



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**VALORACION DE LA SUSTENTABILIDAD EN LA MICROCUENCA DEL RÍO
AGUACAPA EN EL MUNICIPIO DE HUATUSCO, VERACRUZ**

SALVADOR PARTIDA SEDAS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO.

2018

La presente tesis, titulada: **Valoración de la sustentabilidad en la microcuenca del Rio Aguacapa en el municipio de Huatusco, Veracruz**, realizada por el alumno: **Salvador Partida Sedas**, 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. ALBERTO ASIAIN HOYOS

ASESORA: _____


DRA. ANTONIA MACEDO CRUZ

ASESOR: _____


DR. EMILIANO PÉREZ PORTILLA

Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz. 27 de febrero de 2018

VALORACION DE LA SUSTENTABILIDAD EN LA MICROCUENCA DEL RIO AGUACAPA EN EL MUNICIPIO DE HUATUSCO, VERACRUZ

Partida Sedas, Salvador, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2018

La sustentabilidad es un concepto multidimensional que implica una relación sistémica entre el desarrollo humano y su medio natural a través del tiempo. En la presente investigación se planteó el objetivo de valorar el impacto que el tipo y manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas, y las condiciones socioculturales y económicas ejercen sobre la sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa en el municipio de Huatusco, Veracruz. Para evaluar el grado de sustentabilidad se recurrió al diseño y desarrollo de un índice agregado de sustentabilidad de la microcuenca (IASuM) conformado por tres índices que abarcan aspectos ambientales, socio-culturales y económicos (ICAm, IDSc e IDE).

Se encontró que la calidad del agua del río está siendo afectada por el desarrollo de los agroecosistemas y la descarga de aguas residuales de localidades rurales y urbanas, la calidad del suelo se ve afectada directamente por el tipo de agroecosistema; y las condiciones socio-culturales y económicas de la población de la microcuenca evidencian que la baja escolaridad, pobreza y marginación, representan un riesgo para las dimensiones de sustentabilidad y presionan el estado de sus recursos naturales. Así mismo, para algunas áreas se notó que existe un riesgo elevado para la estabilidad y supervivencia de la vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña debido al crecimiento de la superficie correspondiente a los asentamientos humanos y el desarrollo de actividades agropecuarias; mientras que en otras se notó recuperación.

Se obtuvieron valores para el Índice de Calidad Ambiental (ICAm) de 59, Índice de Desarrollo Social (IDSc) de 58.2 e Índice de Desarrollo Económico (IDE) de 48.6, obteniendo un Índice de Sustentabilidad de la Microcuenca (IASuM) de 55.8, lo cual indica un grado de sustentabilidad Media. Se concluye que las actividades antrópicas y los agroecosistemas desarrollados sobre el Río Aguacapa ejercen mayormente un impacto negativo sobre la dimensión ambiental, sociocultural y económica de la sustentabilidad.

Palabras clave: Agroecosistemas, Indicadores, Microcuenca

SUSTAINABILITY EVALUATION AT THE RIO AGUACAPA WATERSHED IN THE MUNICIPALITY OF HUATUSCO, VERACRUZ.

Partida Sedas, Salvador, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2018

Sustainability is a multidimensional concept that implies a systemic relationship between human development and its natural environment through time. In the present investigation was proposed the objective of assessing the impact that the type and management of agroecosystems, anthropogenic activities, sociocultural and economic conditions on the sustainability of the Aguacapa River watershed in the municipality of Huatusco, Veracruz. To assess the degree of sustainability, the design and development of an aggregate sustainability index of the watershed (IASuM) was used, this integrates environmental, socio-cultural and economic indices as well (ICAm, IDSc and IDE).

It was found that the water quality of the river is being affected by the development of agroecosystems and the discharge of wastewater from rural and urban localities; soil quality is directly affected by the type of agroecosystem and its management. The socio-cultural and economic circumstances of the population show that the low educational levels, poverty and marginalization represent a risk for the dimensions of sustainability and put pressure on the state of its natural resources. Likewise, for certain surfaces there is a high risk for the stability and survival of the secondary vegetation of cloud forest due to urbanization growth and the increased use of land for agricultural activities.

Values obtained for the Environmental Quality Index (ICAm) were 59, Social Development Index (IDSc) of 58.2 and Economic Development Index (IDE) of 48.6, obtaining an Aggregated Sustainability Index of the watershed (ISuM) of 55.8, which indicates Medium degree of sustainability. It is concluded that anthropic activities and agroecosystems developed on the Aguacapa River have majorly a negative impact on the environmental, sociocultural and economic dimension of sustainability.

Key words: Agroecosystems, Indicators, Watershed

Dedico esta tesis doctoral a:

A DIOS porque en él he encontrado la fortaleza y guía para afrontar esta vida tan dichosa.

Con todo mi Corazón hacia mis queridos Padres... Gervasio (†) y Delia porque con su ejemplo me han ayudado a trazar una senda.

A ti Maya por todo tu amor y apoyo en estos veintitantos años... juntos en este camino.

A mis hermosos hijos: ¡Pao y Pablo que son los ojos que dirigen mi camino, los amo!

A mis hermanos Germán, Pedro, Manuel, Delia, Susana y Gervasio porque he tenido la dicha de disfrutarlos, convivir y aprender de ustedes, son mis héroes... Los quiero.

A todos mis familiares, cuñadas (os) y todas mis sobrinas(os) que han creado una masa de felicidad inmensa.

A mis grandes amigos de toda la vida, ahora compadres, ahora hermanos: No basta una vida para recordar lo vivido y los momentos de felicidad compartidos.

Al Dr. Octavio Ruiz Rosado, consejero particular que nos abrió una puerta a su espacio de conocimiento, es un ejemplo y guía personal.

A todos mis alumnos quienes fortalecen mi ser y vuelven una sonrisa mi vida

AGRADECIMIENTOS

- Al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz por haberme aceptado como alumno del Doctorado en Agroecosistemas Tropicales y permitirme ser parte de esta gran familia.
- A las Autoridades Municipales del ayuntamiento de Huatusco, a los pobladores y productores de la microcuenca del Río Aguacapa por las facilidades y apoyo para realizar esta investigación.
- Al Consejo Particular por sus recomendaciones y sobre todo por su enorme contribución y ayuda en mi proceso de formación como persona, estudiante e investigador.
- Al Programa de Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior (PRODEP), por el apoyo otorgado de beca convencional nacional para estudios de Doctorado en 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.
- A las autoridades y compañeros del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco por su apoyo y permitirme realizar este posgrado.
- A todos los Docentes del Campus Veracruz por su contribución profesional y personal en mi proceso de formación como estudiante.
- A mis amigos y compañeros del Campus por sus palabras de aliento, apoyo, generosidad y cariño para conmigo: Gracias Adán, Víctor, Doris y la generación Híbridos 2013.
- A mis queridos alumnos del programa de Ingeniería Ambiental del ITS Huatusco porque con su esfuerzo, involucramiento y empeño han contribuido en el logro de los objetivos de esta investigación, gracias Jos, Chuy, Diana, Karla, Josué y Carlos.
- A todos aquellos que han formado parte de mi vida y han contribuido con su tiempo y espacio a este logro.

“Y si... Porque el universo es infinito, tal vez algún día podamos encontrar nuestro proceso, camino y trayectoria para convertirse en estrella que ha de volverse guía para la posteridad...

¡En eso ando, vamos avanzando!”

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	3
2.1 Teoría de la sustentabilidad y el desarrollo sustentable.....	3
2.1.1 Principios del desarrollo sustentable y sustentabilidad.....	3
2.1.2 Implicaciones evolutivas del hombre en el medio natural.....	5
2.1.3 Sustentabilidad y equilibrio entre tipos de desarrollo.....	6
2.1.3.1 Movimientos conservacionistas	6
2.1.3.2 Surgimiento del DS y el término sustentabilidad	8
2.1.3.3 Operatividad del desarrollo sustentable y sustentabilidad.....	9
2.2 Teoría general de sistemas	10
2.3 Teoría de los sistemas complejos.....	11
2.4 Sustentabilidad, teoría de sistemas y teoría de los sistemas complejos.....	13
2.5 Modelos de evaluación de sustentabilidad a diferentes niveles jerárquicos.....	16
2.5.1 Uso de indicadores para evaluación de sustentabilidad.....	17
2.5.2 Modelo P-E-R	18
2.5.3 MESMIS.	19
2.5.4 Biograma.....	20
2.5.5 Metodología W-S-I.....	21
2.6 Modelo teórico de la investigación	22
2.7 Conceptos básicos en la investigación	22
2.7.1 El concepto de microcuenca	22
2.7.2 El concepto de actividades antrópicas	24
2.7.3 El concepto de agroecosistema	24
2.7.4 El concepto de sustentabilidad a nivel microcuenca.....	25

2.7.5 El concepto de indicadores e índices de sustentabilidad	25
2.7.6 Relación entre conceptos de la investigación	26
3. MARCO DE REFERENCIA	27
3.1 Aplicación de modelos de evaluación de sustentabilidad.....	27
3.1.1 Estudios a nivel de cuencas, subcuencas y microcuencas	27
3.1.2 Estudios a nivel agroecosistema	29
3.2 Marco normativo y operativo del manejo de cuencas en México	31
3.2.1 Leyes, normas y políticas aplicables al manejo de cuencas en México.....	31
3.3 Efecto de los agroecosistemas sobre las dimensiones de sustentabilidad.....	33
3.3.1 Implicaciones y desafíos en los agroecosistemas sustentables	33
3.3.2 Efecto de los Agroecosistemas en la calidad y cantidad del agua	35
3.3.3 Efectos adversos los AES en la calidad del agua y del suelo	37
3.4 Indicadores de evaluación de sustentabilidad a nivel microcuenca.....	39
3.4.1 Evaluación de la calidad del agua a través de indicadores	40
3.4.2 Evaluación de la calidad del suelo	42
3.5 Indicadores socio-culturales y económicos	44
3.5.1 Indicadores socio-culturales.....	44
3.5.2 Indicadores económicos.....	45
4. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA Y PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	46
4.1 Contexto ambiental	46
4.2 Contexto económico	50
4.3 Contexto sociocultural	50
4.4 Contexto Político	52
4.5 El problema de investigación.....	53
5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	56

5.1 Hipótesis general.....	56
5.1.1 Hipótesis específicas.....	56
5.2 Objetivo general.....	56
5.2.1 Objetivos particulares.....	56
6. MATERIALES Y MÉTODOS.....	57
6.1 Selección y descripción del área de estudio.....	57
6.2 Población y muestra.....	58
6.2.1 Descripción de las unidades de análisis.....	58
6.2.2 Jerarquización y límites del estudio.....	58
6.2.3 Marco referencial y de análisis en el estudio.....	59
6.2.4 Determinación del tamaño de muestra.....	60
6.3 Operacionalización de las hipótesis.....	67
6.3.1 Operacionalización de la hipótesis particular 1.....	68
6.3.2 Operacionalización de la hipótesis particular 2.....	69
6.4 Proceso de recolección de datos.....	70
6.5 Sistematización y análisis de la información.....	70
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
7.1 Caracterización biofísica y social de la microcuenca del Río Aguacapa.....	71
7.1.1 Descripción General.....	71
7.1.2 Descripción de condiciones climáticas.....	72
7.1.3 Morfometría y Fisiografía.....	74
7.1.4 Tipo de Clima.....	77
7.1.5 Geología.....	79
7.1.6 Tipo de Suelo.....	81
7.1.7 Agroecosistemas de la microcuenca.....	82

7.2 Cambio de uso de suelo en la microcuenca	83
7.2.1 Principales componentes de cobertura y uso de suelo de la microcuenca	83
7.2.2 Indicadores de cambio de uso de suelo	84
7.2.3 Cambios observados durante el período 1985 – 2013	86
7.3 Evaluación de la cantidad y calidad del agua del Río Aguacapa.....	92
7.3.1 Morfometría e hidrometría del Río Aguacapa	92
7.3.2 Resultados del estudio de calidad del agua.....	94
7.3.3 Índice de Calidad del Agua.....	97
7.4 Evaluación de calidad del suelo y velocidad de infiltración del agua	100
7.4.1 Resultados de la evaluación de infiltración de agua en el suelo	100
7.4.2 Resultados de la evaluación de la calidad del suelo de la microcuenca	104
7.4.3 Índice de Calidad del Suelo (ICS)	112
7.5 Aspectos socioculturales y económicos de la microcuenca.....	116
7.5.1 Población de la microcuenca	116
7.5.2 Indicadores sociales y económicos en la microcuenca	117
7.5.2.1 Indicadores de rezago social	118
7.5.2.2 Indicadores de Desarrollo Humano	121
7.5.2.3 Índice de Marginación	122
7.5.3 Indicadores Económicos de la Microcuenca.....	123
7.6 Evaluación de la sustentabilidad de la microcuenca.....	124
7.6.1 Dimensión ambiental	124
7.6.2 Dimensión social.....	125
7.6.3 Dimensión económica.....	126
7.6.4 Sustentabilidad de la microcuenca.....	127
7.7 Contrastación de la hipótesis general de investigación.....	128

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	132
9. LITERATURA CITADA	135
10. ANEXOS	144
Anexo 1. Datos de Velocidad de Infiltración por sitio	144
Anexo 2. Datos de medición de caudal del Río Aguacapa	149
Anexo 3. Datos de campo para el muestreo de suelo	151

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Ejemplo de indicadores del biograma.	21
Cuadro 2. Metodologías de evaluación de sustentabilidad.	28
Cuadro 3. Valores cualitativos de indicadores de sustentabilidad.	30
Cuadro 4. Unidades de análisis para fines de la investigación.	58
Cuadro 5. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Río Aguacapa.	61
Cuadro 6. Parámetros físico-químico-biológicos de ICA.	62
Cuadro 7. Criterios de calidad asignados al ICA.	62
Cuadro 8. Sitios de muestreo de suelo calculados.	65
Cuadro 9. Metodología de evaluación de los indicadores del ICS.	66
Cuadro 10. Ponderación de los indicadores del Índice de Calidad del Suelo.	67
Cuadro 11. Criterios de referencia para evaluar el ICS.	67
Cuadro 12. Grados de Sustentabilidad para el IASuM.	68
Cuadro 13. Datos climáticos del municipio de Huatusco.	72
Cuadro 14. Temperatura promedio y precipitación promedio.	73
Cuadro 15. Datos morfométricos de la microcuenca.	75
Cuadro 16. Correlación entre superficie de la microcuenca y su pendiente.	76
Cuadro 17. Tipos de climas presentes en la microcuenca del Río Aguacapa.	78
Cuadro 19. Tipos de Roca de la microcuenca.	80
Cuadro 18. Tipo de Suelo de la Microcuenca del Río Aguacapa.	81
Cuadro 20. Tipos de Agroecosistemas de la microcuenca.	83
Cuadro 21. Cambios en la cobertura y uso de suelo entre los años 1993 y 2013.	85
Cuadro 22. Matriz de nomenclatura para cada tipo de cobertura y uso de suelo.	87
Cuadro 23. Matriz de transición de cobertura y uso de suelo en la microcuenca.	87
Cuadro 24. Matriz de probabilidad de transición de tipos de uso suelo.	89
Cuadro 25. Porcentaje de transición entre cada tipo de cobertura y uso de suelo.	90
Cuadro 26. Datos hidrométricos de la red hídrica del Río Aguacapa.	92
Cuadro 27. Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.	94
Cuadro 28. Valores obtenidos del análisis del agua.	95
Cuadro 29. Índice de Calidad del Agua del Río Aguacapa.	97

Cuadro 30. Valores del ICA para cada sitio evaluado.	98
Cuadro 31. Valores del ICA para cada sitio del Río Aguacapa.	99
Cuadro 32. Velocidad de infiltración por tipo de cobertura.	101
Cuadro 33. Valores de referencia de los tipos de velocidad de infiltración.	102
Cuadro 34. Resultados de la evaluación de la calidad del suelo.	105
Cuadro 35. Valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo.	106
Cuadro 36. Criterios de sustentabilidad para indicadores de calidad del suelo.	113
Cuadro 37. Valores del ICS para cada tipo de uso de suelo.	114
Cuadro 38. Índice de calidad del suelo para cada tipo de uso de suelo y AES.	115
Cuadro 39. Datos poblacionales de la microcuenca.	118
Cuadro 40. Indicadores de rezago social.	119
Cuadro 41. Indicadores de rezago social.	121
Cuadro 42. Indicadores de desarrollo humano.	122
Cuadro 43. Índice de marginación para la microcuenca.	123
Cuadro 44. Indicadores de desarrollo económico.	123
Cuadro 45. Índice de Calidad Ambiental de la Microcuenca del Río Aguacapa.	124
Cuadro 46. Índice de Desarrollo Social de la microcuenca.	125
Cuadro 47. Índice de Desarrollo Económico para la microcuenca.	126
Cuadro 48. Índice Agregado de Sustentabilidad de la Microcuenca del Río Aguacapa.	128

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Escala de valoración de la complejidad de los sistemas. (Fuente: Laguna-Sánchez <i>et al.</i> , 2016).	13
Figura 2. Modelo Presión - Estado - Respuesta propuesto por la OCDE.	19
Figura 3. Clasificación de cuencas, subcuencas y microcuencas. (Fuente: Cotler <i>et al.</i> , 2013)....	23
Figura 4. Situación problemática de la investigación.	53
Figura 5. Sitio de estudio.	57
Figura 6. Modelo de Evaluación de la Sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa.	59
Figura 7. Sitios de muestreo para la realización de análisis de suelos.....	65
Figura 8. Microcuenca del Río Aguacapa. Municipio de Huatusco, Veracruz.	71
Figura 9. Comportamiento de la temperatura promedio mensual en la microcuenca del Río Aguacapa.....	73
Figura 10. Precipitación mensual promedio en el municipio de Huatusco.....	74
Figura 11. Modelo digital de elevación de la microcuenca del Río Aguacapa.....	74
Figura 12. Descripción fisiográfica de la microcuenca.	76
Figura 13. Pendiente superficial del territorio de la microcuenca.	77
Figura 14. Tipos de climas presentes en la microcuenca.....	79
Figura 16. Geología de la microcuenca del Río Aguacapa.....	80
Figura 15. Edafología presente en la microcuenca del Río Aguacapa.	82
Figura 17. Tipos de cobertura y uso de suelo.	84
Figura 18. Cambios en tipos de cobertura y uso de suelo de la microcuenca.....	85
Figura 19. Tasa de cambio anual para cada tipo de cobertura.	86
Figura 20. Cambios presentados para cada tipo de cobertura y usos de suelo.	88
Figura 21. Probabilidad de transición entre cada tipo de cobertura.....	90
Figura 22. Cambios globales en la cobertura y uso de suelo.	91
Figura 23. Caudal del Río Aguacapa durante el periodo febrero 2016 – marzo 2017.	93
Figura 24. Red hídrica del Río Aguacapa.	93
Figura 25. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Río Aguacapa.....	95
Figura 26. Índice de Calidad del Agua.	99
Figura 27. Nivel de calidad de los parámetros evaluados.....	100

Figura 28. Velocidad de infiltración por tipo de cobertura.....	101
Figura 29. Distribución espacial de la velocidad de infiltración en la microcuenca.	103
Figura 30. Resultado del análisis del suelo.....	106
Figura 31. Distribución espacial del Nitrógeno Total en la microcuenca.....	107
Figura 32. Distribución espacial del fósforo en la microcuenca.....	108
Figura 33. Distribución espacial del potasio en la microcuenca.....	109
Figura 34. Distribución espacial de la materia orgánica en la microcuenca.....	110
Figura 35. Distribución espacial del pH en la microcuenca.	111
Figura 36. Distribución espacial de la conductividad eléctrica en la microcuenca.	112
Figura 37. Nivel de calidad de los indicadores de suelo.....	114
Figura 38. Índice de Calidad del Suelo de la microcuenca del Río Aguacapa.	116
Figura 39. Localidades urbanas y rurales de la microcuenca.	117
Figura 40. Comparación de los diferentes tipos de carencias sociales.	120
Figura 41. Indicadores de desarrollo social para la microcuenca del Río Aguacapa.	126
Figura 42. Índice de Desarrollo Económico para la microcuenca del Río Aguacapa.	127

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AES	Agroecosistemas
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
LAN	Ley de Aguas Nacionales
OCDE	Organización de las Naciones Unidas para la Cooperación y el Desarrollo
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

1. INTRODUCCIÓN

Las evaluaciones sistémicas que se presentan en forma segmentada, conllevan a la obtención de un análisis parcial de la realidad de un fenómeno. El concepto de sustentabilidad se puede considerar como un intento por realizar una integración multidimensional de las variables que interactúan en espacio y tiempo dentro de un sistema determinado. De esta forma, una evaluación de sustentabilidad, implica la cohesión de un conjunto de índices e indicadores que permitan exponer en forma clara y objetiva el estado actual y la tendencia futura del conjunto de elementos que componen un sistema. La idea del desarrollo sustentable solo se hará funcional a través del conocimiento del conjunto de estadíos por los cuales va evolucionando en el tiempo una población. Para el ser humano, es altamente necesario conocer como son estos procesos de cambio y cuáles son las implicaciones que conllevan las alteraciones del medio que les rodea. La idea de delimitar la escala de medición de un sistema, proporciona una ayuda para establecer las fronteras del objeto de estudio. Una microcuenca hidrográfica es un espacio naturalmente delimitado sobre el cual interactúan factores ambientales, sociales y económicos, cuyo eje principal lo constituye el agua, sustancia vital para el desarrollo de la vida y su aprovechamiento por parte del hombre.

En virtud a esta delimitación, en la presente tesis se plantea valorar el conjunto de factores ambientales, socio-culturales y económicos que interactúan en una microcuenca hidrográfica. Se propone un conjunto de índices integrados que permita establecer una línea base para futuras evaluaciones de la sustentabilidad y, además, que la metodología propuesta, sirva de modelo para realizar estimaciones similares en otras microcuencas.

El abordaje de esta investigación partió de los supuestos contenidos en la teoría general de sistemas y la teoría de los sistemas complejos, las cuales permiten a través de la interdisciplinariedad, afrontar un problema complejo. Una microcuenca hidrográfica es un sistema complejo debido a las interacciones que existen entre los múltiples elementos que la componen.

Históricamente, en México se ha planteado el manejo integrado de cuencas y muchos autores proponen su estudio a través de una visión holística. En los capítulos de esta investigación se realiza una revisión de tales propuestas, se presenta el conjunto de conceptos relacionados con el desarrollo sustentable y la sustentabilidad, así como metodologías para evaluar la sustentabilidad a diferentes niveles jerárquicos.

Se propone y desarrolla un planteamiento metodológico para evaluar la sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa en el municipio de Huatusco, Veracruz mediante el uso de indicadores y finalmente se discuten y analizan los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Teoría de la sustentabilidad y el desarrollo sustentable

El concepto de desarrollo sustentable es una propuesta oficial unificada que surge del consenso mundial entre líderes, políticos, investigadores, académicos y sociedad organizada para afrontar los desafíos generados por la incertidumbre y los riesgos asociados al crecimiento poblacional, contaminación y crisis medioambiental del último siglo. Por desarrollo sustentable se entiende aquel desarrollo que avala el uso adecuado de los recursos naturales para satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes, pero que así mismo garantiza su calidad y cantidad a las generaciones futuras y sustentabilidad podría definirse como una cualidad dinámica del desarrollo humano que busque al mismo tiempo el equilibrio entre el capital social, el capital natural y el capital económico.

2.1.1 Principios del desarrollo sustentable y sustentabilidad

El Informe Brundtland “Our common future” por parte de la Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente, integrada por un grupo de personalidades del ámbito científico, político y social, representativo de los diversos intereses existentes en la comunidad internacional el cual hizo popular la frase “desarrollo sostenible” y lo define como “aquel desarrollo que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la habilidad de las futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987).

La concepción original del desarrollo sustentable ha venido nutriéndose, a través de procesos de reflexión y participación social, con enfoques conceptuales y marcos de indicadores cada vez más acotados a temas de interés particular, ámbito geográfico y prioridades específicas. Una variante sobre la noción original del desarrollo sustentable es aquella que concibe a éste en tres dimensiones: capital social, capital económico y capital ambiental, entendida la palabra capital tanto en términos de existencia como de la calidad de los recursos.

La sustentabilidad (o sostenibilidad) es un concepto promovido desde la década de 1980 en el seno de la Naciones Unidas para involucrar, en la discusión sobre desarrollo, la preocupación por el deterioro ambiental progresivo y la inequidad social, que cada vez se demostraba más aguda en todas las regiones del mundo (Acevedo, 2009). Así mismo, se establece 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 medioambiente con desarrollo, y a la vez economía con ecología (Toro *et al.*, 2010).

La sustentabilidad no es una situación de momento o una condición estática si no que corresponde a un proceso verificable solo con el transcurrir del tiempo, lo anterior implica que su evaluación es el resultado de análisis periódicos, en los cuales los registros contables se convierten en evidencias sustantivas, indicativas de dicha condición (López y Mantilla, 2006). El término “sustentabilidad” hace referencia a la actividad económica humana no a los recursos renovables, mientras que la sustentabilidad es una condición particular de los niveles de uso de esos recursos por la sociedad. Entonces, la sustentabilidad es un proceso en el cual, una población garantiza que su nivel de vida y desarrollo, permite a las generaciones futuras gozar de las mismas o mejores condiciones bajo las cuales se encuentran habitando actualmente (Sarandon, 2009).

El concepto de sustentabilidad está construido sobre el deber del comportamiento humano actual con respecto a las futuras generaciones, es decir, garantizar que el desarrollo económico, socio-político, cultural y ambiental presente, será igual o mejor en el futuro. Idealmente la sustentabilidad es la condición o estado que permitiría la continuidad sana, segura, productiva y en armonía con la naturaleza y con los valores espirituales. De aquí que un sistema será sustentable (ecológicamente) si conserva o mejora la base de los recursos intra y extra territoriales, por lo cual se debe definir y fundamentar los recursos a conservar. Se debe explicitar lo que se entiende por sustentabilidad ya que este concepto no es unívoco y existen numerosas definiciones del mismo que responden a varias disciplinas (Sarandon, 2009).

Desde entonces, han sido muchas las definiciones dadas a este término; en general todas coinciden en objetivos como la conservación de la base de recursos naturales, la lucha por los derechos humanos en procura de la equidad social, el respeto a las diferencias culturales y la búsqueda de alternativas para el acceso equitativo a los mercados y recursos económicos. Un concepto básico del término, enmarcado en el desarrollo rural, ha sido propuesto por el Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, según el cual la sustentabilidad se refiere a “...el mantenimiento de una serie de objetivos (o propiedades) deseados a lo largo del tiempo...” (Orozco *et al.*, 2009).

La sustentabilidad es una cualidad del desarrollo sustentable que requiere una propuesta de cambio futuro sobre el modo de actuar presente, vislumbrando un estado en el cual se garantice que el sistema seguirá funcionando en forma más optimizada en términos de sus recursos y atributos, pero a su vez, este modelo futuro requiere de acciones innovadoras que revisen el pasado cercano para asegurar que no se repetirán los mismos errores. Una de las principales preocupaciones mundiales lo constituye la alteración de ecosistemas, la cual se realiza con gran rapidez en

comparación con el tiempo requerido para su reposición, pero, lo más grave, es la velocidad con la que esos ecosistemas están siendo destruidos (Covarrubias, Ojeda y Cruz, 2011).

Para afrontar los desafíos que plantean los modelos económicos y hacer operativos los supuestos del desarrollo sustentable, la teoría general de sistemas es una herramienta exacta que define la forma bajo la cual los elementos de un sistema se afectan entre sí y el pensamiento complejo permite analizar la realidad a través de su conceptualización mediante sistemas complejos. En la vida cotidiana decimos que algo es complejo cuando no lo entendemos, cuando no sabemos cómo opera y normalmente hacemos una asociación con la palabra difícil o complicada. Etimológicamente la palabra complejo tiene como raíz la expresión “*plexus*” que significa entrelazamiento, que engendra *complexus*, es decir, enredo, conexión conflagración (Tarride, 1995).

2.1.2 Implicaciones evolutivas del hombre en el medio natural

El hombre y su proceso evolutivo sobre la tierra ha impreso una serie de efectos sobre nuestro planeta, su actuación histórica muestra que esta transición ha sido del tipo adaptativa; es decir, en cada una de sus etapas se observa que ha adecuado su actuar en función de las condiciones del medio y a su vez ha desarrollado a través de la innovación y el raciocinio, herramientas que le han permitido satisfacer sus necesidades y mejorar sus condiciones de vida.

En la medida que los seres humanos se organizan en grupos e intercambian bienes entre sí, surge propiamente la actividad económica, fueran estos productos de la agricultura, la pesca o la alfarería, y la actividad se realiza no ya para satisfacer sus propias necesidades, sino también para el intercambio, por lo cual el empleo de recursos del medio natural y la generación de residuos se incrementan (Gómez, 2015). A partir de esta satisfacción de necesidades, han surgido contradicciones que enfrentan el desarrollo de la humanidad. En esta dinámica, la sociedad se convierte en un monstruo que va engullendo la naturaleza hasta poner en peligro las posibilidades de continuación del proceso de utilización de los recursos naturales y la permanencia de las relaciones sociales de producción capitalistas (Covarrubias, Ojeda y Cruz, 2011).

Por ejemplo, Gómez (2015) indicó que la revolución industrial que tuvo lugar en el siglo XVIII, aceleró el consumo de energía, el agotamiento de algunos recursos, la concentración de la población en grandes núcleos urbanos y la expansión de un sistema económico, el capitalismo, cuyo objetivo era la búsqueda y acumulación de beneficios en forma de dinero, agudizando de este modo la contradicción entre economía y medio ambiente.

Posterior a la era industrial, a finales del siglo XIX y primera mitad del siglo XX, la historia de la humanidad estuvo marcada por dos conflictos bélicos mundiales y múltiples regionales, donde un pequeño grupo de naciones llevaron al límite su pugna por el poder y control hegemónico del territorio, postulando teorías económicas y modelos de desarrollo cuyo interés no se centraba en un uso racional de los recursos naturales (Gómez, 2015).

Covarrubias, Ojeda y Cruz (2011) establecieron que desde el comunismo primitivo hasta el capitalismo postindustrial: jamás se pensó la posibilidad de que la acción del hombre pusiera en peligro su propia existencia. Algo importante que debemos entender, es que la revolución industrial multiplicó la capacidad humana de transformación de la naturaleza y hace que se empiecen a sentir los efectos depredatorios y contaminantes a nivel planetario, pero es hasta mucho tiempo después que se transita a la toma de conciencia del daño que se está causando y que surge el discurso de la sustentabilidad. Durante la post-guerra, el interés se centró remediar sus estragos: garantizar la paz, re-edificar las naciones y establecer un desarrollo económico que permitiera satisfacer las necesidades de alimentación y sustento de la población. Sin embargo, lo que se observa posterior a esta era, es un egoísmo ilimitado convertido en motor del desarrollo, el cual condujo inevitablemente a la acumulación de capital y, por tanto, a la depredación y contaminación de la naturaleza.

2.1.3 Sustentabilidad y equilibrio entre tipos de desarrollo

2.1.3.1 Movimientos conservacionistas

Los daños ambientales posteriores a la era industrial, la post-guerra, la crisis medioambiental del siglo XX (finales de los sesenta y principio de los años setenta) y de problemas puntuales relacionados con la contaminación y sus efectos en la población, han permeado en el actuar de la misma sociedad, desarrollando corrientes en disputa que manifiestan un debate ambientalista. Se distinguen reflexiones y posturas que argumentan la necesidad de establecer límites al crecimiento económico y poblacional e incrementar las acciones para conservar la base de los recursos naturales y tomar en consideración los efectos de este crecimiento sobre el medio ambiente. Pierrri (2005) destacó tres corrientes conservacionistas que colocaron en el escenario una serie de preocupaciones que reflejan el conflicto hombre vs. naturaleza y sus variantes: economía vs. ecología, crecimiento vs. conservación:

- a) La corriente ecologista conservacionista o sustentabilidad fuerte, tiene raíces en el conservacionismo naturalista del siglo XIX, y en las ideas ecocentristas de Leopold (1949)

de promover una “estética de la conservación” y una “ética de la Tierra” o “bioética” y en una importante referencia filosófico-política en la ecología profunda, de Arne Naess (1973). Tomó cuerpo en la discusión ambiental iniciada en los sesenta mediante la propuesta del crecimiento económico y poblacional cero, siendo la justificación teórica más clara la dada por la economía ecológica, principalmente a través de su “fundador”, el economista norteamericano Herman Daly.

- b) El ambientalismo moderado o sustentabilidad débil, que es antropocéntrica y desarrollista, pero acepta la existencia de ciertos límites que impone la naturaleza a la economía, está expresado por la economía neoclásica tradicional, llamada economía ambiental, cuya propuesta está a favor del crecimiento económico con ciertos márgenes de conservación, cuyos voceros más destacados son los organismos internacionales en la materia, tales como OCDE y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), entre otros.
- c) En tercer lugar, la corriente humanista crítica, con raíces en las ideas y movimientos anarquistas y socialistas, se coloca del lado de los países y sectores pobres y subordinados; se expresa en los setenta en la propuesta tercermundista de ecodesarrollo y entiende que su construcción efectiva requiere un cambio social radical, centrado en atender las necesidades y calidad de vida de las mayorías, con un uso responsable de los recursos naturales. Existen dos subcorrientes importantes: la anarquista y la marxista:
- La subcorriente anarquista pertenece a la tradición comunitaria de esta ideología y tiene por base las elaboraciones teóricas de la llamada ecología social (Bookchin, 1992 y 1994) y, en menor medida, la economía ecológica, con la que comparte la referencia en la ecología y las críticas a las concepciones económicas dominantes, pero no comparte la tesis de los límites físicos absolutos, ni que la solución se centre en detener el crecimiento.
 - Por su parte, la subcorriente marxista tiene sustentos teóricos en autores como Enzensberger (1979), O'Connor (1991) y Foster (1994), entre otros y entiende que el problema ambiental no está dado por los límites físicos externos a la sociedad sino por la forma de organización social del trabajo que determina qué recursos usar, la forma y el ritmo del uso.

Cabe mencionar que tales corrientes estuvieron siempre acompañadas del sustento científico y tomaron como base informes e investigaciones que ponían de manifiesto la crisis ambiental y entre los cuales destaca principalmente el informe al club de Roma, elaborado por un equipo de científicos del prestigioso Instituto Tecnológico de Massachussets dirigido por Dennis Meadows, llamado “The Limits to Growth”(1972), que sustenta la propuesta del crecimiento cero y es considerado el documento más influyente para establecer la alarma ambiental contemporánea.

2.1.3.2 Surgimiento del DS y el término sustentabilidad

Frente a la alarma ambiental experimentada mundialmente, se desarrollaron dos respuestas paralelas y mutuamente influenciadas: una, la expansión del movimiento ambientalista, animado mediante la creación de ONG nacionales e internacionales, principalmente en los países desarrollados y, en segundo lugar, las primeras formas institucionales internacionales y nacionales de asumir el tema y trazar políticas, lo que se concretó, por un lado, en la celebración de conferencias y convenciones internacionales de la ONU y la creación de instituciones internacionales específicas (Pierri, 2005). Particularmente destacan dos reuniones convocadas por la Organización de las Naciones Unidas, las cuales forman la base de lo que hoy se conoce como desarrollo sustentable:

- a) Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, realizada en Estocolmo (Suecia, 1972), en torno a la cual se plantearon diferentes formas de entender y asumir el problema por parte de los países desarrollados y los países en desarrollo
- b) Presentación en Oslo (Noruega, 1987) del Informe Brundtland “Our common future” por parte de la Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente, integrada por un grupo de personalidades del ámbito científico, político y social, representativo de los diversos intereses existentes en la comunidad internacional el cual hizo popular la frase “desarrollo sostenible” y lo define como “aquel desarrollo que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la habilidad de las futuras para satisfacer sus propias necesidades” (Brundtland, 1987).

Y para Pierri (2005) indicó que el desarrollo sustentable ha tenido la virtud de servir como un gran árbol que ha integrado bajo su sombra las diferentes posturas conservacionistas analizadas anteriormente. El origen del concepto de desarrollo sustentable está asociado a la preocupación creciente existente en la comunidad internacional en las últimas décadas del siglo XX al considerar el vínculo existente entre el desarrollo económico y social y sus efectos más o menos inmediatos

sobre el medio natural (Gómez, 2015). Aunque normalmente se utiliza la expresión "desarrollo sustentable", también es frecuente usar el término "desarrollo sostenible", pues ambas expresiones significan lo mismo, el desarrollo sustentable funciona como un concepto lógico, real, concreto y aplicable de un ideal sobre crecimiento a largo plazo (Larrouyet, 2015).

El desarrollo sustentable es un planteamiento teórico que indica las condiciones para establecer un equilibrio entre el conflicto hombre – naturaleza y garantizar que las generaciones futuras podrán disfrutar lo mismo. Entonces, el término sustentabilidad es un concepto que sugiere el cumplimiento de las condiciones planteadas por el desarrollo sustentable. Larrouyet (2015) expuso que la sustentabilidad alude a una condición que se puede mantener indefinidamente sin disminución progresiva de su calidad, así un ecosistema sustentable es aquel que mantiene la integridad del sistema a lo largo del tiempo; por lo tanto, relacionado al desarrollo económico la sustentabilidad implica el mantenimiento de la capacidad de los sistemas naturales para mantener la población humana a largo plazo.

Constanza y Patten (1995) definieron a un sistema sustentable como aquel que “sobrevive o persiste”, mientras que Daly (1991) estableció que un sistema sustentable se caracteriza por su naturaleza dinámica derivada de la evolución de los sistemas físicos y socioeconómicos. Y para Calvente (2007) “Sustentabilidad es la habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas” lo que esencialmente se busca a partir de la sustentabilidad es avanzar hacia una relación diferente entre economía, ambiente y sociedad; no busca frenar el progreso ni volver a estados primitivos, todo lo contrario, busca fomentar un progreso, pero desde un enfoque diferente y más amplio, y ahí es donde reside el verdadero desafío la regla de la sustentabilidad se plantea como un equilibrio entre los criterios de eficiencia económica, calidad ambiental y equidad intra e intergeneracional, pero su aplicación presenta cierta vaguedad.

2.1.3.3 Operatividad del desarrollo sustentable y sustentabilidad

O’Ríordan (1993) establece que los requerimientos que propone el informe Bruntland para un desarrollo sustentable son los siguientes: a) Un sistema político que asegure una efectiva participación en los procesos de decisión, un sistema económico que genere los beneficios y conocimientos técnicos bajo unas bases autosostenidas, b) un sistema social que aporte soluciones a las tensiones que provoca un desarrollo no armónico, c) un sistema de producción que respete la obligación de preservar las bases ecológicas en el proceso de desarrollo, d) un sistema tecnológico

que aporte continuamente nuevas soluciones, e) un sistema internacional de intercambios bajo condiciones de sustentabilidad y f) un sistema administrativo que sea flexible y capaz de autocorregirse.

Uno de los principales problemas para hacer operativo el concepto de sustentabilidad radica en el hecho de que los elementos que la integran no son invariables, sino que varían conforme cambian las demandas e interacciones entre los grupos que componen una determinada sociedad (Paniagua y Moyano, 1998). Por su parte Myers (1993) señaló que la complejidad del concepto de sustentabilidad deriva de las distintas y simultáneas asociaciones que establece entre los problemas que trata de resolver:

- Entre diferentes problemas ambientales (entre un problema y otro)
- Entre diferentes esferas de la actividad humana, como la protección ambiental y el desarrollo
- Entre el mundo desarrollado y el mundo en desarrollo
- Entre la generación presente y la futura
- Entre la protección de los recursos naturales y la satisfacción de las necesidades humanas
- Entre la ecología y la economía
- Entre la eficiencia económica y la equidad social

2.2 Teoría general de sistemas

La teoría general de sistemas surge en la primera mitad del siglo XX como una opción para explicar fenómenos o comportamientos duales o inciertos que no son explicados mediante posturas reduccionistas. Edwin Von Bertalanffy (padre de la teoría) promovió un conjunto de premisas en las cuales se indica que el todo está relacionado y que las partes no pueden visualizarse como entes aislados, existe necesariamente una inter-relación entre ellas. Esta perspectiva sistémica que es considerada como un instrumento con una fuerte posibilidad heurística nos mostró una nueva forma de abordaje de la realidad que prevalece hasta nuestros días. (Barberousse, 2008).

Bertalanffy (1974) buscó explicitar los aspectos de unidad que caracterizan un cierto sistema organizado de elementos y lo denominó conjunto de elementos, es decir, un sistema. Desde una perspectiva holística, asumió que el sistema goza de propiedades emergentes, se halla constituido por subsistemas e interacciona con suprasistemas. Por su parte, (Morin, 1994), estableció que un sistema es una interrelación de elementos que constituyen una entidad global o unidad global y que comporta dos caracteres principales: el primero es la interrelación de los elementos y el

segundo es la unidad global constituida por estos elementos en interacción, además, se puede concebir el sistema como unidad global organizada de interrelaciones entre elementos, acciones o individuos y puede manifestar propiedades que no pueden ser explicadas a partir de sus componentes.

El pensamiento sistémico constituye una de las más poderosas herramientas del proceso gnoseológico, ya que permite conceptualizar y, en su caso, diseñar objetos como sistemas. Toma en cuenta las estructuras externas e internas del sistema en consideración; las primeras se determinan mediante la identificación del papel que desempeñan en el supra sistema y sus relaciones con otros sistemas, las segundas presentan al sistema como un agregado hipotético de subsistemas funcionales, interconectados en forma tal que se asegure el cumplimiento del objetivo del sistema en el supra sistema. En fin, el uso de la teoría de sistemas ayuda a establecer los principales elementos del sistema bajo estudio, su estructura y función, así como las propiedades emergentes.

2.3 Teoría de los sistemas complejos

Un sistema complejo es la confluencia de múltiples procesos cuyas interrelaciones constituyen la estructura de un sistema que funciona como una totalidad organizada. La complejidad de un sistema no está solamente determinada por la heterogeneidad de los elementos (o subsistemas) que lo componen y cuya naturaleza los sitúa normalmente dentro del dominio de diversas ramas de la ciencia y la tecnología. Además de la heterogeneidad, la característica determinante de un sistema complejo es la interdefinibilidad y mutua dependencia de las funciones que cumplen dichos elementos dentro del sistema total (García, 2011). El deterioro de los ecosistemas, la diversidad de los problemas de salud, el crecimiento de las ciudades, los cambios en los sistemas productivos, son ejemplos de situaciones que demandan nuevas formas de enfrentamiento científico tecnológico con objeto de otorgarnos mejor calidad de vida. Este desafío, motiva a tratar los problemas en términos de “problemas típicos de sistemas”, poniendo atención a sus ambientes, componentes y relaciones que cada día crecen en cantidad y complejidad. (Tarride, 1995).

El mundo, afirmó Checkland (1997), es un complejo gigantesco con conexiones densas entre sus componentes. Debido a nuestra limitada capacidad para examinarlo en toda su complejidad, solemos dividir el todo en partes, para luego analizar a cada una de estas por separado. Con base en esta estrategia de reducir la complejidad inherente al mundo (perspectiva atomista-reduccionista), el ser humano logró generar tal cúmulo de conocimientos que al paso del tiempo

fue necesario realizar un esfuerzo complementario para organizarlo. Hoy se entiende o percibe el conocimiento como abierto, inconcluso, siempre relativo y en permanente reconstrucción. La complejidad de los nuevos modelos y teorías científicas obligó a considerar a la información como un insumo de gran valor. La revolución científico-tecnológica ha suscitado cambios profundos en la sociedad contemporánea, fundamentalmente cambios en las mentalidades, perspectivas y valores humanos (Barberousse, 2008)

Esta complejidad funcional de la realidad debe analizarse a través de una nueva forma de abstracción, el pensamiento complejo propuesto por Edgar Morin (1994) inicialmente, permitió clarificar la complejidad que representa las relaciones internas del sistema y la interacción del sistema con su entorno. A través de la complejidad disyuntiva se puede segmentar y distinguir los diferentes subsistemas y las relaciones causa – efecto presente tanto al interior como al exterior del sistema. De esta manera, es a través de García (2006) que se definió a un sistema complejo como un recorte de la realidad que representa un conjunto de elementos heterogéneos interdefinibles entre sí y que intervienen en ciertos procesos, los cuales no pueden ser estudiados de forma aislada, sino a través del entendimiento que cada uno de ellos presenta un efecto sobre la totalidad y no se puede entender la totalidad si no se comprende la función que tiene cada uno de los elementos y la complejidad podría entenderse como el puente o interacción que existe entre los sistemas y su entorno, entendiendo siempre que el entorno siempre será más complejo por sí mismo.

El pensamiento complejo ha permitido construir un abordaje estructural-fenoménico y heurístico de los procesos y fenómenos de la realidad y es a través del paradigma de la complejidad como se asegura un marco conceptual que permite establecer interrelaciones e intercomunicaciones reales entre las diversas disciplinas, provocando un fecundo diálogo entre especialistas, metodologías y lenguajes específicos. Bajo el manto del paradigma de la complejidad los sistemas complejos, según Morin (1994) se tiene una construcción no-lineal de la realidad y se puede afirmar que un sistema complejo no puede ser analizado, en principio, en forma fragmentaria, es decir, por partes; se halla constituido por un sistema de elementos que tiene múltiples sentidos en la intimidad del sistema considerados en un horizonte temporal limitado y puede sufrir transformaciones y cambios bruscos. En la Figura 1 se representa el abordaje que ha de darse al estudio de los sistemas complejos y su diferencia con la visión reduccionista.



Figura 1. Escala de valoración de la complejidad de los sistemas. (Fuente: Laguna-Sánchez *et al.*, 2016).

Un principio básico de la teoría de sistemas complejos afirma que toda alteración en un sector se propaga de diversas maneras a través del conjunto de relaciones que definen la estructura del sistema y, en situaciones críticas (baja resiliencia), genera una reorganización total. Las nuevas relaciones y la nueva estructura que de allí emerge implican tanto modificaciones de los elementos, como del funcionamiento del sistema total. (García, 2011)

2.4 Sustentabilidad, teoría de sistemas y teoría de los sistemas complejos

El ser humano ha logrado interactuar de una manera eficiente y cada vez más inteligente con su entorno, aumentó su capacidad de reflejar creativamente la realidad por medio de cálculos y modelos formales. Los nuevos procesamientos de la información provocaron la aparición de lenguajes y metalenguajes que estructuraron la mente de quien los utilizó y cambió, drásticamente, nuestro modo y estilo de vida. Para que se produzca el fenómeno del desarrollo y crecimiento sustentable de la humanidad se tiene que partir de la base de que la tierra es un sistema de producción complejo, una red de procesos de producción que se producen a sí mismos, de la cual emergen tres condiciones esenciales: las condiciones ambientales, las condiciones infraestructurales y las condiciones estructurales. Estas bases estructurales unidas e interactuando entre sí, producen las condiciones globales, este planteamiento implica una visión más global, dinámica e integradora acerca de nuestra actividad antrópica y su entorno (Calvente, 2007)

Un aspecto importante de la perspectiva del reporte Brundtland fue el de ligar el desarrollo sostenible a la inclusión de las futuras generaciones en el cálculo de los costos del desarrollo económico del presente y su implementación requeriría de cambios en las estructuras económicas, sociales y políticas tanto en los límites de cada nación individual como a nivel internacional. (Moran, 2000).

(Clayton y Radcliffe, 1996) establecieron que ...“El mundo puede ser pensado como un gran sistema complejo, el cual contiene subsistemas, como los socio-económicos y ambientales, que son en sí mismos complejos y que establecen entre sí un patrón de interacción aún más complejo. Es improbable que modelos simples sean capaces de capturar este comportamiento. Los problemas del desarrollo son típicamente multidimensionales, multidisciplinarios y multisectoriales... El entendimiento de las ramificaciones complejas de la sustentabilidad requiere la integración de información de un rango amplio de disciplinas... La tarea vital es encontrar la forma de integrar las dimensiones críticas del debate, para recoger o producir la información y perspectivas esenciales en lo científico, socio-económico y filosófico para desarrollar una estrategia racional... que pueda generar políticas prácticas y efectivas...”

Para poder establecer un primer acercamiento a la relación entre sustentabilidad, teoría de sistemas y sistemas complejos, se puede decir que el estudio y planteamiento de la teoría de sistemas coadyuva en la comprensión del conjunto de interacciones que se pueden presentar en nuestra sociedad. Morán-Seminario (2000) establece que el desarrollo sustentable es un fenómeno complejo, contradictorio y multifacético, suele ser concebido y estudiado, mayormente, en su dimensión cuantitativa, como crecimiento económico, despojado de sus aspectos cualitativos. Uno de los principales desafíos que presenta la sustentabilidad es su enfrentamiento y tratamiento de la complejidad en el sentido de tratar de integrar las diferentes dimensiones que aborda. La introducción en años recientes de la noción de desarrollo sostenible ha servido para ayudar a restablecer la complejidad y el balance en las discusiones sobre el desarrollo.

Existe dos estudios importantes que resumen perfectamente la forma bajo la cual el pensamiento sistémico contribuye a la comprensión de los principios de sustentabilidad. (Tamames, 1977) indicó que, en 1970 en el informe al Club de Roma, el profesor Jay Forrester, experto en dinámica de sistemas del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), presentó un modelo global en el que se incluían muchos de los elementos de la problemática que les preocupaba: El modelo World-2 que relacionaba la evolución de cinco variables: población, inversión de capital, recursos

naturales, contaminación y producción de alimentos; bajo la interpretación de que el crecimiento de la población genera las necesidades de industrialización y de cultivo de tierras, lo que a su vez da lugar a mayor población y mayor crecimiento, se prevé que, a partir de determinado momento, empiezan a aparecer las consecuencias de agotamiento de los recursos naturales y la imposibilidad de regeneración, debido a la fuerte contaminación.

