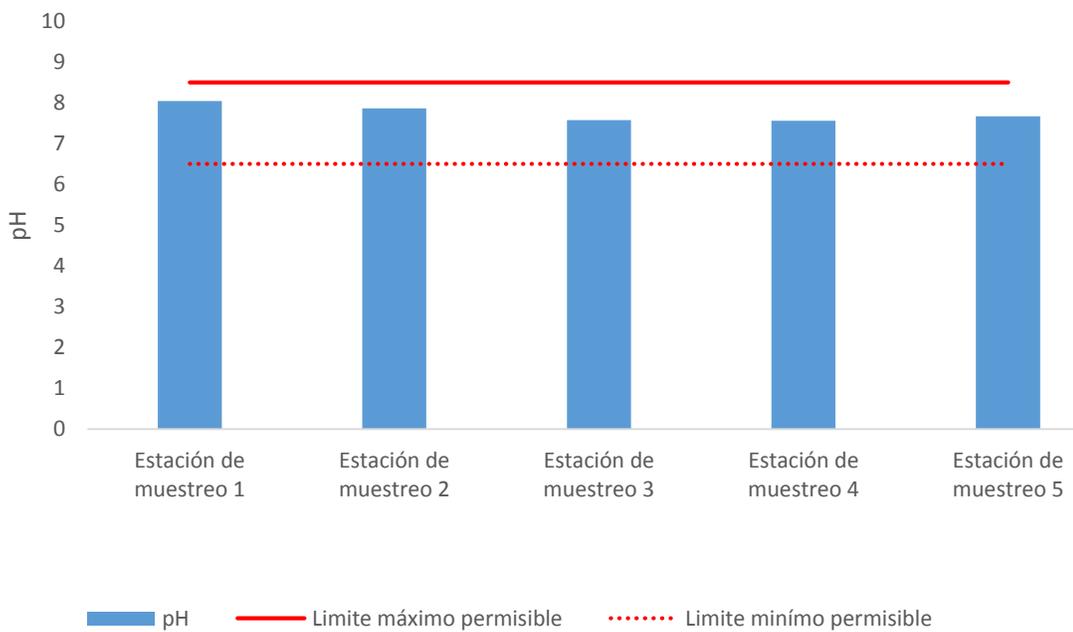
ANEXO 1. Calidad del agua del Río Sonso.



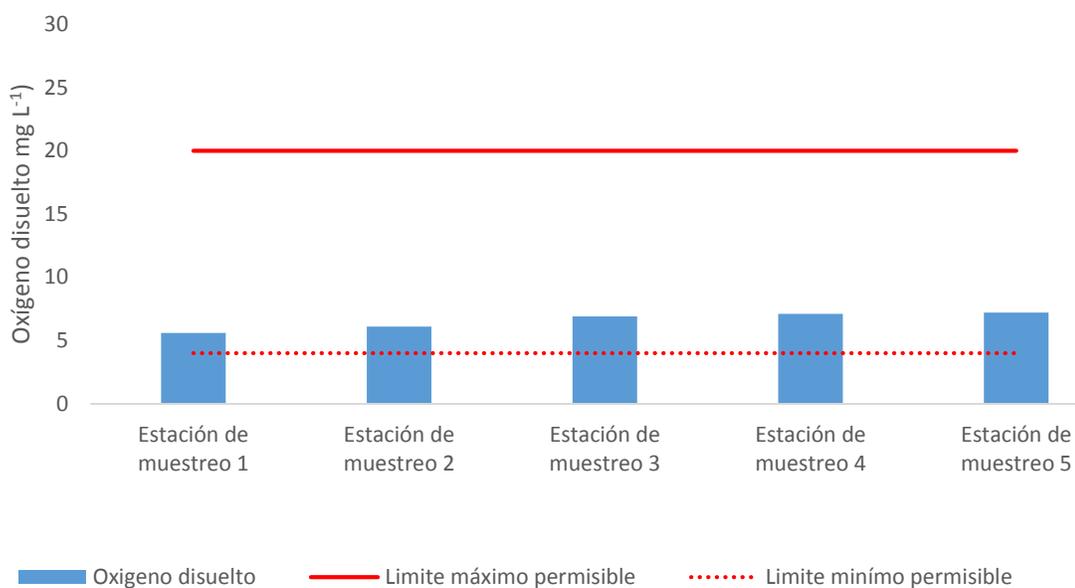
Turbidez del agua del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



