



**El Colegio
de la Frontera
Norte**



**DISEÑO DE UN ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD EN
AGROSISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA.
CASO DE ESTUDIO EN EL VALLE DE MEXICALI**

Tesis presentada por

Carolina del Rosario Sánchez Gastélum

para obtener el grado de

**MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INTEGRAL
DEL AMBIENTE**

Tijuana, B.C., México

2010

*"Para Ana María Gastélum Valenzuela,
porque sin ella, hoy todo esto no podría
ser posible".*

*"Para todas las personas que se preocupan
y ocupan por la problemática ambiental".*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por financiarme mis estudios de maestría, fue de gran apoyo en estos dos años, sin duda tengo un compromiso con mi país.

A El Colef y a El CICESE porque me dieron la oportunidad de realizar la maestría en su institución, permitiéndome crecer profesional y personalmente.

A la Dra. Idania Valdez Vazquez por aceptar la dirección de mi tesis, por creer en mí, y porque con paciencia me ayudó y enseñó lo necesario para poder culminar este trabajo.

A la Dra. Patricia Rivera Castañeda que como mi profesora y lectora siempre estuvo en la mejor disposición de ayudarme, gracias por sus comentarios y por su tiempo.

Al Dr. José Urciaga García por aceptar ser lector de mi tesis, a pesar de sus ocupaciones.

A mis profesores de El Colef y del CICESE, que me mostraron la importancia de las ciencias naturales y sociales para los estudios ambientales, y sus enseñanzas perduraran por siempre.

A todo el Distrito de Desarrollo Rural 002 de la SAGARPA Mexicali, por su gran colaboración y accesibilidad para poder realizar mis entrevistas. Especialmente al MVZ Ramón Salazar Aguirre, Médico, gracias por enseñarme en tan poco tiempo la actitud que se debe tomar ante la vida, y sobre todo, mostrarme lo mucho que se necesita trabajar en el “agro” mexicano.

A mis compañeros de la MAIA, porque juntos aprendimos cosas maravillosas, estoy segura que la experiencia MAIA no la olvidaremos, y porque en estos dos años les tomé gran afecto.

Al honorable cuerpo de la MEA (Angie, Cacha, Caraza, Carlitos, Emanuel, Faus, Fede, Goyito, Marce, Mario, Profe Oscar y Sari) que a pesar de no ser economista me aceptaron y me hicieron sentir como uno de ellos, los extrañaré demasiado y siempre los llevaré en mi corazón, también a Marcela Achoy y Kuko Chávez por escucharme y brindarme su amistad.

A mis Hermanos Daniel y Catalina por tener paciencia e intentar entender mis locas ideas, a mi sobrina Regina que inicia este gran viaje, a mi nueva hermana Silvia, y a toda mi familia de Guasave, Obregón y Tijuana que siempre están conmigo a donde quiera que voy.

A Federico Martínez Aguilar por su agradable compañía, y porque en los momentos difíciles me brindó su apoyo y cariño, que me dieron la fortaleza para seguir adelante.

A todos muchas gracias, que dios los bendiga, ilumine y guie en su camino.

RESUMEN

La bioenergía surge como una respuesta a problemas relacionados con la volatilidad en los precios del petróleo, la seguridad energética nacional, y el calentamiento global. En este trabajo, se ha definido un Agrosistema de Producción de Bioenergía (APB) como aquel formado por sub-sistemas dirigidos a la producción de biomasa, su transformación en bioenergía, así como los recursos humanos implicados. Se han clasificado en APB primarios cuando el insumo empleado para la producción de bioenergía procede directamente de un cultivo agrícola, y en APB secundarios cuando se utilizan esquilmos agrícolas. Esta producción supone beneficios como el impulso al desarrollo rural, disminución de gases efecto invernadero, pero también riesgos relacionados con la seguridad alimentaria y aumento en la agrocontaminación. En la presente investigación, se propone el diseño de un Índice que permita evaluar el grado de sustentabilidad (IS) en los APB. Para esto, se utilizó la metodología propuesta en el MESMIS, identificando 29 puntos críticos que fueron comunes en diferentes escenarios de APB. A partir de esto, se propusieron 7 indicadores económicos, 11 ambientales y 11 sociales, los cuales fueron normalizados en función de un gradiente de impacto e integrados en el IS. Este IS representa una herramienta sencilla para evaluar el grado de sustentabilidad en diferentes escenarios de APB, ya sea en forma longitudinal o transversal.

Palabras clave: Agrosistema, bioenergía, índice de sustentabilidad, MESMIS.

ABSTRACT

Bioenergy arises as a response to problems related to the volatility in the oil prices, the energetic national security and the global warming. In this work, an Bioenergy Production Agrosystem (BPA) has been defined as that formed by subsystems directed to the production of biomass, its transformation into bioenergy, as well as the human resources implied. The BPA's have been classified into primary ones when the input used for the production of bioenergy comes directly from an agricultural crop, and into secondary ones when agricultural residues are transformed. This production assumes benefits as the impulse to the rural development, greenhouse gas decrease, but also could involve risks related with food safety and increase in agro-pollution. The aim of this research was to design an Index that allows the evaluation of the degree of sustainability (SI) in the BPA. To achieve this, it was used the methodology proposed in the MESMIS, identifying 29 critical points that were common in different scenarios of BPA. Then, 7 economic indicators, 11 environmental indicators and 11 social indicators were proposed, which were normalized according to a gradient of impact and integrated in the SI. This SI represents a simple tool to evaluate the degree of sustainability in different sceneries of BPA, either in form longitudinal or transverse.