Ensayando virtualmente diferentes combinaciones de las dinámicas consideradas, Forrester planteó que un posible equilibrio global futuro se obtendría mediante una serie de reducciones: de la utilización de recursos naturales, en un 75 por ciento, en lo posible, mediante reciclaje; de la contaminación, en un 50 por ciento; de las inversiones, en un 40 por ciento; y de la natalidad, en un 30 por ciento. Luego, el equilibrio supondría crecimiento cero en todas las variables básicas del sistema, excepto en los recursos naturales, que seguirían decreciendo, pero muy lentamente. Después, Dennis Meadows (discípulo de Forrester) y su equipo, también del MIT, desarrollaron el modelo World-3, modelo informatizado de las variables asociadas a las cinco tendencias de inquietud mundial: industrialización acelerada, rápido crecimiento demográfico, escasez general de alimentos, agotamiento de recursos no renovables y deterioro del medio ambiente. En la primera proyección, que seguía las tendencias presentes, los límites se alcanzaban por agotamiento de los recursos no renovables; a continuación, programaron una proyección en la que ese problema era resuelto, suponiendo una duplicación de la cantidad de recursos económicamente disponibles. El colapso se daba de nuevo, pero ahora debido a la contaminación producida por la industrialización acelerada causada por esa disponibilidad de recursos. De aquí indican que ese proceso debe acompañarse de frenos a la contaminación. La siguiente proyección incluía, además de la duplicación de los recursos, estrategias tecnológicas para reducir el nivel de contaminación a un cuarto del nivel anterior a 1970. Esta vez, los límites del crecimiento se alcanzan por escasez de alimentos.

En torno a la perspectiva del pensamiento sistémico, se puede sugerir que la sustentabilidad es una propiedad emergente de los sistemas debido a que surge a partir de la operatividad e interacción del sistema y su entorno, es decir, a partir de complejidad operativa de los sistemas y el medio que lo rodea, emergen ciertos problemas que ponen en predicamento la funcionalidad de los mismos y por lo tanto, la sustentabilidad se plantea como una opción para decidir sobre el control y la actuación futura de los elementos del sistema y su relación con el entorno, modulando sus efectos afín de garantizar su estabilidad en el tiempo.

De acuerdo con Laguna-Sánchez *et al.* (2016) los enfoques hacia la sustentabilidad a un se encuentran en desarrollo, pero ya han influido sobre los procesos cognoscitivos de la siguiente manera:

- Cuestionan una postura puramente reduccionista (identificada con la mono y la multidisciplina) a la vez que refuerza una tendencia expansionista (asociada con la inter y la transdisciplina).
- Amplían los ámbitos y dimensiones pertinentes, así como los horizontes espacial y temporal.
- Orientan hacia un trabajo inter y transdisciplinar.

Una última reflexión para la discusión se puede encontrar en Laguna-Sánchez *et al.* (2016) quienes establecieron que la sustentabilidad como paradigma emergente de los sistemas complejos enfrenta a la humanidad a la necesidad de rediseñar sus modelos de desarrollo, de tal manera que le permitan establecer una nueva relación de estabilidad, bajo pautas de equidad intra e intergeneracional, en los socio-ecosistemas y los sistemas antropambientales.

2.5 Modelos de evaluación de sustentabilidad a diferentes niveles jerárquicos

La evaluación del desarrollo sustentable en nuestro país obedeció a su participación en cumbres, reuniones y encuentros internacionales donde se plantearon retos sobre el crecimiento poblacional y el carácter finito de los recursos naturales. En junio de 1992, durante la Cumbre de la Tierra aprobaron el programa de acción para el desarrollo sustentable, conocido como Agenda 21, a través del cual los países se comprometieron a instrumentar mediante la generación de indicadores, una gama de aspectos o temas implícitos en la noción de desarrollo sustentable (INEGI., 2000).

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. De esta manera Toro *et al.* (2010) establecieron que los indicadores e índices surgen como la base de las metodologías de evaluación de sustentabilidad, debiendo cumplir una serie de requisitos para ser de utilidad. Una de las principales motivaciones para el uso de indicadores de sustentabilidad está basada en la idea de crear un soporte estadístico importante y suficiente para evaluar la interacción entre las actividades humanas y el medio ambiente.

2.5.1 Uso de indicadores para evaluación de sustentabilidad

La importancia de los indicadores radica en las funciones que tienen de simplificar, cuantificar y ordenar la información para comunicar de manera sencilla los cambios en el estado de los recursos naturales. Sin embargo, dada la creciente popularidad en su desarrollo, la eficacia en la evaluación y desarrollo de políticas públicas aún es limitada; lo que se debe principalmente a las restricciones de tipo institucional y técnico.

OCDE (2001) definió a un indicador como "una variable que describe una característica del estado de un sistema, generalmente a través de datos observados o estimados". Algunos indicadores pueden informar acerca de la posición del sistema particular en relación con límites u objetivos de la sustentabilidad (indicadores de distancia al objetivo) o proporcionan señales para medir el progreso hacia objetivos que contribuyen conjuntamente al bienestar humano y al bienestar de los ecosistemas. Sin embargo, es importante señalar que un indicador no dice nada acerca de la sustentabilidad, si no hay un valor de referencia, es importante señalar que los indicadores permitan expresar de modo integrado un valor numérico o cuantitativo del grado de sostenibilidad de un país o región, lo cual facilita la comparación con otros países o regiones. (Gómez, 2015).

Mediante la cuantificación de las tendencias clave y la comprensión de cantidades enormes de información en indicadores comprensibles y simples, se ha logrado avanzar en el debate de políticas hacia medidas de mitigación específicas y se ha propiciado la aplicación de políticas novedosas (SEMARNAT, 1997). Según Kates *et al.* (2001) el objetivo de la evaluación de sustentabilidad a través de indicadores es proporcionar a los encargados de adoptar decisiones, una valoración de ámbito local a global que integre los sistemas de naturaleza y sociedad a corto y largo plazo, a fin de ayudar a determinar qué acciones deben ser emprendidas para favorecer una sostenible relación entre sistemas. La evaluación de sustentabilidad se respalda en el empleo de indicadores que describen una característica del estado de un sistema, generalmente a través de datos observados o estimados, e índices que consisten en una agregación cuantitativa de indicadores (Toro *et al.*, 2010). Así mismo, este autor resume que la selección de indicadores debe basarse en los siguientes criterios:

- Rigurosa conexión con las definiciones de sustentabilidad
- que permitan una percepción holística
- fiabilidad y disponibilidad de cuantificar datos a lo largo de horizontes temporales
- adecuación al proceso que se desea valorar

- posibilidad de tener (sub) objetivos políticos derivados
- adecuada normalización, agregación, y ponderación de las variables

Los indicadores de sustentabilidad indican, además, el estado y la variación del sistema humano en relación con el sistema natural y la característica principal de los indicadores es su capacidad para resumir, condensar y centrar la enorme complejidad del entorno dinámico a una cantidad manejable de información significativa (Jimenez, 2000). Por tanto, los indicadores de sustentabilidad permiten la visualización de fenómenos, poniendo de relieve las tendencias, lo que permite simplificar, cuantificar, analizar y comunicar de un modo más simple información compleja. Además, proporcionan información clave acerca de un sistema físico, social o económico, permitiendo el análisis de las tendencias y de las relaciones causa-y-efecto y, por tanto, dando un paso más allá de los datos primarios (Veleva y Ellenbecker, 2001).

2.5.2 Modelo P-E-R

El marco Presión-Estado-Respuesta (PER) ha sido utilizado en el contexto de los trabajos del grupo sobre el estado del medio ambiente. El modelo de evaluación de sustentabilidad propuesto por la organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE, 2001) permitió establecer un grupo de indicadores que midan la presión de las acciones humanas sobre los recursos, el estado actual de los mismos y la respuesta o conjunto de acciones para mejorar las condiciones actuales del desarrollo. Este modelo (Figura 2) proporciona un panorama claro de la dimensión de los problemas ambientales que se enfrentan, las causas que los originan y cómo se les combate, todo esto con una perspectiva del análisis de tendencias, está basado en una lógica de causalidad, presupone relaciones de acción y respuesta entre la economía y el medio ambiente y parte de cuestionamientos simples:

- ¿Qué está afectando al ambiente?
- ¿Qué está pasando con el estado del ambiente?
- ¿Qué estamos haciendo acerca de estos temas?

Los exámenes de desempeño ambiental de la OCDE emplean sistemáticamente indicadores ambientales para apoyar e ilustrar los análisis que incluyen. De este modo se obtiene retroalimentación sobre su importancia política y solidez analítica. Pueden distinguirse tres grandes categorías de indicadores para la evaluación del desempeño ambiental (OCDE, 2001):

- a) Indicadores de desempeño ligados a objetivos cuantitativos explícitos (metas, objetivos, compromisos).

- b) Indicadores de desempeño ligados a grandes objetivos cualitativos, dirigidos generalmente al concepto de desempeño por dos vías: i) con respecto a la eficiencia de las actividades humanas (por ejemplo, emisiones por unidad de PIB); y ii) con respecto a la sustentabilidad del uso de los recursos naturales (por ejemplo, intensidad de uso de la selva).
- c) Indicadores descriptivos, que no están ligados explícitamente a los objetivos nacionales.

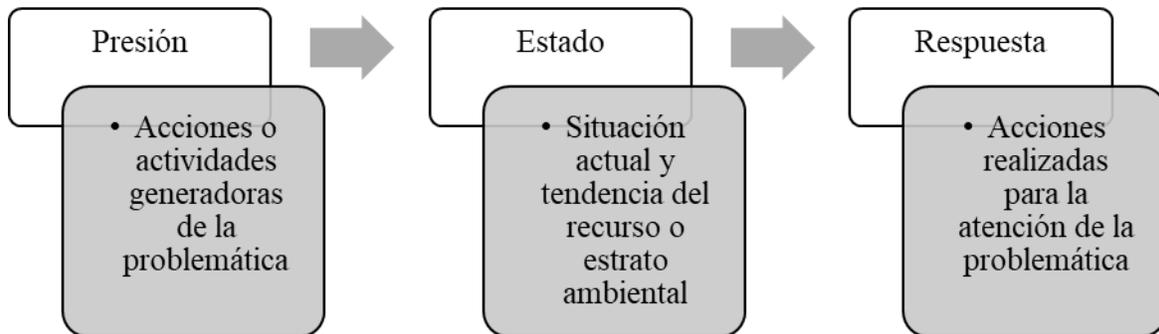


Figura 2. Modelo Presión - Estado - Respuesta propuesto por la OCDE.

2.5.3 MESMIS.

El proyecto MESMIS (Marco para la Evaluación de la Sustentabilidad) es un esfuerzo interdisciplinario y multi-institucional liderado por GIRA, el grupo interdisciplinario para la tecnología rural apropiada y tiene como objetivos (Masera, Astier y López, 1999):

- a) El desarrollo de un marco referencial para evaluar la sostenibilidad de sistemas alternativos de manejo de recursos naturales
- b) La aplicación del marco en diferentes estudios de caso
- c) La capacitación de individuos e instituciones interesadas en el tema
- d) La generación y difusión de materiales para facilitar la aplicación del marco.

MESMIS define un marco que es aplicable en los siguientes parámetros:

- La sustentabilidad de los sistemas de manejo de recursos naturales se define por siete atributos generales: productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autoseguridad.
- La evaluación solo es válida para un sistema de manejo en un determinado lugar geográfico, una escala espacial (por ejemplo, parcela, unidad de producción, comunidad, etc.) y para un período de tiempo determinado.
- Es un proceso participativo que requiere un equipo interdisciplinario.

- No se mide la sustentabilidad per-se, sino que se hace a través de la comparación de dos o más sistemas.

Metodológicamente presenta una estructura flexible para adaptarse a diferentes niveles de información y capacidades técnicas disponibles localmente. El MESMIS no trabaja con una lista predeterminada de indicadores, sino que propone que aquellos seleccionados deben dar información tanto sobre los atributos de sustentabilidad como de los puntos críticos identificados en el sistema. El proceso metodológico es dividido en tres etapas y fases (Orozco *et al.*, 2009):

Etapas de planificación

- Construcción de la propuesta local de agricultura sostenible.
- Identificación de aspectos críticos.
- Definición de indicadores de medición.

Etapas de evaluación

- Aplicación del sistema de indicadores.

Etapas de análisis y retroalimentación:

- Presentación y análisis de resultados.
- Reprogramación de planes de trabajo

2.5.4 Biograma

Otra metodología para evaluar sustentabilidad a nivel de AES es el biograma, desarrollado por (Sepúlveda, 2008), es una evaluación integrada por un diagrama multidimensional y los Índices respectivos que representa gráficamente el “estado de un sistema”. Dicha imagen revela el grado de desarrollo sostenible de la unidad de análisis en cuestión, los aparentes desequilibrios entre las diversas dimensiones y, por ende, los posibles niveles de conflicto existentes. Además, genera un “estado de la situación actual” de la unidad estudiada y permite realizar un análisis comparativo del sistema analizado en diversos momentos de su historia; es decir, su evolución. En el Cuadro 1 se muestra un ejemplo de la aplicación del biograma en la evaluación del desarrollo sostenible de un territorio en particular.

Los resultados del biograma se representan en una gráfica del tipo telaraña y el índice integrado de desarrollo sostenible (S^3), es un instrumento complementario que permite representar el grado de desempeño de una unidad de análisis, utilizando indicadores de las diferentes dimensiones. La unidad de análisis (UA) es el territorio, en el cual se implementarán estrategias, políticas e inversiones para superar las limitantes responsables de los desequilibrios espaciales.

Cuadro 1. Ejemplo de indicadores del biograma.

Indicadores de Desarrollo Sostenible (Por dimensión)		
Ambiental	Económica	Social
A1. Consumo de comestibles renovables (% del total de energía)	E1. Ahorros domésticos brutos (% del PIB)	S1. Desempleo (% de la fuerza de trabajo)
A2. Consumo de energía eléctrica (KWH per cápita)	E2. Balanza de cuenta corriente (% PIB)	S2. Expectativa de vida total (Años)
A3. Consumo de fertilizantes (100 g por hectárea de tierra arable)	E3. Formación de capital bruto (US\$ constantes de 1995)	S3. Fuerza de trabajo femenina (% del total de la fuerza de trabajo)
A4. Contaminantes orgánicos del agua (Kg por día)	E4. Índice de precios al consumidor (1995 – 2000)	S4. Líneas telefónicas (por cada 10,000 personas)
A5. Emisiones de CO2 orgánicos del agua (Ton métricas per cápita)	E5. PIB Per Cápita (US\$ Constantes de 1995)	S5. Tasa de alfabetización (% Personas mayores de 15 años)

2.5.5 Metodología W-S-I

(Chaves y Alipaz, 2006) proponen un índice de sostenibilidad de cuencas (WSI, por sus siglas en inglés) en el que utilizan el modelo de indicadores presión-estado-respuesta, dicho índice se integra cuatro factores:

- Cuestiones hidrológicas (H),
- Medio ambiente (E),
- Vida (L)
- Política de recursos hídricos (P).

En su desarrollo utilizan criterios de selección de cuatro indicadores (H-E-L-P) en un esquema matricial y como resultado obtienen el WSI, el cual se calcula numéricamente que numéricamente por la ecuación $WSI = (H+E+L+P) / 4$.

En esta metodología a todos los indicadores les asigna 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. Para determinar la sostenibilidad de la cuenca establecen un rango de valores el cual indica que si $WSI < 0.5$, entonces se presenta una baja sustentabilidad, entre 0.5

y 0.8 sustentabilidad intermedia y si $WSI > 0.8$, entonces la sustentabilidad de la cuenca será elevada (Chaves y Alipaz, 2006). Dicho modelo se construye a partir de la definición de indicadores de presión, estado y respuesta sobre los cuatro factores (HELP), los cuales puedan medirse cada cierto intervalo de tiempo y de esta forma, realizar evaluaciones estacionales en el área de estudio.

2.6 Modelo teórico de la investigación

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de ciertas variables sobre un objeto de estudio, se basa en un modelo correlacional, el cual tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular, para analizar la relación entre dos o más variables, y de esta forma, cuantificar, analizar y explicar su vinculación, dentro de este modelo correlacional. (Sampieri, Hernández y Baptista, 1997).

Además, la investigación presenta un enfoque cualitativo, el cual busca la “expansión” de los datos o información. Para este enfoque, la forma confiable para conocer la realidad es a través de la recolección y el análisis de datos, de acuerdo con ciertas reglas lógicas. Este enfoque implica inmersión inicial en campo, interpretación contextual y recolección de datos. De igual forma, para este estudio se aplicará el tipo descriptivo y explicativo, en cual se intenta describir y explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables (Sampieri, Hernández y Baptista, 1997).

Sampieri, Hernández y Baptista (1997) describieron estas investigaciones como estudios que se conducen básicamente en ambientes naturales, donde los participantes se comportan como lo hacen en su vida cotidiana, donde las variables no se definen con el propósito de manipularse ni de controlarse experimentalmente y donde los significados se extraen de los datos y se presentan a otros.

2.7 Conceptos básicos en la investigación

Para efectos de la comprensión de los temas que involucra esta investigación, se distingue a continuación una serie de conceptos que define tanto los objetivos de la investigación, metodología utilizada, definición del problema y relación entre las variables que la componen.

2.7.1 El concepto de microcuenca

La cuenca es un territorio natural delimitado por factores biofísicos como los caudales de agua y el relieve, es un espacio donde el agua fluye y desahoga hacia un punto común (Dourojeanni y

Jouravlev, 2002; Pineda, Gilio, Domínguez, Hernández, González y García, 2003; Cotler y Pineda, 2008) citados por (Carvajal, 2013). Las cuencas hidrográficas además de ser unidades funcionales, tener límites bien definidos y salidas puntuales, están estructuradas jerárquicamente, ya que pueden subdividirse en subcuencas, delimitadas también por un parteaguas y donde se concentran los escurrimientos que desembocan en el curso principal del río. Al interior de cada subcuenca se ubican las microcuencas, cuyos límites pueden incluir o no límites administrativos, como los de un ejido o un municipio. Esta delimitación múltiple expresa el carácter jerárquico y anidado de las cuencas (Cotler *et al.* 2013). La elección de los niveles jerárquicos (cuencas, subcuencas o microcuencas) dependerá de los objetivos, del problema o los problemas que se busquen resolver y de los alcances del manejo y gestión (Figura 3).

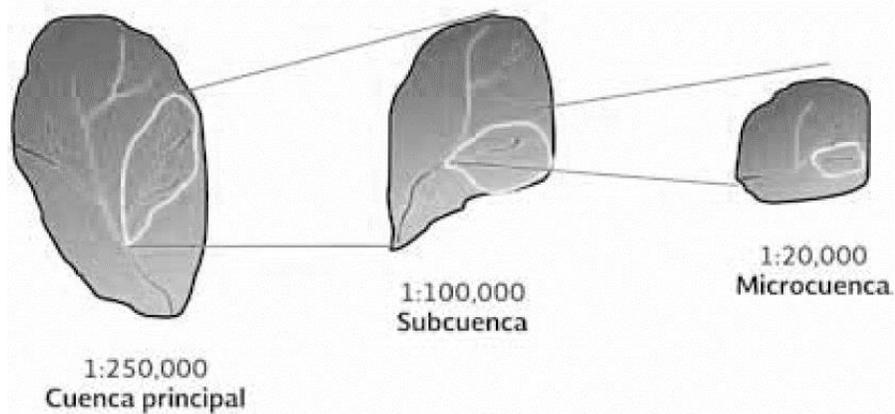


Figura 3. Clasificación de cuencas, subcuencas y microcuencas. (Fuente: Cotler *et al.*,2013).

Cotler *et al.* (2013) considera a las cuencas hidrográficas como los espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica).

En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes). Así mismo, en una cuenca hidrográfica fluye el cauce de un río y está delimitada naturalmente por la fisiografía y tanto la precipitación como los escurrimientos y la infiltración, se dirigen por efecto de la gravedad hacia un cauce común, formando manantiales, arroyos y ríos (Pérez y Pineda, 2007).

Las microcuencas hidrográficas, son entidades donde los componentes naturales físicos y bióticos muestran arreglos diversos de estructura que están interrelacionados de manera que su funcionamiento permite que los ecosistemas continúen sus procesos evolutivos. Sobre esta estructura y función de una microcuenca, se puede promover con mayor éxito el desarrollo social y económico basado en sistemas productivos diversificados y el mantenimiento a largo plazo de los recursos naturales (UAQ, 2011).

2.7.2 El concepto de actividades antrópicas

Por actividad antrópica se entiende a cualquier acción o intervención realizada por el ser humano sobre la faz del planeta. En las interrelaciones entre los distintos elementos clima, suelo, vegetación y hombre, que determinan los problemas ambientales, hay que destacar la relevancia de este último en la medida en que condiciona al resto de elementos, siendo simultáneamente actor desencadenante del problema (como explotador del sistema) y víctima del mismo (como parte del sistema). La investigación explora los factores, actividades, procesos y condiciones sociales que estén incidiendo en la sustentabilidad de una microcuenca, los cuales se han definido como actividades antrópicas.

2.7.3 El concepto de agroecosistema

Un agroecosistema se define como una unidad conceptual y básica de estudio y desarrollo de la agricultura, producto de la modificación de un ecosistema desarrollado por el ser humano. Está integrado a un sistema regional agrícola a través de cadenas de producción-consumo, existiendo relaciones entre sus componentes e interacciones de política y cultura de instituciones públicas y privadas. Su dinámica se basa en la retroalimentación de los procesos ecológicos y socioeconómicos. Busca la producción sustentable de alimentos, materias primas, y servicios ambientales, fundamentalmente, contribuyendo al bienestar de la sociedad. (COLPOS, 2012).

Por otro lado, Altieri y Labrador-Moreno (1995) comentan que un agroecosistema (AES), como cualquier ecosistema «natural», basa su funcionamiento en un flujo continuo de materia y energía que le posibilita el mantenimiento de su estructura y su funcionalidad. Un agroecosistema es un sistema de producción de bienes y servicios agropecuarios en la cual interviene directamente el hombre para transformar los recursos naturales en su beneficio, utiliza para ello una serie de insumos, materia y energía los cuales transforma y aprovecha; de forma resumida diríamos que es la transformación intencionada de los recursos naturales de un ecosistema para establecer un sistema de producción agropecuaria.

2.7.4 El concepto de sustentabilidad a nivel microcuenca

Se entiende a la sostenibilidad como una cualidad de los sistemas productivos mediante la cual éstos son protectores de los recursos naturales, económicamente rentables, generan bienestar social y son culturalmente compatibles. (Acevedo, 2009). Entonces, por sustentabilidad de una microcuenca se entendería el mecanismo bajo el cual se asegura que los recursos bióticos y abióticos son suficientes en cantidad y con una calidad que permitan ser consumidos en los distintos niveles tróficos y procesos energéticos en cada uno de los subsistemas que existen en ella, sin poner en riesgo los mismos para las generaciones futuras.

El desarrollo sustentable relacionado con el agua en una cuenca es un proceso que involucra la integración de factores económicos, sociales y ambientales; de tal manera que las actividades de producción de bienes y servicios deben preservar la diversidad, respetar la integridad funcional de los ecosistemas, minimizando su vulnerabilidad y haciendo compatibles los tiempos de recarga naturales con los de extracción requeridos por el sistema económico (Salcedo, 2005).

Se puede afirmar que el conjunto de recursos naturales de una microcuenca, presenta un umbral de soporte de todas las actividades antrópicas que se desarrollan en torno a ella. Por tanto, se puede estimar a través de un esquema de medición sistematizado, el grado de sustentabilidad de una microcuenca.

2.7.5 El concepto de indicadores e índices de sustentabilidad

De acuerdo con la real academia española (RAE, 2017), la palabra indicador es un adjetivo que indica o sirve para indicar, proviene del verbo latino “indicare”, que significa revelar, señalar. Un indicador se representa por un valor que refleja cuantitativamente, a través de una métrica, el estado de un fenómeno dado, el comportamiento de las variables y el desempeño de las políticas que se aplican (Ortiz, M., Sánchez, Castrejón y Romero, 2015).

Un indicador de sustentabilidad es una expresión en cierto nivel jerárquico y en magnitud, que expresa las interrelaciones entre el desarrollo socio-económico y los fenómenos ecológico-ambientales en la evaluación del bienestar de un país, un estado o una región en particular, necesitan ser desarrollados para proporcionar bases sólidas en la toma de decisiones de todos los niveles y contribuir a autorregular la sustentabilidad de los sistemas integrados del ambiente y el desarrollo (INEGI., 2000). Entre las técnicas más usadas se destacan la ponderación y transformación de los indicadores y su combinación dentro de un índice; la obtención de una variable sintética o combinación lineal de las variables originales que resume información, y es

interpretada como un índice o la aplicación de regresiones lineales múltiples, donde una variable es calculada por la combinación lineal de otras (Toledo, Galantini, y Contreras, 2015).

Por su parte, un índice se forma obteniendo un valor promedio de la suma de los indicadores. Un índice integra de forma resumida y multidimensional los indicadores expresados en un solo valor, razón por la cual se les conoce como indicadores agregados y a diferencia de los indicadores, expresan de una forma más abstracta, pero más fácilmente interpretable, la afectación de una combinación de diversas variables en un sistema (Ebert y Welsh, 2004).

2.7.6 Relación entre conceptos de la investigación

La relación entre los diferentes conceptos establecidos dentro de la investigación se puede establecer a partir de la determinación de las actividades antrópicas y el desarrollo de agroecosistemas dentro de un espacio territorial denominado microcuenca, cuyo efecto es evaluado en las diferentes dimensiones consideradas dentro del desarrollo sustentable a través de indicadores de sustentabilidad. Así, la evaluación de sustentabilidad a través de indicadores consiste en valorar y explicar los cambios sucedidos en el espacio y en el tiempo de un sistema a través de parámetros o indicadores que “revelan” su funcionamiento (Toledo, Galantini, y Contreras, 2015).

Debido a que los indicadores se expresan en diferentes unidades de acuerdo a la variable que cuantifican, es necesario unificarlos transformando sus valores a una misma unidad de medida (estandarización). Para su estandarización se construyen escalas que son independientes de las unidades originales de cada indicador y permiten superar este inconveniente.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Aplicación de modelos de evaluación de sustentabilidad

Los modelos de evaluación de sustentabilidad se pueden diseñar para diferentes niveles jerárquicos, de forma general, estos modelos parten de la selección de la metodología a implementar y a partir de entonces, se determina el conjunto de indicadores e índices que servirán para llevar a cabo la evaluación.

3.1.1 Estudios a nivel de cuencas, subcuencas y microcuencas

Para la consideración de evaluaciones de sustentabilidad a nivel cuenca, subcuenca o microcuenca, han de establecerse las interacciones entre los elementos que las constituyen y a partir de entonces, seleccionar el conjunto de indicadores a utilizar. En México, las cuencas presentan graves problemas de degradación. Aspectos como la deforestación, el incremento desordenado de la superficie agrícola, la ganadería extensiva, los sistemas de producción inadecuados a la aptitud y potencial de los recursos y la casi nula planeación de los procesos de producción y de los asentamientos humanos, son sólo algunas de las acciones que han propiciado el deterioro de los recursos naturales en las cuencas, originando con ello que grandes superficies, con alto potencial agrícola, silvícola o pecuario, se hayan convertido en tierras áridas o con reducido potencial productivo (Cotler *et al.*, 2013).

Estas problemáticas repercuten ampliamente en el conjunto de los servicios ecosistémicos y en particular en la degradación de la calidad del agua de las cuencas. Los impactos del uso de la tierra sobre los procesos hidrológicos y del medio biofísico sólo se pueden verificar dentro de cuencas pequeñas y la mayor parte de los estudios de caso se refieren a este tipo de cuencas. (FAO, 2002) En el Cuadro 2, se presenta un resumen de estudios de sustentabilidad realizados a estos niveles jerárquicos (Partida, Cabal y Ruiz, 2016).

Como se puede observar, son pocos los estudios realizados; sin embargo, la evaluación de sustentabilidad bajo este modelo jerárquico es de importancia relevante y no es reciente, ya que las cuencas hidrológicas como unidad de desarrollo no son una opción nueva, pues desde 1944 se han considerado a las cuencas hidrológicas como polos de desarrollo como fue el caso de la Comisión del Papaloapan y algunas otras. (Ruiz-Rosado, 2012)

Cuadro 2. Metodologías de evaluación de sustentabilidad.

Modelo de Evaluación de Sustentabilidad (Promovente)	Nivel Jerárquico	Indicadores	Marco Conceptual
Sistema Nacional de Indicadores ambientales Acuíferos Nacionales (SEMARNAT)	Estatad / Nacional	4 Indicadores de Presión 3 Indicadores de Estado 5 Indicadores de Respuesta	Modelo P-E-R
Cuenca del lago de Pátzcuaro (IMTA)	Cuenca	2 Indicadores Económicos 3 Indicadores Sociales 7 Indicadores Ambientales	Modelo P-E-R / Teoría de decisiones de atributos múltiples para evaluar un índice de Sustentabilidad (IDS)
Indicadores de Sostenibilidad en Acuíferos – Cuenca Jamapa (UNAM)	Cuenca	9 Indicadores no categorizados	Modelo P-E-R / Indicadores de Sostenibilidad en Acuíferos
Acuífero Cuautitlán-Pachuca. Cuenca del Valle de México (COLPOS)	Subcuenca	6 Indicadores Ambientales 5 Indicadores Económicos 3 Indicadores Sociales	Metodología MESMIS con 5 Atributos de Sustentabilidad
Cuenca del Río Santa Catarina y Subcuenca del río la Silla (UANL)	Subcuenca	5 Indicadores de Presión 5 Indicadores de Estado 5 Indicadores de Respuesta	Modelo P-E-R / Metodología WSI
Microcuenca la Joya - Centro regional de capacitación en cuencas (UAQ)	Microcuenca	9 Indicadores Ambientales 5 Indicadores Sociales 4 Indicadores de Productividad 4 Indicadores Económicos	No especifica metodología
Microcuenca Lagunillas; Jalisco (FIRCO)	Microcuenca	24 Indicadores	Metodología MESMIS

Fuente: Partida, Cabal y Ruiz (2016)

3.1.2 Estudios a nivel agroecosistema

Los agroecosistemas son sistemas de producción de bienes y servicios agropecuarios diseñados para satisfacer necesidades alimentarias del ser humano. Su existencia genera un impacto multidimensional inevitable sobre las condiciones del espacio territorial en el cual se desarrollan cultural o causan un efecto sobre los recursos naturales. Al aplicar un concepto de sostenibilidad en AES, las evaluaciones deben involucrar parámetros ambientales y sociales para obtener una idea global de lo que el agroecosistema significa en el bienestar económico y social y en la regeneración y/o mantenimiento de la calidad de los recursos naturales involucrados en el proceso productivo (Acevedo, 2009).

Para (Altieri y Nichols, 2007) un AES sustentable lo definieron como un conjunto de requisitos agroecológicos que deben ser satisfechos por cualquier finca, independiente de las diferencias en manejo, nivel económico, posición en el paisaje, etc., y ser mantenidos en el tiempo. Como todas las mediciones realizadas se basan en los mismos indicadores, los resultados son comparables, de manera que se puede seguir la trayectoria de un mismo agroecosistema a través del tiempo, o realizar comparaciones entre fincas en varios estados de transición.

(Toro *et al.*, 2010) afirmaron que en la evaluación de la sustentabilidad en general y en el caso particular de su aplicación en los agroecosistemas, la herramienta básica de evaluación (desde la perspectiva de la sustentabilidad fuerte) son los indicadores y, por supuesto, su agregación en índices. Así mismo indican que en la evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas el diagnóstico del impacto ambiental debería ser considerado en dos niveles. En el primer nivel o escala, correspondiente a la unidad básica, se encuentra la granja o predio agrícola, en la que los agricultores deben buscar optimizar la producción, con la mínima utilización de insumos y emisión de contaminantes.

En un nivel superior es posible realizar la evaluación regional de la agricultura y ganadería referidas a una entidad geográfica, diferenciada y estructurada en función de los grupos sociales que habitan e interactúan en ella, situación que hace que los límites geográficos de una región agrícola sean demasiado variables, ya que dependerá de los factores políticos, económicos y sociales considerados; además, han sugerido, por otra parte, que la sustentabilidad de la agricultura y ganadería debe ser evaluada desde la perspectiva de la solidez de los sistemas ecológicos, la aceptación social y la viabilidad económica. La solidez ecológica se refiere a la conservación y mejora del medio ambiente natural (Toro *et al.*, 2010).

La viabilidad económica apunta al mantenimiento de los rendimientos y la productividad de los cultivos y del ganado, y la aceptabilidad social hace mención a la autonomía, la igualdad y la mejora de la calidad de vida. En resumen, los indicadores de sustentabilidad en AES pueden ser utilizados para:

- a) Anticipar y evaluar las condiciones y tendencias
- b) Proporcionar información de alerta temprana para prevenir daños económicos, sociales y medioambientales
- c) Formular estrategias y comunicar ideas
- d) Apoyar la adopción de decisiones

En el Cuadro 3, es posible apreciar indicadores cualitativos empleados en ecosistemas naturales, agroecosistemas modernos y agroecosistemas sustentables (Pretty, 2008). Por ejemplo, en la dimensión económica deben evaluarse la rentabilidad, los márgenes de producción, costos medios, gastos en alimentación e insumos sanitarios y los costos en mano de obra.

Cuadro 3. Valores cualitativos de indicadores de sustentabilidad.

Indicador	Ecosistemas naturales	Agroecosistemas modernos	Agroecosistemas sustentables
Productividad	Media	Alta	Media (Posiblemente alta)
Diversidad de especies	Alta	Baja	Media
Diversidad funcional	Alta	Baja	Media - Alta
Estabilidad de Output	Media	Media - baja	Alta
Acumulación de biomasa	Alta	Baja	Media - Alta
Reciclaje de Nutrientes	Cerrado	Abierto	Semicerrado
Relaciones tróficas	Complejas	Simple	Intermedio
Regulación de la población natural	Alta	Baja	Media - Alta
Resiliencia	Alta	Baja	Media
Dependencia de inputs externos	Baja	Alta	Media
Reemplazo humano de procesos ecológicos	Baja	Alta	Media – Baja
Sustentabilidad	Alta	Baja	Alta

Dentro de la dimensión social, destaca la generación de empleo, las condiciones de trabajo y, con ello, la disminución de la tasa de inmigración en sectores rurales. Finalmente, la evaluación de la sustentabilidad en la dimensión ecológica o ambiental se orienta a determinar el impacto del manejo de cultivos y la producción pecuaria en los recursos agua, suelo y aire. Se debe señalar, que dentro de la dimensión económica de encuentran en forma implícita los aspectos técnicos de la producción, por lo tanto, esta dimensión será enfocada como una dimensión técnico-económica.

3.2 Marco normativo y operativo del manejo de cuencas en México

Las cuencas hidrográficas son territorios definidos naturalmente donde todos los procesos socio-ecológicos están íntimamente ligados entre sí. En ellas, el manejo se entiende como un proceso de planeación, implementación y evaluación de acciones mediante la participación organizada e informada de la población (Cotler *et al.*, 2013).

3.2.1 Leyes, normas y políticas aplicables al manejo de cuencas en México

Hoy por hoy, el agua debe ser apreciada como un elemento integrador que contribuya a dar paz a los mexicanos, para evitar conflictos y dar seguridad a todos; que contribuya a ser un factor de justicia social, que todos los mexicanos tengan acceso al recurso de manera suficiente, asequible, de buena calidad y oportunidad para hacer valer el derecho humano previsto en el artículo cuarto constitucional, que sea un elemento que contribuya a disminuir la pobreza en el país y que propicie el bienestar social. (CONAGUA, 2014). El agua como recurso natural de los ecosistemas, puede ser apreciada multidimensionalmente en función de su valor para la sobrevivencia los seres vivos. Se parte de la arista de su importancia económica, es imprescindible para el desarrollo de los sistemas de producción primaria, secundaria y terciaria. Ahora bien, en términos ambientales, representa el soporte de todos los procesos biológicos y ecológicamente, el ciclo hidrológico nos da una idea de su rol dentro del ecosistema.

Por otra parte, socialmente la humanidad ha dependido históricamente de este recurso y en la actualidad se vive una crisis por el acceso al agua potable de calidad. Como segundo gran componente del sistema terrestre, la encontramos en los tres estados de agregación y el 1.2% corresponde al agua dulce, disponible en lagos, ríos y aguas subterráneas, y el 98.8% restante a mares, océanos, sedimentos marinos, glaciares y nieves perpetuas, teniendo un papel decisivo en la conformación del clima, la regulación del sistema de la vida (biosfera) y en el funcionamiento del ciclo hidrológico. Sin embargo, es el agua dulce la esencial para el mantenimiento de la vida,

y la que actualmente se está convirtiendo en el principal problema mundial en el corto y mediano plazo (Rodríguez, Ruiz y Fajerson, 2010).

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), como señala en el artículo 1, es reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. Esta ley en la fracción I del artículo 7, menciona a la gestión integrada de las aguas nacionales de utilidad pública, y la señala como prioridad y asunto de seguridad nacional. Además, el artículo 15 establece que la planificación hídrica debe ser de carácter obligatoria para la gestión integrada de los recursos hídricos, conservación de los recursos naturales, de los ecosistemas vitales y del medio ambiente, lo que convierte al proceso como el instrumento más importante de la gestión hídrica (CONAGUA, 2014).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México y desempeña sus funciones a través de trece organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las Regiones Hidrológico – Administrativas. (CONAGUA, 2016). Para propósitos de administración de las aguas nacionales la CONAGUA ha definido 731 cuencas hidrológicas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas y a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas. Para propiciar la participación de la sociedad organizada en la gestión integrada del agua, la LAN reconoce a los consejos de cuenca y sus órganos auxiliares como instancias de coordinación y concertación y a los comités hidráulicos de los distritos de riego como órganos colegiados de concertación para una adecuada gestión del agua y la infraestructura. (CONAGUA, 2014).

A partir del año 1999, se instalaron oficialmente en México, los consejos de cuenca por decreto indicado en el capítulo IV, artículo 13 de la Ley de Aguas Nacionales, con la finalidad de formular y ejecutar programas y acciones para la mejor administración de las aguas, el desarrollo de la infraestructura hidráulica y de los servicios respectivos y la preservación de los recursos de la cuenca. La CONAGUA concertará con los usuarios, en el ámbito de los consejos de cuenca, las posibles limitaciones temporales a los derechos existentes para enfrentar situaciones de emergencia, escasez extrema, sobreexplotación o reserva. (Ruiz-Rosado, 2012)

Los consejos de cuenca son órganos colegiados de integración mixta, los cuales representan la instancia de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre la CONAGUA, incluyendo el organismo de cuenca que corresponda, y las dependencias y entidades de las instancias federal, estatal o municipal, y los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad, de la respectiva cuenca hidrológica o región hidrológica. Los consejos de cuenca, así como las comisiones y comités de cuenca, y los comités técnicos de aguas subterráneas representan una fórmula sólida para confrontar los principales desafíos en materia de gobernanza y gobernabilidad del agua en esas demarcaciones geográficas bajo el principio de un enfoque mixto en el cual concurren gobierno y sociedad para alcanzar en forma ordenada la conjunción de objetivos y formas de actuación para la obtención de resultados benéficos en respuesta a necesidades existentes y también para aprovechar el potencial en distintas zonas de la república. Esta fórmula mixta se fundamenta en acuerdos entre la autoridad del agua sin detrimento de su rol en términos de ley y los actores sociales en la gestión del agua, principalmente las organizaciones de usuarios. (CONAGUA, 2014).

La política hídrica nacional ha respondido, desde principios del siglo XX, a las demandas de la sociedad con una gestión de la oferta de agua, enfocada al desarrollo socioeconómico, mediante la construcción de infraestructura hidráulica diversa: presas, acueductos, pozos y sistemas de suministro de agua potable y riego agrícola, entre otras. Ello ha posibilitado el acceso al agua a un gran número de mexicanos; el desarrollo de la superficie agrícola bajo riego, la séptima más grande del mundo, y el crecimiento de la planta industrial, la más importante de América Latina en términos de producto sectorial per cápita. (CONAGUA, 2014).

3.3 Efecto de los agroecosistemas sobre las dimensiones de sustentabilidad

3.3.1 Implicaciones y desafíos en los agroecosistemas sustentables

Aunque en el Siglo XXI la agricultura sigue siendo motor para el desarrollo, enfrenta nuevos desafíos: la degradación de los recursos naturales, la variabilidad y el cambio climático, el libre comercio y el desarrollo de nuevas tecnologías, entre otros. El modelo productivo agrícola actual, heredado de la Revolución verde, está basado en la industrialización de los recursos naturales y el mercadeo de la sociedad rural; situación que promueve el crecimiento de los monocultivos, productos genéticamente modificados, la degradación de los suelos, pérdida de biodiversidad, uso intensivo de agroquímicos y un consecuente aumento de la pobreza rural y disminución de la agricultura tradicional (Loaiza, Carvajal y Ávila, 2014).

Surgen en contraposición nuevas estrategias que persiguen un desarrollo sustentable de los medios de producción agrícola, con tendencia más ambientalista, que plantean la necesidad de cambiar el modelo dominante de producción agrícola, hacia otros más sustentables. Entre dichas tendencias se destacan los modos de producción campesina, generalmente basados en principios que utiliza también la agroecología, reconocida como una ciencia y un conjunto de prácticas basadas en la aplicación de la ecología al estudio, diseño y manejo de agroecosistemas sustentables; que tiene como principio fundamental desarrollar agroecosistemas con mínima dependencia de agroquímicos e insumos de energía, lo cual conduce a una diversificación agrícola dirigida a promover interacciones biológicas y sinergias benéficas entre los componentes del agroecosistema, de forma que permitan la recuperación de la fertilidad del suelo y el mantenimiento de la productividad y la protección de los cultivos (Altieri y Nicholls, 2002) .

En respuesta a lo anterior, se han generado otras formas de producción que son compatibles con el medio ambiente, económicamente eficientes y socialmente equitativas; estas alternativas dependen más de un manejo agroecológico que de inversiones de capital; de recursos locales que de insumos externos y de procesos biológicos que de aplicaciones de agroquímicos (Loaiza, Carvajal y Ávila, 2014).

La agroecología maneja un concepto de respeto por la naturaleza que promueve la participación justa de los agricultores y rescata los conocimientos ancestrales. En la actualidad, la producción se percibe como un sistema mucho más amplio, con muchas partes interactuantes que incluyen componentes ambientales, económicos y sociales; siendo estas interacciones complejas y su balance objeto de preocupación en las últimas décadas, que ha llevado a reflexionar sobre los agroecosistemas sustentables (Gliessman, 2002).

La agroecología se robustece con aportes teóricos y metodológicos, considerando además el conocimiento local en el cual se aplican los conceptos y principios ecológicos, sociales y económicos. Es por ello que como transdisciplina tiene la oportunidad, y tal vez la responsabilidad, de enfocarse al análisis, diseño, desarrollo y evaluación de la agricultura y sus agroecosistemas (Ruiz-R., 2006).

Los sistemas de producción agroecológica son una alternativa sustentable para mejorar la calidad de vida de los productores a pequeña escala, porque utilizan de manera eficiente los recursos productivos, promueven la eficiencia social y cultural y desarrollan la capacidad de gestión productiva y económica. Altieri y Nicholls (2002) consideraron que el comportamiento óptimo de

los agroecosistemas depende del nivel de interacciones entre los distintos componentes bióticos y abióticos construyendo una biodiversidad funcional con el objeto de desencadenar sinergismos que subsidien los procesos que ocurren en el agroecosistema, proporcionando servicios ecológicos tales como la activación de la biología del suelo y el reciclaje de nutrientes, logrando sistemas biológicamente estables y económicamente viables.

3.3.2 Efecto de los Agroecosistemas en la calidad y cantidad del agua

El agua es sin duda uno de los recursos más importantes y valiosos para la agricultura y para la humanidad. Aunque el agua abunda en nuestro planeta (2/3 de su superficie están cubiertas por agua) y forma parte de un ciclo que parece no agotarse nunca, hay dos características que deben ser tenidas en cuenta y que pueden significar un serio problema para los humanos: su calidad y su disponibilidad. La mayor parte del agua es salada y, por tanto, no útil para la mayoría de los usos, entre ellos el consumo humano y el riego para la agricultura. Por lo tanto, la disponibilidad de agua dulce impone importantes restricciones a su uso indiscriminado (UNESCO, 2015).

El sector agrario utiliza por encima del 70% de esos recursos; mientras el sector industrial y el de servicios acaparan en torno al 15%. Se trata en suma de actividades sustentadas sobre la legítima aspiración de cada cual, a mejorar su nivel de vida, por encima del mencionado nivel de suficiencia. Degradar un río o poner en riesgo la potabilidad de sus caudales, bajo la justificación de impulsar el desarrollo económico, constituye una grave inmoralidad.

La agricultura es la actividad humana que hace un mayor uso del agua para consumo. Por lo tanto, el modelo de agricultura elegido, tendrá un gran impacto sobre este recurso. De alguna manera, la disponibilidad de agua de calidad, es una de las principales limitantes a la productividad de los cultivos a escala mundial. Los efectos de la agricultura sobre el medio ambiente representan una de las preocupaciones mayores del público, en el contexto de la reforma de la política agrícola, la liberalización de los intercambios, los acuerdos internacionales sobre medio ambiente y la consecución de una agricultura sostenible. En el manejo de los AES se puede analizar puntualmente cual es la relación entre el agua y el sistema de producción agropecuaria. Dependiendo de la actividad, el agua tendrá un rol específico en la cadena productiva. Por ejemplo, en el cultivo de jitomate bajo invernadero la dependencia hacia este recurso natural, es total: no puede existir este producto sin agua. Sin embargo, a lo largo del estudio de la problemática AGUA-AES, se puede observar que existen otras implicaciones que tienen que ver con la complejidad de las interrelaciones entre los elementos de los agroecosistemas.

Para controlar las repercusiones medioambientales de la agricultura y evaluar los efectos medioambientales de las políticas se necesita obtener informaciones sobre las interacciones entre la agricultura y el medio ambiente. La degradación de la calidad del agua y la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, son los mayores problemas que enfrenta la gestión de los recursos hídricos en América Latina. Existen importantes evidencias de contaminación de las aguas destinadas al consumo con plaguicidas y/o con derivados de fertilizantes (como los nitratos), sobre todo en países desarrollados donde se hace un mayor consumo de agroquímicos. (OCDE, 2001).

En el manejo de cuencas o microcuencas, cada uno de los actores tiene sus intereses, por ejemplo: Los agricultores generalmente pueden estar interesados en incrementar sus rendimientos en la producción agropecuaria, lograr mejores precios, resultados rápidos, bajos intereses en el crédito, bajar costos de producción, cultivar toda su extensión de terreno, lograr tenencia de la tierra, aplicar las técnicas más sencillas, intensificar el uso de la tierra. Como regla general, los impactos de las actividades del uso de la tierra sobre los procesos hidrológicos y de sedimentación sólo se pueden verificar en las cuencas de menor tamaño (hasta algunas decenas de kilómetros cuadrados), donde se pueden distinguir de los procesos naturales y de otras fuentes de degradación. (FAO, 2002). En los estados de la franja maicera de los Estados Unidos, existen datos que demuestran la contaminación de las aguas, aún después del tratamiento de potabilización, con herbicidas e insecticidas. Tan solo en el estado de Iowa, EE.UU., un 82% de las muestras de agua superficiales utilizadas para bebida humana contenían 2 o más pesticidas, entre ellos Alaclor y Atrazina, considerados con posibles efectos cancerígenos. En Almería (España), tal vez la zona con mayor superficie de invernaderos del mundo, se encontró una alta frecuencia de muestras de agua que contenían los plaguicidas endosulfán y clorpirifós (Martínez, 2002).

La contaminación de los cuerpos de agua por exceso de fertilizantes es un grave problema en países desarrollados o industrializados donde la agricultura se realiza con altas dosis de uso de fertilizantes y con una eficiencia en su uso muy baja debida, entre otras causas, al exceso de aplicación. Un 25% de los estados de EE.UU. tienen niveles de nitratos en aguas subterráneas superiores al límite recomendado de $3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ y en algunos supera el nivel de $10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Y en la Argentina, se ha citado un aumento en el número de casos de metahemoglobinemia (enfermedad relacionada con los nitratos en agua), en la población escolar de zonas hortícolas del Gran Buenos Aires, que se caracterizan por la aplicación intensiva de fertilizantes (Martínez, 2002).

En este sentido, Sarandón (2014) indica que los cambios agrícolas alteraron el ciclo de nutrientes, y provocaron una disminución de la materia orgánica y el fósforo, componentes vitales para mantener la fertilidad del suelo y la retención de agua. La mayor parte de los caudales extraídos de ríos y acuíferos no se dedican a garantizar derechos humanos o ciudadanos, sino que sostienen actividades productivas que generan riqueza por encima del nivel de suficiencia para una vida digna, produciendo excedentes que se venden en el mercado.

3.3.3 Efectos adversos los AES en la calidad del agua y del suelo

En muchos estudios, se puede documentar que en las pequeñas cuencas el impacto del hombre es dominante en las relaciones tierra-agua. En las de tamaño medio es ya difícil distinguir entre los impactos naturales y los de origen humano. En las grandes cuencas, los factores naturales (como fuertes lluvias y grandes deslizamientos de tierra) son claramente dominantes en las relaciones entre la tierra y el agua. Cotler *et al.* (2013) indican que los suelos cumplen con importantes funciones de las cuales se derivan servicios ambientales indispensables para el sostenimiento tanto del ecosistema como de la vida humana. La función más conocida es la de soporte y suministro de nutrientes a las plantas. Sin embargo, el suelo cumple con otras funciones igualmente trascendentes como la de constituir un medio filtrante que permite la recarga de los acuíferos influyendo también en la calidad del agua.