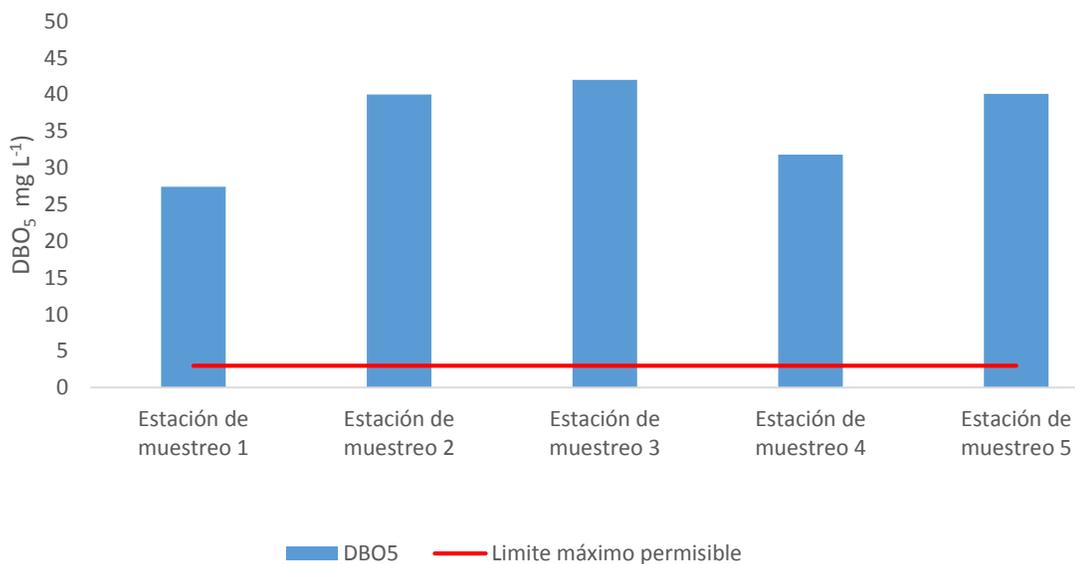
pH del agua del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



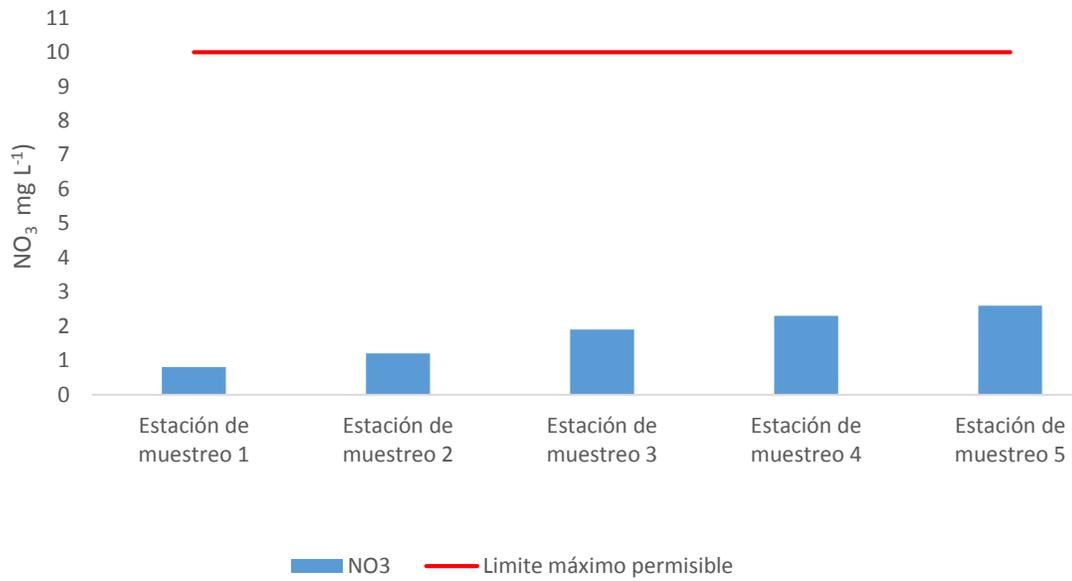
Oxígeno disuelto del agua del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