El impacto de las prácticas del uso de la tierra sobre el agua de una cuenca se puede agrupar en dos categorías: impacto sobre los valores de uso y valores de no uso. Los valores de uso pueden ser consuntivos, por ejemplo, el riego y el uso doméstico, y no consuntivos, por ejemplo, el transporte (FAO, 2002).

(Casillas, 2007) comentó que la importancia de los impactos del uso de la tierra también depende de las prácticas de manejo y de las condiciones agroecológicas y socioeconómicas, que determinan la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta, el tamaño de la cuenca es un parámetro clave a la hora de detectar los impactos del uso de la tierra. Por ejemplo, expuso:

- a) La colmatación de embalses por arrastre de sedimentos o deposición de nutrientes, resultado de los fenómenos erosivos, es otra consecuencia importante de las actividades agrícolas. Se calcula que este efecto es económicamente ocho veces más importante que la pérdida de productividad del suelo. Los sedimentos arrastrados ocasionan turbidez en el agua afectando la captación de luz por las plantas acuáticas y por lo tanto de quienes se

alimentan de ellas. Además, la calidad del agua disminuye para su uso recreativo, navegable y aumenta los costos de su procesamiento para el consumo humano.

- b) La eutrofización de los cuerpos de agua (enriquecimiento de nutrientes del agua) es otro problema bastante común en países que utilizan grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados y fosforados. Esto disminuye la calidad del agua para consumo humano o usos recreativos por la proliferación de hongos y plantas acuáticas. En algunos casos, estos organismos pueden producir olores desagradables e incluso toxinas que pueden ocasionar mortandad masiva de peces, aves o mamíferos.
- c) Otro efecto de este modelo de agricultura sobre el recurso hídrico es la disminución del nivel de los acuíferos por el aumento de las superficies bajo riego (en cultivos tradicionalmente de secano) como consecuencia de una velocidad en el uso de agua mayor que la capacidad de recarga.

De todas las vulnerabilidades que caracterizan a la agricultura bajo riego en la actualidad, ninguna parece mayor que la disminución de los niveles de los acuíferos. Aunque el agua se “obtiene” o “encuentra” cavando un pozo dentro de los límites de la finca o predio, la misma no pertenece a nuestro sistema, sólo hacemos uso de ella; y a veces en forma no adecuada.

La disminución del acuífero se debe a que, muchas veces, se utiliza el agua a una velocidad mayor que la capacidad de recarga, a veces con el objetivo de maximizar los rendimientos en cultivos de alto valor, pero poco eficientes en el uso del agua el uso de riego está asociado con un aumento en las dosis de agroquímicos, principalmente fertilizantes, los que resultan necesarios dentro de un paquete tecnológico de mayores insumos; por lo tanto, también aumenta el riesgo de percolación y contaminación de los acuíferos.

La calidad del agua para el consumo humano depende de las condiciones ambientales de la zona en donde se encuentran las fuentes de agua. Por esta razón hay que preocuparse por preservar y mantener libre de contaminantes el área natural que brinda la fuente de agua. La cuenca está formada por los manantiales u ojos de agua que originan las quebradas y los ríos que finalmente desembocan en el mar. También son parte de la cuenca los bosques, los campos de cultivo, los potreros, los animales salvajes y de crianza y las aves. La interacción de los seres humanos en esta misma área, puede afectar la producción y calidad del agua. (CIGA, 2010)

La incertidumbre existente en las relaciones entre las actividades del uso de la tierra en la cuenca alta y los impactos sobre los usuarios de los recursos de la cuenca baja crea también una

incertidumbre en los valores económicos. El proceso de evaluación y valoración de las interacciones tierra-agua puede constituir una base para dichas deliberaciones ya que aclara los costes y beneficios derivados de ellas y su distribución entre los diferentes agentes implicados. Ciertos impactos del uso de la tierra en la calidad del agua, como la salinidad, tienen también un impacto en cuencas de mayor tamaño. En las cuencas mayores, los impactos son difíciles o imposibles de verificar debido al largo espacio de tiempo comprendido entre la causa y el efecto y muchos otros factores que se solapan (FAO, 2002).

3.4 Indicadores de evaluación de sustentabilidad a nivel microcuenca

La concepción original del desarrollo sustentable ha venido nutriéndose, a través de procesos de reflexión y participación social, con enfoques conceptuales y marcos de indicadores cada vez más acotados a temas de interés particular, ámbito geográfico y prioridades específicas. Una variante sobre la noción original del desarrollo sustentable es aquella que concibe a éste en tres dimensiones: capital social, capital económico y capital ambiental, entendida la palabra capital tanto en términos de existencia como de la calidad de los recursos. El desarrollo de indicadores se ha dirigido principalmente hacia la consecución de tres objetivos ambientales para alcanzar el desarrollo sustentable:

1. Proteger la salud humana y el bienestar general de la población
2. Garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos
3. Conservar la integridad de los ecosistemas

Los indicadores de desarrollo sustentable necesitan ser desarrollados para proporcionar bases sólidas en la toma de decisiones de todos los niveles y contribuir a autorregular la sustentabilidad de los sistemas integrados del ambiente y el desarrollo (INEGI., 2000). Por lo tanto, el desarrollo de indicadores de sustentabilidad a nivel microcuenca debe estar enfocado en los activos principales relacionados con cada una de las dimensiones del desarrollo sustentable. Estos indicadores, que expresan en cierto nivel y magnitud las interrelaciones entre el desarrollo socio-económico y los fenómenos ecológico-ambientales, constituyen para los tomadores de decisiones un punto de referencia en la evaluación del bienestar y de la sustentabilidad de un país.

Por ejemplo, la calidad del agua es determinada por comparación de las características físicas y químicas de una muestra con estándares de calidad de agua que han sido definidos por entidades internacionales como la Organización mundial de la salud (OMS). Organización para la agricultura y la alimentación (FAO). En México, los estándares de calidad de agua para diversos usos son

establecidos por la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) para asegurar la salud humana y del ecosistema. Entonces para entender la operacionalización de un estudio de calidad del agua, habremos de establecer un sistema que nos permite valorar su calidad en función del uso final de este recurso. La Comisión Nacional del Agua (CNA) en México, señala en particular los siguientes usos: el agropecuario, que incluye el agrícola, el pecuario y la acuicultura; el abastecimiento público, para uso público urbano y doméstico, que incluye todas las industrias y servicios que toman agua de las redes municipales; y el uso industrial, para la industria, servicios y generación de energía eléctrica.

El desafío es idear indicadores coherentes con el objetivo que se busca, predictivos, sensibles a un amplio rango de condiciones, confiables, de fácil recolección, interpretación factible (no ambiguos) y robustos (que sinteticen amplia información); permitiendo comparar diferentes sistemas productivos en diferentes contextos geográficos (Sarandón, 2002; Flores y Sarandón, 2006)

3.4.1 Evaluación de la calidad del agua a través de indicadores

El desarrollo de planes de monitoreo para la evaluación de la calidad del agua es una herramienta que aporta información periódica y que genera elementos que respaldan la toma de decisiones para el manejo ambiental. En la Agenda 21, emitida en la Conferencia de Río (1992) se plantea “la creación de indicadores para el desarrollo sostenible que proporcionen bases sólidas para la toma de decisiones a todos los niveles” y la OCDE ha trabajado “en la elaboración y utilización de la información ambiental reunida en indicadores ambientales y articulada a aspectos económicos y sociales” (Castro, Almeida, Ferrer y Díaz, 2014).

Los indicadores de calidad del agua se clasifican de diferentes maneras, en la mayoría de los casos como características físicas, químicas y biológicas (Tchobanoglous y E.D., 1985). Para diagnosticar una alteración de calidad del agua se requieren mediciones específicas de una sola característica como los metales pesados, los compuestos orgánicos tóxicos o un cierto grupo de bacterias, en relación directa con el uso previsto. La primera evaluación de las condiciones del agua se basa en las características físicas que, de acuerdo con (Tchobanoglous y E.D., 1985), consideran lo siguiente:

- a) Sólidos, los cuales, según su tamaño y estado, se clasifican por sus características químicas en sedimentables, suspendidos, coloidales o disueltos.

- b) Turbidez o grado de claridad en la columna de agua, que se verifica por la penetración de la luz a través del líquido.
- c) Olor, que pueda indicar materia orgánica en descomposición o presencia de minerales atribuida a la reducción de sulfatos por actividad microbiana.
- d) Temperatura, que altera un gran número de características del agua, ya que su aumento influye en la tasa de las reacciones químicas y bioquímicas.
- e) Color, que revela materia coloidal en suspensión.

La presencia de iones específicos como calcio, magnesio o plomo se relaciona con las características químicas. Existen medidas burdas de las características del agua como la alcalinidad, la dureza y la conductividad, que también se utilizan como medidas generales de la calidad del agua. Las mediciones químicas más comunes (Tchobanoglous y Schroeder, 1985) son las siguientes:

- a) Iones mayores en agua. Incluyen los cationes calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^{+}) y potasio (K^{+}), y los aniones bicarbonato (HCO_3^{-}), cloruros (Cl^{-}) y nitratos (NO_3^{-}). Las interacciones entre iones determinan muchas características químicas.
- b) Iones menores en agua. Comprenden cationes como aluminio (Al^{+3}), amonio (NH_4^{+}), arsénico (As^{+3}), bario (Ba^{+2}), borato (BO_4^{-3}), cobre (Cu^{+2}), hierro (Fe^{+3}) y manganeso (Mn^{+2}), al igual que aniones como bisulfato (HSO_4^{-}), bisulfito (HSO_3^{-}), carbonatos (CO_3^{-2}), flúor (F^{-}), hidróxido (OH^{-}), monofosfatos ($\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$), difosfatos (HPO_4^{-3}), trifosfatos (PO_4^{-3}), sulfuro (S^{-2}) y sulfito (SO_3^{-2}).
- c) Especies inorgánicas. Principalmente metales pesados, entre ellos: arsénico (As^{+3}), bario (Ba^{+2}), cadmio (Cd^{+2}), cromo (Cr^{+3} y Cr^{+6}), plomo (Pb^{+2}), mercurio (Hg^{+2}), selenio (Se), plata (Ag^{+2}), zinc (Zn^{+2}) y cianuro (CN^{-}).
- d) Nitrógeno y fósforo. Especies inorgánicas aportadas a los sistemas terrestres por las actividades humanas. Se identifican en fertilizantes para las plantas y se vierten con aguas residuales o de retorno agrícola a cuerpos de agua. Algunos de estos compuestos son: amonio (NH_4^{+}), nitritos (NO_2^{-}), nitratos (NO_3^{-}), nitrógeno total (N_{total}), ortofosfatos (Na_3PO_4 o Na_2HPO_4) y fósforo total (P_{total}).
- e) pH. Concentración del ión hidrógeno, que brinda las condiciones de neutralidad, acidez o alcalinidad del agua. Es relevante porque determina las reacciones químicas.
- f) Alcalinidad. Capacidad del agua de neutralizar ácidos.

g) Conductividad. Parámetro que permite caracterizar la habilidad de una solución para conducir una corriente eléctrica; se determina por los iones en solución.

h) Dureza. Representa la suma de las concentraciones de calcio y magnesio.

Actualmente, el Índice de Calidad del Agua (ICA) se ha convertido en un instrumento fundamental para transmitir información sobre la calidad del recurso hídrico a las autoridades competentes y al público en general. El ICA es un indicador compuesto que integra información de varios parámetros de calidad del agua y presenta diferentes metodologías según su autor. Este índice es una herramienta matemática para la calidad y puede ser utilizado para transformar grandes cantidades de datos sobre la calidad del agua en una escala de medición única (Castro, Almeida, Ferrer y Díaz, 2014).

(Castro, Almeida, Ferrer y Díaz, 2014) indicaron que la aplicación del índice de calidad del agua fue avalada por el Consulado Canadiense como la medida ambiental es herramienta práctica para mostrar los resultados de manera integral de los parámetros: físicos, químicos, orgánicos y microbiológicos de las diferentes comunidades, mientras que ShiohMey *et al.*, (2004) evaluaron el índice de calidad del agua, en el Río Keya, Taiwán, midiendo 13 variables dentro de tres aspectos: Orgánicos, partículas y microorganismos. En México, los parámetros de mayor manejo para evaluar la calidad del agua se integraban en un índice de calidad que consideraba alcalinidad, cloruros, coliformes fecales, color, conductividad, surfactantes, dureza, pH, sólidos suspendidos totales, fosfatos, grasas y aceites, nitrógeno amoniacal y nitratos, DBO₅, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos y turbidez (INE, 2000)

En estos términos, pensar en la gestión integrada de una cuenca requiere de indicadores que permitan evaluar y dirigir las acciones que sea oportuno implementar para conservarla. El desarrollo de planes de monitoreo para la evaluación de la calidad del agua a través de indicadores es una herramienta que aporta información periódica y que genera elementos que respaldan la toma de decisiones para el manejo ambiental y varios tipos de métodos aritméticos que se han utilizado han incluido la agregación de datos de monitoreo de la calidad para producir un índice general de calidad (Pérez *et al.*, 2007).

3.4.2 Evaluación de la calidad del suelo

Un índice de calidad de suelo puede ser definido como el mínimo conjunto de parámetros, que interrelacionados, provee datos numéricos acerca de la capacidad de un suelo para llevar a cabo sus funciones (Acton y Padburry, 1993). Karlen y Scott (1994) propusieron un modelo de

normalización de indicadores basado en el uso de curvas normalizadas para luego evaluar el efecto de los diferentes sistemas productivos sobre funciones asociadas con la calidad del suelo (Karlen et al., 1994) utilizando un índice aditivo ponderado donde las funciones del suelo eran ponderadas arbitrariamente y multiplicadas por el valor normalizado de la variable que representaba esa función. Con el objetivo de obtener un solo valor numérico que represente la calidad o estado actual del suelo, se calcula el índice de calidad de suelo (InCS) considerando todos los indicadores juntos. Debido a que no todos los indicadores poseen el mismo valor o peso para la sustentabilidad (algunos seguramente serán más importantes que otros) se procede a multiplicar el valor del indicador por un coeficiente (ponderación).

La normalización de los indicadores responde a la función que mejor represente al indicador utilizado. Esto puede ser “cuanto mayor es mejor”, “cuanto menor es mejor” o un “óptimo”. Aunque este sistema de normalización es válido y representativo de la realidad de cada sistema, cuenta con ciertas limitaciones, ya que para cada indicador a normalizar hay que fijar valores umbrales, bases y óptimos. Esto es dificultoso ya que los mismos varían según el sistema productivo y tipo de suelo, entre otros factores. El Comité para la salud del suelo, de la Soil Science Society of America, adopta la definición de calidad del suelo como “la capacidad del suelo para funcionar dentro de ciertos límites naturales y antrópicos del ecosistema, sustentar la productividad vegetal y animal, mantener la calidad del agua y del aire, promover la salud de plantas, animales y soportar la habitabilidad y salud del hombre”; además, se trata de un concepto holístico, que reconoce al suelo como parte de un sistema de producción diverso y dinámico, con atributos físicos, químicos y biológicos, que se pueden cuantificar en escalas temporales específicas, reconoce también los distintos roles de los suelos en los agroecosistemas y en los sistemas naturales (Wilson, 2017).

Así mismo, Wilson (2017) expone que siendo la Calidad del Suelo un elemento clave de la agricultura sustentable, su conocimiento y la cuantificación del impacto del uso, resulta fundamental para el desarrollo de sistemas productivos sustentables, tanto desde el punto de vista ambiental como económico, siendo una herramienta básica a la hora de tomar decisiones de manejo para lograr una producción sostenible en el tiempo y que contribuya a la calidad ambiental. Dada las múltiples funciones del suelo: producción, hidrológica, de almacenamiento de agua, de nutrientes y energía, sostenibilidad y calidad ambiental, de control de la contaminación, de espacio

para el desarrollo de la vida entre otras (FAO, 2001), la calidad es más bien relativa que absoluta, siendo entonces multifuncional (De la Rosa, 2008).

3.5 Indicadores socio-culturales y económicos

Los indicadores socioeconómicos y político-institucionales evalúan elementos sociales e institucionales que están o podrían afectarse o afectar el desarrollo de los pobladores que se encuentran asentados en las márgenes de la microcuenca.

3.5.1 Indicadores socio-culturales

Las condiciones sociales de la población son factores que limitan o potencian el desarrollo de un territorio en particular. Para la población, es de vital importancia el medio en donde viven, su desarrollo personal y el acceso a satisfactores de necesidades básicas. Desde 2008 el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) difunde cada dos años los resultados de la medición de pobreza en México, los resultados que se reportan dan cuenta sobre el número de personas, el porcentaje y las carencias promedio de la población que se encontraba en situación de pobreza en un año en particular y se recopilan los cambios observados en las dimensiones de la pobreza y en cada una de las entidades y municipios del país. (CONEVAL, 2016) Como establece la Ley General de Desarrollo Social (LGDS), el CONEVAL lleva a cabo la medición de pobreza con base en ocho indicadores básicos: 1) ingreso corriente per cápita, 2) rezago educativo promedio en el hogar, 3) acceso a los servicios de salud, 4) acceso a la seguridad social, 5) calidad y espacios de la vivienda, 6) acceso a los servicios básicos en la vivienda, 7) acceso a la alimentación y 8) grado de cohesión social (CONEVAL, 2016).

Otro indicador social importante es el índice de marginación, en el cual se define a la marginación como un fenómeno multidimensional y estructural originado, en última instancia, por el modelo de producción económica expresado en la desigual distribución del progreso, en la estructura productiva y en la exclusión de diversos grupos sociales, tanto del proceso como de los beneficios del desarrollo. Se concibe como un problema estructural de la sociedad, en donde no están presentes ciertas oportunidades para el desarrollo, ni las capacidades para adquirirlas. Si tales oportunidades no se manifiestan directamente, las familias y comunidades que viven en esta situación se encuentran expuestas a ciertos riesgos y vulnerabilidades que les impiden alcanzar determinadas condiciones de vida (CONAPO, 2012).

Aunado a estos índices e indicadores, el Índice de Desarrollo Humano (IDH) sintetiza el avance promedio de tres aspectos básicos del desarrollo humano, medido en un rango de cero a uno, en el

que los valores más cercanos a uno significan un mayor desarrollo humano y está diseñado a partir de los valores de la esperanza de vida al nacer en años, la tasa de alfabetismo de los adultos en porcentaje, la tasa bruta combinada de matrícula escolar en porcentaje y el PIB per cápita en dólares de paridad del poder adquisitivo, fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y permite clasificar los países en tres grupos: alto ($IDH > 0.8$), medio ($0.5 < IDH < 0.8$) y bajo ($IDH < 0.5$) nivel de desarrollo humano. (PNUD, 2011). De esta manera, es posible construir una serie de indicadores socio – culturales que permitan describir las condiciones y características de la población que pertenece a la microcuenca y a su vez, evaluar la dimensión social de la sustentabilidad.

3.5.2 Indicadores económicos

En la dimensión económica y en los sistemas de medición de la sustentabilidad tradicionalmente, los sistemas de cuentas nacionales han obviado al medio ambiente, esto ha llevado a los tomadores de decisiones en política económica, ignorar y destruir el medio ambiente en nombre del desarrollo económico. En estos términos, los indicadores económicos tales como el producto interno bruto (PIB) o nacional (PNB) así como todas sus derivaciones no pueden considerarse indicadores fiables y, ni mucho menos, indicadores de bienestar.

(Martínez A. , 2002) indicó que el diseño de indicadores para medir el avance económico de países o regiones en particular, se remonta al decenio de los noventa donde se emprendieron los primeros ejercicios teóricos para construir indicadores capaces de medir aspectos cualitativos del crecimiento de una nación, como educación, niveles de ingreso y salud, entre otros, tal como lo intenta hacer el índice de desarrollo humano (IDH).

En el caso de los aspectos económicos de la microcuenca bajo estudio, el conjunto de indicadores que pueden evaluarse están referidos a las condiciones económicas de la población. En el caso particular, tanto instituciones como el INEGI, SEDESOL y otras organizaciones no gubernamentales, reportan con cierta periodicidad, indicadores económicos con un nivel de detalle bastante preciso. De esta forma, se puede conocer entre otros aspectos, la población económicamente activa (PEA), tasa de ocupación, tasa de participación económica, nivel de ingresos entre otros. Por ejemplo, la tasa de participación económica (TPE) mide el grado de participación de la población en el mercado de trabajo y representa el cociente entre la población económicamente activa (definida como las personas que trabajan o buscan trabajo) de 15 años y más y la población total de 15 años y más, multiplicado por 100.

4. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA Y PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La problemática de las microcuencas hidrográficas se caracteriza por su enorme complejidad en términos de sus componentes y las múltiples variables e interrelaciones que en ellas intervienen. En México, las microcuencas presentan graves problemas de degradación, aspectos como la deforestación, incremento desordenado de la superficie agrícola, ganadería extensiva, sistemas de producción inadecuados a la aptitud y potencial de los recursos y la casi nula planeación de los procesos de producción y de los asentamientos humanos, son sólo algunas de las acciones que han propiciado el deterioro de los recursos naturales en las cuencas, originando con ello que grandes superficies, con alto potencial agrícola, silvícola o pecuario, se hayan convertido en tierras áridas o con reducido potencial productivo (Casillas, 2007). Considerando las dimensiones propuestas por el desarrollo sustentable, a continuación, se presenta un análisis que permite contextualizar cada una de ellas:

4.1 Contexto ambiental

Visualizando a una microcuenca como un ecosistema, el valor que representa para el ser humano los servicios ambientales agua, suelo, aire y biodiversidad son muy importantes, sin embargo, estos recursos naturales van disminuyendo tanto en calidad como en cantidad por efecto de las actividades antrópicas. México cuenta con un sin número de microcuencas y estas se encuentran ubicadas dentro de los aproximadamente 64 millones de hectáreas de bosques de clima templado y selvas que abarcan el 32% del territorio nacional. Adicionalmente el país cuenta con 56 Millones de hectáreas de matorrales y cerca de 2 millones de hectáreas de vegetación hidrófila. Tales recursos son de gran importancia para el país desde el punto de vista social, económico y ambiental (Chapela, 2012).

Alrededor 80% de los bosques y selvas del país se encuentran bajo régimen de propiedad social, constituidos en alrededor de 8,500 núcleos agrarios. Las poblaciones que constituyen estos núcleos agrarios están vinculadas directamente con los recursos forestales para la obtención de sus principales satisfactores. (FAO, 2006). Sin embargo, se reconoce que México sigue perdiendo sus bosques y según la Cámara de Industrias Derivadas de la Silvicultura (CNDIS), entre 1982 y 1989 se perdieron 295,000 hectáreas anuales de bosques y selvas. En tanto las cifras de FAO, indican que México perdió 155,000 hectáreas anuales de bosques y selvas entre los años 2005 y 2010 (Chapela, 2012).

Lo anterior es debido principalmente al cambio de uso de suelo para convertirse en territorio ganadero o agrícola. Los problemas principales del sector forestal son: (i) inseguridad de la tenencia de la tierra, (ii) organización insuficiente de los ejidos y comunidades como unidades de producción forestal comercial; (iii) sobre explotación localizada del recurso; (iv) un comercio exterior de productos forestales con un balance negativo de 12,000 millones de pesos³ por año, (v) un sector privado con una crisis de competitividad internacional; (vi) degradación del medio ambiente; y (vii) un inadecuado marco institucional y legal para promover la producción forestal sustentable, lo que resulta en altos costos de transacción, caracterizado además por una falta de continuidad administrativa y de políticas. (FAO, 2006)

Además de la deforestación, los bosques de México muestran una degradación progresiva que los principales sistemas de manejo forestal aplicados en el país, no han sido capaces de detener. Los datos disponibles, muestran que los stocks nacionales de madera se han reducido desde un nivel de más de 70 m³-ha⁻¹ que tenían hace 31 años, a menos de la mitad en la actualidad. (SEMARNAT, 2014).

La misma situación presenta la calidad del agua de los ríos, los cuales de acuerdo a (CONAGUA, 2016) el 44.1 % de los ríos se encuentra contaminado; en este mismo sentido, el suelo presenta severos problemas de erosión y esta se manifiesta en la pérdida de fertilidad, arrastre de sedimentos y reducción en su capacidad de captación de las aguas pluviales. A partir del 2001, el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado anualmente entre 100 y 106. Al 31 de diciembre de 2015 se reportan 105 acuíferos sobreexplotados. De acuerdo con los resultados de los estudios recientes, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo, en función de la relación extracción/recarga. (CONAGUA, 2016)

CONAPO estima que al 2050 México tendrá 150.8 millones de habitantes, lo que representará mayor presión sobre los recursos hídricos. La disponibilidad natural media per cápita de agua en México era en 1950 de 18,035 m³-hab⁻¹-año⁻¹ y en 2013 pasó a 3,982 m³-hab⁻¹-año⁻¹, cifra calificada como baja por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (CONAGUA, 2014). La problemática identificada se concentra en tres aspectos: sobreexplotación, sobre-concesión y contaminación de los recursos hídricos. Existen aprovechamientos que carecen de títulos de concesión o asignación, la medición del agua extraída y la verificación de los aprovechamientos y descargas son bajas e insuficientes.

En las zonas de libre alumbramiento no se tiene control de los aprovechamientos; además de que prevalece un incremento de obras que invaden zonas y cauces federales que generan riesgos a la sociedad. (CONAGUA, 2014). Los impactos más comunes sobre arroyos y ríos se pueden subdividir en tres categorías: 1) Disturbios en la forma física; 2) Cambios en la descarga de agua y 3) Introducción de materia orgánica y sustancias químicas, en su conjunto estas afectaciones han disminuido la calidad ambiental de estos ecosistemas (Pérez y Pineda, 2007).

El principal efecto sobre la calidad de los recursos naturales de las microcuencas se encuentra directamente relacionado con las actividades agropecuarias que se desarrollan en su territorio. Estas, en general contribuyen con el 9% de las emisiones globales del dióxido de carbono (CO₂), 45% del metano (CH₄) y 46% del óxido nitroso (N₂O) (de Klein *et al.*, 2008); así mismo, se reporta que la aplicación de fertilizantes químicos, el mal manejo del estiércol y orina del ganado y la combustión de desechos y biomasa durante los procesos de deforestación emiten CO₂ y N₂O (Steinfeld *et al.*, 2006; Herrero *et al.*, 2011).

Un efecto negativo directo sobre las propiedades del suelo es el realizado por actividades ganaderas, las cuales contribuyen con la compactación de los suelos debido al sobre pastoreo (Reeve *et al.*, 2000). Además, se ha documentado también la contaminación de cuerpos de agua adyacentes a los ranchos por inadecuadas prácticas de manejo (Freilich *et al.*, 2003), en los cuales se han reportado concentraciones de nitrato que superan los estándares de calidad del agua (10 mg NO₃ L⁻¹) para consumo humano y en el caso de los nitritos (NO₂) se consideran potencialmente carcinogénicos. El fósforo en forma de fosfato (PO₄) causa eutrofización de los cuerpos de agua superficiales, al igual que lo hacen las altas concentraciones de N que entran a estos mismos (Newton *et al.*, 2003; Hubbard *et al.*, 2004).

En el caso particular del río, las actividades humanas ejercen una gran presión sobre sus recursos naturales, tanto pobladores de localidades rurales como de la zona urbana, realizan actividades que van demeritando la calidad y cantidad de los recursos abióticos de la misma. Por ejemplo, una práctica común observada en la microcuenca es el cambio de uso de suelo sin el permiso de autoridades locales, derriban zonas de bosque y vegetación secundaria para convertirlas en áreas agrícolas o pecuarias mediante la introducción de ganado. Así mismo, existe una fuerte dependencia por parte de los pobladores de las localidades rurales hacia la extracción de leña para uso combustible en el hogar. Además, es muy común la extracción y comercialización de plantas,

así como la presencia de cazadores furtivos quienes amenazan la existencia de la gran diversidad de especies animales y vegetales nativas del bosque mesófilo de montaña.

En las zonas de asentamientos humanos y área urbana, no existen plantas de tratamiento de aguas grises y se observa una gran cantidad de puntos de descarga tanto de aguas pluviales como de aguas residuales domésticas a lo largo de la microcuenca, estas descargas llegan directamente al río y contaminan al afluente.

Aunado a lo anterior, existen pequeñas factorías dedicadas al beneficiado de café, extracción del jugo de caña para elaboración de panela y una múltiple cantidad de granjas de aves y cerdos quienes aparte de consumir el agua del río, vierten directamente sus efluentes y residuos hacia cañadas conectadas con su cauce, contaminándolo severamente. Por su parte, los diferentes agroecosistemas asentados en las márgenes del río, no son manejados sustentablemente y se puede apreciar que no existe una planificación, ni mucho menos un control sobre agroquímicos utilizados y cantidad de fertilizantes aplicado. La gran mayoría de los cultivos se siembran en territorios con pendientes pronunciadas y en el sentido de los escurrimientos pluviales, esto se traduce en problemas de erosión del suelo de parcelas y sembradíos y el consecuente arrastre de sedimentos hacia el río.

No existen estudios formales que evalúen la dinámica en la cobertura y uso de suelo dentro de la microcuenca, ni está determinada su capacidad para captar el agua pluvial. Estas variables ambientales son importantes y tienen una relación directa con el balance hidrológico para estimar cuanta de esta agua se evapotranspira, infiltra al subsuelo y escurre tanto por cañadas como por el río mismo. La cantidad de agua que escurre a través del río de la microcuenca ofrece un panorama sobre su disponibilidad para diferentes usos tanto agroindustrial como humano.

Aunque no se conoce realmente los efectos del cambio climático sobre la microcuenca, se ha documentado que tanto la precipitación como la temperatura, han sufrido cambios importantes en los últimos sesenta años. En un estudio comparativo de estas variables, (Partida, Cabal, Ruiz, Landeros y Cuervo, 2016) encontraron que tanto la precipitación anual como la temperatura media mensual del municipio de Huatusco se ha incrementado, observando mayor cantidad de eventos con lluvia y mayor carga pluvial en menor cantidad de tiempo; este fenómeno pudiera tener un efecto sobre el manejo de los cultivos, el ciclo de producción y la calidad del suelo.

4.2 Contexto económico

El desarrollo económico de la microcuenca está claramente segmentado entre la vida urbana y las localidades rurales. En la zona rural se observa que los bienes y servicios producidos están relacionados con las actividades agropecuarias desarrolladas, en orden de importancia económica los principales cultivos son café, ganado, caña y maíz. Así, en el sector rural, se observa que las actividades agropecuarias actuales se caracterizan en función del tamaño y tipo de propiedad: en parcelas pequeñas destaca el cultivo de productos para autoconsumo tales como maíz, frijol, café y algunos frutales, mientras que en mediana y grandes propiedades las actividades agropecuarias dominantes son caña, café y ganado. Además, durante los últimos cinco años, se observa una tendencia entre los productores hacia la introducción del cultivo de aguacate Hass. Así mismo, existe un número importante de granjas avícolas, beneficios de café y trapiches, los cuales producen aves de engorda, procesan el aromático y la caña de azúcar, respectivamente.

La mano de obra para la realización de estas actividades proviene de los mismos habitantes de la microcuenca, unos atendiendo sus propias parcelas, otros rentando terrenos y los demás como jornaleros al servicio de los dueños de terrenos, granjas y beneficiadoras. El comercio representa tanto en la zona urbana como en las principales localidades rurales, la principal fuente de empleo e ingresos para la población asentada en la microcuenca; además, contribuyen con la generación de bienes y servicios, pequeños talleres que trabajan de forma artesanal quienes realizan actividades tales como herrería, soldadura, mecánica, laminación y pintura automotriz, carpintería, entre otras.

Destaca además la industria de la construcción y el desarrollo inmobiliario, donde un número importante de personas se dedican a labores de construcción de casas-habitación. Los bienes y servicios generados por cada tipo de actividad productiva, representan un ingreso y flujo de efectivo importante para el municipio. Sin embargo, no se cuenta con una estimación que indique el desempeño de todo el conjunto de actividades económicas desarrolladas en la microcuenca y no existe una evaluación que identifique como sido su evolución histórica de cada una de ellas, los indicadores económicos coadyuvarían en la comprensión de la sustentabilidad de la misma.

4.3 Contexto sociocultural

El aspecto sociocultural de la microcuenca se encuentra directamente relacionado con el conjunto de creencias y el nivel educativo de las personas que en ella habitan. En términos educativos, a pesar de que en todas las localidades rurales existen escuelas de diferentes niveles, desde básico

hasta bachillerato, el nivel educativo promedio es de 5.9 grados académicos, mientras que en la población urbana en promedio 7.1 grados académicos (INAFED, 2015).

Culturalmente, los pobladores de localidades rurales son muy apegados a celebraciones dedicadas al patrono del lugar, el sincretismo con el cual se desbordan hacia esta festividad da un alto sentido de pertenencia y relevancia en su comunidad. Así, anualmente ansían y preparan con gran devoción sus festejos, los cuales enmarcan con la realización de bodas comunitarias, bautizos y confirmaciones, etc. Estas alegorías, tienen una notabilidad prominente en sus hogares ya que se convierte en una ocasión única para combinar el festejo del patrono y compartir con su entorno familiar y amistades.

Una actividad cotidiana de la zona rural de la microcuenca, se relaciona con la alta dependencia que tienen hacia el valor energético obtenido de especies maderables provenientes del bosque mesófilo de montaña. Es común asignar esta labor a las mujeres, quienes se encargan de la extracción y acarreo de leña hacia el hogar y es apreciada como algo normal que no pone en riesgo la subsistencia y regeneración de la vegetación asociada a este tipo de ecosistema. Por su parte, en el entorno urbano se observan ciertos fenómenos sociales muy particulares, tales como migración de la población rural hacia la cabecera en búsqueda de oportunidades de trabajo y mejora en sus condiciones económicas, alto porcentaje de población joven sin acceso a trabajo y una cantidad importante de hogares disfuncionales, estas condiciones conjuntadas con su nivel educativo, conlleva a fuertes problemáticas relacionadas con vicios e inseguridad, el alcoholismo y los robos son las principales agravantes hoy en día en este municipio.

Específicamente, el alcoholismo en la población varonil (urbana y rural), tanto en jóvenes como adultos presenta una alta incidencia en el consumo de bebidas embriagantes. Aunado a lo anterior, se puede sumar el creciente consumo de drogas por parte de la población juvenil, el cual se ha incrementado en los últimos años y empeora aún más la condición social. En términos del aspecto social de los agroecosistemas asentados en la microcuenca, se han ido perdiendo paulatinamente ciertas costumbres de las personas dedicadas a las labores del campo. Este, es un fenómeno recurrente en todo el país, donde se observa un abandono de las tierras para buscar nuevas fuentes de empleo y acceso a ingresos para sostén de las familias.

La tradición y costumbres sobre el manejo cosmogónico de los agroecosistemas se han perdido paulatinamente, en muy pocas zonas se sigue respetando la siembra de acuerdo con las fases lunares y/o fechas específicas para obtener cosechas y cultivos de temporal; además, existe una

pérdida de variedades de semillas criolla y por lo general, buscan introducir cultivos altamente rentables o incursionar en nuevas actividades agropecuarias que les represente un mayor ingreso, sin importar el daño o perjuicio que estas nuevas actividades causen al medio ambiente. Es algo común en el medio agropecuario mexicano que no se tenga la capacidad para trabajar de manera colaborativa y organizada o se han tenido experiencias negativas, el nivel de organización social en la microcuenca así lo demuestra, existen muy pocas asociaciones y una alta dependencia de los productores hacia los apoyos y subsidios gubernamentales entregados a través de la SAGARPA.

4.4 Contexto Político

Dentro del marco de gestión integrada de recursos en microcuencas, a pesar de que la ley general de aguas nacionales establece las bases legales para la conformación de consejos de cuenca, si bien estos han sido creados para cada una de ellas en el país, su esfera de acción solamente abarca superficies territoriales extensas y son muy pocos los comités a nivel subcuenca o microcuenca, esto limita la efectividad en la aplicación de políticas para el manejo y conservación de sus recursos naturales. Dentro de la operatividad de los consejos de cuenca, no se ha logrado integrar plenamente a sus actividades tanto a autoridades municipales como a la sociedad civil organizada, quienes son los principales usuarios y beneficiarios directos de sus recursos naturales.

En el caso específico de la microcuenca, el tema del cuidado en el manejo de los recursos naturales del municipio está a cargo de una regiduría quien, a través de la oficina de ecología y medio ambiente, tiene la responsabilidad del seguimiento, vigilancia y correcta aplicación de las leyes y reglamentos ambientales; sin embargo, está muy limitada su capacidad de actuación, en términos de personal, recursos y alcances de acción.

El planteamiento de la problemática anterior, permite esquematizar en la Figura 4 las interacciones de los aspectos socioculturales, económicos, ambientales y políticos que caracterizan actualmente la situación problemática actual de la microcuenca del Río Aguacapa:

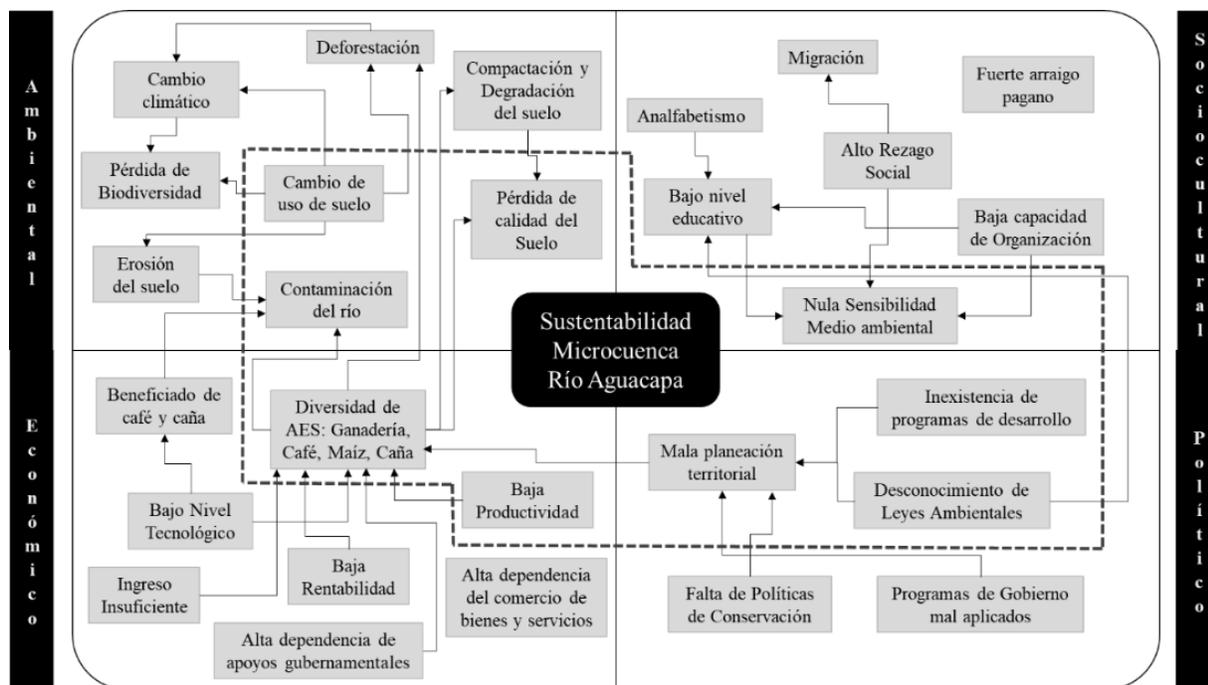


Figura 4. Situación problemática de la investigación.

4.5 El problema de investigación

En México, las metodologías para evaluación de la sustentabilidad se aplican periódicamente con objeto de determinar el estado ambiental, social, económico y político del país. Desde 1997 existen formalmente mediciones de la condición de nuestros recursos naturales y en el año 2000, se crea el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales; sin embargo, estos datos comparan la condición nacional y estatal de los recursos. (INEGI., 2000).

Evaluaciones más específicas se realizan a través de proyectos de desarrollo regional generalmente financiados por dependencias gubernamentales tales como SEMARNAT, CONAGUA, CONABIO o centros de educación e investigación, entre otros. La valoración de sustentabilidad en cuencas, subcuencas y microcuencas obedece al desarrollo de proyectos de investigación que utilizan diferentes metodologías de evaluación.

Aunque Tiburcio-Sánchez (2012) comentó que ha sido evaluación de desarrollo sustentable, las principales mediciones de sustentabilidad se caracterizan por ser evaluaciones a nivel país, estado o región, adoptando el modelo de indicadores de Presión-Estado-Respuesta (P-E-R) de la OCDE, actualmente se cuenta con el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA), establecido en 2005 y con evaluaciones en los años 2005, 2008 y 2010.

Sin embargo, evaluaciones de sustentabilidad a nivel microcuenca existen muy pocas y en las metodologías propuestas, no existe un consenso sobre la definición de indicadores para evaluar la sustentabilidad en cuencas, subcuencas y microcuencas, y en cada caso se proponen indicadores diferentes; si bien se proponen indicadores para la evaluación de las dimensiones de sustentabilidad, estos son diferentes en cada una de las metodologías propuestas. Debido a que no está documentado un estudio particular y formal sobre la microcuenca del Río Aguacapa, se puede generar información valiosa para evaluar la sustentabilidad en términos del uso, manejo y conservación de sus recursos naturales, debido a que:

- No hay una evaluación histórica del cambio en la cobertura y el uso de suelo de la microcuenca.
- No existe una referencia a cerca de los parámetros de calidad del suelo de la microcuenca.
- No existe un estudio sobre la calidad del agua del Río Aguacapa.
- No existe una evaluación del efecto de los agroecosistemas asentados en las márgenes del río sobre la dimensión ambiental, económica y sociocultural de la sustentabilidad.
- No están claramente identificadas los efectos de las actividades políticas y socioculturales sobre la sustentabilidad de la microcuenca.

Estos argumentos y la situación problemática anterior, en conjunto con el marco teórico de la investigación, permite sintetizar un fenómeno poco abordado en el área de la evaluación de sustentabilidad a nivel microcuenca, mismo que plantea el siguiente problema de investigación:

“No se ha evaluado el efecto que tienen los agroecosistemas y las actividades antrópicas sobre las dimensiones de la sustentabilidad en la Microcuenca del Río Aguacapa”

Este problema plantea las siguientes interrogantes:

Pregunta general de investigación:

¿Cuál es el impacto que los agroecosistemas, las actividades antrópicas y las condiciones socioculturales y económicas de la población ejercen sobre la sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa?

Preguntas específicas:

1. ¿Cómo afecta a la sustentabilidad de la microcuenca, el cambio en la cobertura y uso de suelo, el grado de contaminación del agua del río, la capacidad de infiltración de aguas pluviales y los atributos de calidad del suelo?

2. ¿Cuál es el efecto, en la sustentabilidad de la microcuenca, que ejercen el manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas y las condiciones socioculturales y económicas de la población asentados en la microcuenca del Río Aguacapa?

5. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

5.1 Hipótesis general

“El grado de sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa está siendo impactado por el tipo y manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas y las condiciones socio-culturales y económicas de la población que habita en ella.”

5.1.1 Hipótesis específicas

H1. El grado de sustentabilidad es función del cambio en la cobertura y uso de suelo, la calidad del agua del río, la capacidad de infiltración y la calidad del suelo.

H2. El grado de sustentabilidad es función del tipo y manejo de los agroecosistemas, actividades antrópicas, y las condiciones socioculturales y económicas de la población de la microcuenca del Río Aguacapa.

5.2 Objetivo general

Valorar el impacto que el tipo y manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas, y las condiciones socioculturales y económicas ejercen sobre la sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa.

5.2.1 Objetivos particulares

1. Valorar el impacto sobre el grado de la sustentabilidad del cambio en la cobertura y uso de suelo, la calidad del agua del río, la capacidad de infiltración y la calidad del suelo de la microcuenca.
2. Evaluar el grado de sustentabilidad como resultado del tipo y manejo de los agroecosistemas, actividades antrópicas y las condiciones socioculturales y económicas de la población de la microcuenca del Río Aguacapa.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Selección y descripción del área de estudio

La presente investigación se realizó en la microcuenca del Río Aguacapa, localizada dentro del Municipio de Huatusco, Veracruz; cuenta con una superficie de 32.05 Km² (3200.5 Ha.) y está delimitada por las coordenadas 19°11'27.18" Latitud Norte - 97°0'54.65" Longitud Oeste y 19°7'36.65" Latitud Norte y 96°56'16.15" Longitud Oeste, forma parte de la cuenca del Río Jamapa, en la parte central del estado de Veracruz y pertenece a la Región Administrativa X, Golfo Centro, así como a la Región Hidrológica 28 Río Papaloapan.

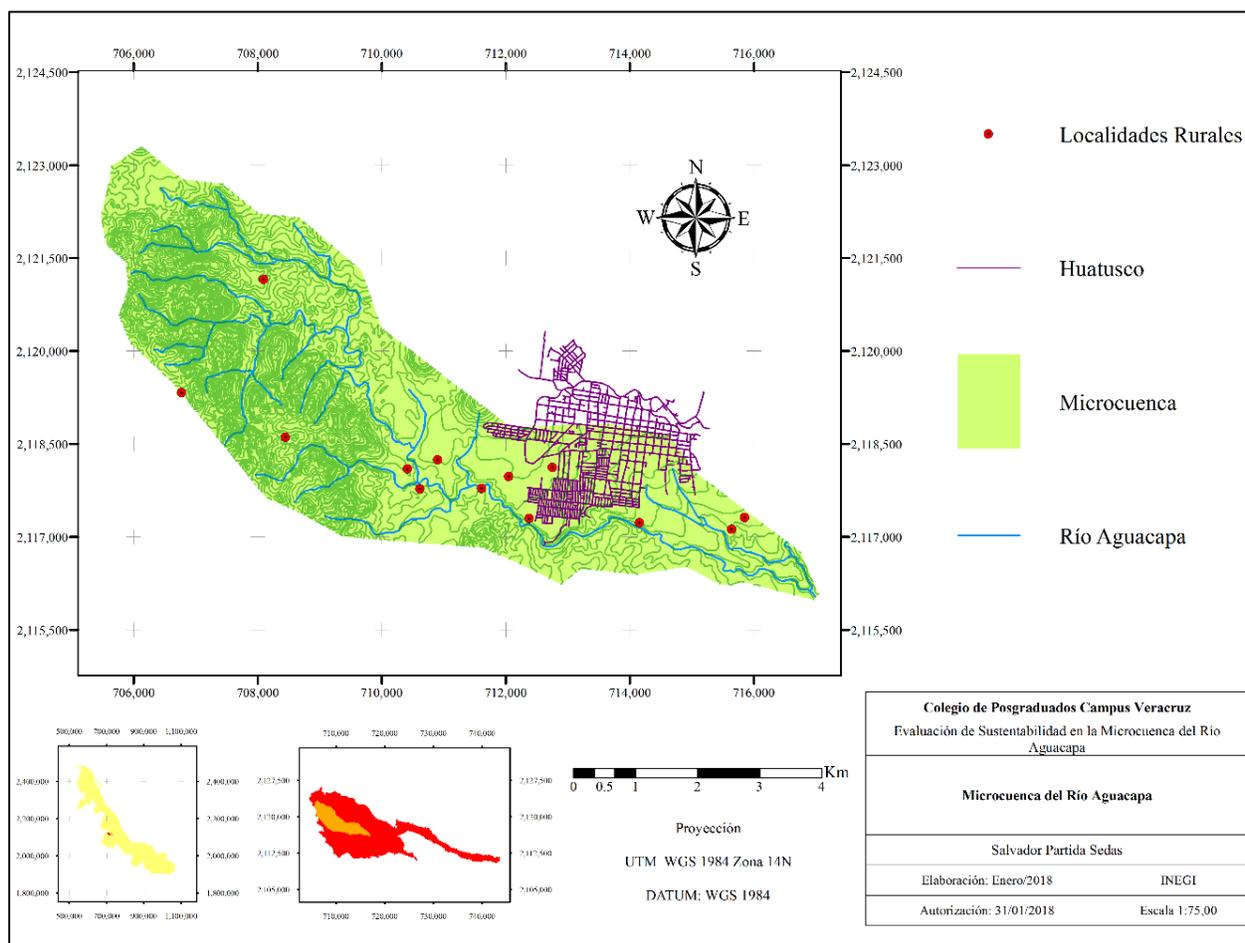


Figura 5. Sitio de estudio.

La microcuenca del Río Aguacapa está conformada por la superficie terrestre que abarca el cauce del Río Aguacapa, perteneciente al municipio de Huatusco, Veracruz; el cual nace en los límites entre Puebla y Veracruz y cuenta con una longitud total de 15.4 kilómetros uniéndose al cauce de los ríos Seco y Citlalapa para desembocar aguas abajo en el río Jamapa.

6.2 Población y muestra

6.2.1 Descripción de las unidades de análisis

El estudio de sustentabilidad implicó la delimitación y descripción de las características fisiográficas de la microcuenca del Río Aguacapa, considerando aspectos ambientales, económicos, socioculturales y políticos. En el Cuadro 4 que se muestra a continuación, se indican las diferentes unidades de análisis, así como la descripción de cada una ellas

Cuadro 4. Unidades de análisis para fines de la investigación.

Unidad de Análisis	Descripción
Río Aguacapa	Cuerpo de agua perenne afluente del río Jamapa
Agroecosistemas	Parcelas y unidades de producción agropecuarias asentadas en toda la microcuenca
Localidades Rurales	Habitantes de las comunidades rurales asentadas en la microcuenca
Tipos de Cobertura y Uso de suelo	Principales usos de suelo y tipos de cobertura vegetal presentes en la microcuenca
Informantes Clave	Funcionarios públicos municipales y organizaciones del sector agropecuario, así como productores de los diferentes agroecosistemas asentados en la microcuenca y dependencias gubernamentales nacionales y estatales.

6.2.2 Jerarquización y límites del estudio

El alcance jerárquico de esta investigación está en el nivel municipal y los principales sistemas de estudio son los agroecosistemas, los tipos de cobertura y uso de suelo, el río Aguacapa y la población de localidades rurales asentada en la microcuenca. Los límites del estudio se encuentran definidos por el parteaguas natural que indica la superficie de captación y escurrimiento de aguas pluviales que convergen hacia el Río Aguacapa. En el caso de los informantes clave, los límites de investigación se hicieron hacia el alcance operativo de funcionarios, organizaciones y productores del área de estudio.

6.2.3 Marco referencial y de análisis en el estudio

Para el proceso de evaluación de sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa a través de indicadores, se generó el diseño de un índice agregado de sustentabilidad que integre las tres dimensiones de sustentabilidad, el cual se presenta en la Figura 6.

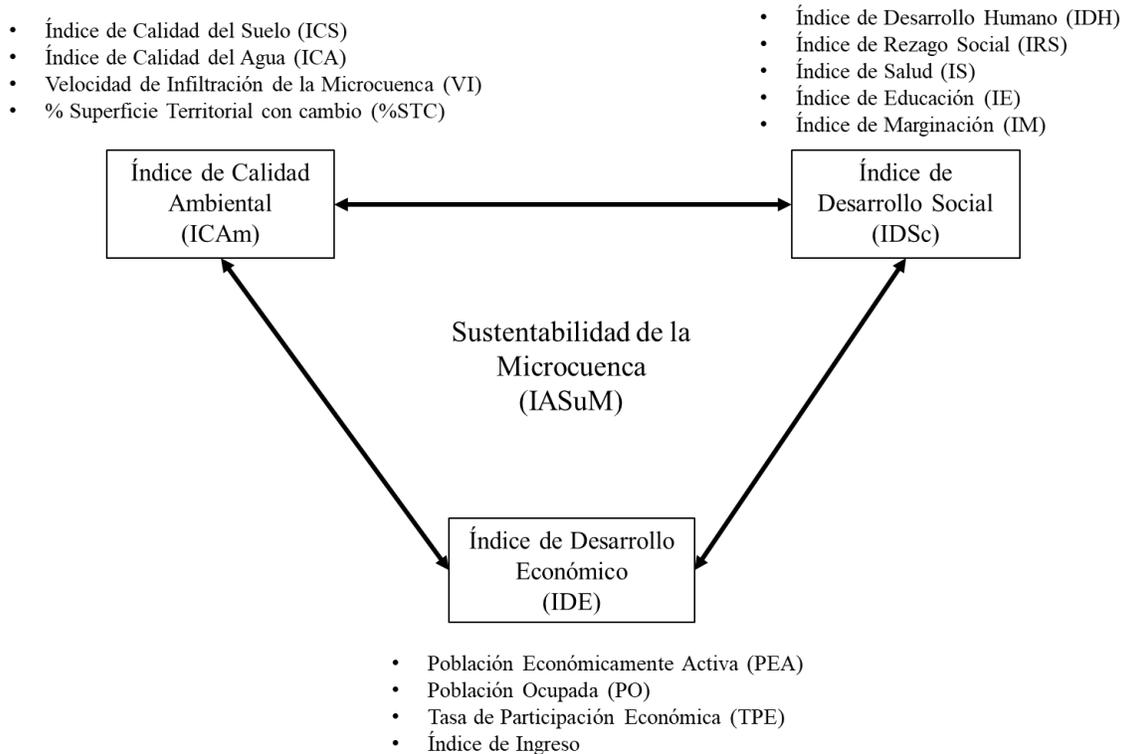


Figura 6. Modelo de Evaluación de la Sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa.

Este modelo proporciona un panorama claro de los problemas ambientales que se enfrentan en cada una de las dimensiones de la sustentabilidad, las causas que los originan y cómo se les combate, todo esto con una perspectiva del análisis de tendencias, está basado en una lógica de causalidad, presupone relaciones de acción y respuesta entre la economía y el medio ambiente y parte de cuestionamientos simples:

- ¿Qué está afectando al ambiente?
- ¿Qué está pasando con el estado del ambiente?
- ¿Qué estamos haciendo acerca de estos temas?

6.2.4 Determinación del tamaño de muestra

Para el proceso de recopilación de la información, se tomó en consideración los siguientes aspectos: el tipo de cobertura y uso de suelo, evaluación de calidad y cantidad del agua del río y evaluación de la calidad del suelo, procedimientos que se detallan a continuación:

a) Evaluación del cambio de uso de suelo y cobertura de la microcuenca.

Para el caso de la evaluación de la cobertura y el cambio de uso de suelo de la microcuenca se recurrió al uso de las cartas de uso de suelo y cobertura emitidas por parte del INEGI, se utilizaron las series del I y V correspondiente a los años de 1993 y 2013, posteriormente se estimó en cada caso, la tasa de cambio anual y el porcentaje de cambio para cada tipo de cobertura presente en la microcuenca. Mediante el uso de sistemas de información geográfica y apoyados en la carta de uso de suelo y vegetación 1:250,000 Serie V INEGI, así como la carta edafológica 1:1000000 (INIFAP y CONABIO, 1995), se identificaron los tipos de cobertura y uso de suelo y tipos de suelo de la microcuenca, calculando el área correspondiente a cada uno de ellos.

b) Evaluación de la calidad y cantidad del Agua de Río.

Para evaluar la calidad del agua del río se seleccionaron cinco sitios a lo largo del caudal, establecidos en función del acceso, los asentamientos humanos establecidos y una distancia promedio aproximada entre cada sitio. Durante el período de enero a marzo de 2017 se realizó monitoreo mensual en cada uno de ellos y se evaluaron nueve parámetros físicos, químicos y biológicos: pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad, sólidos disueltos totales (SDT), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitratos, fosfatos y coliformes fecales. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos en sitio y en laboratorio se determinaron parámetros químicos y biológicos.

El método para evaluar la calidad del agua fue a través del índice de calidad de agua (ICA) desarrollado por la Fundación Nacional de Saneamiento de Estados Unidos (NSF-WQI, por sus siglas en inglés), el cual está conformado por los parámetros arriba mencionados. Además, los datos se analizaron a través del NSF-WQI, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127), las normas de agua para consumo humano según lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004) y al Reglamento Gubernamental No. 82/2001 clase II. En el Cuadro 5 se indica el parámetro, unidad de medición, método y sitio de medición de cada uno de ellos:

Cuadro 5. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Río Aguacapa.

No.	Parámetro	Unidad	Método	Sitio de medición
Físicos				
1	Temperatura	°C	Termómetro de Mercurio	<i>In situ</i>
2	Sólidos Disueltos Totales	mg/L	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	% Sat	Equipo multiparamétrico ODO™ de YSI	<i>In situ</i>
6	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días	mg/L	NMX-AA-028-SCFI-2001	Laboratorio
7	Nitratos (NO ₃)	mg/L	Equipo multiparamétrico ODO™ de YSI	<i>In situ</i>
8	Fosfato total	mg/L	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 ICA 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. La puntuación de peso (W_i) se multiplica por el valor del subíndice (L_i) de la curva de parámetro- i obtenida en la calculadora de NSF-WQI publicada en su página web. (WRC, 2017) La ecuación del índice de Calidad del agua , se expresa de la siguiente forma:

$$ICA = \sum_{i=0}^n Wi * Li$$

Donde:

ICA es el Índice de calidad de agua

Wi es la puntuación del peso del parámetro *i*

Li es el valor del subíndice *i*

Para este estudio, se evaluaron los nueve parámetros y la asignación de los pesos para cada de ellos se especifica en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros físico-químico-biológicos de ICA.

No.	Parámetro	Peso del parámetro (Wi)
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	Fósforo 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

De acuerdo con este índice, en el Cuadro 7 se indican los criterios de calidad en función de los valores obtenidos.

Cuadro 7. Criterios de calidad asignados al ICA.

Puntaje del ICA	Criterio
0-25	Muy mal
26-50	Mal
51-70	Medio
71-90	Bueno
91-100	Excelente

Para determinar el caudal del río, se seleccionó un sitio de fácil acceso y mediante el método del flotador con cinco repeticiones, semanalmente se midió el caudal. Durante el período comprendido entre febrero de 2016 y marzo de 2017 se realizaron cincuenta y dos mediciones del caudal, posteriormente en gabinete y con el auxilio de hoja de cálculo, se realizó la estimación del caudal en litros por segundo. Los datos obtenidos se indican en el anexo 1.

c) Evaluación de la calidad del suelo en la microcuenca del Río Aguacapa.

Debido a que no existen datos ni estudios previos que sirvan de referencia acerca del estado general del suelo de la microcuenca, se determinó crear una línea base que muestre la calidad o el estado general del suelo en la microcuenca a partir de la realización de análisis fisicoquímicos de este recurso. Posteriormente, se determinó el número de muestras a considerar para cada uno de los tipos de uso de suelo mediante un muestreo mixto estratificado y sistemático que caracterice cada tipo de cobertura. Finalmente, se evaluaron los parámetros fisicoquímicos nitrógeno, fósforo, potasio, contenido de materia orgánica, conductividad eléctrica, velocidad de infiltración, textura, densidad aparente y pH en el laboratorio de planta-agua y suelo del Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

Tipo de muestreo del suelo. Debido a las características del proyecto de investigación, a la extensión territorial de la microcuenca y tomando en consideración el objetivo de la caracterización de la calidad del suelo, se realizó un muestreo mixto donde primeramente se consideró un muestreo estratificado y posteriormente muestreo sistemático en el cual se represente estadísticamente el uso de suelo y cobertura. En el muestreo estratificado la población en estudio se separa en subgrupos o estratos que tienen cierta homogeneidad, después de la separación, dentro de cada subgrupo se puede hacer un muestreo aleatorio simple o un muestreo sistemático; mientras que, en el muestreo sistemático, se ubican las muestras o unidades muestrales en un patrón regular en toda la zona de estudio (Mostacedo y Fredericksen, 2000).

Se decidió excluir la superficie correspondiente a los asentamientos humanos y zona urbana para evaluar la calidad del suelo de la microcuenca, tomando en consideración solo los siguientes datos:

Determinación de sitios de muestreo. Atendiendo las recomendaciones establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000-SEMARNAT (SEMARNAT, 2002), específicamente el punto 6.3, indica:

- Para estudiar los atributos del suelo es necesario obtener muestras lo más representativo posible, tanto de cada sitio de muestreo como del área a estudiar.

- El muestreo para clasificación de suelos involucra una gran simplificación de la realidad, ya que por razones prácticas incluye la toma de unas muestras sumamente pequeñas y la obtención de datos de análisis de suelos, requiere de una muestra todavía más pequeña
- El muestreo se realizará después de que se hayan hecho los análisis de parámetros detallados en material cartográfico, como fotografías aéreas y/o imágenes de satélite y mediante técnicas computacionales, se ubican áreas con el mismo patrón de distribución de suelos a mayor o menor escala, en las que se precisan puntos de muestreo representativos de cada uno de los estratos.

De acuerdo a lo anterior, se decidió calcular el número óptimo de muestras de suelo para poder cumplir con los objetivos de la investigación, por lo que mediante una revisión bibliográfica se encontró con las recomendaciones emitidas por la consejería del medio ambiente de Andalucía (CMMJA, 1999), utilizando el siguiente estimador para calcular el número de sitios a muestrear

$$n = \frac{t^2 * S^2}{E^2}$$

Donde

n es el número de muestreo

t es el estimador “t” de student

S² es la suma de los cuadrados de los valores

E es el error esperado

Finalmente, en el Cuadro 8, se indica el número de sitios a muestrear para alfa = 0.05, X_{test} = 366.7 y un error esperado del 20% del valor de la media.

Se tomaron 154 muestras simples, las cuales se encuentran distribuidas en la Figura 7. Una vez que se obtuvieron las muestras simples, se procedió a realizar 19 muestras compuestas representativas de cada uno de los tipos de coberturas y uso de suelo. Posteriormente, se evaluaron en laboratorio nueve parámetros físico-químicos de acuerdo a la metodología establecida en la NOM-RECNAT-021-SEMARNAT-2000.

Cuadro 8. Sitios de muestreo de suelo calculados.

Cobertura	Tipo de Suelo	Superficie		No. Sitios a Muestrear
		Ha	%	
Bosque Mesófilo de Montaña	Andosol	120.0	4.1%	6
Pastizal Cultivado	Acrisol	32.0	1.1%	2
Pastizal Cultivado	Andosol	789.0	26.9%	40
Agricultura de temporal anual y permanente	Andosol	503.0	17.1%	26
Agricultura de temporal permanente	Andosol	411.0	14.0%	21
Agricultura de temporal semipermanente	Andosol	119.0	4.1%	6
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	Acrisol	29.0	1.0%	1
Vegetación Secundaria de Bosque Mesófilo de Montaña	Andosol	930.5	31.7%	47
<i>Totales</i>		<i>2933.5</i>	<i>100.0%</i>	<i>150</i>

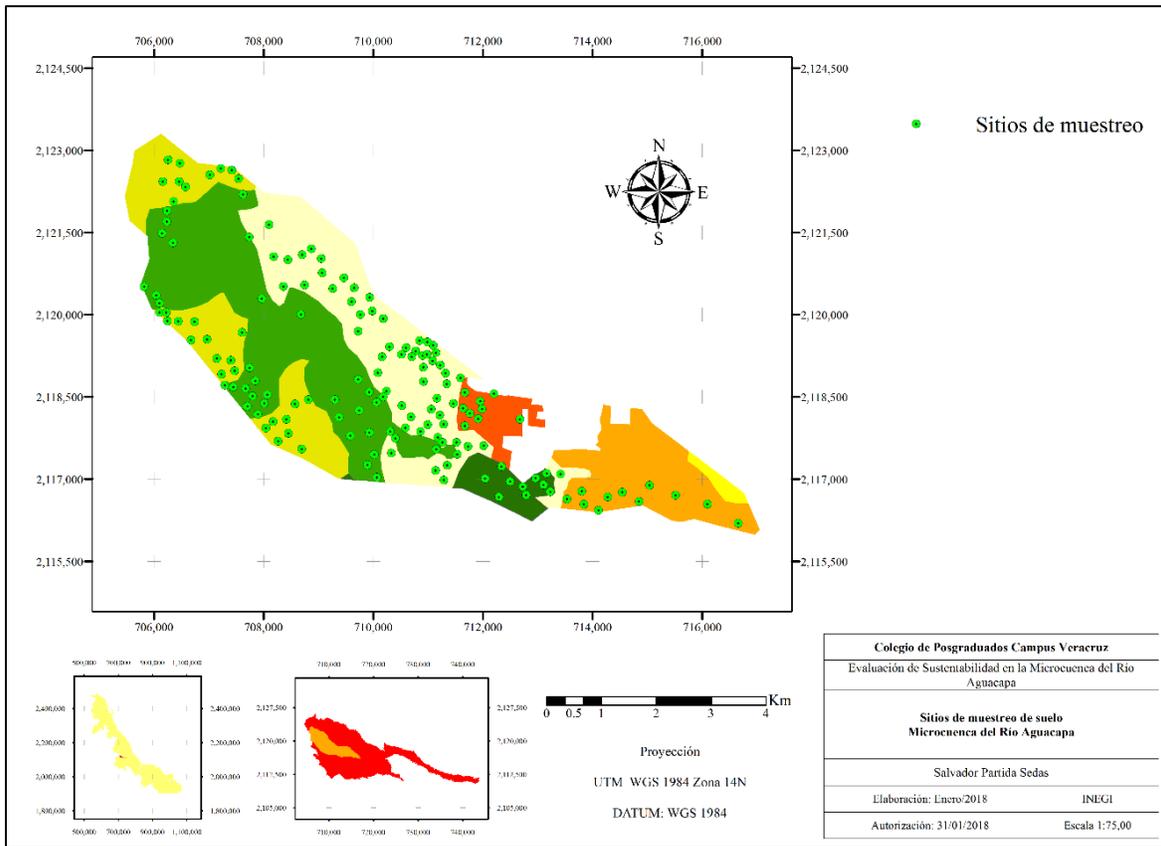


Figura 7. Sitios de muestreo para la realización de análisis de suelos

El método para evaluar la calidad del suelo fue a través de un índice de calidad de suelo (ICS) construido a partir de los parámetros evaluados. De forma similar a la construcción del ICA, la puntuación de peso (W_i) se multiplica por el valor del subíndice (L_i) para cada parámetro evaluado en el suelo, la ecuación se representa así:

$$ICS = \sum_{i=0}^n W_i * L_i$$

Donde:

ICS es el Índice de calidad del Suelo

W_i es la puntuación del peso del parámetro i

L_i es el valor del subíndice i

Para integrar el ICS se evaluaron siete parámetros fisicoquímicos, mismos que se indican en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Metodología de evaluación de los indicadores del ICS.

No.	Parámetro	Unidad	Método
1	Potencial de Hidrógeno	1 a 14	Potenciométrico AS-02/ NOM-021-SEMARNAT 2000
2	Materia Orgánica	%	Walkley y Black AS-07/ NOM-021-SEMARNAT 2001
3	Nitrógeno Total	%	Kjeldahl
4	Fósforo	mg/kg	Bray P-1
5	Potasio	mg/kg	Espectrofotométrico
6	Conductividad	dS/m	Conductímetro AS-18 / NOM-021-SEMARNAT 2005
7	Velocidad de Infiltración	min/cm	Doble Anillo de Infiltración

Aunado a lo anterior, se evaluó la textura y densidad aparente de cada una de las muestras compuestas para cada tipo de cobertura y uso de suelo. La ponderación de cada uno de los indicadores establecidos para el índice de calidad del suelo (ICS), así como la interpretación de sus resultados se indican en los Cuadros 10 y 11.

Cuadro 10. Ponderación de los indicadores del Índice de Calidad del Suelo.

No.	Parámetro	Peso del parámetro (Wi)
1	Materia Orgánica	0.20
2	pH	0.15
3	Nitrógeno total	0.15
4	Fósforo	0.15
5	Potasio	0.15
6	Conductividad	0.10
7	Velocidad de Infiltración	0.10
Total		1.00

Cuadro 11. Criterios de referencia para evaluar el ICS.

Puntaje ICS	Criterio
0 a 25	Muy malo
26 a 50	Malo
51 a 70	Medio
71 a 90	Bueno
91 a 100	Excelente

6.3 Operacionalización de las hipótesis

Este procedimiento se realizó con la finalidad de desglosar las variables de estudio que componen las hipótesis en aspectos más concretos llamados índices, lo que permitiría facilitar la metodología, explicar y comprender el fenómeno en estudio y contrastar las hipótesis (Rojas, 1995). En este sentido, la hipótesis general se contrastó a partir de las particulares.

Hipótesis general

“El grado de sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa está siendo impactado negativamente por el tipo y manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas y las condiciones socio-culturales y económicas de la población que habita en ella.”

Operacionalización

Índice de Agregado de Sustentabilidad de la Microcuenca (IASuM)

$$IASuM = ICAm * 0.34 + IDsc * 0.33 + IDE * 0.33$$

Donde:

IASuM es el Índice Agregado de Sustentabilidad de la Microcuenca

ICAm es el Índice de Calidad Ambiental de la Microcuenca

IDSc es el Índice de desarrollo social de la microcuenca

IDE es el Índice de Desarrollo Económico de la microcuenca

El índice agregado de sustentabilidad ambiental (IASuM) es una escala de referencia de 0 a 100 puntos, la cual indicará el grado de sustentabilidad de la microcuenca, mismos que se indican en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Grados de Sustentabilidad para el IASuM.

Valores del IASuM	Grado de Sustentabilidad de la Microcuenca
0 – 25	No Sustentable
26 - 50	Baja
51 – 75	Media
76 - 100	Alta

6.3.1 Operacionalización de la hipótesis particular 1

Hipótesis particulares

H1. El grado de sustentabilidad es función del cambio en la cobertura y uso de suelo, la calidad del agua del río, la capacidad de infiltración y la calidad del suelo.

Definición operativa

Índice de Calidad Ambiental (ICAm)

$$ICAm = \left(\sum_{i=1}^n Xi * Wi \right)$$

Dónde:

ICAm es el Índice de Calidad Ambiental de la Microcuenca = 0 a 100

x_i son las variables (Índice de Calidad Ambiental (ICAm)),

w_i es el peso asignado a la variable

Índices e indicadores para ICAm

- % de Superficie Territorial con cambio (% STC)

- Velocidad de Infiltración de la Microcuenca (VI)
- Índice de Calidad del Agua de la Microcuenca (ICA)
- Índice de Calidad del Suelo de la Microcuenca (ICS)

6.3.2 Operacionalización de la hipótesis particular 2

H2. El grado de sustentabilidad es función del tipo y manejo de los agroecosistemas, actividades antrópicas, y las condiciones socioculturales y económicas de la población de la microcuenca del Río Aguacapa.

Definiciones operativas

Índice de Desarrollo Socio-cultural (IDSc)

$$IDSc = \left(\sum_{i=1}^n Xi * Wi \right)$$

Dónde:

IDSc es el índice de Desarrollo Sociocultural de la Microcuenca = 0 a 100 Puntos

x_i son las variables (Índice de Desarrollo Sociocultural IDSc)

w_i es el peso asignado a la variable

Indicadores considerados para IDSc

- Índice de Desarrollo Humano
- Índice de Rezago Social
- Índice de Salud
- Índice de Educación
- Índice de Marginación

Índice de Desarrollo Económico (IDE)

$$IDE = \left(\sum_{i=1}^n Xi * Wi \right)$$

Dónde:

IDE es el Índice de Desarrollo Económico de la Microcuenca = 0 a 100 Puntos

x_i son las variables (Índice de Desarrollo Económico IDE)

w_i es el peso asignado a la variable

Indicadores de Desarrollo Económico considerados:

- Población Económicamente Activa
- Población Ocupada
- Tasa de participación Económica
- Índice de ingreso

6.4 Proceso de recolección de datos

Las muestras de agua y suelo fueron recolectadas en cada uno de los sitios de muestreo, se tomaron datos en el sitio y posteriormente se trasladaron al laboratorio para su tratamiento y análisis respectivo. En el caso de los datos para la construcción de los índices de desarrollos social (IDSc) e Índice de desarrollo económico (IDE), estos se obtuvieron a través de la consulta de bases de datos establecidas en cada una de sus páginas de las dependencias.

6.5 Sistematización y análisis de la información

Toda vez que se reunió la información, mediante trabajo de gabinete y en procesador electrónico, con la ayuda del software RS Studio, ArcGis V10.2, Microsoft Word y Excel 2010, se procedió a integrar la información y realizar los análisis correspondientes para emitir las observaciones y recomendaciones de acuerdo con los resultados obtenidos y finalmente, contrastar la hipótesis y presentar las conclusiones finales de esta investigación.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Caracterización biofísica y social de la microcuenca del Río Aguacapa

7.1.1 Descripción General

La microcuenca del Río Aguacapa se encuentra localizada dentro del Municipio de Huatusco, Veracruz; cuenta con una superficie de 32.05 Km² (3200.5 Ha.) y está delimitada por las coordenadas 19°11'27.18" Latitud Norte - 97°0'54.65" Longitud Oeste y 19°7'36.65" Latitud Norte y 96°56'16.15" Longitud Oeste, forma parte de la cuenca del Río Jamapa, en la parte central del estado de Veracruz y pertenece a la Región Administrativa X, Golfo Centro, así como a la Región Hidrológica 28 Río Papaloapan.

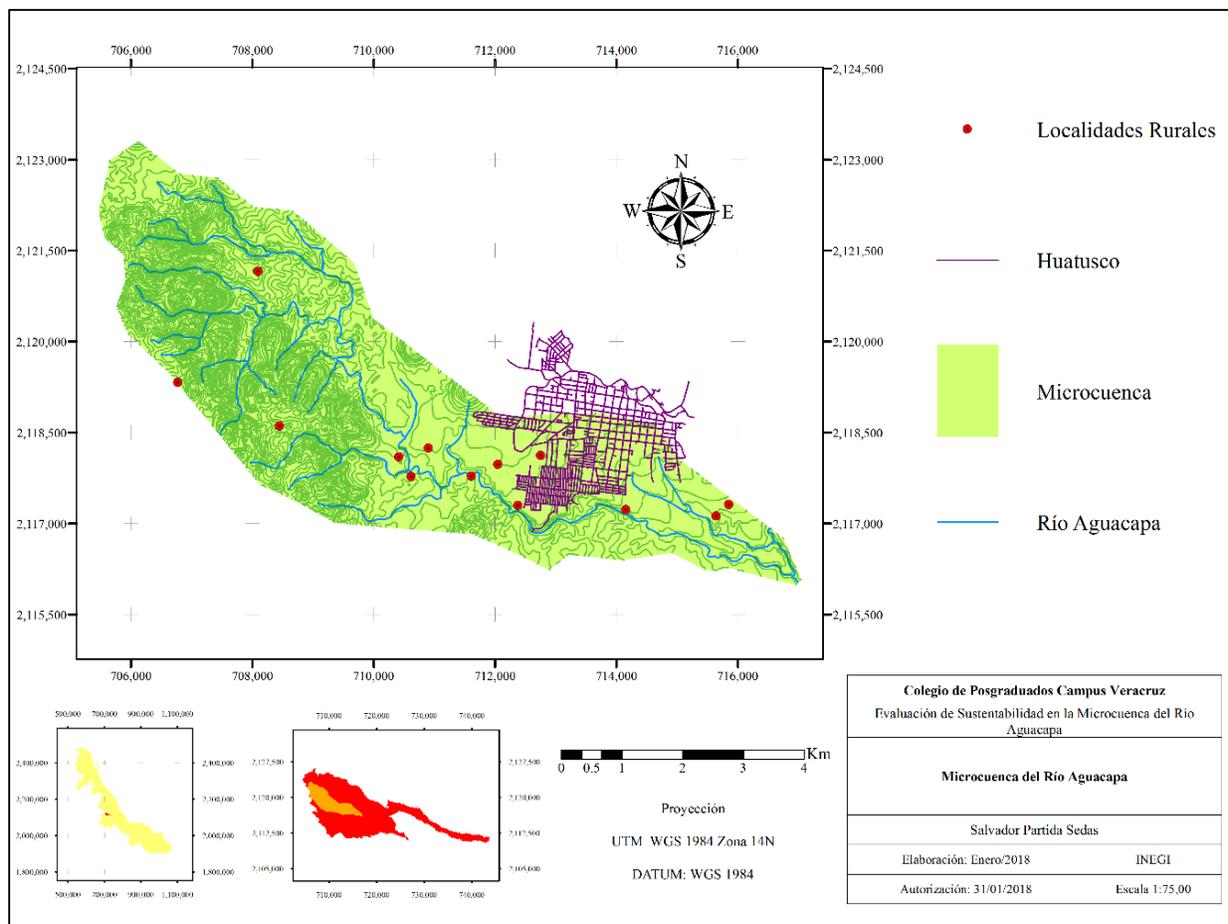


Figura 8. Microcuenca del Río Aguacapa. Municipio de Huatusco, Veracruz.

Está conformada por la superficie terrestre que abarca el cauce del Río Aguacapa, perteneciente al municipio de Huatusco, Veracruz; el cual nace en los límites entre Puebla y Veracruz y cuenta con una longitud total de 15.4 kilómetros uniéndose al cauce de los ríos Seco y Citlalapa para desembocar aguas abajo en el río Jamapa.

Una de las principales características de esta microcuenca es la coexistencia de diversos tipos de agroecosistemas: ganado, café, maíz, caña y aves de engorda; así como beneficios de café, trapiches de caña y un importante número de asentamientos humanos quienes interaccionan con los recursos naturales de la misma. Además, destaca la belleza estética del paisaje y una superficie importante de bosque mesófilo de montaña, virtud que le confiere una mayor relevancia para su estudio en términos de los servicios ambientales que brinda este tipo de ecosistema: captación de agua, enriquecimiento del suelo, control de la erosión y deslaves, así como secuestro de carbono (Williams-Linera, 2002).

7.1.2 Descripción de condiciones climáticas

De acuerdo con la base de datos climatológica nacional del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), en la microcuenca del Río Aguacapa se encuentra localizada la estación 30071, cuyos datos principales se indican en el cuadro 13.

Cuadro 13. Datos climáticos del municipio de Huatusco.

Ciudad	HUATUSCO	<i>Temp. (°C); Prec. (mm)</i>	
Estado	VERACRUZ	Temp. Máxima prom.	21.9
Estación	HUATUSCO	Temp. Media:	19.5
<i>Coordenadas Geográficas de la estación</i>		Temp. Mínima prom.	16.1
Latitud	19° 09'00'' N	Prec. Máxima:	346.8
Longitud:	96°57'35'' W	Prec. Mínima:	41.9
Altitud:	1284 msnm	Prec. Total.	1,941.7
<i>Periodo de observación (Jul 1907 – Dic 2001)</i>		P/T	99.57
Temperatura	80 años	% Prec. Invernal	7.05%
Precipitación	80 años	Oscilación	5.8

Fuente: CICESE, 2013

En el Cuadro 14 se indican los valores promedio para el periodo de datos analizado

Cuadro 14. Temperatura promedio y precipitación promedio

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura °C	16.1	16.9	19.1	21.1	21.9	21.5	20.7	21.1	20.7	19.6	18.2	16.6	19.5
Precipitación mm	48.4	41.9	46.5	75.2	137.3	339.8	346.8	288.4	326.1	167.7	77.5	46.1	1,941.7

Fuente: CICESE, 2013

Los datos climatológicos de la región en la cual se encuentra localizada la microcuenca del Río Aguacapa indican una temperatura promedio anual de 19.5° y una precipitación de 1941.7 mm anuales (CICESE, 2013). En la Figura 9 se muestra la temperatura promedio mensual registrada en la estación climatológica:

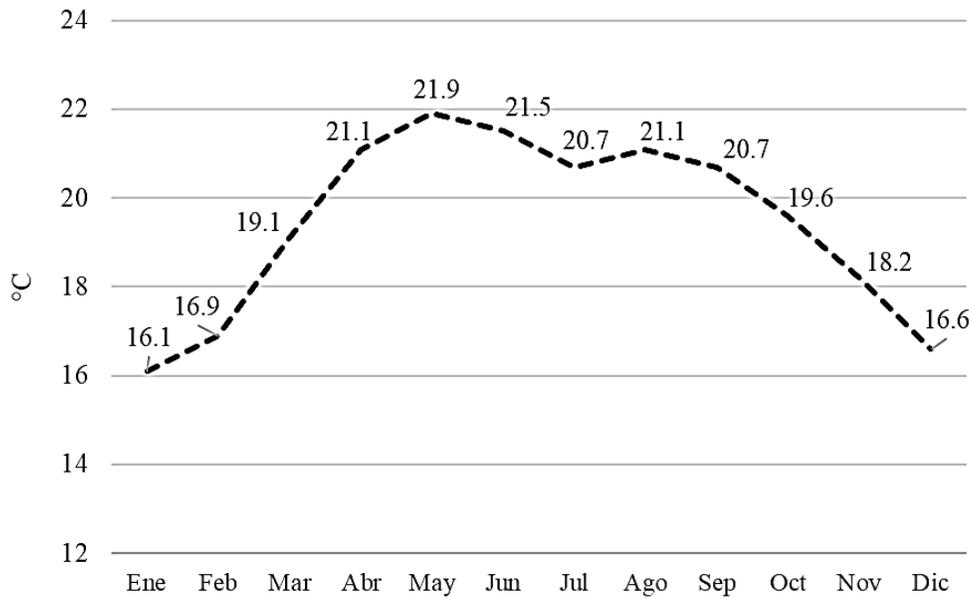


Figura 9. Comportamiento de la temperatura promedio mensual en la microcuenca del Río Aguacapa.

Los datos correspondientes a los valores de precipitación de la región de estudio, presentan un comportamiento típico del clima tipo Ganges con canícula. (Figura 10)

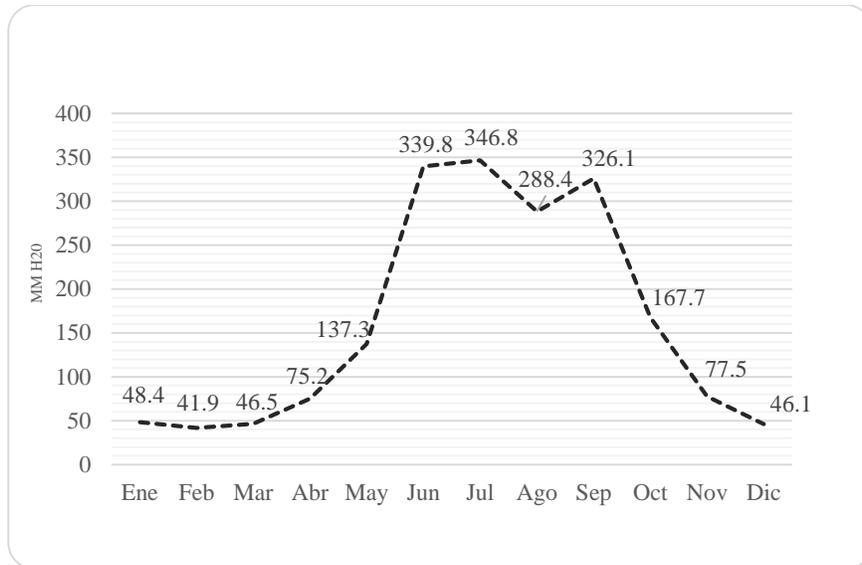


Figura 10. Precipitación mensual promedio en el municipio de Huatusco.

7.1.3 Morfometría y Fisiografía

La microcuenca del Río Aguacapa abarca una superficie de 32.05 km² y un perímetro de 30.46 km, presenta una cota máxima de 2,060 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una cota mínima de 1,100 msnm. En la Figura 11 se muestra un modelo digital de elevación de la microcuenca

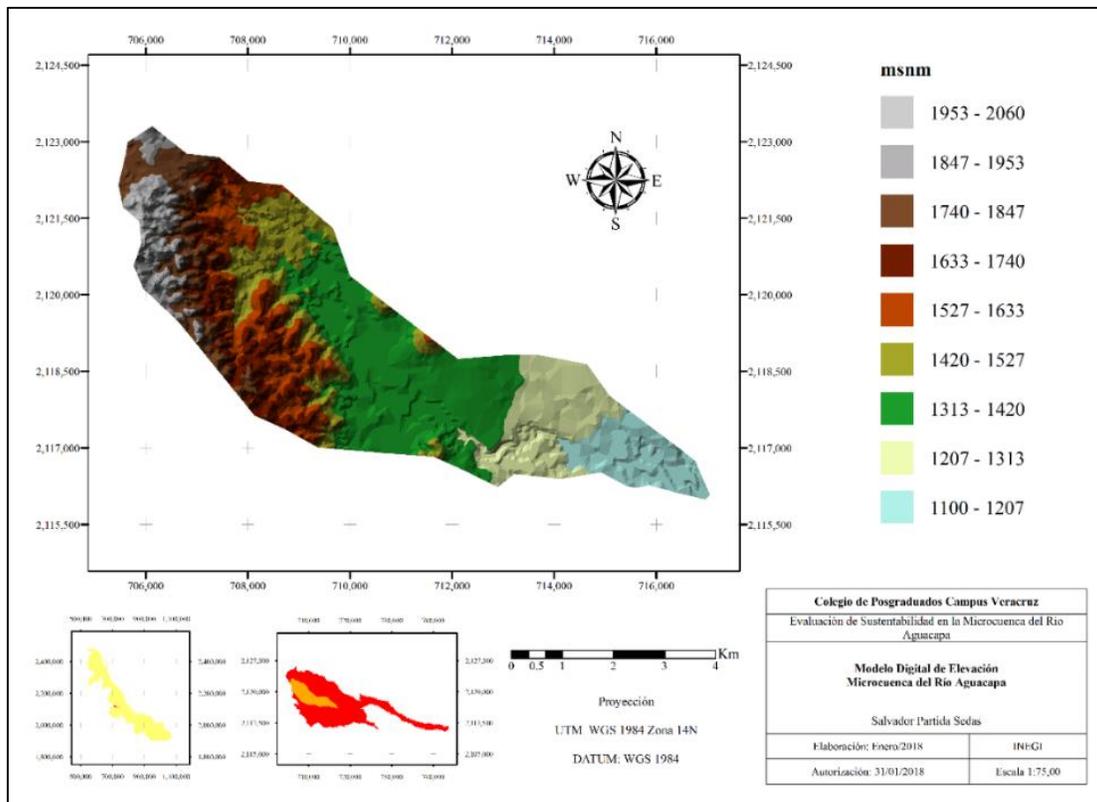


Figura 11. Modelo digital de elevación de la microcuenca del Río Aguacapa.

De acuerdo con el conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica escala 1:1'000,000 INEGI (2000) y mediante su manipulación en el programa informático ArcGis® Versión 10.2, la microcuenca presenta una altitud media de 1,549 msnm y una pendiente promedio de 28.93%. En el Cuadro 15 se indica parámetros morfométricos de la microcuenca, mismos que fueron obtenidos con el uso del software ArcGis® versión 10.2 y en donde se calcularon los principales componentes fisiográficos.

Cuadro 15. Datos morfométricos de la microcuenca.

Descripción	Unidad	Valor
<i>De la superficie</i>		
Área	Km ²	32.01
Perímetro	Km	30.46
Cota Máxima	m	2060.00
Cota Mínima	m	1100.00
<i>Coordenadas del Centroide (WGS:1984_14N)</i>		
X	m	710697.30
Y	m	2119376.57
Z	msnm	1549.78
<i>Altitud</i>		
Altitud Media	msnm	1549.78
Altitud más frecuente	msnm	1373.44
Altitud de Frecuencia Media	msnm	1496.53
<i>Pendiente</i>		
Pendiente promedio de la cuenca	%	28.93

Aunado a los parámetros morfométricos de la Microcuenca del Río Aguacapa, en la Figura 12 se observa un análisis detallado de su fisiografía:

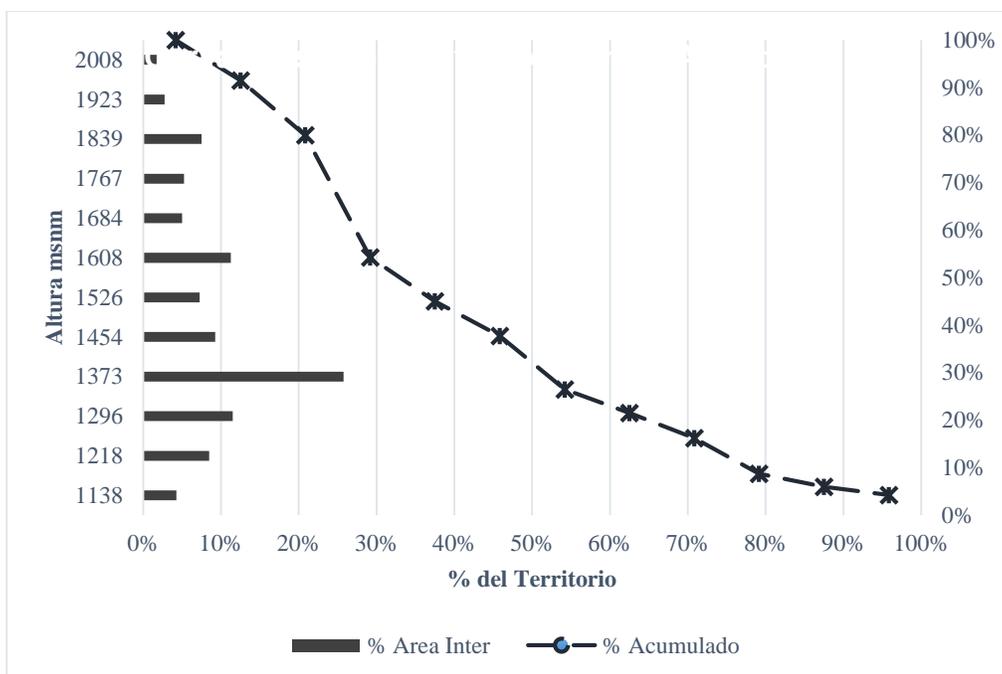


Figura 12. Descripción fisiográfica de la microcuenca.

La fisiografía de la microcuenca del Río Aguacapa se caracteriza por una distribución uniforme en términos de la pendiente del terreno, el mayor porcentaje territorial corresponde a una superficie plana sobre la cual se distribuyen diferentes agroecosistemas y zonas de asentamientos humanos, la superficie restante la ocupan territorios cuya inclinación varía entre 3% a más del 45%. En el Cuadro 16 se muestra la distribución de cada uno de los tipos de territorio en función a su pendiente y en la Figura 13, se indica el mapa correspondiente a la distribución de la pendiente del territorio de la microcuenca del Río Aguacapa.

Cuadro 16. Correlación entre superficie de la microcuenca y su pendiente.

	Pendiente	Área (Ha)	%
Plano	0 – 3 %	950.2	29.7
Inclinado	3 – 12 %	712.1	22.2
Fuertemente Inclinado	12 – 30%	899.1	28.1
Escarpado	30 – 45 %	476.1	14.9
Muy escarpado	>45 %	163.0	5.1

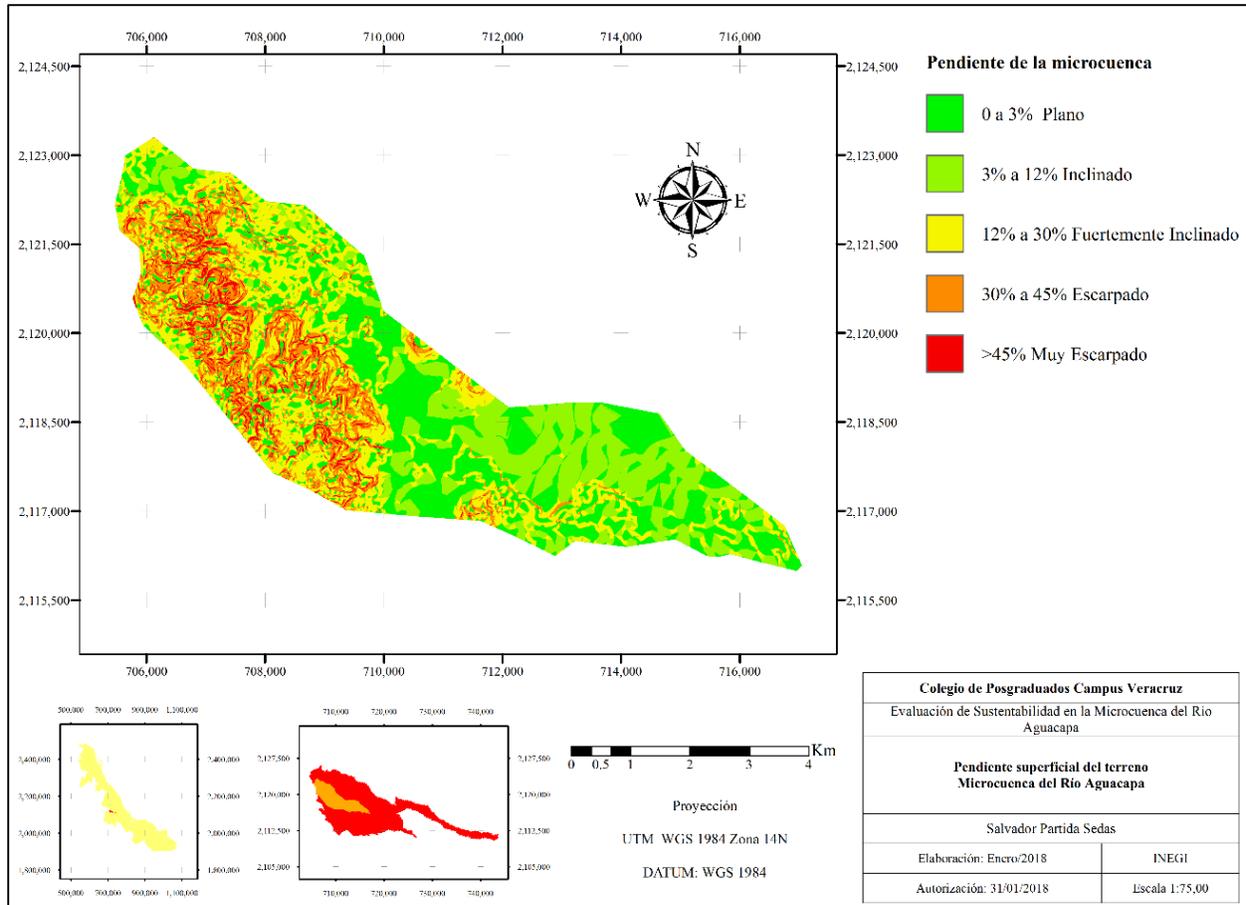


Figura 13. Pendiente superficial del territorio de la microcuenca.

7.1.4 Tipo de Clima

De acuerdo con la descripción de datos obtenidos de la carta Climática 1:250,000 del INEGI, en la microcuenca se presenta tres tipos de climas (INEGI., 2000) y tomando como referencia las definiciones establecidas por (García, 2004) y presentados en el Cuadro 17. En función de los resultados obtenidos, y de acuerdo con la descripción que realiza García (2004), el tipo de clima (A)C(m)(f) se caracteriza por ser semicálido con poca oscilación térmica, temperatura media anual mayor de 18 °C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; una precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. Este tipo de clima abarca un área de 14.7 km², lo cual corresponde a un 45.9 % del total de la microcuenca.

Cuadro 17. Tipos de climas presentes en la microcuenca del Río Aguacapa.

Rango Altitudinal (msnm)	Tipo de Clima	Descripción	% Territorio
1100 a 1450	(A)C(m)(f)	Semicálido húmedo con lluvias abundantes en verano y poca oscilación térmica	45.9
1450 a 1650	C(m)(f)	Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C y precipitación en el mes más seco menor de 40 mm con lluvias de verano	39.0
1650 a 2060	C(f)	Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual	15.1

El tipo de clima C(m)(f) es templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C; precipitación en el mes más seco menor de 40 mm, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual; abarca un total de 12.47 Km² y constituye el 39 % de la superficie total. Finalmente, el clima C(f) es templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C; precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm, lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual. Este tipo de clima abarca el 15.1% de la superficie total de la microcuenca, con un total de 4.83 km². La representación gráfica de los tipos de climas presentes en la microcuenca del Río Aguacapa se presentan en la Figura 14.

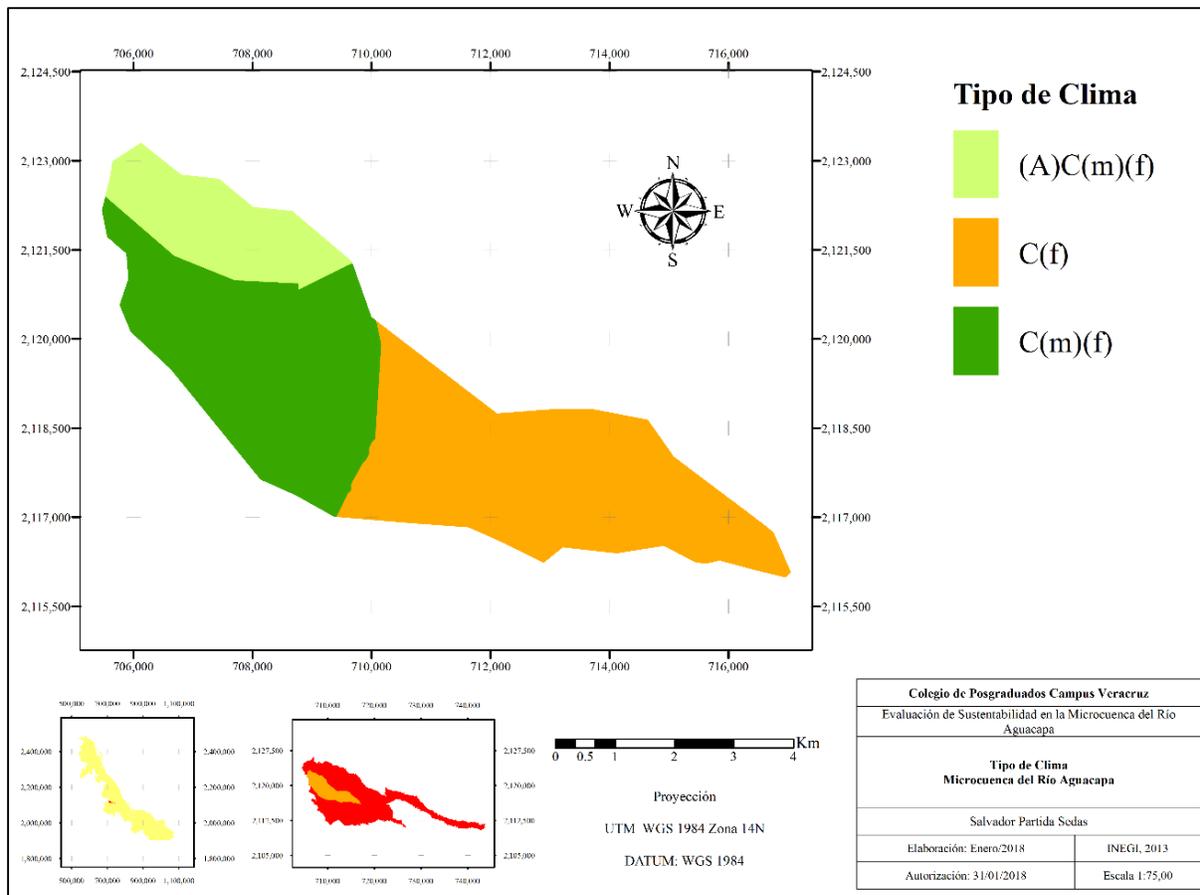


Figura 14. Tipos de climas presentes en la microcuenca.