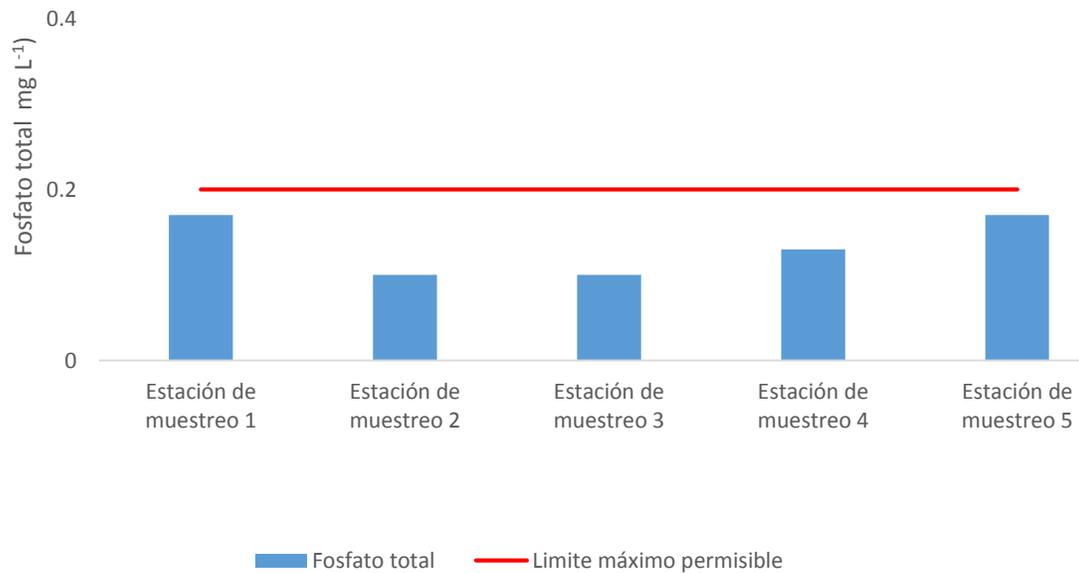
DBO₅ del agua del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



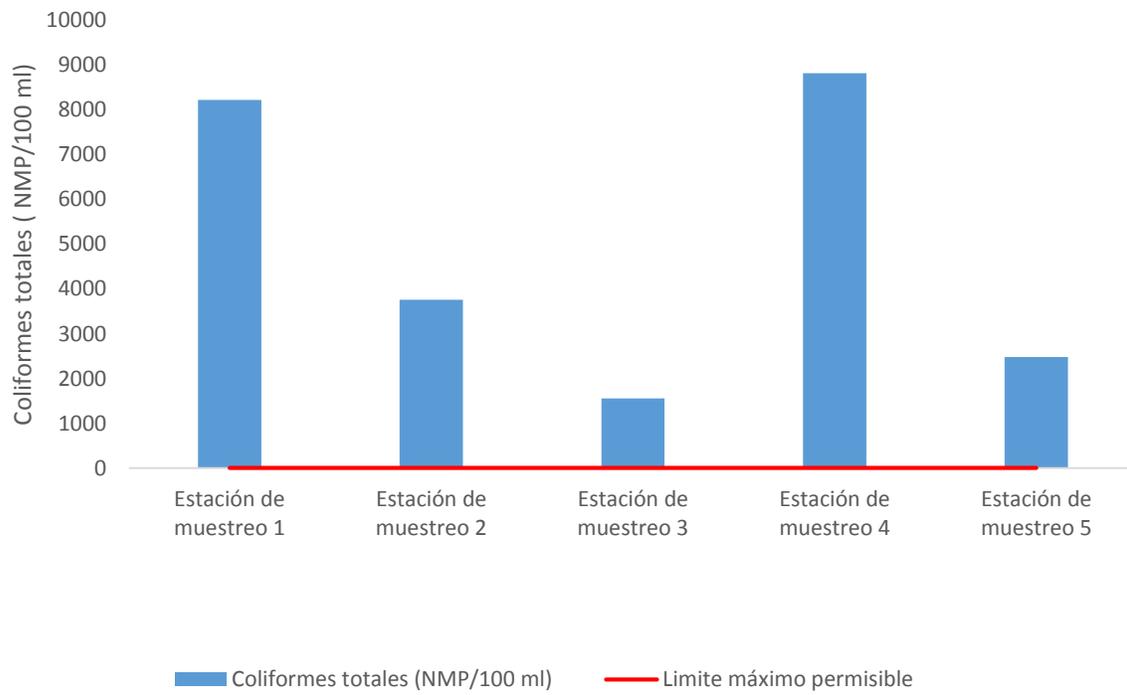
NO₃ del agua del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



Fosfato total del agua del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



Coliformes totales del Río Sonso ubicado en la microcuenca de Huatusco, Veracruz.



ANEXO 2. Memoria fotográfica de la microcuenca del Río Sonso

1.1. Renovación parcial o total de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* P.) en la microcuenca del Río Sonso.



Se muestra la renovación parcial o total de plantas de café, debido a los daños severos de la roya del café (*Hemileia vastratix*).

1.2. Agroecosistemas de café en la microcuenca del Río Sonso.



1.3. Agrobiodiversidad en los agroecosistemas de la microcuenca del Río Sonso.



1.4. Río Sonso.