7.1.5 Geología

La microcuenca se caracteriza por contar con tres tipos geológicos superficiales

- a) Brecha volcánica básica
- b) Roca caliza
- c) Toba básica

. La toba (T) básica son rocas ígneas intrusivas, es un tipo de roca piroclástica cuya composición mineralógica es similar a la roca basáltica, estas rocas son de origen explosivo y están formadas por material volcánico suelto o consolidado; comprende fragmentos de diferente composición mineralógica y tamaños menores de 4 mm. Las rocas ígneas extrusivas se originan a partir de material fundido en el interior de la corteza terrestre, el cual está sometido a temperatura y presión muy elevada, el material antes de solidificarse recibe el nombre genérico de magma y se forma a una profundidad de entre 25 a 200 km; cuando el magma llega a la superficie terrestre es derramado a través de fisuras o conductos (volcán), las cuales al enfriarse y solidificarse forman este tipo de rocas. Se distinguen de las intrusivas por presentar cristales que solo pueden ser observados por

medio de una lupa. (INEGI, Guía para la interpretación de cartografía geológica, 2005). La distribución espacial de cada uno de los tipos geológicos superficiales se encuentra representados en la Figura 16

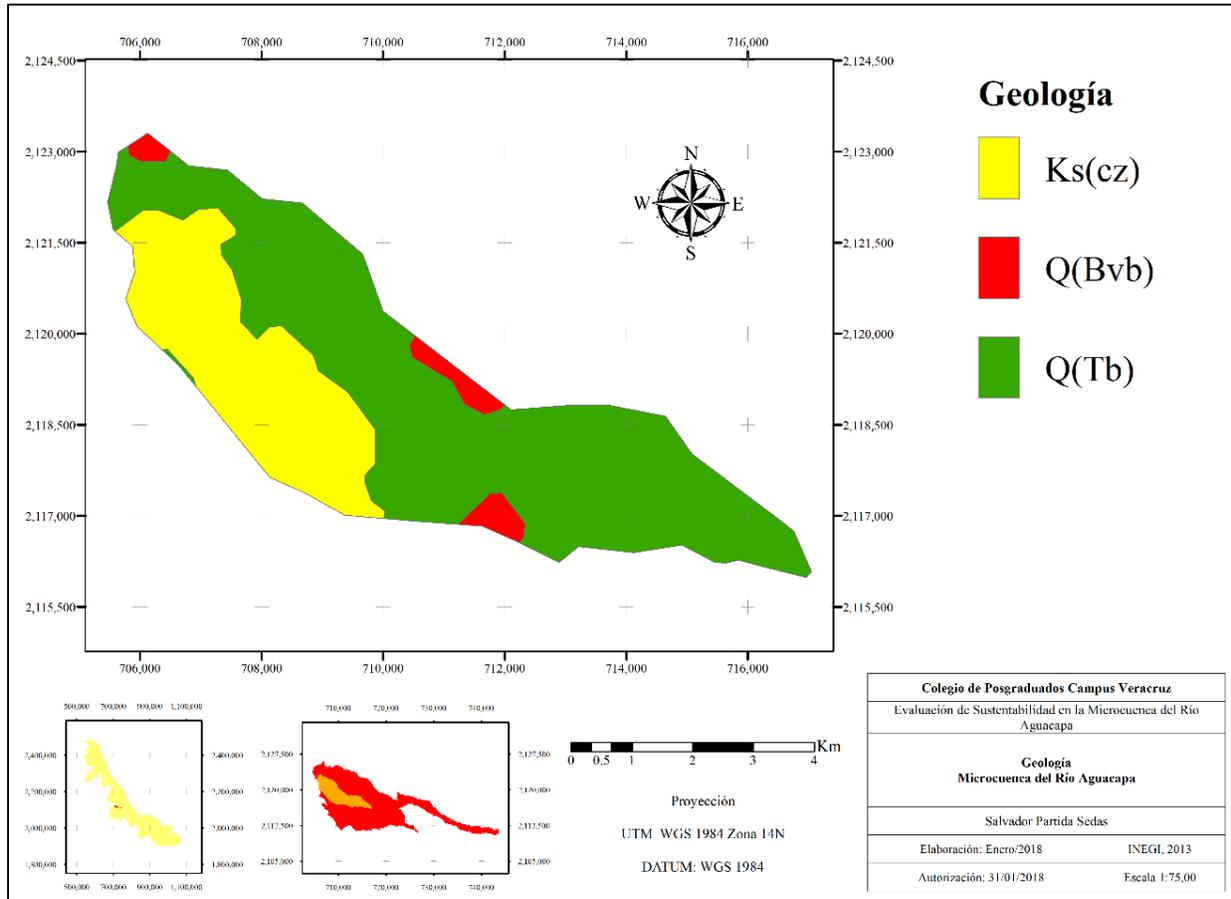


Figura 15. Geología de la microcuenca del Río Aguacapa.

En el Cuadro 19, se indica los valores correspondientes a cada tipo de roca presente en la microcuenca

Cuadro 18. Tipos de Roca de la microcuenca.

Clave	Tipo	Clase	Era	Área (km ²)	%
Q(Tb)	Toba básica	Ígnea extrusiva	Cenozoico	21.39	66.80%
Ks(cz)	Caliza	Sedimentaria	Mesozoico	9.4	29.40%
Q(Bvb)	Brecha volcánica básica	Ígnea extrusiva	Cenozoico	0.53	1.70%
Q(Bvb)	Brecha volcánica básica	Ígnea extrusiva	Cenozoico	0.46	1.40%
Q(Bvb)	Brecha volcánica básica	Ígnea extrusiva	Cenozoico	0.21	0.70%

7.1.6 Tipo de Suelo

En la microcuenca se presentan dos tipos de suelo: a) Andosol Húmico y b) Acrisol Órtico, además de una proporción de superficie correspondiente a asentamientos humanos. De acuerdo con los datos edafológicos emitidos por parte de (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 obscuro, presenta una con capa superficial obscura, con buen contenido de materia orgánica, pero pobre en nutrientes o bases (Ca, Mg, K, Na). En el Cuadro 18 se muestra la superficie y porcentaje correspondiente a cada uno de ellos:

Cuadro 19. Tipo de Suelo de la Microcuenca del Río Aguacapa.

Tipo de Suelo	Superficie	
	Ha	%
Andosol Húmico (Lítico Profundo)	1532.8	47.9%
Andosol Húmico (Pedregoso)	1389.7	43.4%
Acrisol Órtico (Lítico Profundo)	210.5	6.6%
Asentamiento Humano	67.5	2.1%
	3200.5	100.0%

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

La fase física del suelo es la característica del suelo definida de acuerdo con la presencia y abundancia de grava, piedra o capas fuertemente cementadas, que impiden o limitan el uso agrícola del suelo; en función a este atributo, en el suelo Andosol húmico de la microcuenca, se aprecian dos tipos de capas: una Lítica profunda (LP) que es roca continua entre los 50 y 100 cm de profundidad y otra Pedregosa (P) en la que se observa la presencia de piedras en los 50 cm de profundidad en un volumen mayor del 30% y las piedras miden de 7.5 a 25 cm en su parte más ancha. Por su parte, el 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). En los dos tipos de suelo presentes en la microcuenca, la textura del suelo es del tipo Medio (2), cuya característica es que contiene menos del 35% de arcilla y menos del 65% de

arena. (INEGI, 2001). En la Figura 15 se presenta la distribución edafológica de la microcuenca del Río Aguacapa:

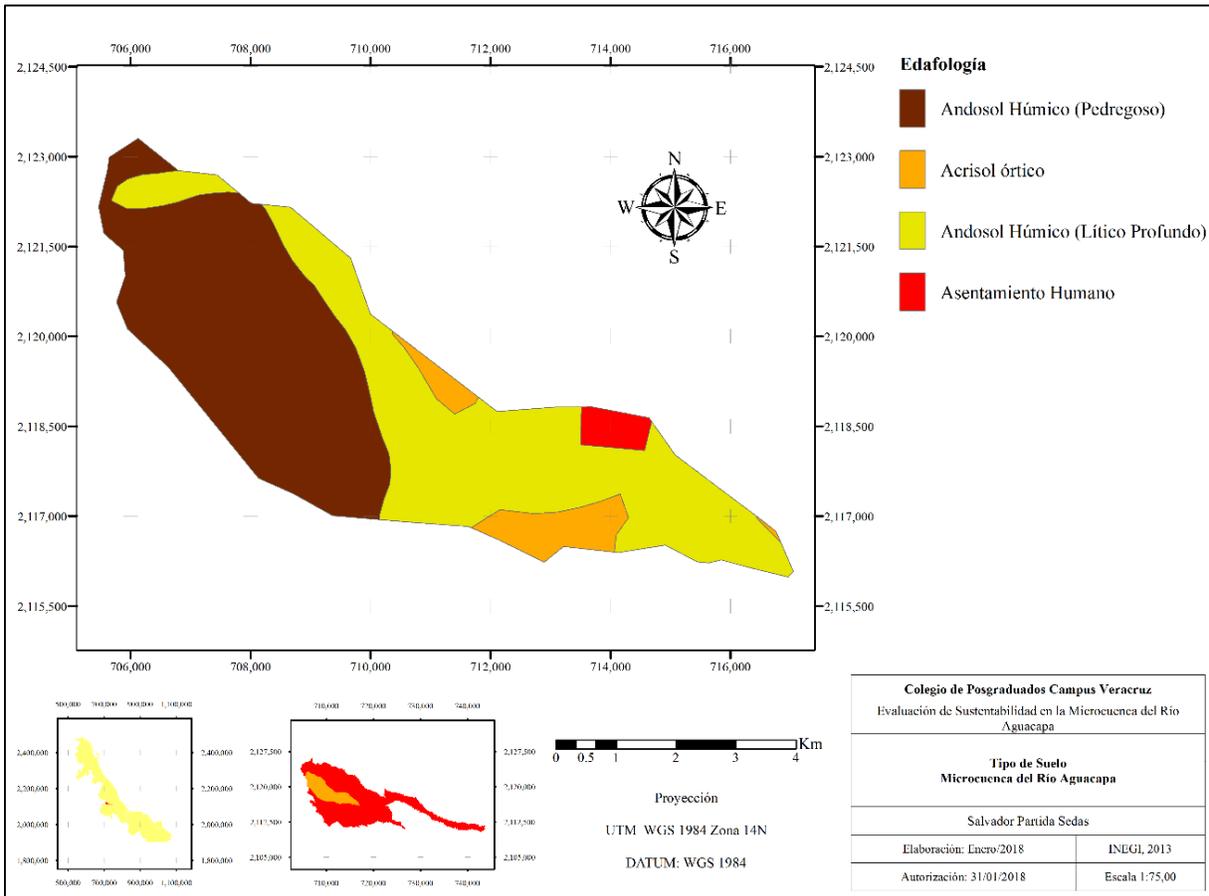


Figura 16. Edafología presente en la microcuenca del Río Aguacapa.

7.1.7 Agroecosistemas de la microcuenca

Los AES presentes en la microcuenca fueron obtenidos en forma primaria a través de la Serie V del uso del suelo y vegetación del INEGI, la cual consta de 149 conjuntos de datos digitales y un conjunto nacional en formato vectorial (shape), con datum de referencia ITRF92 (INEGI, 2014). Mediante su manipulación con sistemas de información geográfica, se obtuvo un mapa con los diferentes tipos de cobertura y uso de suelo de la microcuenca (Figura 17). La serie V, INEGI (2014) establece la siguiente clasificación de agroecosistemas, los cuales agrupa en diferentes tipos de agricultura y actividades acuícolas que conforman la información agrícola, pecuaria y forestal:

1. Agricultura de Temporal
2. Agricultura de Riego
3. Agricultura de Humedad
4. Pastizal Cultivado

La clasificación de cada tipo de AES se presenta en función de la naturaleza del cultivo respecto a su temporalidad, considerando los siguientes tipos:

- Anual: Su ciclo vegetativo no es mayor a un año.
- Semipermanente: El periodo de su ciclo vegetativo dura entre 2 y 10 años.
- Permanente: Su ciclo vegetativo es mayor a diez años.

Con base en la clasificación propuesta en la carta de uso de suelo, la microcuenca del Río Aguacapa presenta los siguientes agroecosistemas (Cuadro 20)

Cuadro 20. Tipos de Agroecosistemas de la microcuenca.

Tipos de Agroecosistemas	Superficie	
	Ha	%
Pastizal cultivado	820.07	43.6%
Agricultura de temporal anual y permanente	502.73	26.7%
Agricultura de temporal permanente	410.95	21.8%
Agricultura de temporal semi-permanente	118.97	6.3%
Agricultura de temporal semi-permanente y permanente	29.01	1.5%
	1881.73	100.0%

. Fuente de elaboración propia con datos de la carta de uso de suelo y vegetación 1:250,000 Serie V INEGI

Los AES representan un 58.8 % de la superficie total de la microcuenca, en ella se puede encontrar una gran diversidad de cultivos, destacando por orden de importancia maíz, café, caña y aguacate; así mismo, se observa una superficie importante dedicada a la ganadería extensiva.

7.2 Cambio de uso de suelo en la microcuenca

7.2.1 Principales componentes de cobertura y uso de suelo de la microcuenca

Para efectos de la determinación de los cambios que ha sufrido la cobertura y uso de suelo de la microcuenca del Río Aguacapa, en la Figura 17 se indica el mapa de cobertura correspondiente al año 2013:

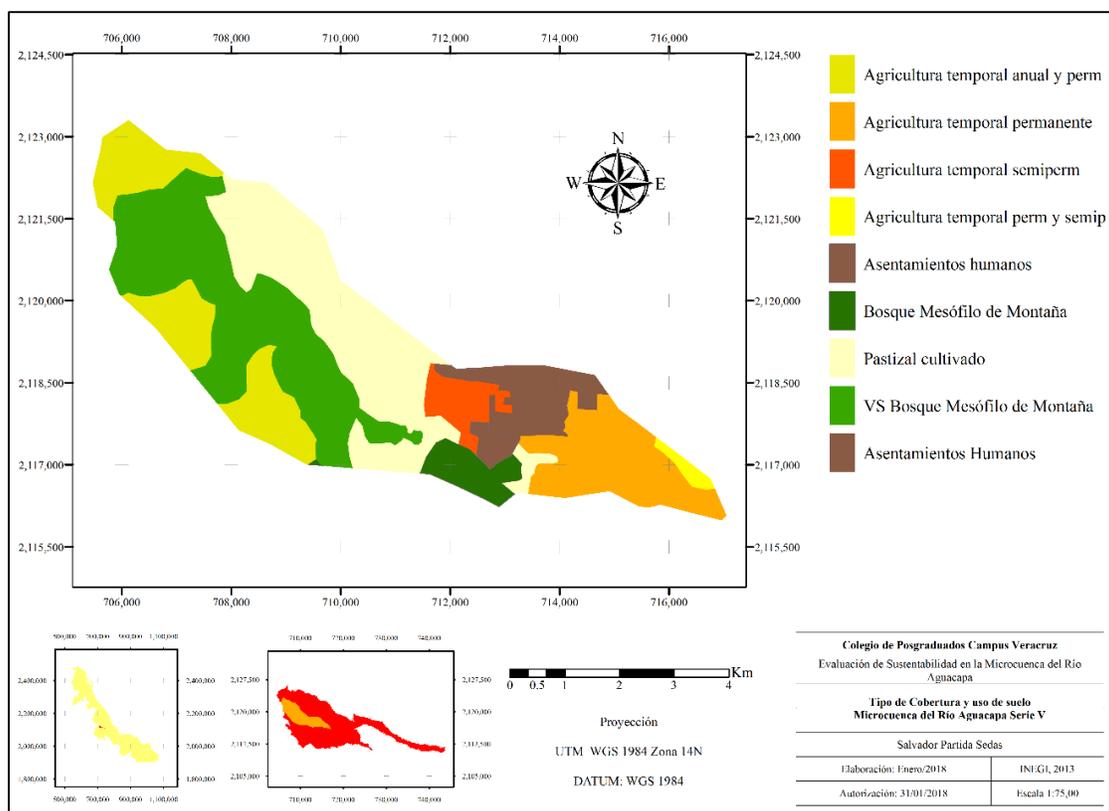


Figura 17. Tipos de cobertura y uso de suelo.

Como se puede observar, los agroecosistemas presentes en la microcuenca son todos de temporal, por sus características medioambientales y fisiográficas, la población asentada en sus márgenes ha encontrado condiciones idóneas para el desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias y ganaderas.

7.2.2 Indicadores de cambio de uso de suelo

En el año de 1993, la cobertura de suelo con mayor proporción en la microcuenca era la vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña con un 32.8% de la superficie total, este tipo de cobertura es la que mayores transformaciones ha sufrido en un período de veinte años. Para el año 2013, se puede observar que se perdieron 116.5 hectáreas, lo cual representa una tasa de reducción promedio de 5,8 hectáreas-año⁻¹. Por su parte, la agricultura, que en 1993 ocupaba el 28.1% de la superficie total de la microcuenca es el tipo de cobertura que más ha visto incrementado su territorio en los últimos veinte años; en este periodo de tiempo, ha crecido en 163 hectáreas, lo cual constituye una tasa de crecimiento anual promedio de 8.2 hectáreas-año⁻¹. En el Cuadro 21 se indica en forma resumida los cambios en la cobertura del suelo indicando el número de hectáreas ganadas o pérdidas para cada tipo de cobertura, la tasa de cambio anual, el % de cambio para cada tipo de cobertura y la variación de hectáreas por año:

Cuadro 21. Cambios en la cobertura y uso de suelo entre los años 1993 y 2013.

Uso de Suelo y Vegetación	1993		2013		1993 - 2013			
	Área		Área		Cambio en la cobertura de suelo			
	Ha	%	Ha	%	Ha	TDA	TDA(%)	Ha/Año
Agricultura	897.8	28.1%	1,061.7	33.2%	163.8	0.0084	0.838	8.2
Pastizal Cultivado	947.7	29.6%	820.0	25.6%	-127.7	-0.0072	-0.724	-6.4
Vegetación Secundaria BMM	1,048.3	32.8%	931.7	29.1%	-116.5	-0.0059	-0.589	-5.8
Bosque Mesófilo de Montaña (BMM)	99.8	3.1%	120.7	3.8%	20.9	0.0095	0.949	1.0
Asentamientos Humanos	206.9	6.5%	266.5	8.3%	59.6	0.0127	1.265	3.0

La tercera superficie territorial de la microcuenca lo constituye el pastizal cultivado, que durante el período evaluado pasó de 947.7 hectáreas a un total de 820 hectáreas, en este lapso de tiempo ha visto reducida su superficie en 127.7 hectáreas y de todos los tipos de cobertura presentes en la microcuenca es la que mayor tasa de reducción promedio presenta, la cual que ha decrecido 6.4 hectáreas-año⁻¹. La Figura 18 indica los cambios en la cobertura del suelo de la microcuenca durante el período evaluado, en ella, puede observarse cómo ha sido la transición entre los años 1993 y 2013.

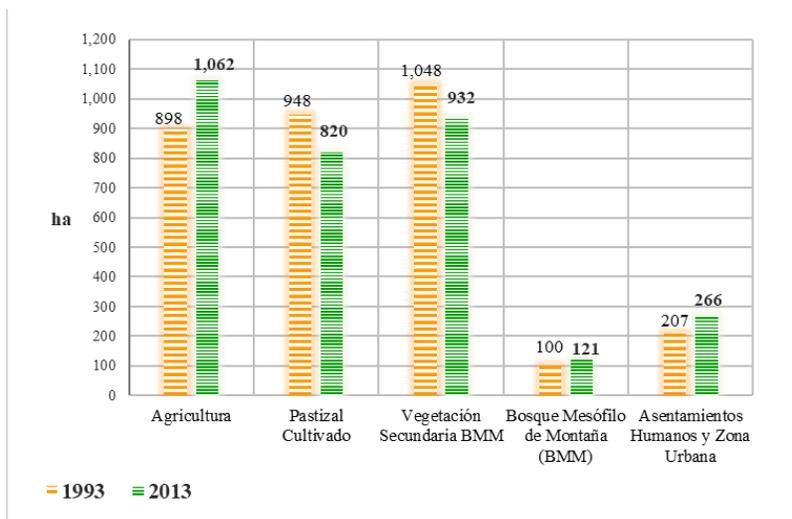


Figura 18. Cambios en tipos de cobertura y uso de suelo de la microcuenca.

El gráfico puede servir de referencia para comprender la distribución espacial de los tipos de cobertura presentes en la microcuenca, juntos agricultura, pastizal cultivado y bosque mesófilo de montaña constituyen el 93.5% de la cobertura total. Sin embargo, puede observarse que el crecimiento de los asentamientos humanos en la cabecera del municipio de Huatusco se ha incrementado de forma importante. Así mismo, para comprender detalladamente el proceso de cambio de uso de suelo observado en el período analizado, en la Figura 19 se indica gráficamente la tasa de cambio anual (TDA) para cada tipo de cobertura, expresando el porcentaje de cambio para cada uno de los años del período evaluado.

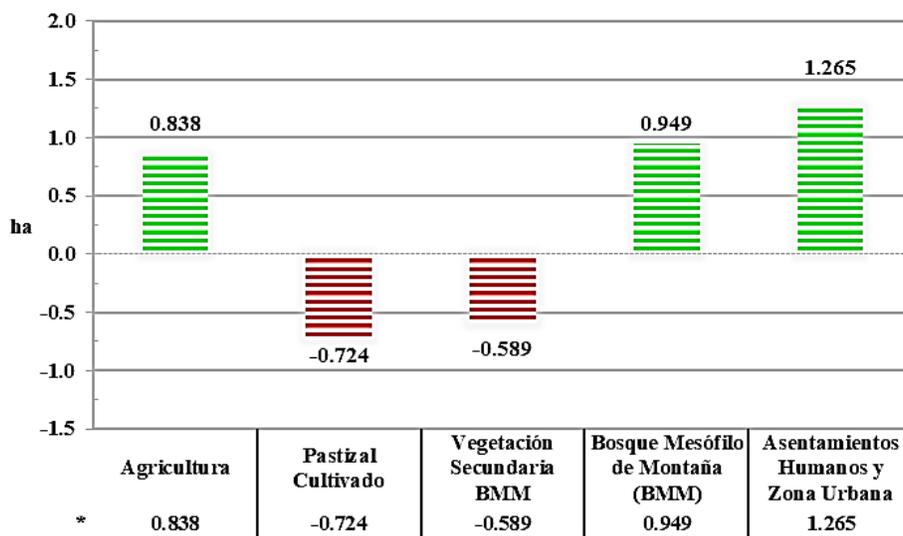


Figura 19. Tasa de cambio anual para cada tipo de cobertura.

Tanto el pastizal cultivado como la vegetación secundaria presentan tasas de cambio negativas, sus valores representan el porcentaje de cambio anual; esto es, en el caso del pastizal cultivado se observa que entre los años 1993 y 2013 se ha reducido anualmente su superficie en un 0.724% y en el caso de la vegetación secundaria del bosque mesófilo de montaña, un 0.589%. Por su parte, tanto agricultura como asentamientos humanos y bosque mesófilo de montaña presentan tasa de cambio anual positivas. En el caso de los asentamientos humanos, se puede apreciar la mayor TDA para el periodo evaluado, la cual ha crecido a un ritmo promedio anual de 1.265%.

7.2.3 Cambios observados durante el período 1985 – 2013

Para evaluar los cambios que se presentaron en la cobertura y uso de suelo se utilizaron los mapas de cobertura de la microcuenca durante los años 1993 y 2013, así como los datos indicados en el Cuadro de cambios de uso de suelo. Con esta información, se construyó una matriz de transición

y posteriormente se evaluó la probabilidad de transición para cada tipo de cobertura. De forma primaria, se estableció una nomenclatura para poder identificar la cobertura en el año base (1993) y otra nomenclatura para el año de referencia final (2013). Posteriormente, mediante álgebra matricial se construyó un arreglo numérico rectangular en la cual se combinan las filas y columnas de cada tipo de cobertura, los números resultantes en la matriz representan la transición entre cada tipo de cobertura. En el Cuadro (22) se indica la nomenclatura inicial establecida para la realización de la matriz de transición 1993 – 2013.

Cuadro 22. Matriz de nomenclatura para cada tipo de cobertura y uso de suelo.

Nomenclatura para la transición		2013				
		Agricultura	Pastizal	VS BMM	BMM	Zona Urbana
		10	20	30	40	50
1993	Agricultura 1	11	21	31	41	51
	Pastizal 2	12	22	32	42	52
	VS BMM 3	13	23	33	43	53
	BMM 4	14	24	34	44	54
	Zona Urbana 5	15	25	35	45	55

Una vez establecido el arreglo, mediante sistemas de información geográfica y su herramienta de álgebra de mapas, se obtuvo la matriz de transición 1993 – 2013 la cual se indica en el Cuadro 23 y representa la evolución que ha sufrido cada tipo de cobertura entre el período evaluado. Como puede observarse, los cambios principales se presentan en la transición de 169.9 hectáreas de pastizal cultivado en agricultura, 158.86 hectáreas de vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña en pastizal y 59.24 hectáreas de pastizal en zona urbana.

Cuadro 23. Matriz de transición de cobertura y uso de suelo en la microcuenca.

Transición 1993 / 2013		2013				
		Agricultura	Pastizal	VS BMM	BMM	Zona Urbana
1993	Agricultura	884.45	0.15	9.48	0.25	3.50
	Pastizal	169.66	660.80	36.58	21.44	59.24
	VS BMM	3.88	158.86	885.54	0.00	0.00
	BMM	0.15	0.22	0.14	98.98	0.32
	Zona Urbana	3.51	0.00	0.00	0.00	203.42

Es a través de la matriz de transición como se observa la forma bajo la cual cambia el uso de suelo y vegetación en un territorio determinado. Gráficamente esto se encuentra representado en la Figura 20 la cual corresponde al mapa de transición de los diferentes usos de suelo presentes en la microcuenca, construido a partir de la matriz de transición:

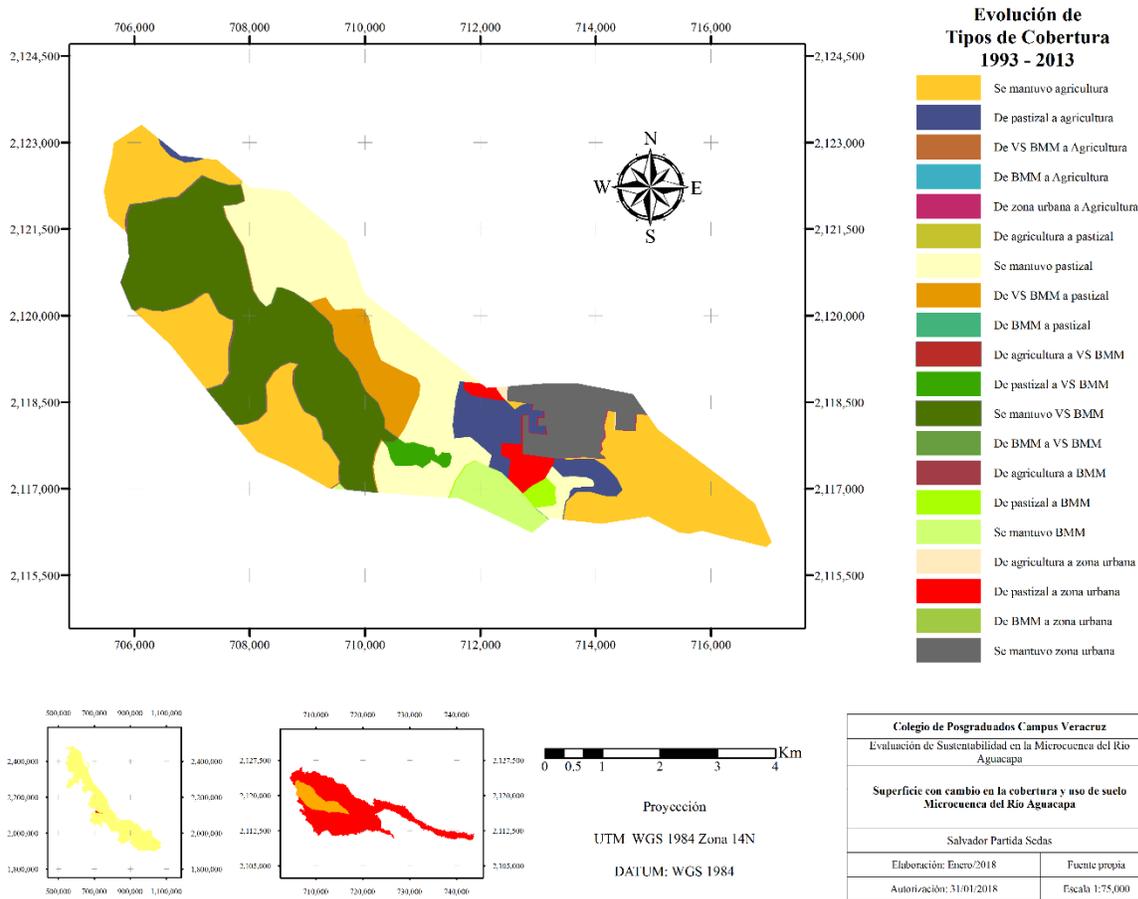


Figura 20. Cambios presentados para cada tipo de cobertura y usos de suelo.

Durante el período evaluado, se han presentado cambios importantes en la cobertura y uso de suelo de la microcuenca. La agricultura ha incrementado su superficie a costa del decrecimiento en los pastizales, de la misma forma que estos han crecido a costa la reducción en la vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña. Por su parte, los asentamientos humanos han crecido a través del desarrollo de nueva infraestructura que se ha establecido en territorios donde anteriormente eran terrenos de pastizal o agricultura. Estas transiciones permiten establecer una correlación entre la superficie que existía inicialmente con la que se tiene al final del período evaluado. Relacionar estos valores, permitió obtener una matriz en la cual se indica la probabilidad

de transición de cada uno de los tipos de cobertura presentes en la microcuenca. De este modo, en el Cuadro 24 se indica la matriz de probabilidad de transición

Cuadro 24. Matriz de probabilidad de transición de tipos de uso suelo.

Probabilidad de Transición	2013				
	Agricultura	Pastizal	VS BMM	BMM	Zona Urbana
Agricultura	0.985	0.000	0.011	0.000	0.004
Pastizal	0.179	0.697	0.039	0.023	0.063
1993 VS BMM	0.004	0.152	0.845	0.000	0.000
BMM	0.002	0.002	0.001	0.992	0.003
Zona Urbana	0.017	0.000	0.000	0.000	0.983

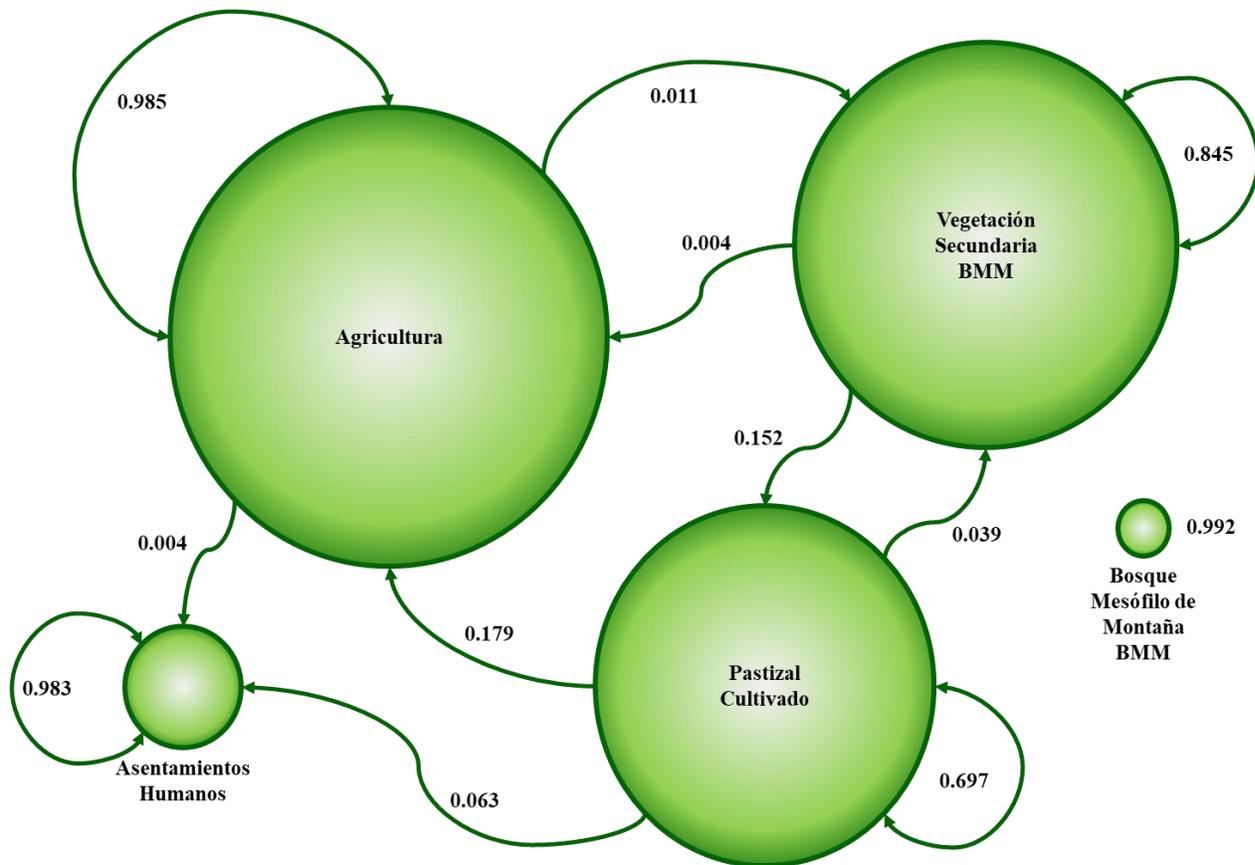
Los valores indicados representan la probabilidad de transición entre cada tipo de cobertura, así, en la diagonal principal de la matriz se presenta la probabilidad de que cada cobertura permanezca como tal durante el período evaluado. Por ejemplo, se puede observar que tanto el bosque mesófilo de montaña, como la agricultura y los asentamientos humanos presentan la mayor probabilidad de mantenerse como tales a lo largo del tiempo con un 0.992, 0.985 y 0.983 respectivamente. La mayor vulnerabilidad al cambio en la cobertura se encuentra en el pastizal con una probabilidad de transición del 0.697 seguido de la vegetación secundaria del bosque mesófilo de montaña con 0.845.

Así mismo, los demás valores dan una idea de la probabilidad de transición entre cada tipo de cobertura. De esta forma, se puede entender el proceso bajo el cual un territorio que inicialmente era considerado un pastizal, ahora se ha convertido en terreno destinado al uso agrícola y áreas que anteriormente correspondían a vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña ahora se ocupa como terrenos dedicados al pastoreo y ganadería extensiva. También es preciso mencionar que la matriz de probabilidad de transición se puede expresar en términos porcentuales, si el caso lo amerita (Cuadro 25).

El cambio de uso suelo en la microcuenca permite construir un gráfico de relaciones entre los diversos tipos de uso de suelo, este gráfico brinda una idea acerca de cómo se han presentado las transiciones a través del tiempo. La Figura 21 nos muestra las probabilidades de transición entre cada tipo de cobertura presente en la microcuenca, la cual se construyó a partir del gráfico de transiciones.

Cuadro 25. Porcentaje de transición entre cada tipo de cobertura y uso de suelo.

Porcentaje de Transición	2013				
	Agricultura	Pastizal	VS BMM	BMM	Zona Urbana
1993					
Agricultura	98.5	0.0	1.1	0.0	0.4
Pastizal	17.9	69.7	3.9	2.3	6.3
VS BMM	0.4	15.2	84.5	0.0	0.0
BMM	0.2	0.2	0.1	99.2	0.3
Zona Urbana	1.7	0.0	0.0	0.0	98.3



Fuente de elaboración propia con datos de las cartas de uso de suelo 1:250,000, series II y V. INEGI (2015)

Figura 21. Probabilidad de transición entre cada tipo de cobertura.

Como se puede observar, el pastizal cultivado es la superficie territorial que mayores cambios ha sufrido y la que presenta una menor probabilidad de mantenerse como tal en el tiempo (69.7%),

del total existente en 1993, un 17.9% se transformó en agricultura, 6.3 % en asentamientos humanos y 3.9% se convirtió en vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña.

Sin embargo, las transiciones entre este tipo de cobertura y el bosque mesófilo de montaña son de carácter bidireccional, donde un 15.2 % de vegetación secundaria de bosque mesófilo se convirtió en pastizal cultivado, lo anterior aporta una idea a cerca de la evolución de los agroecosistemas presentes en la microcuenca. Esto es, en un principio los propietarios de predios introducen ganado en zonas de bosque mesófilo y posteriormente, cuando la vegetación más abundante se ha eliminado, estos mismos territorios son convertidos en áreas dedicadas a la siembra de maíz, frijol u otros cultivos. Para finalizar este apartado, en la Figura 22 se presenta el mapa indicativo con la superficie que sufrió una transformación en su cobertura entre los años 1993 y 2013.

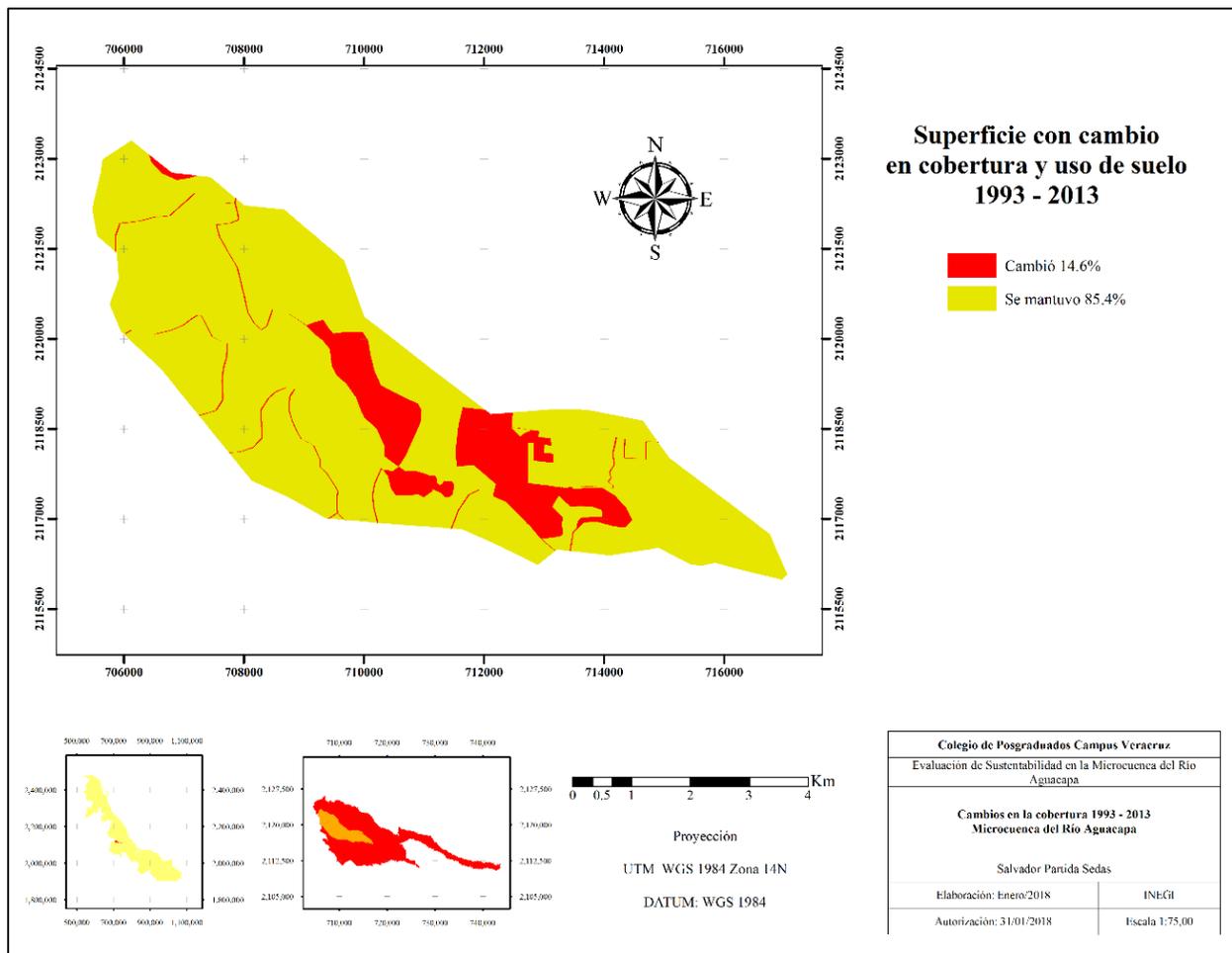


Figura 22. Cambios globales en la cobertura y uso de suelo.

Las zonas más próximas a la cabecera municipal son las áreas que más ha cambiado en la cobertura y uso de suelo, en total un 14.6% de la superficie de la microcuenca sufrió alteraciones en el uso de suelo entre 1993 y 2013. Lo anterior corresponde a una superficie de 467.3 hectáreas y el resto (2,700.2 ha) permaneció como tal en el periodo evaluado.

7.3 Evaluación de la cantidad y calidad del agua del Río Aguacapa

7.3.1 Morfometría e hidrometría del Río Aguacapa

El Río Aguacapa es un cauce intermitente el cual cuenta con una longitud de 15.47 km y una pendiente del cauce principal de 41.35 m/km. A partir de la manipulación de datos provenientes de mapas digitales de la red hídrica nacional con sistemas de información geográfica, se determinó que la longitud de la red hídrica es de 25.79 km y corresponde a una red de orden 3 (INEGI, 2000). Además, de acuerdo con los datos de la pendiente del cauce principal, se encontró que el tiempo de concentración es de 95.7 minutos y la pendiente promedio de la red hídrica es del 3.073%. En el Cuadro 26 se encuentran indicados los datos hidrométricos del Río Aguacapa.

Cuadro 26. Datos hidrométricos de la red hídrica del Río Aguacapa.

Datos de la red hídrica		
Longitud del curso principal	Metros	15,477.8
Orden de la red hídrica	Unidad	3
Longitud de la red hídrica	Km	25.8
Pendiente promedio de la red hídrica	%	3.07
Tiempo de concentración	Min	95.7
Pendiente del cauce principal	m/km	41.35

Fuente de elaboración propia a partir del conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica escala 1:1'000,000 INEGI(2000) y manipulación en Arc Gis 10.2

Durante el lapso de febrero de 2016 a febrero de 2017, en un sitio de fácil acceso, se monitoreó semanalmente el caudal del río, encontrando un caudal promedio de 595 lts-seg⁻¹ y un rango que va desde los 17.7 lts-seg⁻¹ en el mes de mayo (época de estiaje) hasta los 2,818.7 lts-seg⁻¹ en la época de lluvias, dicho comportamiento se muestra en la Figura 23:

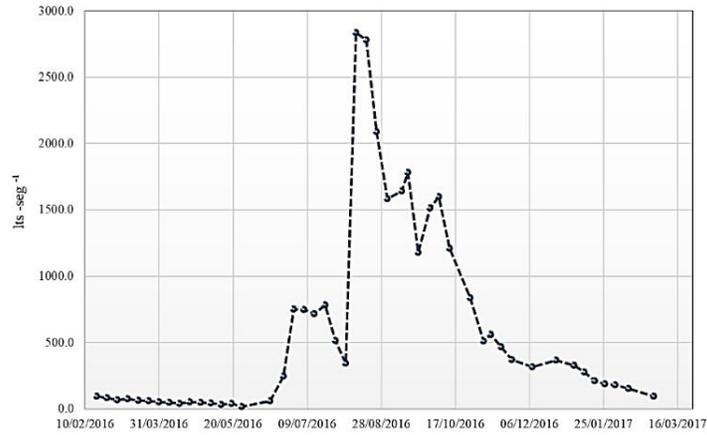


Figura 23. Caudal del Río Aguacapa durante el periodo febrero 2016 – marzo 2017.

Como puede observarse, el caudal presenta un comportamiento semejante a las condiciones de precipitación presentes en la microcuenca, un caudal pico en la época de lluvias y a partir del mes de agosto su caudal desciende hasta encontrar su valor mínimo en el mes de mayo. El conjunto de la red hídrica se presenta en la Figura 24, el cual sirvió de referencia para ubicar los puntos en los cuales se monitoreó la calidad del agua del Río Aguacapa.

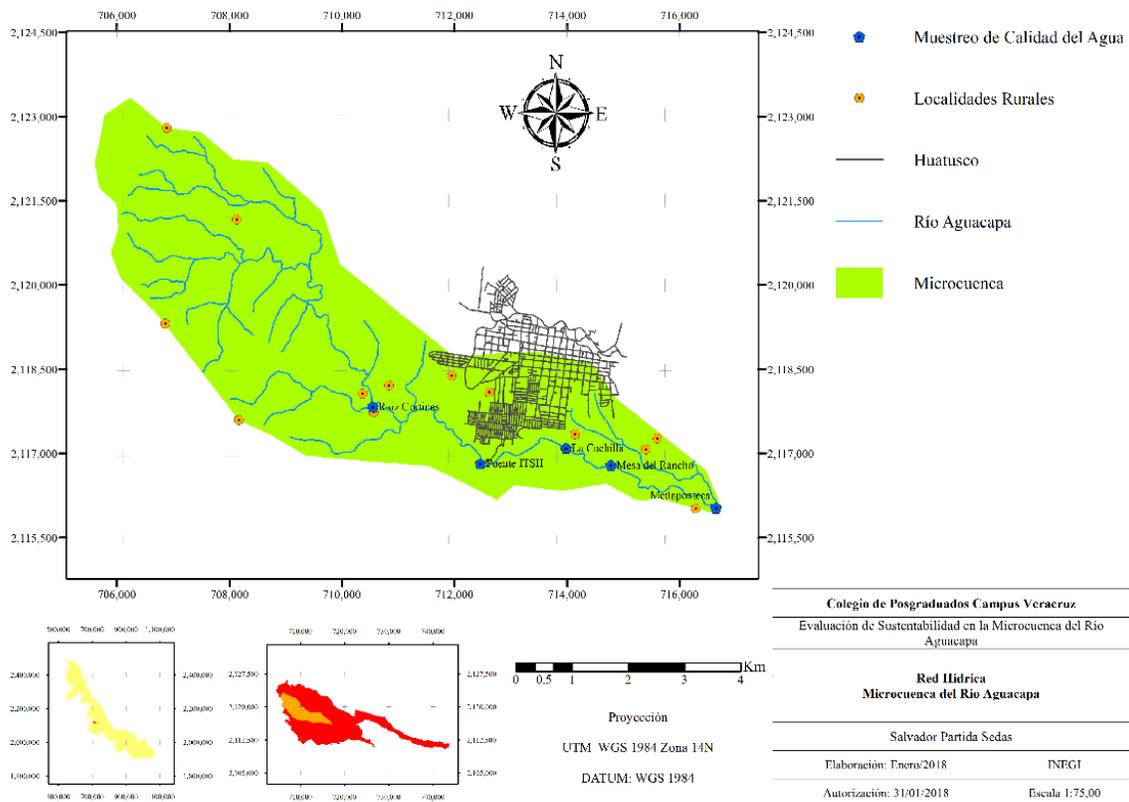


Figura 24. Red hídrica del Río Aguacapa.

7.3.2 Resultados del estudio de calidad del agua

De acuerdo con las condiciones fisiográficas de la microcuenca, la morfometría del río y los asentamientos humanos establecidos en sus márgenes, se determinaron cinco sitios de muestreo de calidad del agua, los cuales se describen a continuación:

- a) Metlapoxteca
- b) Mesa del rancho
- c) Beneficio de café La Cuchilla
- d) Puente del Instituto Tecnológico Superior de Huatusco
- e) Colonia Ruiz Cortines

Durante un período de cuatro meses (diciembre 2016 a marzo 2017), se tomó una muestra mensual en cada sitio determinando los siguientes parámetros físico-químicos y biológicos: Conductividad eléctrica, temperatura, pH, Sólidos Disueltos Totales (SDT), Oxígeno Disuelto (OD), salinidad, fósforo total, nitratos, turbidez, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y coliformes fecales. En el Cuadro 27 y en la Figura 24, se indican las coordenadas y localización de cada uno de los sitios de muestreo de calidad del agua:

Cuadro 27. Coordenadas geográficas de los sitios de muestreo.

Sitio	Coordenadas UTM	
	X	Y
Metlapoxteca	716,930.7	2'116,152.0
Mesa del Rancho	716,365.9	2'116,338.7
La Cuchilla	715,045.5	2'116,774.7
ITSH	712,593.6	2'116,916.7
Ruiz Cortines	710,641.5	2'116,895.6

El Cuadro 28 presenta de forma resumida el valor promedio para cada parámetro durante el periodo de muestreo. Como se puede observar, el sitio localizado en el puente del ITSH es el que presenta valores más aceptables en términos de calidad del agua y el sitio Metlapoxteca, el lugar más contaminado de los cinco sitios evaluados. El análisis parcial de cada uno de los parámetros sirve para observar ciertas condiciones particulares presentes en cada sitio. En función del oxígeno disuelto, el sitio Metlapoxteca es el que presenta el mayor porcentaje de saturación, sin embargo, la cantidad de colonias de coliformes fecales es el valor más alto observado; además de presentar

valores más elevados en DBO, SDT, fósforo total y turbidez. La representación gráfica de cada uno de los parámetros se aprecia en la Figura 25, indicando a su vez, los límites máximos permisibles para cada uno de ellos.

Cuadro 28. Valores obtenidos del análisis del agua.

Sitio	OD	Coliformes Fecales	pH	DBO	Nitratos	Fosfato Total	SDT	Turbidez	ΔT
	% Sat	Col/100 ml	Unid	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	ntu	C
Metlapoxteca	66.40	3361.27	7.24	59.33	13.66	2.33	129.73	9.99	1.70
Mesa del Rancho	62.80	1950.27	6.86	46.33	15.19	0.87	99.90	3.12	0.40
La Cuchilla	66.40	2419.40	7.03	48.00	19.50	0.47	103.90	2.68	0.20
ITSH	57.60	731.47	7.49	29.33	9.80	0.10	101.87	2.22	0.10
Ruiz Cortines	55.40	1168.33	7.02	32.00	8.56	0.10	59.10	1.32	5.10
Promedio	61.72	1926.15	7.13	43.00	13.34	0.77	98.90	3.87	1.50

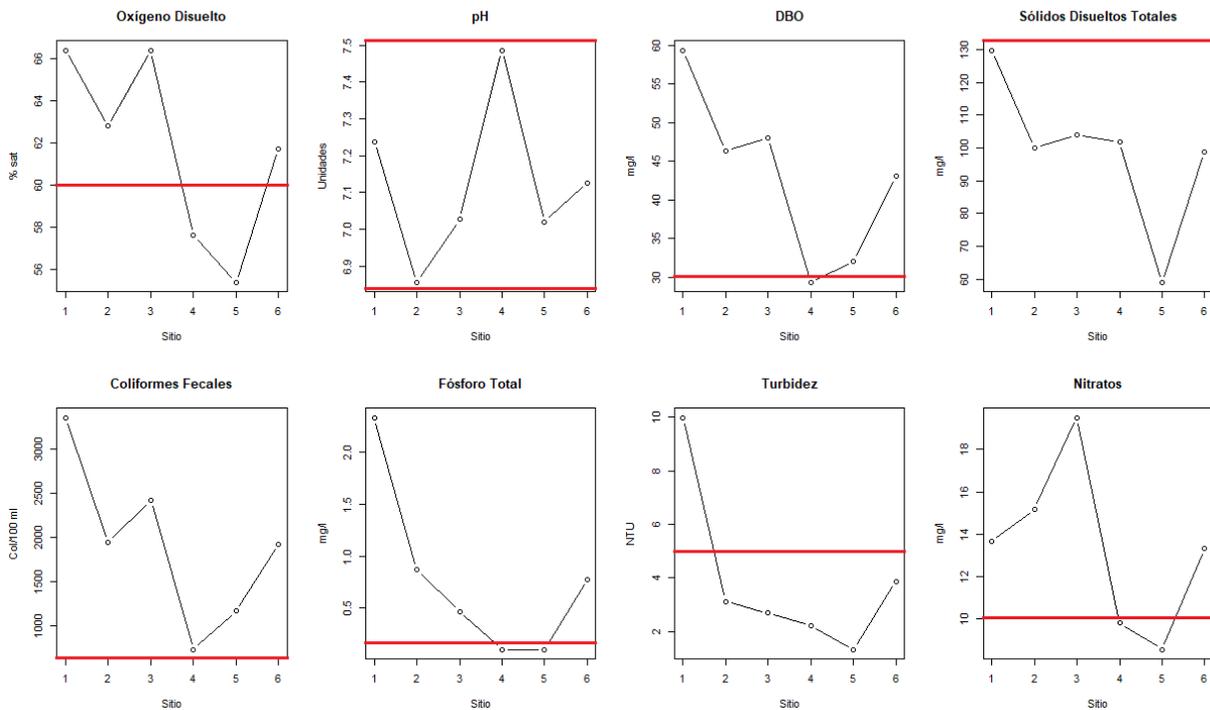


Figura 25. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Río Aguacapa.

Lo anterior, muestra la evidente contaminación del Río Aguacapa por efectos de la descarga de las aguas residuales provenientes de la ciudad de Huatusco. En términos de los criterios ecológicos de calidad del agua que maneja la Comisión Nacional de Agua (CNA), valores comprendidos entre 0 y 30 mg-It⁻¹ de DBO consideran aceptable su calidad, entre 30 y 120 mg-It⁻¹ está contaminada y mayor a 120 mg-It⁻¹ está fuertemente contaminada. En virtud a los valores obtenidos, solamente el sitio ITSH tendría una calidad aceptable y los restantes se consideran sitios contaminados. De acuerdo con los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud, la calidad del agua no cumple con los requisitos de potabilidad, en los cinco sitios de muestreo se encontró presencia de coliformes fecales, siendo el Sitio Metlapoxteca el más contaminado, esto es debido a la descarga de las aguas residuales provenientes del drenaje de la ciudad de Huatusco.

Generalmente el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, así como la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales, pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en el agua y al ser solubles, no se adsorben a los componentes del suelo por lo que son movidos con facilidad en aguas superficiales y subterráneas. La OMS ha recomendado una concentración máxima de 45 mg-It⁻¹ y este ha sido aceptado por parte de la EPA, sin embargo, esta ha establecido un límite máximo de 10 mg-It⁻¹ (Albert, 2009). De acuerdo a las normativas establecidas, solamente dos de los tres sitios cumplen con un valor menor a 10 mg-It⁻¹, por lo que el agua no debe utilizarse para potabilización. (Martínez, Ojeda y Hernández, 2011) establecieron que la concentración de nitratos en el agua subterránea es un tópico común de muchas discusiones acerca de la calidad del agua ya que es de importancia tanto para humanos como para animales. Debido a sus propiedades físicas, los nitratos no pueden olerse ni sentirse y su presencia en concentraciones potencialmente peligrosas es detectada cuando se manifiesta un problema de salud; a menudo es difícil precisar el origen de la contaminación debido a que puede provenir de muchas fuentes. La entrada de los nitratos en aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales y del efecto directo o indirecto de las actividades humanas. Los procesos naturales incluyen la precipitación, el intemperismo de los minerales y la descomposición de la materia orgánica. Los nitratos provenientes de las actividades humanas incluyen la escorrentía de terrenos cultivados, los efluentes de lagunas y tanques sépticos, la fertilización excesiva de nitrógeno, la deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Martínez, Ojeda y Hernández, 2011).

7.3.3 Índice de Calidad del Agua

El índice de calidad del agua (ICA) es una escala de cero a cien puntos que resume los resultados de la evaluación de nueve parámetros físico-químico-biológicos evaluados en una muestra determinada. Cada parámetro es estandarizado hacia un determinado nivel de calidad en función del valor obtenido versus sus valores de referencia (mínimo y máximo) dentro del agua. De acuerdo con los valores obtenidos en cada parámetro evaluado, al calcular el índice de calidad del agua, se obtuvieron los siguientes resultados (Cuadro 29):

Cuadro 29. Índice de Calidad del Agua del Río Aguacapa.

Índice General de Calidad del Agua del Río Aguacapa						
Variable	Unid de Medida	Peso Específico	Valor	Calidad	ICA	
OD	% Saturación	17%	61.7	60	10	
Coliformes Fecales	Colonias/100 ml	16%	1926.5	19	3	
pH	Unidades	11%	7.1	90	10	
DBO	mg/l	11%	43.0	5	1	
Cambio Temperatura	C	10%	5.0	73	7	
Fosfato Total	mg/l	10%	0.8	47	5	
Nitratos	mg/l	10%	13.3	46	5	
Turbidez	ntu	8%	3.9	88	7	
SDT	mg/l	7%	98.9	83	6	
					100%	53

De forma similar, con los valores reportados en el Cuadro 30, se obtuvieron los siguientes índices de calidad del agua para cada sitio:

Cuadro 30. Valores del ICA para cada sitio evaluado.

Variable	Metlapoxteca			Mesa del Rancho			La Cuchilla			ITSH			Ruiz Cortines		
	Valor	Calidad	ICA	Valor	Calidad	ICA	Valor	Calidad	ICA	Valor	Calidad	ICA	Valor	Calidad	ICA
OD	66.4	69	11.7	62.8	62	10.5	66.4	69	11.7	57.6	54	9.2	55.4	51	8.7
Coliformes Fecales	3361.3	16	2.6	1950.3	19	3.0	2419.4	17	2.7	731.5	25	4.0	1168.3	21	3.4
pH	7.2	92	10.1	6.9	86	9.5	7.0	88	9.7	7.5	93	10.2	7.0	88	9.7
DBO	59.3	5	0.6	46.3	5	0.6	48.0	5	0.6	29.3	5	0.6	32.0	5	0.6
Cambio Temperatura	1.7	86	8.6	0.4	91	9.1	0.2	92	9.2	0.1	93	9.3	5.1	72	7.2
Fosfato Total	2.3	25	2.5	0.9	43	4.3	0.5	60	6.0	0.1	96	9.6	0.1	96	9.6
Nitratos	13.7	45	4.5	15.2	43	4.3	19.5	38	3.8	9.8	51	5.1	8.6	54	5.4
Turbidez	10.0	76	6.1	3.1	90	7.2	2.7	91	7.3	2.2	92	7.4	1.3	95	7.6
SDT	129.7	81	5.7	99.9	83	5.8	103.9	83	5.8	101.9	83	5.8	59.1	87	6.1
			52.3			54.3			56.8			61.1			58.2

En forma sintética y gráfica, se presentan los valores del ICA para el Río Aguacapa en el Cuadro 31 y Figura 26, los cuales nos ayudan a comparar los resultados obtenidos

Cuadro 31. Valores del ICA para cada sitio del Río Aguacapa.

Sitio	ICA
Metlapoxteca	52.3
Mesa del Rancho	54.3
La Cuchilla	56.8
ITSH	61.1
Ruiz Cortines	58.2
Río Aguacapa	53.1

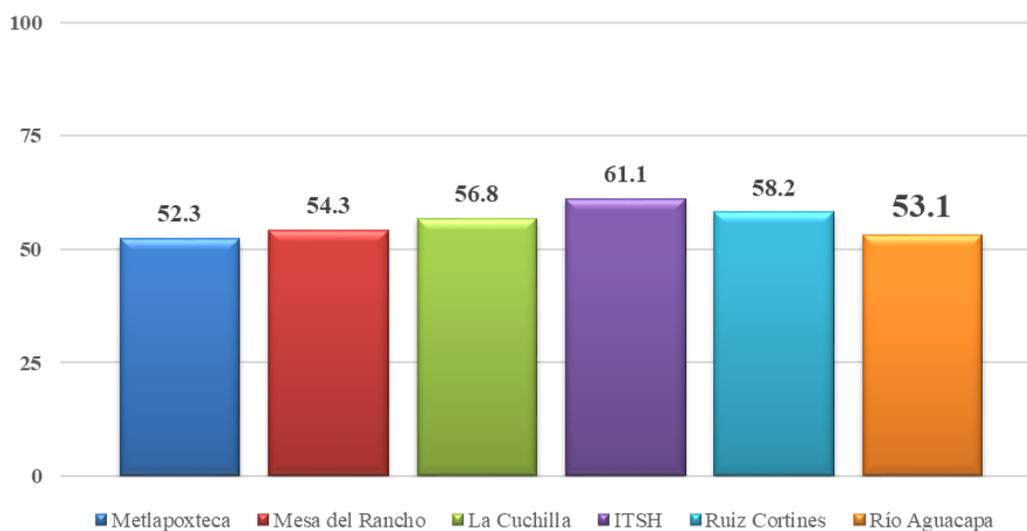


Figura 26. Índice de Calidad del Agua.

En función a los valores obtenidos para cada parámetro calculado en el Río Aguacapa, se realizó un gráfico que indique la calidad de cada uno ellos de acuerdo con los sitios de muestreo (Figura 27):

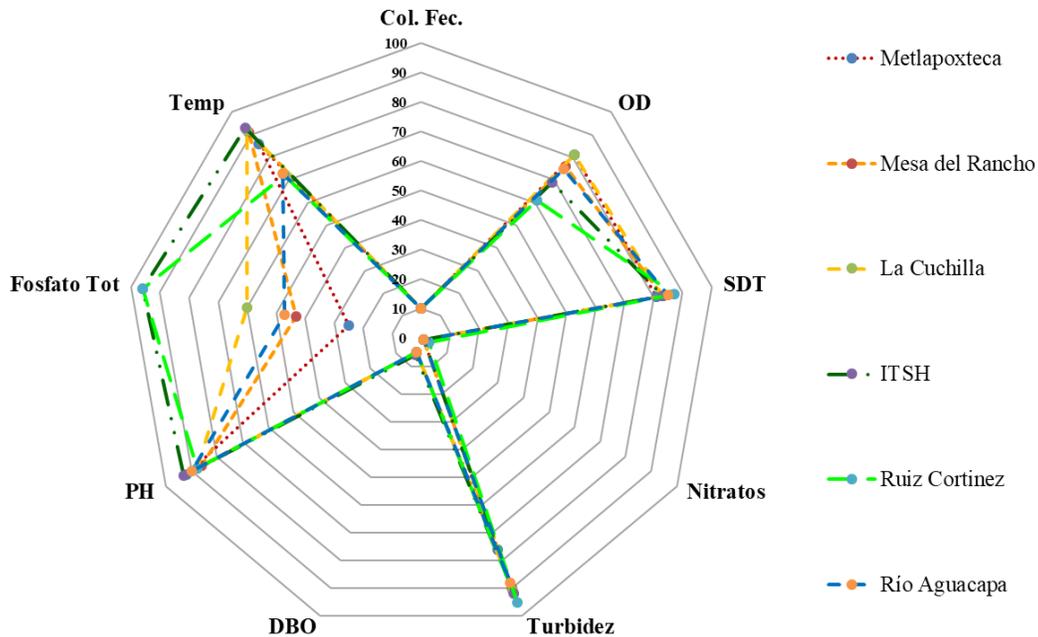


Figura 27. Nivel de calidad de los parámetros evaluados.

Como se puede observar, los parámetros con menor valor de calidad en todos los sitios son los correspondientes a DBO, coliformes fecales y nitratos y a excepción del valor de los fosfatos en los sitios “La Cuchilla” y “Metlapoxteca”, el resto de los valores para cada uno de los parámetros se encuentran por arriba de los cincuenta puntos de calidad. Como se estableció líneas arriba, el sitio Metlapoxteca es el que presenta severos problemas de contaminación, además, los sitios la cuchilla y mesa del rancho evidencian problemas graves de contaminación, situación derivada de la descarga directa de aguas residuales y pluviales provenientes de la ciudad de Huatusco.

7.4 Evaluación de calidad del suelo y velocidad de infiltración del agua

7.4.1 Resultados de la evaluación de infiltración de agua en el suelo

Derivado de la evaluación en campo de la velocidad de infiltración de agua en suelo, se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los tipos de cobertura presentes en la microcuenca (Cuadro 32):

Cuadro 32. Velocidad de infiltración por tipo de cobertura.

Cobertura	Velocidad de Infiltración
	cm-hr ⁻¹
Bosque Mesófilo de Montaña	159.9
Café	139.9
Vegetación Secundaria BMM	125.5
Agricultura de Temporal	56.6
Maíz	48.3
Ganadería	34.7
Caña	22.6

Como se puede observar, el bosque mesófilo de montaña presenta los valores de velocidad de infiltración más rápida y los agroecosistemas caña y ganado los más lentos, al graficar el conjunto de datos anterior (expresado en min-cm⁻¹), podemos observar cómo es su comportamiento individual (Figura 28):

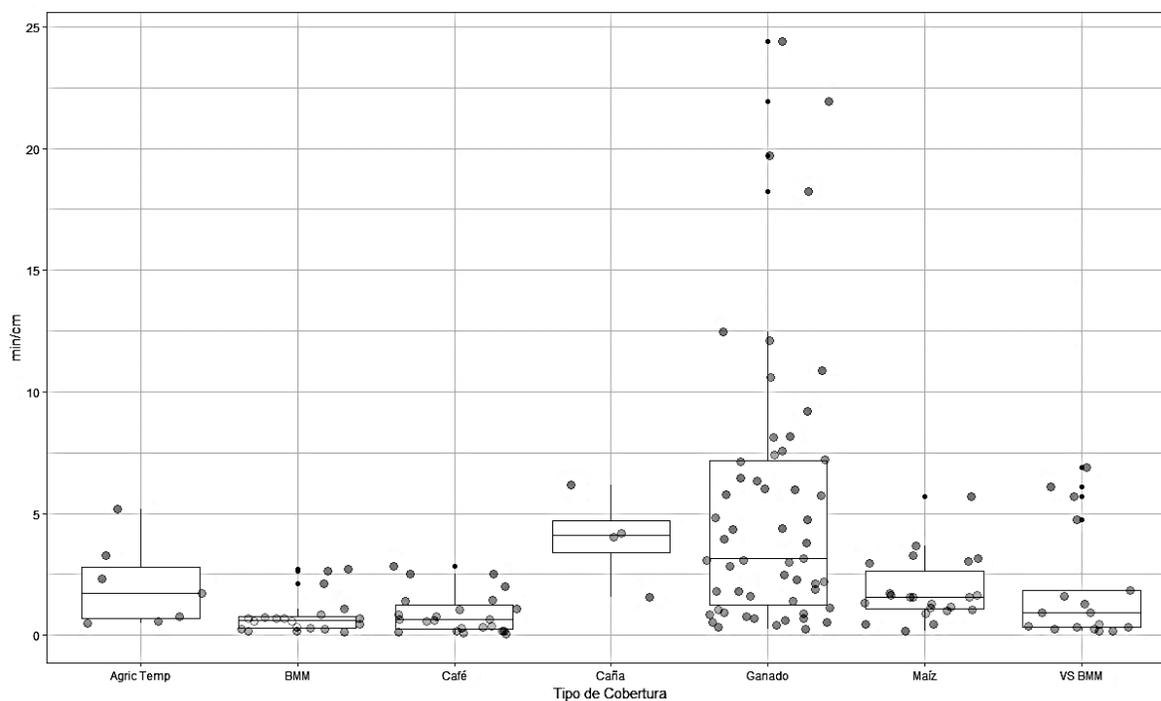


Figura 28. Velocidad de infiltración por tipo de cobertura.

El rango de valores obtenidos para la velocidad de infiltración en todos los tipos de cobertura se encuentra entre muy rápida y rápida. Para el BMM, Café y VS BMM se tienen tasas de infiltración muy rápidas y para el resto de los tipos de cobertura, la velocidad de infiltración es rápida. Los AES ganado y caña, son los tipos de cobertura que presentan las tasas de infiltración más bajas. A continuación, se presenta una referencia respecto a la velocidad de infiltración del agua en el suelo (Cuadro 33).

Cuadro 33. Valores de referencia de los tipos de velocidad de infiltración.

cm-hr-1	Clase de Infiltración
> 50.8	Muy rápida
15.24 - 50.80	Rápida
50.80 - 15.24	Moderadamente rápido
15.24 - 5.08	Moderado
5.08 - 1.52	Moderadamente lento
1.52 - 0.51	Lento
0.51 - 0.0038	Muy Lento
< 0.0038	Impermeable

La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina de agua que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo, se expresa generalmente en cm/hr o cm/min. La cantidad de agua que se infiltra en un suelo en una unidad de tiempo, bajo condiciones de campo, es máxima al comenzar la aplicación del agua en el suelo y disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que ya ha entrado en él (Cisneros-A, 2003). Con los valores resultantes, se obtuvo un mapa de la distribución espacial que presenta la velocidad de infiltración del agua en la microcuenca, mismo que se representa en la Figura 29.

Del total de valores obtenidos para la velocidad de infiltración del agua en la microcuenca, se encontraron seis observaciones en AES Ganaderos cuyo valor es menor a 5.08 cm-hr⁻¹, el resto de los valores es mayor a este valor y en promedio, se tiene que el promedio de la velocidad de infiltración del agua en la microcuenca es de 91.66 cm-hr⁻¹, esto representa una clase de infiltración muy rápida.

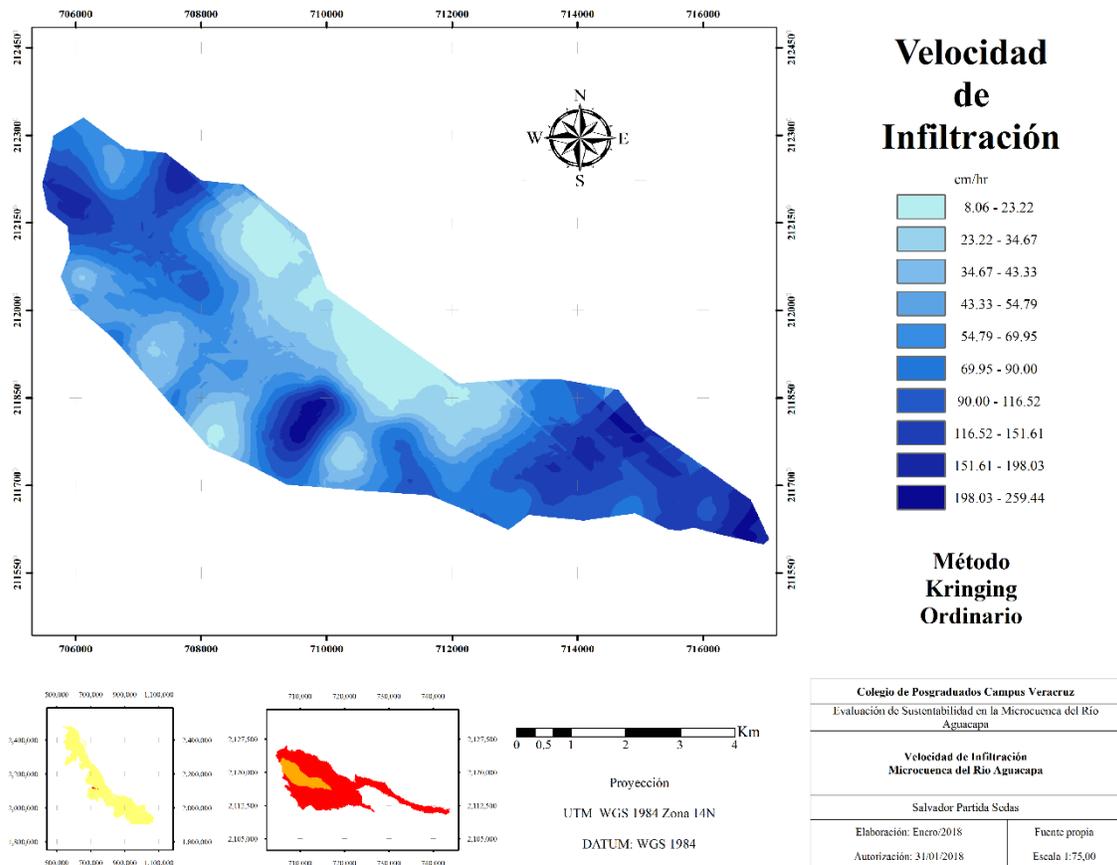


Figura 29. Distribución espacial de la velocidad de infiltración en la microcuenca.

La infiltración es un proceso complejo que depende de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo, como el contenido de humedad, de la cantidad de agua que ha recibido en el pasado, de los cambios estructurales en las capas de suelo y de cuánto aire se encuentra atrapado en el suelo (CIMMYT, 2013).

(Cisneros-A, 2003) Menciona que los factores principales que determinan la magnitud del movimiento del agua por infiltración son:

- Textura. Los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. En un suelo arenoso se favorece la infiltración.
- Estructura. Suelos con grandes agregados estables en agua tienen proporciones de infiltraciones más altas.
- Cantidad de materia orgánica. Altas proporciones de materia orgánica sin descomponer propician que una mayor cantidad de agua entre al suelo.

Muchos de los factores relacionados al suelo que controlan la infiltración también gobiernan el movimiento y la distribución del agua en el suelo, durante y después del proceso de infiltración. Por tanto, es muy importante entender la infiltración y los factores que lo afectan para un diseño y operación eficientes en los sistemas de riego (Delgadillo y Pérez, 2016). La velocidad de la infiltración básica del agua en el suelo, se define como el momento en que la variación de ésta con respecto al tiempo, es muy lenta y constante, generalmente, esta condición de la infiltración se consigue cuando el suelo ha alcanzado su capacidad de campo (Delgadillo y Pérez, 2016).

El método de anillos de infiltración sirve para hacer pruebas que determinan la permeabilidad en suelo, simulando el proceso de infiltración del agua en el suelo. Las pruebas se realizan enterrando dos anillos de forma concéntrica, uno de diámetro mayor. Se llenan ambos con agua y se mide la tasa de descenso de esta agua en el anillo interior. Se realiza así para que el flujo del agua en el suelo sea lo más vertical posible, dado que la infiltración en el anillo externo limita el flujo lateral del agua infiltrada por la anilla interna, disminuyendo la distorsión de los datos obtenidos (Delgadillo y Pérez, 2016).

7.4.2 Resultados de la evaluación de la calidad del suelo de la microcuenca

Una vez que se evaluaron los parámetros fisicoquímicos del suelo para cada una de las muestras compuestas obtenidas del proceso de muestreo del suelo, en el Cuadro 34 se indican los resultados obtenidos en laboratorio:

Cuadro 34. Resultados de la evaluación de la calidad del suelo.

Muestra	Uso de	pH	MO	Cond	N	P	K	Vel	Textura			Densidad	
	suelo								total	Infiltración	% Arc		% Lim
	principal	1 - 14	%	dS/m	%	mg/kg	mg/kg	min/cm					g/cm ³
1	Agric Temp	5.37	5.89	0.540	0.040	2.25	180.0	2.90	11.1	31.0	57.9	F. Arenoso	0.950
2	Agric Temp	6.22	9.05	0.135	0.090	0.75	350.0	1.60	9.7	45.0	45.3	Arcilloso	1.110
3	Agric Temp	5.53	3.96	0.113	0.055	1.50	366.0	2.70	16.9	34.0	49.1	Arcilloso	0.960
4	BMM	5.55	12.35	0.135	0.065	0.57	252.0	0.40	2.1	28.0	69.9	F. Arenoso	0.850
5	BMM	5.50	6.05	0.110	0.060	1.36	254.0	0.70	2.1	17.0	80.9	F. Arenoso	0.987
6	BMM	5.81	11.95	0.120	0.070	4.00	90.0	1.70	11.7	44.0	44.3	Arcilloso	0.980
7	BMM	4.85	3.36	0.076	0.650	0.47	322.0	0.90	13.1	29.0	57.9	F. Arenoso	0.920
8	BMM	5.05	4.04	0.125	0.700	3.00	502.0	1.20	2.1	38.0	59.9	F. Arenoso	1.050
9	Café	4.96	4.65	0.117	0.040	1.90	292.50	1.00	8.1	50.9	41.0	Arcilloso	0.970
10	Café	4.40	2.42	0.093	0.025	3.09	274.0	0.80	27.9	31.0	41.1	F. Arcilloso	1.040
11	Caña	5.14	12.97	0.524	0.090	2.00	25.0	3.00	15.7	35.0	49.3	Arcilloso	1.010
12	Ganado	5.66	5.80	0.150	0.070	1.00	210.0	4.70	8.1	23.0	68.9	F. Arenoso	0.980
13	Ganado	5.22	4.56	0.117	0.060	1.25	100.0	3.90	17.7	42.0	40.3	Arcilloso	0.880
14	Ganado	5.13	14.03	0.129	0.070	2.50	210.0	7.80	8.7	41.0	50.3	Arcilloso	0.960
15	Ganado	5.50	8.58	0.155	0.075	2.32	290.0	7.40	7.7	23.0	69.3	F. Arenoso	0.984
16	Ganado	5.04	12.98	0.267	0.080	4.25	720.0	4.20	8.4	44.0	47.6	Arcilloso	1.040
17	Maíz	5.57	12.31	0.109	0.080	2.46	272.0	1.40	2.1	38.0	59.9	F. Arenoso	1.090
18	Maíz	5.87	3.91	0.180	0.050	5.00	130.0	2.50	24.1	39.0	36.9	Arcilloso	1.040
19	Maíz	5.05	3.63	0.117	0.110	0.96	328.0	2.84	0.5	46.6	52.9	F. Arenoso	1.200
<i>Promedio</i>		<i>5.34</i>	<i>7.50</i>	<i>0.17</i>	<i>0.13</i>	<i>2.14</i>	<i>271.97</i>	<i>2.72</i>	<i>10.40</i>	<i>35.76</i>	<i>53.83</i>		<i>1.00</i>

El comportamiento gráfico de cada una de las variables evaluadas se muestra a en la Figura 30

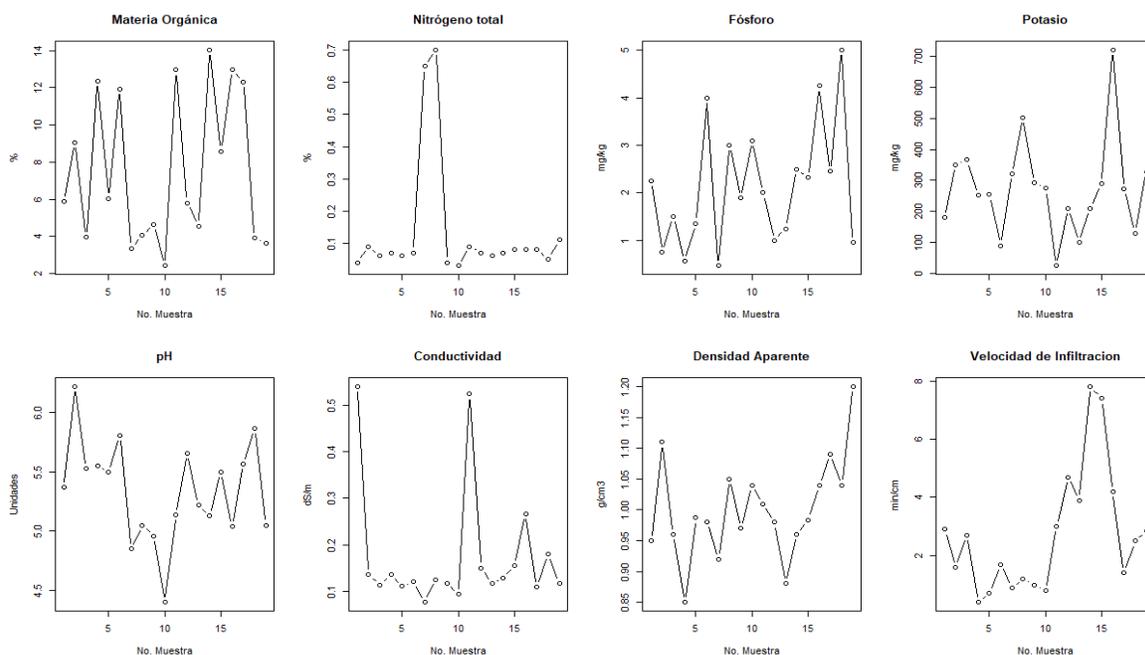


Figura 30. Resultado del análisis del suelo.

De forma resumida, en el Cuadro 35 se presentan los valores obtenidos de los parámetros fisicoquímicos del suelo para cada uno de los agroecosistemas presentes en la microcuenca Cuadro 35. Valores de los parámetros fisicoquímicos del suelo.

Variable	Maíz	Café	Caña	Agric	Ganado	BMM	Microcuenca
pH	5.5	4.68	5.135	5.71	5.31	5.35	5.28
MO	6.62	3.54	12.97	6.3	9.19	7.55	7.70
Conductividad	0.135	0.105	0.524	0.263	0.164	0.113	0.22
N total	0.08	0.033	0.09	0.062	0.071	0.309	0.11
P	2.81	2.49	2	1.5	2.26	1.88	2.16
K	243	283	25	299	306	284	240.00
Vel Infiltración	2.25	0.9	3	2.4	5.6	0.98	2.52

A través de la manipulación de los resultados obtenidos mediante sistemas de información geográfica y utilizando el método de interpolación espacial de Kringing Ordinario, se

elaboraron los mapas de distribución espacial correspondientes a cada uno de los parámetros fisicoquímicos del suelo, los cuales se indican a continuación:

Distribución espacial de Nitrógeno. El rango de valores obtenidos para el nitrógeno se encuentra entre 0.025% y 0.727%, donde la diferencia entre el valor máximo y mínimo es de 0.702%, en la Figura 31 se presenta una distribución espacial del nitrógeno en la microcuenca del Río Aguacapa. Los valores más bajos de nitrógeno se encuentran en la zona baja de la microcuenca, principalmente donde se encuentra establecido el agroecosistema café y los valores más altos obtenidos se distribuyen en la zona comprendida por la cobertura de bosque mesófilo de montaña.

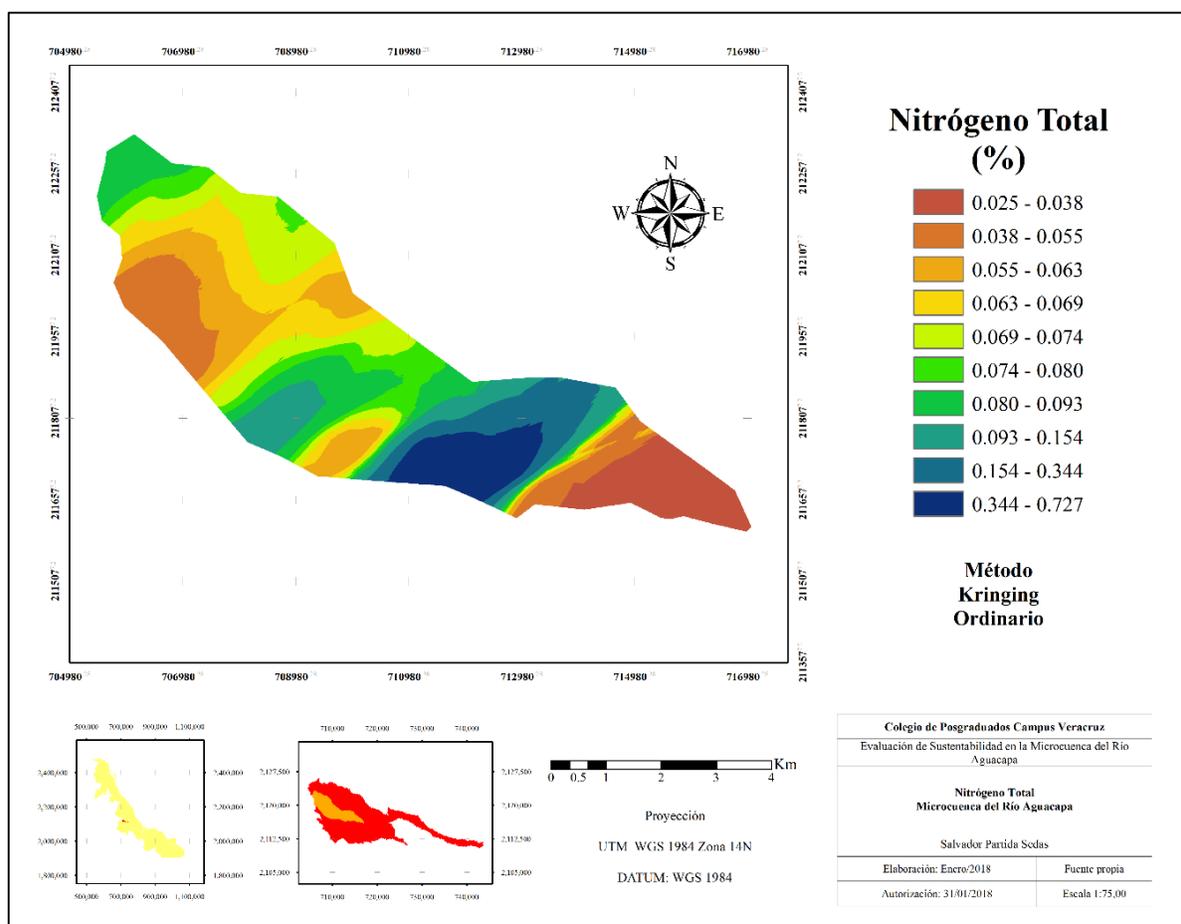


Figura 31. Distribución espacial del Nitrógeno Total en la microcuenca.

La mayor parte de la microcuenca presenta valores comprendidos entre 0.055% y 0.093% de nitrógeno en el suelo, estos valores corresponden a los agroecosistemas caña, ganado, maíz y agricultura de temporal. En términos de calidad del suelo se considera que este tipo de agroecosistemas presentan una alta deficiencia en nitrógeno, solamente las zonas cuyos

valores se encuentran por encima del 0.1 % de nitrógeno se consideran como suelos con buena y excelente calidad en términos de este parámetro.

Distribución espacial de Fósforo. El segundo macronutriente analizado es el fósforo, cuyos valores se encuentran en el rango que va de 0.404 mg·kg⁻¹ a 5.737 mg·kg⁻¹. Como se puede observar en la ilustración, el 90% del territorio corresponde a zonas donde el valor del fósforo está por debajo de 2.83 mg·kg⁻¹.

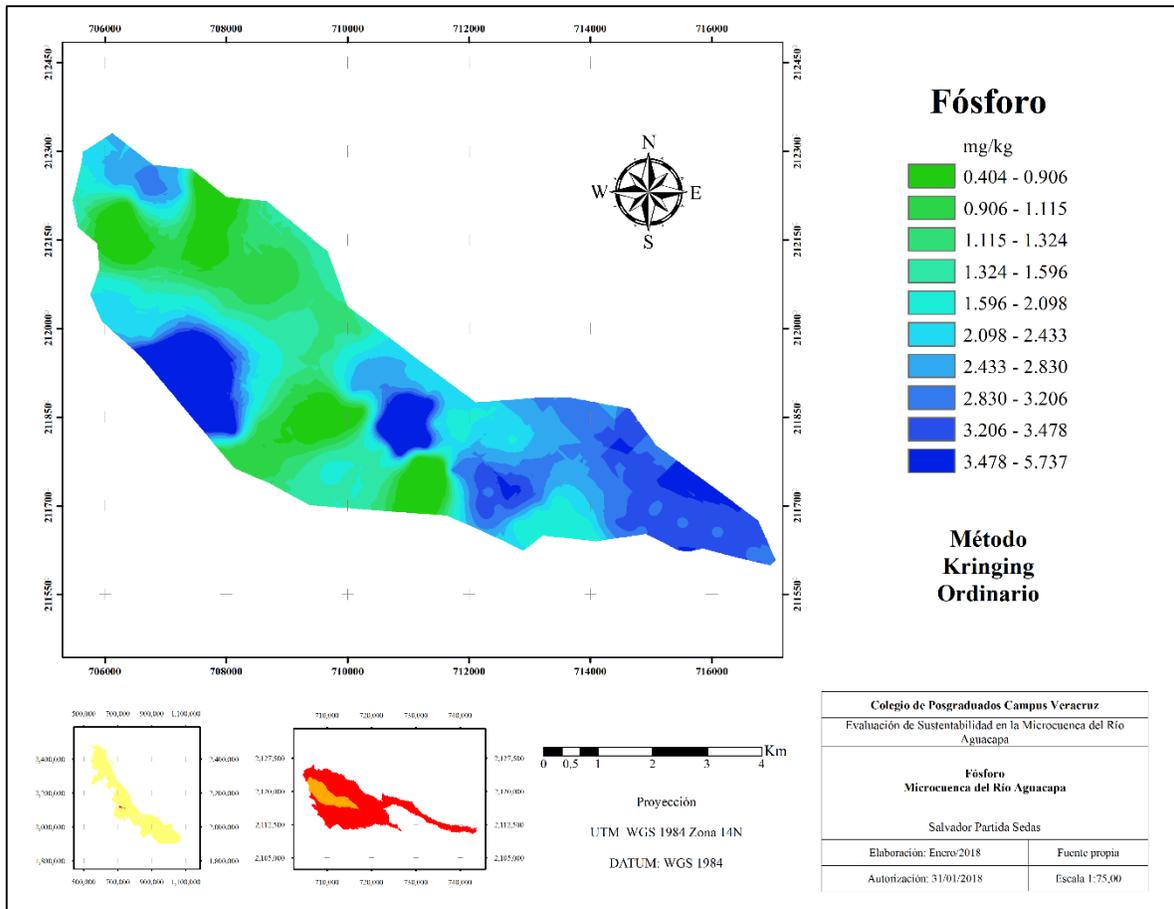


Figura 32. Distribución espacial del fósforo en la microcuenca.

En términos de calidad, se puede establecer que los valores de este parámetro en la microcuenca son muy pobres.

Distribución espacial de Potasio. El conjunto de valores obtenidos para el potasio se indica en la Figura 33, el rango es muy variable y está comprendido entre 22.57 mg·kg⁻¹ hasta los 1,008.1 mg·kg⁻¹. Sin embargo, se puede afirmar que los valores de este parámetro se

encuentran entre aceptables a excelentes, siendo menor la superficie cuyos valores presenta deficiencia de este nutriente en el suelo.

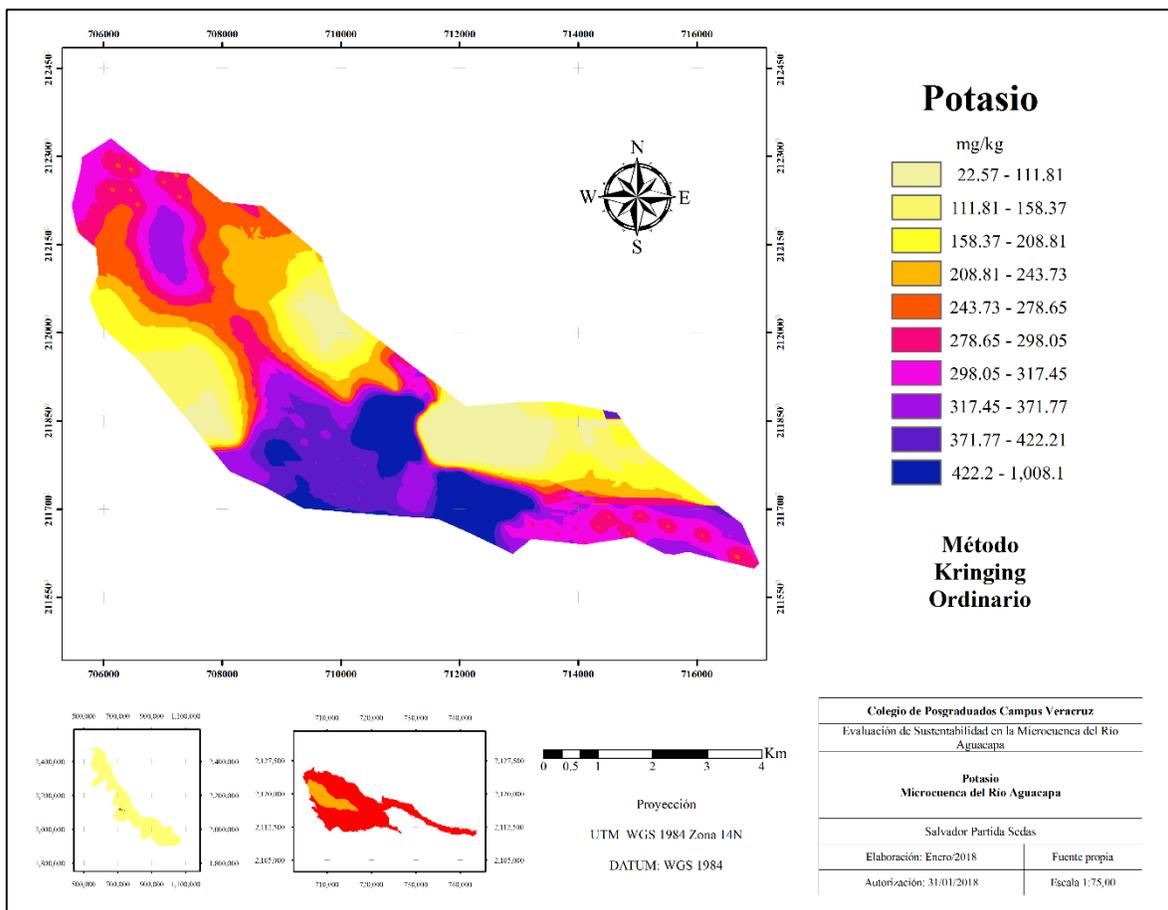


Figura 33. Distribución espacial del potasio en la microcuenca.

Distribución espacial de Materia Orgánica. El rango de valores de materia orgánica se encuentra entre un 2.4 % hasta un máximo de 15.3 %, de forma general se puede establecer que las zonas comprendidas por los agroecosistemas maíz, café, caña y ganado son las que presentan los valores más bajos posibles. Ciertas zonas de la región central de la microcuenca y la parte alta de la misma son las que presentan los valores más elevados de porcentaje de materia orgánica. La distribución espacial de este parámetro se representa en la Figura 34.

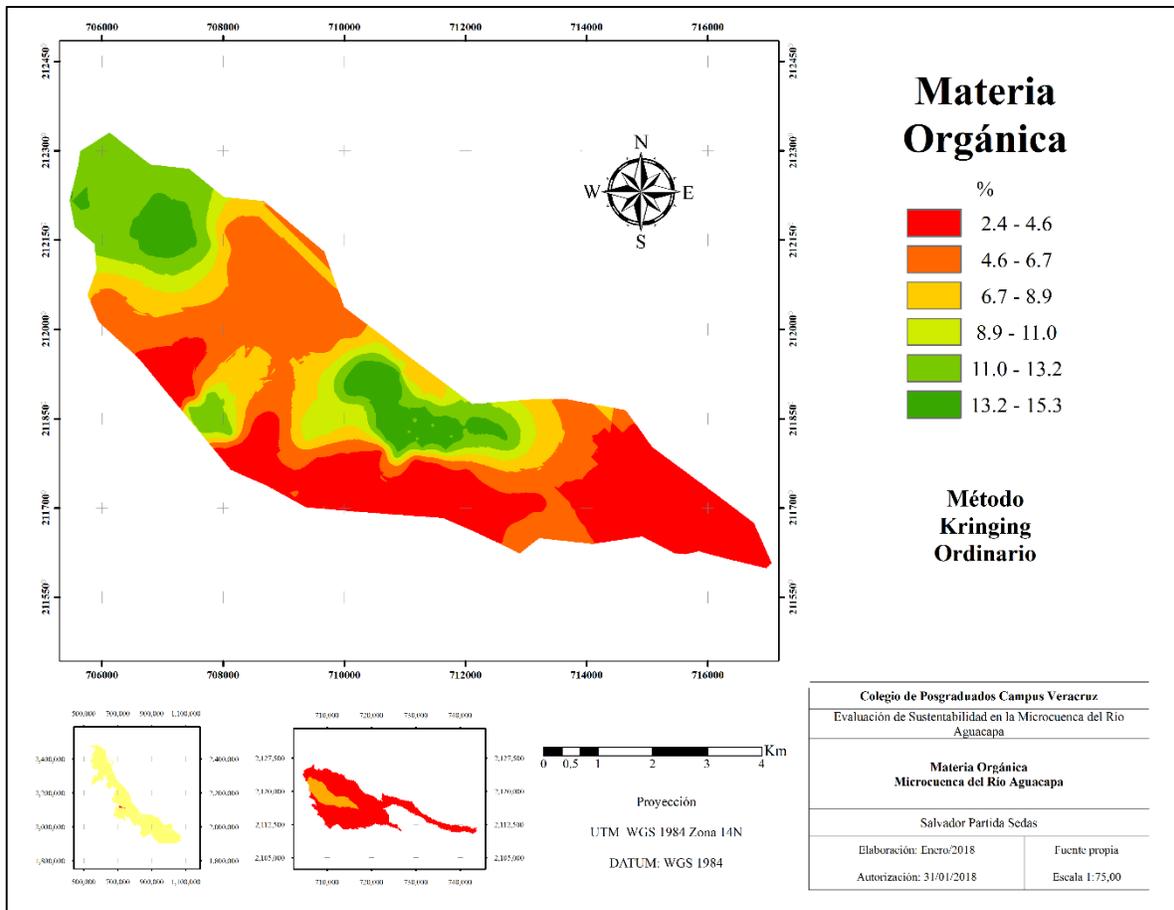


Figura 34. Distribución espacial de la materia orgánica en la microcuenca.

De acuerdo a los parámetros establecidos en la NOM 021 de la SEMARNAT, un suelo cuyos valores se encuentran por debajo del 4% materia orgánica se consideran deficientes, entre 4% y 10.9 % aceptables y mayor a 11% suelos excelentes (SEMARNAT, 2002). En función a estos valores, podemos observar que un alto porcentaje de la microcuenca presenta valores entre aceptable y deficiente en función de la materia orgánica.

Distribución espacial del Potencial de Hidrógeno. El potencial de hidrógeno (pH) es un parámetro fisicoquímico del suelo muy importante debido a su capacidad de liberación de macro y micro nutrientes. De acuerdo con los resultados obtenidos, el rango de valores del pH en la microcuenca se encuentra comprendido entre 4.3 y 6.5, es decir, se consideran suelos ácidos, que van desde muy ácidos hasta ligeramente ácidos. Su distribución espacial se representa en la Figura 35

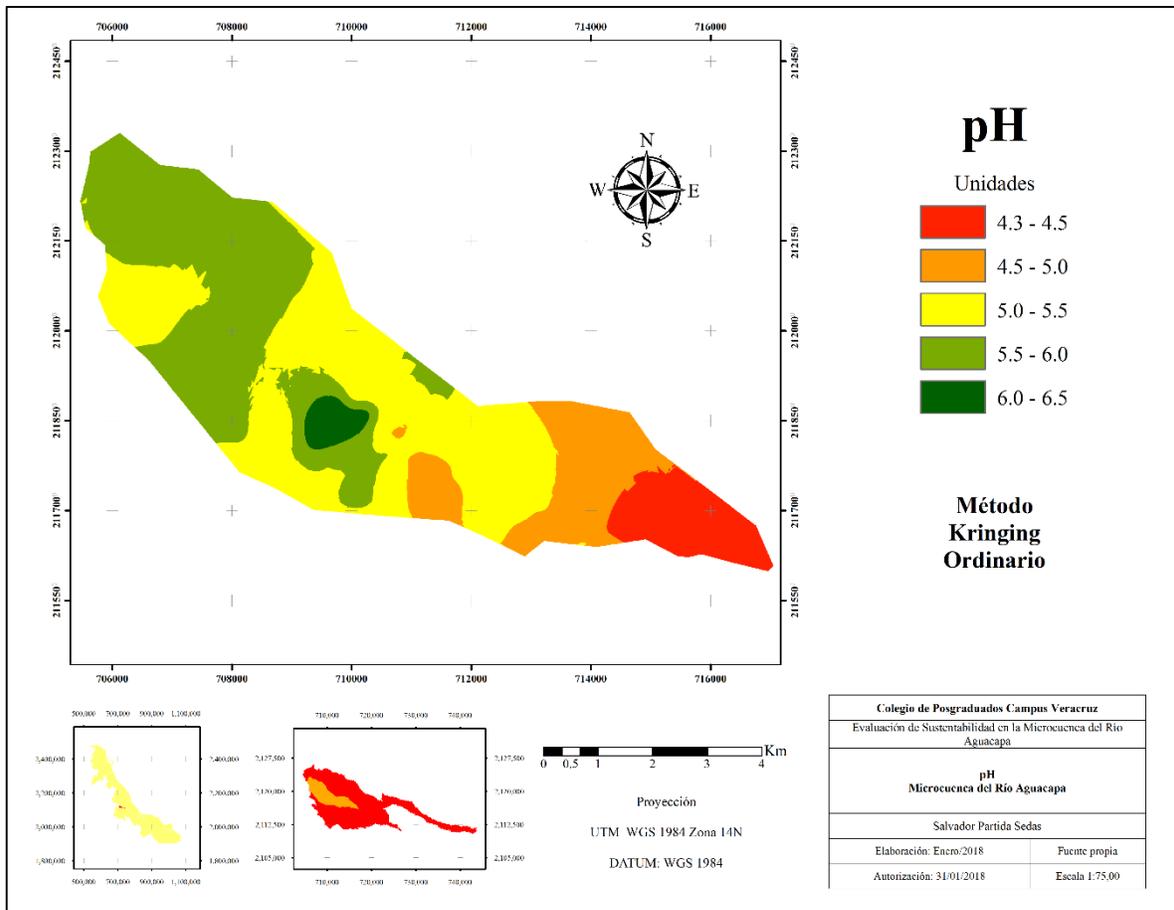


Figura 35. Distribución espacial del pH en la microcuenca.

Los suelos mayormente ácidos se encuentran en la zona baja de la microcuenca, donde el agroecosistema predominante es el café y en la zona media de la microcuenca presenta valores del potencial de hidrógeno entre cinco y seis, es decir ácidos a ligeramente ácidos, y, por último, la zona alta de la microcuenca es la que presenta suelos ligeramente ácidos, y en donde se encuentran las mejores condiciones en función de este parámetro.

Distribución espacial de la Conductividad. La salinidad es un parámetro que nos indica la capacidad de conducción eléctrica del suelo, es una referencia a cerca de la presencia de iones que pueden afectar su calidad. Al evaluar la conductividad eléctrica en la microcuenca, se encontró que el rango de valores de este parámetro está comprendido entre $0.072 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y $0.589 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, su distribución espacial se presenta en la Figura 36

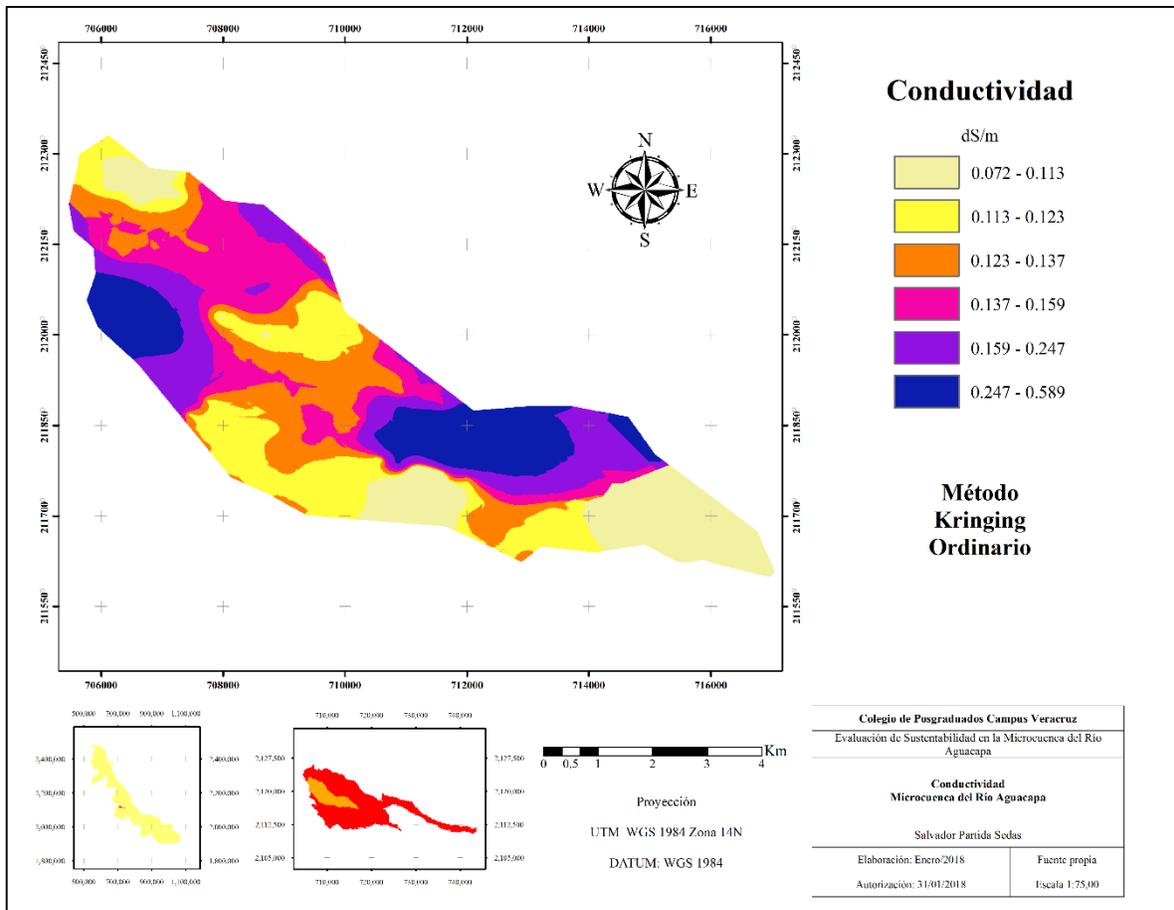


Figura 36. Distribución espacial de la conductividad eléctrica en la microcuenca.

De acuerdo a (SEMARNAT, 2002) se puede establecer que el suelo no contiene gran cantidad de sales y es excelente en términos de este parámetro.

7.4.3 Índice de Calidad del Suelo (ICS)

Al correlacionar los valores de cada parámetro con el nivel de calidad propuesto en cada uno de ellos, se obtuvo una normalización de los datos para establecer una escala que maneje los mismos criterios de calidad. Así, en el Cuadro 36 que se indica a continuación, se indican los rangos de valores para asignar cada una de las ponderaciones:

El cuadro 36 fue realizado a partir de los valores de referencia establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT (SEMARNAT, 2001) con la finalidad de construir una escala de referencia para establecer criterios de sustentabilidad en cada uno de los parámetros evaluados en el índice de Calidad del Suelo.

Cuadro 36. Criterios de sustentabilidad para indicadores de calidad del suelo.

Variables	Menor	< -----	Sustentabilidad	----- >	Mayor
	20	40	60	80	100
pH	Perjudicial	Malo	Aceptable	Bueno	Excelente
	<4.5, >9.6	4.6-5.1, 8.9-9.5	5.2-5.7, 8.3-8.8	5.8-6.4, 7.6-8.2	6.5 -7.5
MO	Deficiente	Mala	Aceptable	Buena	Excelente
	<4.0	4.1 - 6.0	6.1 - 10.9	11.0 - 16.0	>16.0
Conductividad	Pésima	Mala	Aceptable	Buena	Excelente
	8.1 - 16.0	4.1 - 8.0	2.1 - 4.0	1.1. - 2.0	< 1.0
N total	Pésima	Mala	Aceptable	Buena	Excelente
	<0.05	0.05 - 0.10	0.10 - 0.15	0.15 - 0.25	>0.25
P	Deficiente	Malo	Aceptable	Bueno	Excelente
	<15	16 - 20	21 - 24	25 - 29	>30
K	Deficiente	Malo	Aceptable	Bueno	Excelente
	< 95	96 - 170	171 - 245	246 -330	>331
Velocidad de Infiltración	Impermeable	Lento	Moderada	Rápida	Muy rápida
	> 15,748	118.1 - 15,748	11.81 - 118.1	1.18 - 11.81	< 1.18

Lo anterior, permite asignar una ponderación entre 0 y 100 a cada uno de los valores obtenidos en las muestras de suelo analizadas. En el Cuadro 37, se indica el valor del ICS para cada tipo de cobertura y uso de suelo presentes en la microcuenca del Río Aguacapa.

El AES Café es quien presenta el menor valor para el ICS con 48 puntos, indicativo de una mala calidad de suelo; en orden creciente de su calidad, se encuentran los AES caña (ICS=52), maíz (ICS=57), ganado (ICS=58) y cultivos de temporal (ICS=60) los cuales presentan una calidad de suelo media, solamente el bosque mesófilo de montaña (BMM) presenta una calidad buena (ICS=71).

La Figura 37 presenta el nivel de calidad de cada parámetro y tipo de cobertura, este nivel está construido en una escala entre 0 y 1, donde este último valor representa el nivel óptimo para cada uno de ellos.

Cuadro 37. Valores del ICS para cada tipo de uso de suelo.

Variable	Maíz		Café		Caña		Agric Temp		Ganado		BMM		
	Val	ICS	Val	ICS	Val	ICS	Val	ICS	Val	ICS	Val	ICS	
pH	5.50	9	4.68	6	5.14	6	5.71	9	5.31	9	5.35	9	
MO	6.62	12	3.54	4	12.97	16	6.30	12	9.19	12	7.55	12	
Conductividad	0.14	10	0.11	10	0.52	10	0.26	10	0.16	10	0.11	10	
N total	0.08	6	0.03	3	0.09	6	0.06	6	0.07	6	0.31	15	
P	2.81	3	2.49	3	2.00	3	1.50	3	2.26	3	1.88	3	
K	243.00	9	283.00	12	25.00	3	299.00	12	306.00	12	284.00	12	
Velocidad de Infiltración	2.25	8	0.90	10	3.00	8	2.40	8	5.60	6	0.98	10	
			57		48		52		60		58		71

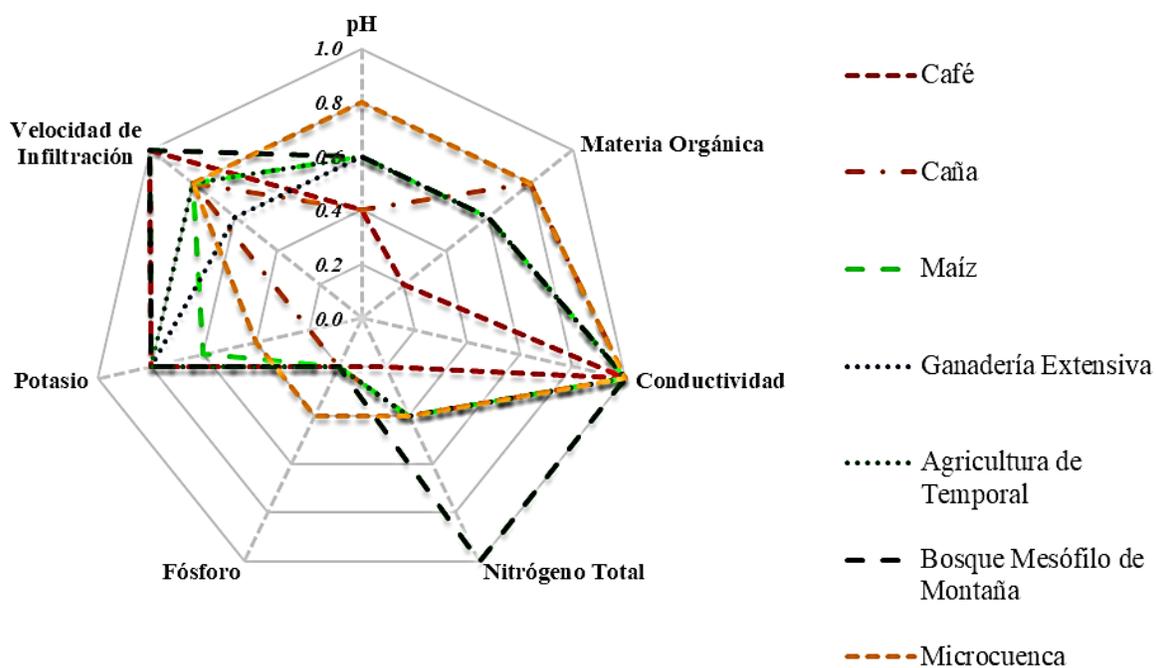


Figura 37. Nivel de calidad de los indicadores de suelo.

El bosque mesófilo de montaña es el tipo de cobertura cuyos parámetros fisicoquímicos del suelo son los más consistentes, salvo en la cantidad de fósforo cuyo valor es bajo, en los demás, el nivel de calidad de cada parámetro está por arriba del 60%, de hecho, todos los tipos de cobertura presentan valores muy bajos de fósforo en el suelo.

Como se estableció anteriormente, el valor de la velocidad de infiltración presenta niveles de sustentabilidad elevados y lo mismo sucede para los valores de la conductividad eléctrica del suelo. En el caso del valor de la materia orgánica, destaca la calidad del suelo del bosque mesófilo de montaña y los AES caña y ganado cuyos valores son mayores a 60%, los demás agroecosistemas presentan valores menores a 60%, siendo el café el tipo de cobertura con menor cantidad de materia orgánica en el suelo. Con el conjunto de valores obtenidos para cada uno de los parámetros fisicoquímicos del análisis del suelo, se procedió a calcular el índice de calidad del suelo (ICS). Se obtuvo el ICS para cada tipo de cobertura y un valor general para la microcuenca, el cual nos arroja los siguientes resultados:

Cuadro 38. Índice de calidad del suelo para cada tipo de uso de suelo y AES.

Cobertura	ICS	Calidad
Café	48	Moderada
Caña	52	Moderada
Maíz	57	Moderada
Ganadería Extensiva	58	Moderada
Agricultura de Temporal	60	Alta
Bosque Mesófilo de Montaña	71	Alta
<i>Microcuenca</i>	58	<i>Moderada</i>

En forma gráfica, se puede observar el comportamiento del ICS para cada uno de los agroecosistemas presentes en la microcuenca (Figura 38); en general, la microcuenca presenta un ICS igual a 58 unidades, siendo el AES Café el que presenta el desempeño más pobre y el BMM quien obtuvo un valor de ICS = 71, indicativo de una elevada calidad del suelo.

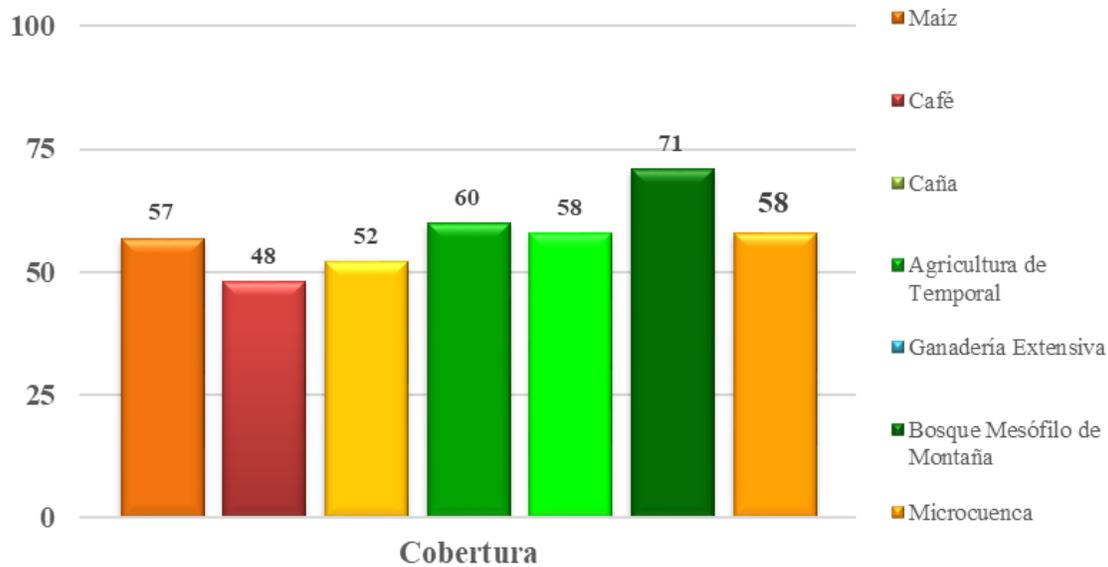


Figura 38. Índice de Calidad del Suelo de la microcuenca del Río Aguacapa.

La diferencia en términos de calidad del suelo es significativa al momento de comparar cada uno de los tipos de cobertura presentes en la microcuenca, siendo el bosque mesófilo de montaña un referente en términos de los parámetros fisicoquímicos del suelo con respecto a los agroecosistemas y otros tipos de cobertura analizados.

7.5 Aspectos socioculturales y económicos de la microcuenca

7.5.1 Población de la microcuenca

La población asentada en las márgenes del Río Aguacapa se caracteriza por un conjunto de localidades rurales, suburbanas y urbana, siendo la cabecera municipal el mayor número de habitantes quienes se encuentran adyacentes a la superficie de la microcuenca. En la Figura 39 podemos observar cada una de estas localidades. INEGI (2011) reporta en datos del censo poblacional de 2010, que en la microcuenca del Río Aguacapa se encontraban asentadas 37,725 Habitantes, distribuidas en una localidad urbana, dos colonias suburbanas y 9 localidades rurales.

Debido a las características fisiográficas del territorio de la microcuenca, la ciudad de Huatusco se encuentra localizada entre dos microcuencas: Citlalapa y Aguacapa; esta característica presenta ciertas particularidades en términos de los efectos antrópicos sobre los servicios ambientales del territorio; el servicio de agua potable para los pobladores de la ciudad, proviene de un trasvase de la microcuenca del río seco hacia la microcuenca del Río

Aguacapa ; sin embargo, el drenaje y las descargas de aguas residuales y pluviales de la ciudad se vierten puntualmente sobre los ríos Citlalapa y Aguacapa.

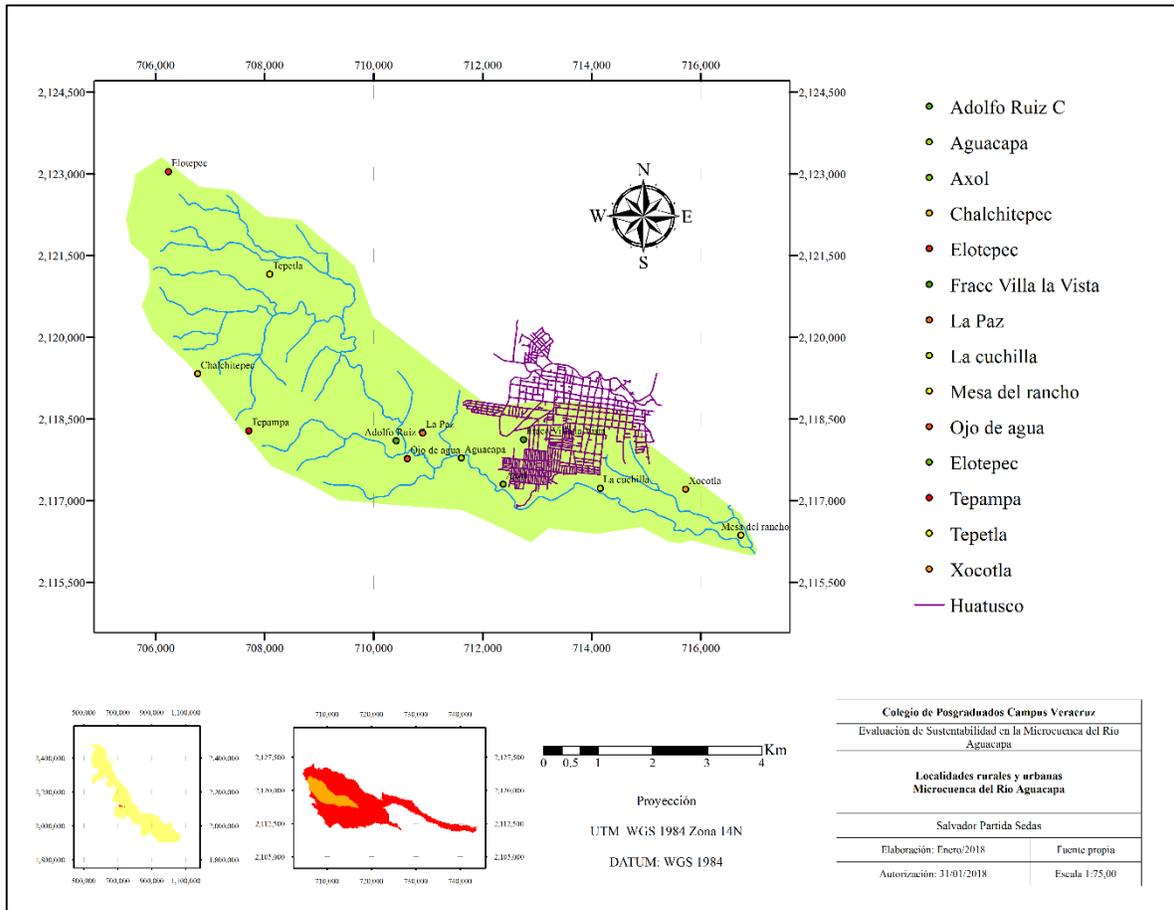


Figura 39. Localidades urbanas y rurales de la microcuenca.

En el Cuadro 39 se indican los datos correspondientes a la población de la microcuenca en el año 2010:

7.5.2 Indicadores sociales y económicos en la microcuenca

En esta última sección, se presentan los resultados de indicadores sociales y económicos reportados por parte de autoridades gubernamentales y organizaciones mundiales, para efectos de la evaluación de esta dimensión en la microcuenca del Río Aguacapa, se consideraron los índices de rezago social, de desarrollo humano, marginación e indicadores económicos, mismos que fueron integrados en dos índices: Índice de Desarrollo Social (IDSc) e Índice de Desarrollo Económico (IDE).

Cuadro 39. Datos poblacionales de la microcuenca.

Localidad	Tipo	Población	Hombres		Mujeres		Altitud SNM
Huatusco de Chicuéllar	Urbana	31305	14635	46.7%	16670	53.3%	1291
Colonia Pastoría Cuatro	Suburbana	598	305	51.0%	293	49.0%	1381
Fraccionamiento Villa la Vista	Suburbana	135	65	48.1%	70	51.9%	1358
Adolfo Ruiz Cortines (La Pastoría)	Rural	643	318	49.5%	325	50.5%	1347
La Cuchilla	Rural	28	13	46.4%	15	53.6%	1235
Chalchitepec	Rural	632	311	49.2%	321	50.8%	1828
Elotepec	Rural	1881	935	49.7%	946	50.3%	1851
Mesa del Rancho	Rural	857	428	49.9%	429	50.1%	1159
Tepampa	Rural	840	411	48.9%	429	51.1%	1729
Tepetla	Rural	148	84	56.8%	64	43.2%	1541
Axol	Rural	20	7	35.0%	13	65.0%	1334
La Paz	Rural	188	103	54.8%	85	45.2%	1359
		37275	17615	47.3%	19660	52.7%	

7.5.2.1 Indicadores de rezago social

De acuerdo con datos reportados por (CONEVAL, 2016) en el año 2015, el municipio de Huatusco presentaba un grado de rezago social medio y se encontraba ubicado en el lugar 1,110 a nivel nacional. En el Cuadro 40 se presentan los principales indicadores que maneja el Consejo Nacional de Evaluación en términos de rezago social; a partir de estos valores, se realizó una estimación para la población asentada en la microcuenca en los años 2010 y 2015. En términos de educación, existe un alto porcentaje de población con educación básica incompleta y un número importante de pobladores entre 6 a 14 años que no asiste a la escuela, además, la población de quince años o más analfabeta no se ha disminuido considerablemente entre los años 2010 y 2015. Analizando las características de las viviendas, se puede observar que las políticas sociales implementadas por parte de los gobiernos locales han reducido en forma mínima, el acceso a los principales servicios básicos: agua entubada, drenaje y energía eléctrica. Solamente se han mejorado los indicadores de acceso a servicios de salud y reducción en el número de viviendas con piso de tierra.

Cuadro 40. Indicadores de rezago social.

Indicadores de Rezago Social	Microcuenca			
	Huatusco		Aguacapa	
	2010	2015	2010	2015
Población total	54,561	60,674	37,275	41,451
Población de 15 años o más analfabeta (%)	12.40	10.68	4,624	4,427
Población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela (%)	8.12	6.49	3,027	2,690
Población de 15 años y más con educación básica incompleta (%)	58.01	52.20	21,625	21,639
Población sin derechohabiencia a servicios de salud (%)	54.86	23.53	20,448	9,753
Viviendas con piso de tierra (%)	20.25	6.49	7,550	2,690
Viviendas que no disponen de excusado o sanitario (%)	2.71	1.60	1,008	663
Viviendas que no disponen de agua entubada de la red pública (%)	6.33	6.08	2,360	2,520
Viviendas que no disponen de drenaje (%)	6.80	8.70	2,534	3,604
Viviendas que no disponen de energía eléctrica (%)	2.77	2.19	1,032	907
Índice de rezago social	0.00178	-0.0763		
Grado de rezago social	Bajo	Medio		
Lugar que ocupa en el contexto nacional	1107	1110		

De acuerdo con otros indicadores sociales que reporta el CONEVAL, en el Cuadro 41 se presenta el valor de los indicadores de pobreza, privación social, carencias sociales y bienestar económico de la población; con estos indicadores y tomando como línea base la población asentada en la microcuenca en el año 2010, se estimó la parte proporcional de habitantes de la microcuenca del Río Aguacapa asociados cada uno de los indicadores. Existe

un alto nivel de pobreza y un número elevado de habitantes en condiciones de vulnerabilidad social, económica, educativa, de acceso a servicios de salud y calidad en los espacios de sus viviendas. Esta situación repercute de forma importante en la calidad de vida de la población. Del conjunto de valores, destaca el número de habitantes con ingreso inferior a la línea de bienestar con un 72.5 %, este valor es altamente representativo de sus condiciones económicas y repercute de forma directa en la búsqueda de alternativas para poder acceder a los demás servicios básicos para mejorar su calidad de vida.

Como se puede observar, un 89.9% de la población tiene al menos una carencia social y se puede destacar que un 79% de ellos no tiene acceso a una alimentación adecuada. La Figura 40 indica un gráfico comparativo de cada una las carencias que presenta el municipio y su relación con el estado y el país.

Salvo los indicadores de carencia pos servicios básicos de la vivienda y acceso a la alimentación que se encuentra por debajo de la media nacional y estatal, en el resto de los indicadores se encuentra por encima de ellos. Estas condiciones sociales, presentan un efecto directo con el medio en cual se desarrollan, un bajo nivel educativo es indicativo de falta de valores y por ende respeto al medio ambiente en el cual viven, además, la carencia en servicios básicos dentro de la vivienda, hace que los pobladores, principalmente de las localidades rurales y suburbanas, busquen como alternativa la extracción de materiales leñosos para elaboración de sus alimentos y uso como medio de calefacción.

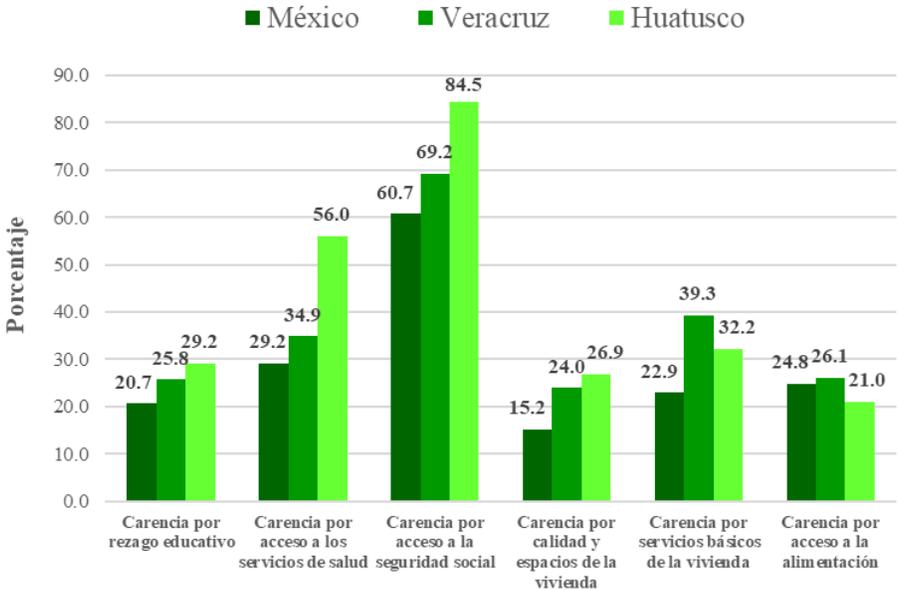


Figura 40. Comparación de los diferentes tipos de carencias sociales.

Cuadro 41. Indicadores de rezago social.

Indicadores	Porcentaje	Número de personas	Número promedio de carencias
<i>Pobreza</i>			
Población en situación de pobreza	69.9	26,055	2.9
Población en situación de pobreza moderada	46.6	17,370	2.4
Población en situación de pobreza extrema	23.2	8,648	3.9
Población vulnerable por carencias sociales	20.0	7,455	2.4
Población vulnerable por ingresos	2.7	1,006	0.0
Población no pobre y no vulnerable	7.4	2,758	0.0
<i>Privación social</i>			
Población con al menos una carencia social	89.9	33,510	2.8
Población con al menos tres carencias sociales	47.7	17,780	3.8
<i>Indicadores de carencia social</i>			
Rezago educativo	29.2	10,884	3.6
Acceso a los servicios de salud	56.0	20,874	3.2
Acceso a la seguridad social	84.5	31,497	2.8
Calidad y espacios de la vivienda	26.9	10,027	3.9
Acceso a los servicios básicos en la vivienda	32.2	12,003	3.9
Acceso a la alimentación	21.0	7,828	4.4
<i>Bienestar económico</i>			
Población con ingreso inferior a la línea de bienestar mínimo	36.0	13,419	3.1
Población con ingreso inferior a la línea de bienestar	72.5	27,024	2.8

7.5.2.2 Indicadores de Desarrollo Humano

El IDH está diseñado a partir de los valores de la esperanza de vida al nacer en años, la tasa de alfabetismo de los adultos en porcentaje, la tasa bruta combinada de matrícula escolar en porcentaje y el PIB per cápita en dólares de paridad del poder adquisitivo, fue creado por el

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y permite clasificar los países en tres grupos: alto ($IDH > 0.8$), medio ($0.5 < IDH < 0.8$) y bajo ($IDH < 0.5$) nivel de desarrollo humano. (PNUD, 2011) El IDH sintetiza el avance promedio de tres aspectos básicos del desarrollo humano, medido en un rango de cero a uno, en el que los valores más cercanos a uno significan un mayor desarrollo humano (PNUD, 2012). De acuerdo con lo anterior, el valor de los indicadores en el año 2010 reportados para en el municipio de Huatusco y por ende para las localidades de la microcuenca del Río Aguacapa, se presentan en el Cuadro 42. Como puede observarse, a excepción del índice de salud que se encuentra por encima de la media, las condiciones del desarrollo humano de la población que habita en la microcuenca se encuentra en un término medio.

Cuadro 42. Indicadores de desarrollo humano.

Indicador	Huatusco	Nacional	
	Valor	Min	Max
Años promedio de escolaridad	6.484	1.056	13.642
Años esperados de escolarización	12.178	7.039	15.666
Ingreso per cápita anual (dólares PPC)	\$8,504.2	\$2,097.8	\$45,012.6
Tasa de Mortalidad Infantil	15.83	8.06	56.70
Índice de educación	0.592	0.207	0.965
Índice de ingreso	0.636	0.436	0.875
Índice de salud	0.829	0.323	0.925
Valor del Índice de Desarrollo Humano (IDH)	0.678	0.362	0.917

Fuente: PNUD (2012)

7.5.2.3 Índice de Marginación

La Comisión Nacional de Población reporta un índice de marginación por localidad y municipio, la marginación se concibe como un problema estructural de la sociedad, en donde no están presentes ciertas oportunidades para el desarrollo, ni las capacidades para adquirirlas. El índice de marginación se calcula a partir de ocho indicadores socioeconómicos básicos obtenidos a partir del Censo de Población y Vivienda 2010. (CONAPO, 2012)

De acuerdo con CONAPO (2012), la población asentada en la microcuenca del Río Aguacapa reporta los siguientes valores para el índice de marginación (Cuadro 43)

Cuadro 43. Índice de marginación para la microcuenca.

Indicador	Valor
Índice de marginación	-0.0911
Grado de marginación	Medio
Índice de marginación de 0 a 100	26.64
Lugar a nivel estatal	137
Lugar a nivel nacional	1271

7.5.3 Indicadores Económicos de la Microcuenca

Para efectos del cálculo de los indicadores económicos definidos en la evaluación de sustentabilidad de la microcuenca del Río Aguacapa, se recurrió a los reportes establecidos por parte del INEGI y el INAFED. De acuerdo con los datos reportados, se consideró la población económicamente activa, la población ocupada, la tasa de participación económica y el índice de ingreso proveniente del IDH. El Cuadro 44 muestra los valores de cada uno de los indicadores económicos reportados en el año 2010.

Cuadro 44. Indicadores de desarrollo económico.

Indicadores de participación económica	Hombres		Mujeres		Total
	No.	%	No.	%	
Población económicamente activa (PEA)	15,028	69.6	6,563	30.4	21,591
Ocupada	14,494	69.13	6,472	30.87	20,966
Desocupada	534	85.44	91	14.56	625
Población no económicamente activa	4,006	20.96	15,105	79.04	19,111
Tasa de participación económica (%)	78.61		30.22		52.87

La población económicamente activa representa el 39.6 % del total de la población municipal, mientras que la población ocupada representa el 38.4%; por su parte, la tasa de participación económica del municipio representa el 52.87 % y de acuerdo con (PNUD, 2012) se tiene un índice de ingreso de 0.636.

7.6 Evaluación de la sustentabilidad de la microcuenca

7.6.1 Dimensión ambiental

El conjunto de índices e indicadores que componen la dimensión ambiental se presentan en el Cuadro 45

Cuadro 45. Índice de Calidad Ambiental de la Microcuenca del Río Aguacapa.

Indicadores	Dimensión	Peso	Valor	Producto
Índice de Calidad del Agua de la Microcuenca (ICA)	Ambiental	40%	53.00	21.20
Índice de Calidad del Suelo de la Microcuenca (ICS)	Ambiental	40%	58.00	23.20
Velocidad de Infiltración de la Microcuenca (VI)	Ambiental	10%	80.00	8.00
% de Superficie Territorial con cambio (% STC)	Ambiental	10%	66.00	6.60
Índice de Calidad Ambiental (ICAm)				59.00

La velocidad de infiltración es considerada como un indicador clave de la calidad del suelo y se puede entender como velocidad de infiltración media a la cantidad acumulada de agua percolada por unidad de superficie, a lo largo del tiempo que ha durado el proceso (García, García, Castellanos y Cano, 2008). De acuerdo con los resultados obtenidos, se encuentra que la velocidad de infiltración media de la microcuenca es rápida a muy rápida. Los valores más bajos se encuentran relacionados con el tipo de cobertura

En México, la calidad del recurso hídrico se mide sistemáticamente a través de la Red Nacional de Monitoreo (RNM) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En 2012, la RNM contaba con 3,957 sitios de monitoreo en aguas superficiales, de los cuales 2 517 estaban ubicados en cuerpos de agua superficiales y 1,045 en zonas costeras. A los anteriores hay que añadir 102 sitios pertenecientes a la red de estudios especiales y 293 a la red de descargas. Los sitios con monitoreo de calidad del agua están ubicados en los principales cuerpos de agua del país, incluyendo zonas con alta influencia antropogénica. La Conagua publica entre sus principales indicadores de calidad del agua, la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de sólidos suspendidos totales (SST). (CONAGUA, 2016)

En 2012, el 40.7% de los 2,588 sitios de monitoreo examinados tuvo medidas de DBO₅ inferiores a los 3 mg-l⁻¹, valor que se clasifica como de una excelente calidad del agua. En contraste, cerca de 11.8% de los sitios tenía valores mayores a 30 mg-l⁻¹, valor considerado como el límite máximo permisible para la protección de la vida acuática en ríos. La mayor cantidad de los sitios con altos valores de DBO₅ y considerados como contaminados y fuertemente contaminados se concentraron en las regiones Aguas del Valle de México, Península de Baja California y Lerma-Santiago-Pacífico (en 27.3, 23.5 y 20.7% de sus sitios, respectivamente) (CONAGUA, 2016)

7.6.2 Dimensión social

Una vez obtenidos los valores correspondientes a los indicadores sociales reportados para la microcuenca del Río Aguacapa, se realizó una normalización para cada uno de ellos y poder estimar el valor promedio. Agrupando los índices que corresponden a los aspectos sociales, en el Cuadro 46 se indica el valor del índice de desarrollo social (IDSoc) de la microcuenca. El valor más bajo del conjunto de índices sociales obtenidos para la microcuenca es el relativo a marginación, concepto que se asocia a la carencia de oportunidades sociales y a la ausencia de capacidades para adquirirlas o generarlas, pero también a privaciones e inaccesibilidad a bienes y servicios fundamentales para el bienestar.

Cuadro 46. Índice de Desarrollo Social de la microcuenca.

Indicadores	Dimensión	Peso	Valor	Producto
Índice de Desarrollo Humano	Social	20%	67.80	13.56
Índice de Rezago Social	Social	20%	54.90	10.98
Índice de Salud	Social	20%	82.90	16.58
Índice de Educación	Cultural	20%	59.20	11.84
Índice de Marginación	Social	20%	26.40	5.28
Índice de Desarrollo Social (IDSoc)				58.24

La marginación es un fenómeno multidimensional y estructural originado, en última instancia, por el modelo de producción económica expresado en la desigual distribución del progreso, en la estructura productiva y en la exclusión de diversos grupos sociales, tanto del proceso como de los beneficios del desarrollo (CONAPO, 2012).

La marginación se concibe como un problema estructural de la sociedad, en donde no están presentes ciertas oportunidades para el desarrollo, ni las capacidades para adquirirlas. Si tales oportunidades no se manifiestan directamente, las familias y comunidades que viven en esta situación se encuentran expuestas a ciertos riesgos y vulnerabilidades que les impiden alcanzar determinadas condiciones de vida. (CONAPO, 2012). En la Figura 41 se muestra de forma gráfica el constructo del IDSc, integrando el valor de cada uno de sus componentes:



Figura 41. Indicadores de desarrollo social para la microcuenca del Río Aguacapa.

7.6.3 Dimensión económica

Por su parte en el Cuadro 47 se presenta el Índice de Desarrollo Económico (IDE) de la microcuenca, el cual se obtiene mediante el promedio ponderado de cada uno de los indicadores económicos normalizados y en la Figura 42, la representación gráfica del IDE.

Cuadro 47. Índice de Desarrollo Económico para la microcuenca

Indicadores	Dimensión	Peso	Valor	Producto
Población Económicamente Activa	Económica	25%	39.57	9.89
Población Ocupada	Económica	25%	38.43	9.61
Tasa de participación Económica	Económica	25%	52.87	13.22
Índice de ingreso	Económica	25%	63.64	15.91
Índice de Desarrollo Económico (IDE)				48.63

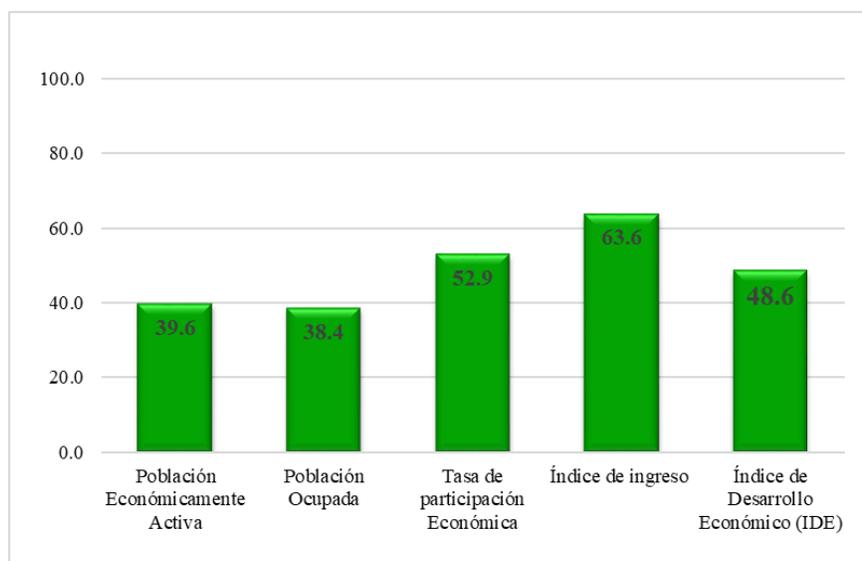


Figura 42. Índice de Desarrollo Económico para la microcuenca del Río Aguacapa.

La tasa de participación económica (TPE) mide el grado de participación de la población en el mercado de trabajo y representa el cociente entre la población económicamente activa (definida como las personas que trabajan o buscan trabajo) de 15 años y más y la población total de 15 años y más, multiplicado por 100. Además, considera al porcentaje de personas económicamente activas que se encuentran empleadas o trabajando y corresponde a población de 15 años y más de edad ocupada, dividida entre la población económicamente activa de 15 años y más de edad, multiplicada por 100.

Una de las características de la población asentada en la microcuenca del Río Aguacapa en términos de su valoración mediante indicadores económicos, muestra un porcentaje bajo de población económicamente activa y población ocupada. Por su parte, se observa que la tasa de participación económica es mayor al 50 % de la población que vive en la microcuenca, esto genera un índice de ingreso de 63.6 y un índice de desarrollo económico de 48.6.

7.6.4 Sustentabilidad de la microcuenca

Una vez obtenidos los valores de todos los índices se integran para generar el índice agregado de Sustentabilidad de la Microcuenca (IASuM), y se presenta en el Cuadro 48. De acuerdo con lo establecido, se observa que la microcuenca presenta un grado de sustentabilidad media. Analizando los valores individuales de cada uno de los índices propuestos, el ICAM es quien presenta un mejor nivel de desempeño al presentar un valor de 59, mientras que el IDE es quien presenta el valor más bajo con 48.6.

Cuadro 48. Índice Agregado de Sustentabilidad de la Microcuenca del Río Aguacapa.

Variable (xi)	Dimensión	Peso (Wi)	Valor	Producto
Índice de Calidad Ambiental (ICAm)	Ambiental	34%	59.0	20.1
Índice de Desarrollo Social (IDSc)	Sociocultural	33%	58.2	19.2
Índice de Desarrollo Económico (IDE)	Económico	33%	48.6	16.0
Índice Agregado de Sustentabilidad de la Microcuenca (IASuM)				55.3

7.7 Contrastación de la hipótesis general de investigación

Con respecto a la hipótesis particular número uno: “El grado de sustentabilidad es función del cambio en la cobertura y uso de suelo, la calidad del agua del río, la capacidad de infiltración y la calidad del suelo”, se comenta lo siguiente:

- Los resultados del cambio en la cobertura y uso de suelo de la microcuenca permiten analizar cómo se ha presentado dicha transición y la capacidad para mantenerse estables en el tiempo. Con base al reto de conservar los recursos naturales de la microcuenca en un futuro cercano, tanto el desarrollo de asentamientos humanos como el de actividades agropecuarias, indican una tendencia incremental y esto apunta muy seguramente a la reducción del bosque mesófilo de montaña y/o a la reducción de los agroecosistemas ganaderos.
- En función de la calidad del agua del río, son claros los efectos antrópicos sobre la contaminación de este afluente. Los resultados muestran un nivel de degradación de menor a mayor grado a medida que el cauce del río llega al punto de salida de la microcuenca. En este sentido, de acuerdo con las normas sanitarias en la materia, se advierte que el agua del Río Aguacapa no puede ser utilizada para consumo humano, pero si se puede utilizar para actividades pecuarias y agrícolas, siempre y cuando estas no sean utilizadas para procesar alimentos de consumo directo.
- Por su importancia ecológica, la cantidad de nitratos presente en el agua del río, hace evidente su correlación con las actividades agropecuarias desarrolladas por el conjunto de agroecosistemas presentes en la microcuenca.

- En términos de la capacidad de infiltración del agua en el suelo de la microcuenca, si bien los resultados indican que la velocidad de infiltración es alta, si se aprecian diferencias significativas entre los diferentes tipos de cobertura y uso de suelo, así como entre los diferentes agroecosistemas presentes en la microcuenca.
- Por último, el conjunto de indicadores que componen el índice de calidad del suelo hacen evidente la deficiencia de ciertos nutrientes, por los resultados obtenidos, esta deficiencia se hace más evidente en los agroecosistemas cuyo manejo es del tipo intensivo y más específicamente en plantaciones cafetaleras, donde se observan los valores más bajos para el potencial de hidrógeno y otros nutrientes.
- El hecho de que los valores para el pH de la microcuenca sean menores a 7, indica que son suelos entre moderadamente ácidos a muy ácidos, esta característica, no permite que el resto de los nutrientes sean liberados totalmente y a su vez, sean subaprovechados o desaprovechados por parte las plantaciones establecidas en la microcuenca.
- Al comparar los resultados de la evaluación de la calidad del suelo, se hace evidente una diferencia significativa entre cada uno de los tipos de cobertura y uso de suelo, y esta evaluación se hace más reveladora en el momento de comparar cada uno de los tipos de agroecosistemas contra los niveles de calidad del suelo del bosque mesófilo de montaña.
- El Bosque Mesófilo de Montaña puede ser utilizado como una línea base para la comparación contra otros tipos de cobertura o también, para especificar y/o definir, cuáles serían las condiciones de idoneidad de un suelo sustentable.

A partir de lo anterior y en términos de los resultados obtenidos, no se rechaza la hipótesis particular número uno debido a que los índices e indicadores, dan constancia de que el grado de sustentabilidad es una función del cambio en la cobertura y uso de suelo, la calidad del agua del río, la capacidad de infiltración y la calidad del suelo; además, muestran el estado de la dimensión ambiental de la sustentabilidad para la microcuenca.

Con respecto a la hipótesis particular número dos: “El grado de sustentabilidad es función del tipo y manejo de los agroecosistemas, actividades antrópicas, y las condiciones socioculturales y económicas de la población de la microcuenca del Río Aguacapa” se comenta lo siguiente:

- Con los resultados obtenidos para la evaluación de calidad del agua y suelo, se hace evidente que tanto las actividades antrópicas como los agroecosistemas asentados en la microcuenca del río Aguacapa están ejerciendo un efecto negativo en la dimensión ambiental de la sustentabilidad.
- Por su parte, los resultados obtenidos en el Índice de Desarrollo Sociocultural de la microcuenca, son constancia de que tanto las condiciones de rezago, marginación y desarrollo humano, como las de pobreza, educación y carencias de servicios básicos elementales en la población de la microcuenca impactan en el grado de sustentabilidad de la microcuenca.
- Destaca que el nivel educativo de la población en las localidades rurales, se encuentra por debajo de la media nacional, esto hace evidente su incapacidad para comprender el efecto de sus actividades cotidianas sobre el medio ambiente. Por las visitas y entrevistas realizadas con la población de la microcuenca, se observa que no existe conciencia hacia el cuidado de los recursos naturales y en un manejo adecuado de los mismos.
- Así mismo, las condiciones de pobreza y marginación de la población, impacta en la búsqueda de alternativas para acceder a la satisfacción de sus necesidades de alimentación y servicios básicos en el entorno de su vivienda. Esta satisfacción, generalmente va acompañada de un detrimento en la condición de los recursos naturales de su entorno: deforestación, contaminación de efluentes y descarga de contaminantes en su medio cercano.
- Por su parte, las condiciones socioeconómicas indican que, a pesar de contar con un número importante de población económicamente activa, la tasa de ocupación es baja y las condiciones de ingreso no son suficientes para poder acceder al nivel de bienestar mínimo establecido por parte de CONEVAL, así lo demuestra el 89% de la población asentada en la microcuenca que vive en condiciones de pobreza y presenta al menos una carencia social.
- El ingreso per cápita de los pobladores de la microcuenca se encuentra por debajo de la media nacional, por tanto, se convierte en un riesgo para efectos de la dimensión económica de la sustentabilidad, muestra de ello es el índice de desarrollo económico, el cual presenta el nivel de desempeño más bajo en este modelo de evaluación.

En función a las observaciones indicadas, no se rechaza la hipótesis particular número dos al haber evidencia suficiente de que las actividades antrópicas, el desarrollo de agroecosistemas y las condiciones socioculturales y económicas de la población asentada en la microcuenca, presenta un efecto negativo sobre las dimensiones de la sustentabilidad.

Finalmente y de acuerdo a lo establecido en la hipótesis general “El grado de sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa está siendo impactado por el tipo y manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas y las condiciones socio-culturales y económicas de la población que habita en ella”, se indica a continuación el impacto que tanto los agroecosistemas, como las actividades antrópicas y condiciones socio-culturales y económicas presentan sobre el grado de sustentabilidad de la microcuenca del Río Aguacapa:

- El tipo y manejo de agroecosistemas presentan un impacto en el cambio de cobertura y uso de suelo, los diferentes tipos de AES asentados en la microcuenca han evolucionado en los últimos 25 años, afectando negativamente a la vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña.
- La calidad del agua del Río Aguacapa es impactada negativamente por efecto de las actividades antrópicas y en particular por la descarga de aguas residuales provenientes de los drenajes y colectores pluviales de la población asentada en la microcuenca, así mismo, se encontraron diferencias en la calidad del suelo de la microcuenca que permite establecer una relación con el tipo y manejo de los AES presentes en la microcuenca.
- Las condiciones socioculturales y económicas de la población, evidencian escenarios de vulnerabilidad por efecto de diversas carencias en función a su marginación, nivel educativo, desarrollo humano, ingresos y rezago, lo cual impacta directamente sobre el grado de sustentabilidad de la microcuenca.

Por todo lo anteriormente mencionado, no se rechaza la hipótesis general, existe evidencia de que el grado de sustentabilidad de la microcuenca del Río Aguacapa está siendo impactado por el tipo y manejo de los agroecosistemas, las actividades antrópicas y las condiciones socio-culturales y económicas de la población que habita en ella.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El paradigma de la sustentabilidad plantea el reto de establecer un consenso universal que permita hacer explícito este concepto e indique cuales son los elementos básicos a considerar en cada una de sus dimensiones. El modelo planteado con esta investigación es un intento por simplificar la idea de la multidimensionalidad encontrada en el desarrollo sustentable.

El marco de evaluación de la sustentabilidad propuesto para la microcuenca del Río Aguacapa en el municipio de Huatusco, Veracruz es una herramienta metodológica para hacer operativos los principios establecidos en el desarrollo sustentable. El hecho de traducir aspectos subjetivos a entornos objetivos mediante la utilización del pensamiento complejo y la teoría de sistemas, permite hacer operativos los conceptos de sustentabilidad y desarrollo sustentable.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que la sustentabilidad de la microcuenca del Río Aguacapa está en función directa de las actividades antrópicas y los agroecosistemas, así como de las condiciones socioeconómicas de la población establecida en su territorio. Ahora bien, en términos de la escala establecida para la evaluación de sustentabilidad en la microcuenca del Río Aguacapa, se encuentra que esta presenta un grado medio de sustentabilidad.

En una referencia puntual hacia los resultados obtenidos, se concluye que:

- La calidad del agua del río está siendo impactada negativamente por la descarga de aguas residuales y aguas pluviales provenientes de la ciudad de Huatusco, así mismo, el valor obtenido en términos del nitrato pudiera tener una relación directa con el conjunto de agroecosistemas presentes.
- La calidad del suelo de la microcuenca se ve afectada directamente por el tipo de agroecosistema presente y la superficie correspondiente al bosque mesófilo de montaña es un indicador de referencia excelente con el afán de plantear estrategias que coadyuven en mejorar la calidad del suelo de los agroecosistemas.
- Las condiciones socio-culturales y económicas de la microcuenca evidencian que la educación, pobreza y marginación de las comunidades rurales, suburbanas y urbanas representan un riesgo para las dimensiones de sustentabilidad de la microcuenca y presionan el estado de sus recursos naturales.

- Existe un riesgo elevado para la estabilidad y supervivencia de la vegetación secundaria de bosque mesófilo de montaña debido al crecimiento de la superficie correspondiente a los asentamientos humanos y el desarrollo de actividades agropecuarias.

Con los resultados obtenidos en la presente investigación, se crea una línea base de información para poder realizar nuevas evaluaciones en la microcuenca del Río Aguacapa, además, permite enfocar los esfuerzos políticos e institucionales para establecer líneas de acción enfocados en la atención de las principales debilidades encontradas

Recomendaciones

- De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación, a fin de mejorar la calidad del agua del río, se recomienda atender en forma inmediata las descargas de aguas residuales provenientes de las localidades rurales y urbanas, mediante el diseño y construcción de plantas de tratamiento y saneamiento.
- En función de los resultados de calidad del suelo, se recomienda implementar prácticas agroecológicas en cada uno de los agroecosistemas presentes en la microcuenca a fin de mejorar la estructura y composición del suelo y obtener mejores resultados en su manejo.
- Para el caso del cambio de uso de suelo, los resultados indican que debe formularse un plan de ordenamiento ecológico territorial en función de las características de la microcuenca y establecer las áreas de acuerdo a su aptitud territorial.
- Se debe diseñar una iniciativa local que promueva la cultura de cuidado y protección a las áreas correspondientes de bosque mesófilo de montaña, enfatizando el hecho de que este es un ecosistema único en México, altamente valioso y con importantes servicios medioambientales.
- Para el caso de los índices socio-cultural y económico, se debe mejorar las condiciones económicas de la población a través de la inversión en la mejora de sus capacidades y el nivel educativo, que les permita acceder a empleos mejor remunerados. Además, se recomienda atender los principales rezagos sociales y reducir el número de vulnerabilidades a los cuales se enfrenta la población de la microcuenca.

- Se debe promover un manejo integral de los recursos de la microcuenca a través de un enfoque metodológico basado en una estrategia colaborativa entre diversos entes públicos y privados que promueva las mejores y más eficientes formas de aprovechamiento de los recursos naturales.
- El modelo de evaluación propuesto puede ser robustecido a través de la inserción de nuevos indicadores de cada una de las dimensiones de la sustentabilidad, principalmente en el aspecto económico y el desempeño de los agroecosistemas.
- Dentro de las restricciones institucionales para el uso de indicadores, se encuentra la falta de recursos económicos, personal y capacitación profesional; y dentro de las restricciones técnicas la falta de datos básicos y estadísticas, de redes de monitoreo, diferencias en las definiciones de los parámetros medidos; que en conjunto conllevan el riesgo de una mala interpretación

Finalmente, una microcuenca hidrográfica será sustentable si el conjunto de subsistemas que la componen, tienden al mejoramiento ambiental, sociocultural y económico a corto, mediano y largo plazo en beneficio de la sociedad, sin deteriorar la base de los recursos naturales.

9. LITERATURA CITADA

- Acevedo, A. (2009). *Cómo evaluar el nivel de sostenibilidad de un programa agroecológico*. Bogotá: Cuadernos Rurales.
- Albert, L.-A. (2009). Nitratos y Nitritos. En O. M. Salud, *Toxicología* (págs. 279-296). Xalapa: Sociedad Mexicana de Toxicología. Recuperado el 29 de Diciembre de 2017, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a17.pdf>
- Altieri, M. A., y Labrador-Moreno, J. (1995). *Manejo y diseño de sistemas agrícolas sustentables*. Madrid: Minsiterio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Altieri, M. A., y Nichols, C. (2007). Conversión agroecológica de sistemas. *Ecosistemas*, 3-12.
- Altieri, M., y Nicholls, C. (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo Integrado de Plagas*, 17-24.
- Álvarez, A., y et-al. (2006). Índice de calidad del agua en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México: Diagnóstico y predicción. *Revista Internacional de botánica experimental*, 71-83.
- ArcGIS. (19 de Julio de 2017). *ArcGIS Pro*. Obtenido de Vista general del conjunto de herramientas Interpolación: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-interpolation-tools.htm>
- Barberousse, P. (2008). FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL PENSAMIENTO COMPLEJO DE EDGAR MORIN. *Educare*, XII(2), 95-113. Recuperado el 10 de 07 de 2017, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=194114586009>
- Bejarano-Ávila, A. (1998). *Un Marco Institucional para la gestión del medio ambiente y para la sostenibilidad agrícola en Agricultura, Medio Ambiente y Pobreza Rural en América Latina*. Washington DC.: IFPRI-BID,.
- Blanco-Contreras, E. (2008). PENSAR LOS AGROECOSISTEMAS. *Agroecología* , 97.
- Brink, B. (1991). The AMOEBA approach as a useful for establishing sustainable development. . En K. Verbruggen, *In search of indicators of sustainable development*. (págs. 156-185). Amsterdam: Kluwer Academic Publishers.
- Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future*. Oslo: Organización de las Naciones Unidas.
- Calvente, R. (2007). Concepto moderno de sustentabilidad. *Sociología y desarrollo sustentable*, 1-7.
- Carvajal, J. (2013). Centro Regional de Capacitacion en Cuencas La Joya, Querétaro. Un modelo pedagógico multidisciplinario. En CIGA, *Memorias del Tercer Congreso*

- Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas* (pág. 1148). Morelia, Michoacán: CIGA.
- Casanova-Pérez, L., Martínez-Dávila, J. P., López-Ortiz, S., Landeros-Sánchez, C., López Romero, G., y Peña-Olvera, B. (2015). Enfoques del pensamiento complejo en el agroecosistema. *Interciencia*, 210-21.
- Casillas, J. (2007). El programa nacional de microcuencas: una estrategia de desarrollo integral. En SEMARNAT, *El Manejo Integral de Cuencas en México* (págs. 259-276). México, D.F.: SEMARNAT.
- Castelán-Vega, R., Ruiz-Careaga, J., Linares-Fleites, G., y Pérez-Avilés, R. (2007). “Dinámica de cambio espacio temporal de uso de suelo en la subcuenca del Río San Marcos, Puebla”. (UNAM, Ed.) *Investigaciones Geográficas*((64)), pp.75-89.
- Castillo-Villanueva, L., y Velázquez-Torres, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socioecológicos y resiliencia. *Revista Quivera.*, 11-32.
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., y Díaz, D. (2014). “Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global”. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 111-124. doi:<http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., y Díaz, D. (2014). “Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global”. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 111-124. doi:<http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- CEPAL. (2012). *Gobernanza de los recursos naturales en América Latina y el Caribe*. Nueva York USA: CEPAL.
- Chapela, F. (2012). *El estado de los bosques de México*. México, D.F.: Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sustentable” A.C. Recuperado el 3 de Enero de 2018, de http://www.ccmss.org.mx/descargas/Estado_de_los_bosques_en_Mexico_final.pdf
- Chaves, M. L., y Alipaz, S. (2006). An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resour Manage*, 883–895. doi:10.1007/s11269-006-9107-2
- Chekcland, P. (1997). *Pensamiento de Sistemas, Práctica de sistemas*. Nueva York: LIMUSA.
- CICESE. (2013). *Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN con gráficas del CICESE* . Recuperado el 14 de Noviembre de 2013, de BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL (SISTEMA CLICOM): <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- CIGA. (2010). *Mecanismos e instrumentos para el monitoreo de calidad del agua*. San José: ANAM. Recuperado el 2017 de Julio de 14, de

http://lasa.ciga.unam.mx/monitoreo/images/biblioteca/29%20mecanismos_monitoreo_calidad_agua.pdf

CIMMYT. (2013). *Infiltración*. México: CIMMYT. Recuperado el 26 de Diciembre de 2017, de

https://www.google.com.mx/url?sa=tyrct=jyq=yesrc=sysource=webycd=8ycad=rjayuact=8yved=0ahUKEwiZkPS-1MvYAhVo9YMKHVfODkYQFgg-MACyurl=http%3A%2F%2Fconservacion.cimmyt.org%2Fes%2Fcomponent%2Fdocman%2Fdoc_download%2F1141-yusg=AOvVaw2qY9b7Ob-Y8aEWzrawd24C

Cisneros-A, R. (2003). *Apuntes de riego y drenaje*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí: UASLP. Recuperado el 19 de Diciembre de 2017, de <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego%20y%20Drenaje.pdf>

Clayton, A., y Radcliffe, N. (1996). *Sustainability: a systems approach*. Earthscan.

CNA. (2004). *Estadísticas del agua en México*. . México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.

COLPOS. (2012). *LÍNEA PRIORITARIA DE INVESTIGACIÓN 2*. Colegio de Postgraduados. Manlio Fabio Altamirano: COLPOS. Obtenido de http://www.colpos.mx/wb_pdf/Investigacion/LPI/lpi-2/PE%20LPI%202.pdf

CONAGUA. (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014 - 2018*. México D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA. (2016). *Estadísticas del Agua en México*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 6 de Enero de 2018, de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf

CONAPO. (2012). *Índice de marginación por localidad 2010*. México D.F.: Consejo Nacional de Población. Recuperado el 15 de Enero de 2018, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/112592/Indice_de_marginacion_por_localidad_2010.pdf

CONEVAL. (2011). *Los mapas de la pobreza en México*. México .D.F: Consejo Nacional para la evaluación del desarrollo social.

CONEVAL. (2016). *Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social*. México, D.F.: Secretaria de Desarrollo Social.

Cotler, H., y Cairé, G. (2009). *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México*. México D.F.: INE-SEMARNAT.

Cotler, H., y et al. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. México D.F.: Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.

- Covarrubias, F., Ojeda, A., y Cruz, M. G. (2011). La sustentabilidad ambiental como sustentabilidad del régimen capitalista. *Ciencia Ergo Sum*, 95-101.
- De la Rosa, D. (2008). *Evaluación agro-ecológica de los suelos para un desarrollo rural sostenible*. Buenos Aires: Ediciones Mundi-Prensa.
- Delgadillo, J. L. (2007). El desarrollo sustentable en México (1980 -2007). (UNAM, Ed.) *Revista Digital Universitaria*, 9(3), 3-13. Recuperado el 10 de Julio de 2017
- Delgadillo, O., y Pérez, L. (2016). *Medición de la infiltración del agua en el suelo*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. Recuperado el 22 de Diciembre de 2017, de http://www.centro-agua.umss.edu.bo/wp-content/uploads/2017/05/2016_Medicion_infiltracion_doble_anilla.pdf
- Del-Moral-Ituarte, L., Arrojo-Agudo, P., y Herrera-Grao, T. (2015). *El agua: perspectiva ecosistémica y gestión integrada*. Zaragoza: Fundación Nueva Cultura del Agua.
- Denoia, J., Sosa, O., Zerpa, I., y Martín, B. (2000). Efecto del pisoteo animal sobre la velocidad de infiltración y sobre otras propiedades físicas del suelo. *Pastos*, 129-141.
- Ebert, U., y Welsh, H. (2004). Meaningful environmental indices: a social choice approach. *Journal of environmental economics and management*(47), 270 - 283.
- Edward, J. P. (2000). *La ciencia del suelo y su manejo*. Madrid, España.: Paraninfo.
- FAO. (2001). *Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural*. Roma, Italia: Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación .
- FAO. (2002). *Relaciones tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales*. Roma: FAO.
- FAO. (2006). *TENDENCIAS Y PERSPECTIVAS DEL SECTOR FORESTAL EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado el 22 de Octubre de 2017, de <http://www.fao.org/docrep/009/a0470s/a0470s00.htm>
- FAO. (2009). *Monitoreo y Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales* . Roma: FAO.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Quinta ed. ed.). (I. d. Geografía, Ed.) México, D.F., México: UNAM.
- García, R. (2006). *Sistemas Complejos*. Barcelona: GEDISA.
- García, R. (2011). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *Revista Latinoamericana de Investigación en Ciencias Sociales*, 1(1), 66-101.

- García-H., M. A., García-H., M. A., Castellanos-V., I., y Cano-S., Z. (2008). Variación de la velocidad de infiltración media en seis ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 21-27.
- Gliessman, S. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. San José, Costa Rica: Turrialba.
- Gómez, C. (2015). *EL DESARROLLO SOSTENIBLE: CONCEPTOS BÁSICOS, ALCANCE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN*. La Habana: UNESCO. Recuperado el 17 de Julio de 2017, de www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Havana/pdf/Cap3.pdf
- Gómez, C. (2015). *EL DESARROLLO SOSTENIBLE: CONCEPTOS BÁSICOS, ALCANCE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN*. La Habana, Cuba. Recuperado el 10 de Julio de 2017, de <http://www.unesco.org/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Havana/pdf/Cap3.pdf>
- Gómez, L. E., Trujillo, F. L., y Díaz, R. G. (2013). Bases pluriepistemológicas de los estudios en agroecología. *Entramado* , 204-211.
- González De Molina, M. (2011). *Introducción a la Agroecología. En: Cuadernos Técnicos de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica SEAE. Serie Agroecología y Ecología Agraria*. Madrid: Imag Impressions.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., y Nelson, W. L. (1999). *Soil fertility and fertilizers*. Upper Saddle River, NJ, USA.: 6th ed. Prentice Hall. .
- Hernández-Sampieri, R. (2006). Formulación de Hipótesis. En R. H. Smpieri, *Metodología de la Investigación* (págs. 73-101). México D.F.: Mc Graw Hill.
- Ibarra, A. A. (2010). *Calidad del agua : un enfoque multidisciplinario*. México D.F.: Instituto de Investigaciones Económicas.
- Ibarra-Castillo, D., y et-al. (2007). Distribución espacial del contenido de materia orgánica de los suelos agrícolas de Zapopan, Jalisco. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 187-194.
- INAFED. (2015). *Datos e Indicadores Municipales 2010*. INAFED. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Recuperado el 29 de Diciembre de 2017, de <http://www.inafed.gob.mx/es/inafed/Municipales>
- INEGI. (2000). Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica escala 1:1'000,000. Aguascalientes, Ags, México.
- INEGI. (2001). *Diccionario de datos edafologicos*. Aguascalientes, Ags.: INEGI.
- INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía geológica*. Aguascalientes, Ags.: INEGI.

- INEGI. (2014). *Guía para la interpretación de cartografía : uso del suelo y vegetación ESCALA 1:250, 000 : serie V*. Aguascalientes, Ags, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 21 de Febrero de 2017, de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/doc/guia_interususuelov.pdf
- INEGI. (2000). *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-.
- INIFAP, y CONABIO. (25 de Mayo de 1995). Carta Edafológica 1:1'000,000 de los Estados Unidos Mexicanos. México, D.F., México.
- Jimenez, L. (2000). *Desarrollo Sostenible Transición a la coevolución global*. Madrid: Pirámide.
- Juárez, J. M., y Comboni Salinas, S. (Diciembre de 2012). Epistemología del pensamiento complejo. (U. A. Xochimilco, Ed.) *Reencuentro*, 38-51.
- Kates, R. e. (2001). Sustainability Science. *Science*, 292, 641-642.
- Laguna-Sánchez, G., y et-al. (2016). *Complejidad y sistemas complejos: un acercamiento multidimensional*. Ciudad de México: Editora C3.
- Larrouyet, M. C. (2015). *Desarrollo sustentable : origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta*. Bernal, Argentina: Universidad Nacional de Quilmes.
- Loaiza, W., Carvajal, Y., y Ávila, Á. (2014). Evaluación agroecológica de los sistemas productivos agrícolas en la microcuena centella (Dagua, Colombia). *Colombia Forestal*, 17(2), 161 - 179.
- Lopez, J., y Mantilla, E. (2006). Los Indicadores y la medición de la sostenibilidad. En E. Mantilla, *Medición de la Sostenibilidad Ambiental* (pág. 121). Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia.
- M.A., A., y Toledo, V. (2011). The agroecological revolution in Latin America:rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *The Journal of Peasant Studies*, 587-612.
- Machado-Vargas, M. M., y Ríos-Osorio, L. A. (2016). Sostenibilidad en agroecosistemas de café de pequeños agricultores. *IDESIA (Chile)* , 15-23.
- Martínez, A. (2002). Indicadores de Sustentabilidad Ambiental de la Economía Mexicana. *Comercio Exterior*, 242 - 253.
- Martínez, F., Ojeda, D., y Hernández, A. (Enero-Marzo de 2011). El exceso de nitratos: Un problema actual en la agricultura. *Synthesis*, 11-16. Recuperado el 30 de Diciembre de 2017

- Martínez, J. (2002). *DINÁMICA DEL POTASIO EN EL SUELO Y SU REQUERIMIENTO POR LOS CULTIVOS*. Montecillo: COLPOS.
- Martínez-A., P. E., Martínez-S., P., y Castaño-C., S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. México, D.F.: Mundiprensa.
- Masera, O., Astier, M., y López, S. (1999). *Sustentabilidad y el manejo de los recursos naturales. El marco de evaluación MESMIS*. México: Mundiprensa.
- Maya, E. (2014). *Métodos y técnicas de investigación*. México D.F.: UNAM.
- Moran, H. (2000). Presupuestos filosóficos del desarrollo sustentable. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas*, 181 - 200.
- Morin, E. (1994). *Introducción al Pensamiento Complejo*. Barcelona: GEDISA.
- Mostacedo, B., y Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia: Editora el País. Obtenido de <http://www.bio-nica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Munk-Ravnborg, H., y et-al. (2012). *Gobernanza territorial de los recursos naturales*. Santiago, Chile : Rimisp-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.
- OCDE. (2001). *INDICADORES MEDIOAMBIENTALES PARA LA AGRICULTURA: MÉTODOS Y RESULTADOS, VOLUMEN 3*. París: OCDE.
- Orozco, Q., y et-al. (2009). El marco MESMIS, estudios de caso en Iberoamérica y Norteamérica. En M. R.-G. J López-Blanco, *Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México* (pág. 196). México, D.F.: UNAM.
- Ortiz, M., Sánchez, E., Castrejón, M., y Romero, A. (2015). *Los indicadores ambientales como herramienta para la sustentabilidad: Estudio de caso en Morelos*. Cuernavaca: UAEM.
- Paniagua, Á., y Moyano, E. (1998). Medio ambiente, desarrollo sostenible y escalas de sustentabilidad. *Reis: Revista Española de Investigaciones Sociológicas*(83), 151-175. Recuperado el 10 de 07 de 2017, de http://www.reis.cis.es/REIS/PDF/REIS_083_07.pdf
- Partida, S., Cabal, A., y Ruiz, O. (2016). Metodologías de evaluación de sustentabilidad en cuencas, subcuencas y microcuencas hidrográficas. En R. M. Hidrográficas, *IV Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas* (págs. 285 - 295). Xalapa, Veracruz: UV. Obtenido de <http://remexcu.org/iv-congreso/>
- Partida-S., S., Cabal, A., Ruiz, O., Landeros, C., y Cuervo, V. (2016). Efecto del cambio climático en la disponibilidad del agua: El caso de Huatusco. En R. M. Cuencas, *IV*

- Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas* (págs. 285-295). Xalapa, Veracruz: UV.
- Pérez, G., y et-al. (2007). Calidad del agua en la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, una propuesta para su manejo. *Memorias del III Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas*, 1010-1019.
- Pérez, G., Espinosa, A., Islas, P., Zarco, A., y Mazari-H., M. (2007). *Calidad del agua en la Cuenca Valle de Bravo Amanalco*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Pérez, R., y Pineda, R. (2007). *Calidad ambiental de ríos y arroyos en el centro de México*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Pérez-Morales, G. B., y Rodríguez-Castro, A. (2009). *Apuntes de Hidrología Superficial*. Morelia: Universidad Michoacana San Nicolás Hidalgo.
- Petersen, R., y Calvin, L. (1986). Methods of Soil Analysis, Part 1. *Ed. Agronomy 9(1)*, 33-51.
- Pierri, N. (2005). Historia del Desarrollo Sustentable. En N. P. Guillermo Foladori, *¿Sustentabilidad? Desacuerdos sobre el desarrollo sustentable* (págs. 27 - 80). Zacatecas, Zacatecas, México: Universidad Autónoma de Zacatecas. Recuperado el 10 de Julio de 2017, de http://rimd.reduaz.mx/coleccion_desarrollo_migracion/sustentabilidad/Sustentabilidad5.pdf
- PNUD. (2011). *Informe sobre Desarrollo Humano 2011*. Nueva York: Ediciones Mundi-Prensa. Recuperado el 12 de Enero de 2018, de http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2011_es_complete.pdf
- PNUD. (2012). *El índice de desarrollo humano en México*. México D.F.: Programa de las naciones unidas para el desarrollo. Recuperado el 13 de Enero de 2018, de http://www.cinu.mx/minisitio/indice_de_desarrollo/El_IDH_en_Mexico.pdf
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of Royal Society B*, 447-465.
- RAE. (22 de Enero de 2017). *Real Academia Española*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <http://dle.rae.es/?id=LNthkwR>
- Roberts, T. L., y Henry, J. L. (2001). El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones Agonómicas* (42), 4-13.
- Rodríguez-O., N., Ruiz-R., O., y Fajerson, P. (2010). Acciones y reflexiones para la conservación y el amnejo del agua en México. *Ciencia Administrativa*, 11-18.
- Rojas-Soriano, R. (2010). *Guía para realizar investigaciones sociales*. México D.F.: Plaza.

- Ruiz-R., O. (2006). Agroecología: una disciplina que tiende a la transdisciplina. *Interciencia*, 140 - 145.
- Ruiz-Rosado, O. (2012). *LA CUENCA HIDROLOGICA COMO UN SISTEMA: Perspectivas de Desarrollo*. Xalapa: COLPOS.
- Salcedo, E. (2005). *Evaluación de la sustentabilidad del agua en la cuenca del lago de Pátzcuaro*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Sampieri-H, R., Fernández-C, C., y Baptista-L, P. (2010). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Sarandon, S. (2009). Evaluación de la sustentabilidad en Agroecosistemas: Una propuesta metodológica. *Agroecología 4*, 19-28.
- Sarandon, S. (2014). *Agroecología : bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata.
- SEMARNAT. (1997). *Avances en el desarrollo de Indicadores Ambientales*. Instituto Nacional de Ecología: Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2002). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-021-SEMARNAT-2000*. México D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2014). *El Medio ambiente en México: Ecosistemas terrestres*. México, D.F.: SEMARNAT. Recuperado el 11 de Enero de 2018, de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/02_ecosistemas/2_2.html
- Sepúlveda, S. (2008). *Biograma: metodología para estimar el nivel de desarrollo sostenible de territorios*. San José, Costa Rica: IICA.
- Tamayo, M. (1995). *El proceso de la investigación científica*. México D.F.: Limusa.
- Tarride, M. (1995). Complejidad y sistemas complejos. *Historia, Ciencias, Saúde - Manguinhos*, II(1), 46-66. Recuperado el 2017 de Julio de 12
- Tchobanoglous, G., y E.D., S. (1985). *Water quality*. Reading: Addison-Wesley Publ.
- Tiburcio-Sánchez, A., y Perevochtchikova, M. (2012). La gestión del agua y el desarrollo de indicadores ambientales en México y Canadá: un análisis comparativo. *Journal of Latin American Geography*, 141-164.
- Toledo, D., Galantini, J., y Contreras, J. V. (2015). STOCK DE CARBONO Y RELACIONES DE ESTRATIFICACIÓN COMO ÍNDICES DE CALIDAD EN OXISOLES SUBTROPICALES. En E. Sá Pereira, G. Minoldo, y J. Galantini, *IMPACTO DE LOS SISTEMAS ACTUALES DE CULTIVO SOBRE LAS*

- PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO* (pág. 167). Buenos Aires: Ediciones INTA.
- Toro, P., y et-al. (2010). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas. *Archivos de Zootecnia*, 71-94.
- UAQ. (2011). *Línea de base para el manejo integrado de la subcuenca específica Támbula-Picachos en San Miguel de Allende, Guanajuato*. San Miguel de Allende, Guanajuato.: Universidad Autónoma de Querétaro.
- UNESCO. (2015). *Facing the challenges: Case studies and indicators*. Paris, Francia: UNESCO.
- Veleva, V., y Ellenbecker, M. (2001). Indicators of Sustainable Production: A New Tool for Promoting Business Sustainability. *New Solutions*. doi:<https://doi.org/10.2190/XQK7-UB3W-3AQE-G4N0>
- Wilson, M.-G. (2017). *Manual de indicadores de calidad del suelo para las eco-regiones de Argentina*. (M. d. Agroindustria, Ed.) Buenos Aires: Entre Ríos: Ediciones INTA, 2017.
- WRC. (22 de Noviembre de 2017). *Monitoring the Quality of Surface Waters*. Obtenido de Water Research Center: <http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>
- Zúñiga, F. B., y et-al. (2011). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. México D.F.: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM 2a Edición.

10. ANEXOS

Anexo 1. Datos de Velocidad de Infiltración por sitio

No. sitio	X	Y	Vel Infiltración (min/cm)	Cobertura
1	711592	2118845	12.453	Potrero
2	711320	2118929	0.827	Potrero
3	711225	2119080	2.834	Potrero
4	711082	2119158	5.740	Potrero
5	710902	2119254	2.992	Potrero
6	710979	2119273	7.430	Potrero
7	711145	2119305	3.150	Potrero
8	711091	2119440	3.952	Potrero
9	710987	2119503	24.387	Potrero
10	710845	2119529	5.983	Potrero
11	710776	2119337	4.341	Potrero
12	710599	2119398	7.199	Potrero
13	710514	2119277	10.872	Potrero
14	710699	2119233	7.139	Potrero
15	710914	2119039	21.951	Potrero
16	710914	2118780	8.111	Potrero
17	708179	2121059	1.030	Potrero
18	708443	2121005	3.790	Potrero
19	708704	2121094	2.503	Cafetal
20	708681	2120005	2.114	Potrero
21	708746	2120542	0.662	Cafetal
22	708869	2121205	9.210	Potrero
23	709050	2121026	1.782	Potrero
24	709068	2120764	19.708	Potrero
25	709463	2120674	1.394	Potrero
26	709258	2120478	2.286	Potrero
27	709651	2120491	1.617	Acahual
28	709606	2120235	4.731	Acahual
29	709765	2120003	6.883	Bosquete
30	709728	2119698	1.289	Bosquete
31	709936	2120315	10.580	Potrero
32	709981	2120068	0.322	Bosquete
33	707738	2121418	0.930	Acahual
34	708096	2121641	2.189	Potrero
35	707966	2120294	0.266	Acahual
36	708358	2120514	1.113	Potrero
37	710183	2119927	6.331	Potrero

38	710297	2119414	12.105	Potrero
39	710161	2119231	0.322	Potrero
40	710083	2118940	3.086	Potrero
41	712724	2118089	3.164	Maizal
42	709301	2118448	0.486	Frijolar
43	709379	2118124	0.574	Mixto (café y aguacate)
44	709584	2117789	0.061	Cafetal
45	709929	2117847	0.766	Cafetal
46	709744	2118254	0.182	Cafetal
47	710308	2117868	5.704	Bosquete
48	710063	2118401	0.147	Cafetal
49	709927	2118588	0.080	Cafetal
50	709725	2118817	6.079	Acahual
51	710239	2118605	4.835	Potrero
52	710179	2118501	0.231	Potrero
53	710333	2117475	7.581	Potrero
54	710403	2117745	2.840	Cafetal
55	710589	2117933	0.413	Potrero
56	710689	2118133	4.402	Potrero
57	710992	2117993	0.595	Potrero
58	710861	2117871	0.669	Potrero
59	710524	2118338	0.924	Acahual
60	711162	2118475	1.613	Potrero
61	707390	2118938	5.716	Maizal
62	707368	2119085	1.265	Maizal
63	707162	2119056	1.654	Maizal
64	707133	2118838	3.685	Maizal
65	707291	2118715	3.271	Maizal
66	706742	2119870	1.703	Maizal
67	707606	2119676	3.040	Maizal
68	705814	2120151	8.160	Potrero
69	705861	2119998	2.335	Mixto (maíz y aguacate)
70	706041	2120355	1.569	Maizal
71	706102	2120209	0.158	Bosquete
72	706102	2120043	5.168	Mixto (Frutal y potrero)
73	706224	2120039	0.438	Maizal
74	706439	2119881	3.283	Ciruelar
75	706676	2119537	0.182	Maizal
76	706967	2119551	1.581	Maizal

77	711057	2118275	18.242	Potrero
78	711214	2118164	0.766	Potrero
79	711461	2118378	6.470	Potrero
80	707443	2118679	2.104	BMM
81	707602	2118516	0.255	BMM
82	707590	2118433	0.316	BMM
83	707561	2118283	1.164	Maizal
84	707756	2118896	0.586	BMM
85	707764	2118713	0.586	BMM
86	707829	2118539	6.032	Potrero
87	707730	2118290	0.896	Potrero
88	707670	2118128	2.955	Maizal
89	711670	2117968	1.557	Caña
90	711765	2118199	6.166	Caña
91	701642	2118291	0.694	Potrero
92	711987	2118280	1.803	Potrero
93	711916	2118099	1.897	Potrero
94	711952	2118423	4.196	Caña
95	711672	2118577	0.529	Potrero
96	712202	2118557	4.013	Caña
97	711339	2118735	5.764	Potrero
98	711284	2118000	0.523	Potrero
99	710018	2117448	4.743	Potrero
100	709896	2117254	0.930	Potrero
101	710029	2116903	1.054	Maizal
102	711288	2117083	0.175	BMM
103	711349	2117252	0.343	Acahual
104	711138	2117156	2.477	Potrero
105	711178	2117762	0.669	BMM
106	711148	2117544	1.097	BMM
107	711263	2117667	0.304	BMM
108	712040	2117009	2.700	BMM
109	711521	2117671	1.719	Aguacatal
110	711532	2117451	0.773	Aguacatal
111	711727	2117597	1.838	Acahual
112	712014	2117608	2.648	BMM
113	712341	2117230	0.670	BMM
114	712499	2116953	0.697	BMM
115	712728	2116858	0.832	BMM

116	712296	2116674	0.465	Acahual
117	712790	2116708	1.400	Cafetal
118	706346	2121314	0.459	BMM
119	706146	2121485	0.254	BMM
120	706233	2121700	0.735	BMM
121	706239	2121897	0.162	Acahual
122	706355	2122066	0.676	BMM
123	706162	2122431	0.459	Maizal
124	706574	2122330	3.081	Potrero
125	706459	2122429	1.627	Maizal
126	706258	2122826	1.108	Maizal
127	706468	2122766	1.573	Maizal
128	707622	2122194	0.124	BMM
129	707541	2122485	0.189	BMM
130	707419	2122639	0.903	Maizal
131	707219	2122668	0.989	Maizal
132	707019	2122554	1.313	Maizal
133	712963	2117017	0.243	Acahual
134	713164	2117105	0.384	Acahual
135	713106	2116893	2.513	Cafetal
136	713229	2116766	1.086	Cafetal
137	713472	2116729	0.297	Cafetal
138	713670	2116671	0.605	Cafetal
139	713419	2117088	0.341	Cafetal
140	713845	2116537	1.043	Cafetal
141	714110	2116430	0.551	Cafetal
142	714328	2116485	0.643	Cafetal
143	714636	2116462	0.378	Cafetal
144	714849	2116590	2.000	Cafetal
145	716660	2116192	0.157	Cafetal
146	716098	2116541	1.432	Cafetal
147	715515	2116702	0.184	Cafetal
148	715041	2116884	0.849	Cafetal

Anexo 2. Datos de medición de caudal del Río Aguacapa

No.	Fecha	Hora	Temperatura (°C)		Tirante de Agua (m)	Velocidad promedio	Área de película	Caudal	
			Externa	Agua				h	m/s
			1	18/02/2016	07:35	8.4	13.1	0.040	0.545
2	25/02/2016	07:25	11.5	13.3	0.030	0.624	0.132	0.082	82.3
3	03/03/2016	07:30	14.1	15.0	0.033	0.474	0.145	0.069	68.8
4	10/03/2016	07:26	13.5	14.7	0.035	0.479	0.154	0.074	73.8
5	17/03/2016	08:05	18.3	17.0	0.030	0.476	0.132	0.063	62.8
6	24/03/2016	07:50	18.5	17.0	0.025	0.531	0.110	0.058	58.4
7	31/03/2016	08:45	20.0	18.0	0.028	0.420	0.123	0.052	51.8
8	07/04/2016	08:15	15.0	17.0	0.028	0.396	0.123	0.049	48.8
9	14/04/2016	09:45	20.0	18.0	0.025	0.357	0.110	0.039	39.3
10	21/04/2016	08:20	S/R	S/R	0.035	0.346	0.154	0.053	53.4
11	28/04/2016	08:15	15.0	19.0	0.028	0.372	0.123	0.046	45.9
12	05/05/2016	08:10	19.0	19.5	0.025	0.386	0.110	0.042	42.4
13	12/05/2016	09:20	21.5	20.5	0.024	0.298	0.106	0.031	31.5
14	19/05/2016	08:00	17.0	18.5	0.028	0.337	0.123	0.042	41.5
15	26/05/2016	10:15	26.0	21.0	0.018	0.224	0.079	0.018	17.7
16	14/06/2016	07:25	18.0	19.5	0.035	0.378	0.154	0.058	58.2
17	23/06/2016	07:15	15.0	18.0	0.070	0.796	0.308	0.245	245.1
18	30/06/2016	07:30	14.0	19.0	0.125	1.364	0.550	0.750	750.0
19	07/07/2016	08:05	14.0	19.0	0.120	1.413	0.528	0.746	746.1
20	14/07/2016	17:45	20.0	19.0	0.126	1.290	0.554	0.715	715.0
21	21/07/2016	08:40	19.0	18.5	0.128	1.391	0.563	0.783	783.3
22	28/07/2016	09:00	17.0	18.0	0.105	1.112	0.462	0.514	513.9
23	04/08/2016	07:45	14.0	18.0	0.081	0.971	0.354	0.344	343.9
24	11/08/2016	09:25	20.5	19.0	0.240	2.686	1.056	2.836	2836.4
25	18/08/2016	09:35	18.0	19.0	0.220	2.872	0.968	2.780	2780.0
26	25/08/2016	09:10	15.0	17.0	0.195	2.434	0.858	2.089	2088.8
27	01/09/2016	17:35	21.0	20.0	0.195	1.844	0.858	1.583	1582.6
28	11/09/2016	14:50	24.0	21.0	0.175	2.130	0.770	1.640	1639.9
29	15/09/2016	09:30	19.0	19.0	0.180	2.248	0.792	1.780	1780.1
30	22/09/2016	18:00	20.0	20.0	0.138	1.940	0.607	1.178	1178.1
31	30/09/2016	08:20	18.0	19.0	0.170	2.021	0.748	1.512	1511.8
32	06/10/2016	09:15	18.0	18.0	0.165	2.202	0.726	1.599	1598.6
33	13/10/2016	09:05	19.0	18.0	0.142	1.935	0.625	1.209	1208.7
34	27/10/2016	16:15	19.0	18.0	0.122	1.557	0.537	0.836	835.7
35	05/11/2016	13:00	18.0	18.0	0.100	1.163	0.440	0.512	511.8
36	10/11/2016	11:15	20.0	18.0	0.101	1.266	0.444	0.562	562.4

37	17/11/2016	09:40	19.0	16.5	0.094	1.134	0.414	0.469	469.0
38	24/11/2016	09:30	16.0	16.0	0.084	0.999	0.370	0.369	369.4
39	08/12/2016	09:10	18.0	17.0	0.076	0.945	0.334	0.316	315.9
40	24/12/2016	08:50	12.0	15.0	0.086	0.966	0.378	0.366	365.6
41	05/01/2017	10:00	14.0	14.5	0.080	0.931	0.352	0.328	327.6
42	12/01/2017	17:05	17.0	15.2	0.074	0.848	0.326	0.276	276.0
43	19/01/2017	16:55	19.0	16.5	0.067	0.716	0.295	0.211	210.9
44	26/01/2017	17:35	19.0	16.5	0.059	0.728	0.260	0.189	189.0
45	02/02/2017	08:25	13.0	13.0	0.057	0.716	0.251	0.180	179.7
46	11/02/2017	09:45	16.5	13.5	0.051	0.676	0.224	0.152	151.6
47	28/02/2017	07:35	13.5	14.7	0.046	0.464	0.202	0.094	93.9

Anexo 3. Datos de campo para el muestreo de suelo

No. Sitio	No. Muestra Compuesta	Altura msnm	Fecha	Pendiente	Temperatura Suelo	Humedad	Observaciones
1	12	1414	21/03/2017	35	17.0	4.5	Potrero
2	12	1423	21/03/2017	45	20.5	5.0	Potrero
3	12	1422	21/03/2017	35	19.0	5.0	Potrero
4	12	1384	21/03/2017	25	20.5	5.0	Potrero
5	11	1359	21/03/2017	15	18.0	8.0	Potrero
6	12	1385	21/03/2017	25	16.0	6.5	Potrero
7	12	1397	21/03/2017	40	21.0	6.5	Potrero
8	12	1375	21/03/2017	45	21.0	5.0	Potrero
9	12	1376	21/03/2017	35	18.5	6.0	Potrero
10	12	1377	21/03/2017	20	22.0	8.0	Potrero
11	11	1367	21/03/2017	15	20.5	7.0	Potrero
12	11	1373	21/03/2017	10	21.0	4.5	Potrero
13	11	1365	21/03/2017	15	17.0	2.0	Potrero
14	11	1368	21/03/2017	10	22.0	2.0	Potrero
15	11	1379	21/03/2017	5	21.0	4.0	Potrero
16	14	1388	21/03/2017	5	23.5	3.0	Potrero
17	4	1542	25/03/2017	25	21.9	6.0	Potrero
18	4	1504	25/03/2017	35	21.5	3.0	Potrero
19	4	1487	25/03/2017	10	19.1	2.0	Cafetal
20	6	1427	25/03/2017	10	16.8	5.0	Potrero
21	4	1403	25/03/2017	5	18.0	8.0	Cafetal
22	4	1467	25/03/2017	45	19.7	2.0	Potrero
23	4	1476	25/03/2017	0	21.6	2.5	Potrero
24	4	1441	25/03/2017	20	20.5	6.0	Potrero
25	7	1402	25/03/2017	30	20.5	3.5	Potrero
26	7	1386	27/03/2017	30	21.3	4.0	Potrero
27	7	1389	27/03/2017	0	20.0	2.0	Acahual
28	7	1376	27/03/2017	35	18.0	3.0	Acahual
29	7	1390	27/03/2017	40	17.0	2.5	Bosquete
30	7	1372	27/03/2017	45	17.7	3.0	Bosquete
31	7	1371	27/03/2017	5	19.7	6.0	Potrero
32	7	1382	27/03/2017	15	17.9	2.0	Bosquete
33	2	1563	30/03/2017	5	20.0	3.5	Acahual
34	4	1533	30/03/2017	15	21.8	3.0	Potrero
35	6	1467	30/03/2017	45	20.0	4.0	Acahual
36	4	1455	30/03/2017	40	17.7	3.0	Potrero

37	7	1401	30/03/2017	15	26.0	3.0	Potrero
38	11	1377	30/03/2017	10	18.2	3.0	Potrero
39	11	1384	30/03/2017	0	22.3	4.0	Potrero
40	11	1363	30/03/2017	5	19.8	4.0	Potrero
41	15	1364	31/03/2017	5	20.0	1.5	Maizal
42	10	1490	31/03/2017	60	21.1	4.0	Frijolar
43	10	1425	31/03/2017	70	20.2	2.7	Mixto (café y aguacate)
44	13	1426	31/03/2017	60	19.4	6.0	Cafetal
45	13	1387	31/03/2017	5	19.0	1.0	Cafetal
46	10	1417	31/03/2017	60	22.0	2.0	Cafetal
47	13	1339	31/03/2017	35	18.0	2.0	Bosquete
48	10	1364	03/04/2017	50	17.7	1.3	Cafetal
49	10	1412	03/04/2017	60	18.6	2.8	Cafetal
50	10	1382	03/04/2017	60	22.5	5.0	Acahual
51	10	1343	03/04/2017	5	18.1	3.5	Potrero
52	10	1351	03/04/2017	25	21.6	1.3	Potrero
53	13	1347	6/04/2017	5	22.7	2.5	Potrero
54	13	1356	6/04/2017	60	18.6	1.8	Cafetal
55	13	1336	6/04/2017	25	22.0	2.0	Potrero
56	14	1351	6/04/2017	15	21.3	2.0	Potrero
57	14	1348	6/04/2017	10	22.2	4.0	Potrero
58	14	1328	6/04/2017	45	21.7	2.5	Potrero
59	14	1352	6/04/2017	0	18.7	3.0	Acahual
60	14	1365	6/04/2017	15	23.3	3.0	Potrero
61	5	1711	05/05/2017	25	17.6	3.5	Maizal
62	5	1742	05/05/2017	30	18.8	7.0	Maizal
63	5	1799	05/05/2017	60	18.8	7.5	Maizal
64	5	1784	05/05/2017	35	17.9	4.0	Maizal
65	5	1774	05/05/2017	45	18.1	6.5	Maizal
66	3	1840	05/05/2017	45	18.1	2.0	Maizal
67	5	1844	05/05/2017	5	18.0	6.0	Maizal
68	3	1940	11/05/2017	60	17.8	4.0	Potrero
69	3	1898	11/05/2017	20	18.8	2.5	Mixto (maíz y aguacate)
70	3	1923	11/05/2017	65	18.6	2.5	Maizal
71	3	1962	11/05/2017	60	16.3	2.5	Bosquete
72	3	1929	11/05/2017	30	17.6	3.5	Mixto (Frutal y potrero)
73	3	1908	11/05/2017	45	18.9	2.0	Maizal
74	3	1860	11/05/2017	45	19.4	2.0	Ciruelar
75	5	1867	11/05/2017	65	19.4	4.0	Maizal

76	5	1798	11/05/2017	70	20.3	3.5	Maizal
77	14	1364	11/05/2017	0	24.0	2.0	Potrero
78	14	1331	11/05/2017	30	25.6	3.5	Potrero
79	15	1350	11/05/2017	35	21.5	5.0	Potrero
80	8	1748	12/05/2017	60	17.2	1.9	BMM
81	8	1757	12/05/2017	65	18.1	1.2	BMM
82	8	1804	12/05/2017	35	17.7	3.1	BMM
83	8	1742	12/05/2017	30	21.0	4.0	Maizal
84	8	1595	12/05/2017	10	17.2	4.0	BMM
85	8	1625	12/05/2017	70	16.8	7.0	BMM
86	8	1661	12/05/2017	25	20.5	7.0	Potrero
87	8	1686	12/05/2017	5	19.2	5.5	Potrero
88	8	1717	12/05/2017	40	21.2	6.0	Maizal
89	15	1362	22/05/2017	0	25.4	1.5	Caña
90	15	1368	22/05/2017	0	23.9	1.0	Caña
91	15	1371	22/05/2017	0	24.0	2.0	Potrero
92	15	1369	22/05/2017	0	24.4	3.0	Potrero
93	15	1366	22/05/2017	0	24.2	2.5	Potrero
94	15	1375	22/05/2017	0	24.2	2.0	Caña
95	15	1384	22/05/2017	5	21.9	4.8	Potrero
96	15	1386	22/05/2017	0	24.7	1.5	Caña
97	14	1397	22/05/2017	30	24.0	2.0	Potrero
98	14	1344	22/05/2017	50	21.8	2.5	Potrero
99	13	1373	25/05/2017	30	21.1	2.0	Potrero
100	13	1397	25/05/2017	40	23.5	2.0	Potrero
101	13	1371	25/05/2017	15	24.2	2.0	Maizal
102	16	1361	25/05/2017	20	21.0	2.0	BMM
103	16	1345	25/05/2017	15	21.0	2.0	Achual
104	16	1352	25/05/2017	5	23.2	4.0	Potrero
105	16	1294	26/05/2017	40	21.8	1.5	BMM
106	16	1320	26/05/2017	40	19.9	6.0	BMM
107	16	1328	26/05/2017	40	20.5	1.0	BMM
108	17	1341	26/05/2017	60	20.9	1.5	BMM
109	16	1317	20/06/2017	45	22.0	4.0	Aguacatal
110	16	1346	20/06/2017	30	22.2	3.0	Aguacatal
111	17	1325	20/06/2017	5	20.0	3.5	Achual
112	17	1334	20/06/2017	60	19.7	2.0	BMM
113	17	1321	20/06/2017	45	19.5	3.5	BMM
114	17	1315	20/06/2017	40	19.9	2.5	BMM
115	17	1278	20/06/2017	60	19.2	3.0	BMM
116	17	1354	20/06/2017	10	19.9	4.5	Achual

117	18	1314	20/06/2017	35	20.5	4.0	Cafetal
118	2	1887	21/06/2017	35	16.6	2.5	BMM
119	2	1937	21/06/2017	55	16.9	2.5	BMM
120	2	1846	21/06/2017	45	19.5	5.0	BMM
121	2	1904	21/06/2017	40	18.9	3.5	Acahual
122	2	1897	21/06/2017	60	17.0	2.0	BMM
123	1	1860	22/03/2017	15	20.1	1.5	Maizal
124	1	1818	23/03/2017	0	20.0	3.0	Potrero
125	1	1824	24/03/2017	10	20.0	3.0	Maizal
126	1	1845	25/03/2017	5	18.0	6.0	Maizal
127	1	1841	26/03/2017	5	17.5	3.0	Maizal
128	2	1639	26/03/2017	70	19.0	5.5	BMM
129	2	1711	26/03/2017	50	19.0	3.0	BMM
130	1	1742	27/03/2017	65	18.0	3.0	Maizal
131	1	1771	28/03/2017	30	24.0	2.0	Maizal
132	1	1807	29/03/2017	30	22.0	2.0	Maizal
133	17	1273	30/03/2017	45	20.0	4.0	Acahual
134	17	1278	30/03/2017	40	20.0	7.5	Acahual
135	18	1274	30/03/2017	10	20.5	6.0	Cafetal
136	18	1277	30/03/2017	25	20.0	2.5	Cafetal
137	18	1298	30/03/2017	15	21.0	3.0	Cafetal
138	18	1283	30/03/2017	40	22.5	1.9	Cafetal
139	18	1257	30/03/2017	45	21.5	2.0	Cafetal
140	18	1264	30/03/2017	35	23.0	6.0	Cafetal
141	18	1253	30/03/2017	15	24.5	4.5	Cafetal
142	19	1227	30/03/2017	35	32.0	7.0	Cafetal
143	19	1228	30/03/2017	0	29.0	7.0	Cafetal
144	19	1211	30/03/2017	35	28.0	4.5	Cafetal
145	19	1122	30/03/2017	10	35.0	2.5	Cafetal
146	19	1148	30/03/2017	25	25.0	3.0	Cafetal
147	19	1171	30/03/2017	15	28.0	4.0	Cafetal
148	19	1190	30/03/2017	30	27.0	3.0	Cafetal
149	9	1707	04/04/2017	30	21	5.5	Potrero
150	9	1740	04/04/2017	60	24	3.5	Potrero
151	9	1716	04/04/2017	60	20	3	Maizal
152	9	1604	04/04/2017	15	20	2.5	Maizal
153	9	1616	04/04/2017	30	19.5	3	Maizal
154	9	1650	04/04/2017	30	20	4.5	Maizal
155	9	1655	04/04/2017	45	20	4.5	Maizal
156	9	1695	04/04/2017	50	19	7	Maizal