Keys words: Agrosystem, bioenergy, Sustainability Index, MESMIS.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. BIOENERGÍA.....	4
Introducción	4
1.1 Consumo y producción de energía en México	4
1.2 Impactos de los combustibles fósiles	7
1.3 Desarrollo de las energías alternativas	10
1.4 Evolución de la bioenergía.....	12
1.5 Recursos agrícolas para la generación de bioenergía.....	16
1.6 Tecnologías de producción de bioenergía.....	22
1.6.1 Tecnologías de conversión bioquímicas	23
1.6.2 Tecnologías de conversión termoquímicas.....	26
1.6.3 Tecnologías de conversión químicas	27
1.7 Los bioenergéticos y la legislación	28
1.8 Criterios de sustentabilidad para la producción de Bioenergía.....	32
Capítulo II. AGRICULTURA Y SUSTENTABILIDAD	36
Introducción	36
2.1 Sustentabilidad, agricultura sustentable y agroecología	37
2.2 El MESMIS.....	40
2.3 Agrosistemas	46
2.4 La agricultura en México. Situación actual.....	47
2.5 Desarrollo rural mediante producción de bioenergía	51
Capítulo III. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	54
Introducción	54
3.1 Planteamiento del problema.....	54
3.2 Preguntas centrales de investigación.....	56
3.3 Objetivo general y objetivos específicos.....	57
3.4 Hipótesis.....	57
Capítulo IV. METODOLOGÍA.....	58
Introducción	58
4.1 Selección y caracterización de los sistemas a evaluar.....	58
4.2 Definición de las áreas de evaluación, variables e indicadores.....	61
4.3 Integración de indicadores	65
4.31. Diseño del Índice de Sustentabilidad	67

Capítulo V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
Introducción	70
5.1. Agrosistemas de Producción de Bioenergía	71
5.1.1. Descripción de los escenarios	71
5.1.11. Particularidades del Agrosistema de Producción de Bioenergía primario	72
5.1.12. Particularidades del Agrosistema de Producción de Bioenergía Secundario	84
5.1.2. Análisis y puntos críticos identificados en la caracterización teórica	90
5.2. Entrevistas a representantes de agricultores en el Valle de Mexicali	92
5.21. Primera sección de la entrevista, cultivos energéticos	92
5.21.11. Análisis y puntos críticos identificados en la primera sección	97
5.22. Segunda sección de la entrevista, esquilmos agrícolas.....	101
5.22.21. Análisis y puntos críticos identificados en la segunda sección	104
5.3 Indicadores de los Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB)	106
5.3.1 Indicadores Económicos.....	106
5.3.11. Análisis de los indicadores económicos	111
5.32 Indicadores Ambientales	112
5.3.21. Análisis de los indicadores ambientales	122
5.33 Indicadores Sociales	124
5.3.31. Análisis de los indicadores sociales.....	131
5.4 Índice de sustentabilidad.....	134
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
6.1 Conclusiones	137
6.2 Recomendaciones	140
BIBLIOGRAFÍA.....	142
ANEXO.....	i
Formato de la entrevista a los representantes de los sistema-producto agrícola de Mexicali..	ii

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. 1. Impactos ambientales del petróleo.....	9
Cuadro 1. 2. Clasificación de los recursos biomásicos según su origen	16
Cuadro 1. 3. Criterios de sustentabilidad para la producción de bioenergía	34
Cuadro 2. 1. Principales regiones y cultivos agrícolas del país.....	49
Cuadro 2. 2. Producción anual de cultivos agrícolas sensibles (Miles de toneladas).....	50
Cuadro 4. 1. Tipo de tecnología de conversión aplicada según el APB	60
Cuadro 4. 2. Gradiente de sustentabilidad propuesto para la normalización de los indicadores	66
Cuadro 4. 3. Ponderación aplicable a los indicadores normalizados.....	68
Cuadro 5. 1. Indicadores Económicos.....	107
Cuadro 5. 2. Especificación normativa D6751 para el Biodiesel.....	109
Cuadro 5. 3. Especificación normativa D4806 para el alcohol desnaturalizado.....	109
Cuadro 5. 4. Indicadores ambientales.....	113
Cuadro 5. 5. Factores de emisión por tipo de combustible.....	118
Cuadro 5. 6. Factores de emisión para metano y óxido nitroso.....	119
Cuadro 5. 7. Indicadores Sociales.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Estructura de la producción de energía primaria en México, 2008.....	5
Figura 1. 2. Consumo final total de energía	6
Figura 1. 3. Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación 1980-2005	7
Figura 1. 4. Potencial bioenergético en México.....	17
Figura 1. 5. Estructura de la materia lignocelulosa	22
Figura 1. 6. Clasificación generalizada de las tecnologías para la obtención de Bioenergía	23
Figura 1. 7. Insumos para la producción de bioetanol.....	24
Figura 1. 8. Mecanismo de la digestión anaerobia.....	25
Figura 1. 9. Reacción de transesterificación.....	28
Figura 2. 1. El rol de la agroecología en la satisfacción de los objetivos de la agricultura sustentable	39
Figura 2. 2. El ciclo de evaluación en el MESMIS.....	44
Figura 2. 3. Estructura general de un sistema de manejo agrícola o agrosistema.....	47
Figura 2. 4. Importaciones y exportaciones de productos sensibles (Miles de toneladas).....	50
Figura 2. 5. Sectores beneficiados por la producción de bioenergía en sistemas agrícolas	52
Figura 4. 1. APB primario, o de referencia	59
Figura 4. 2. APB secundario, o alternativo	59
Figura 4. 3. Ubicación del Valle de Mexicali.....	62
Figura 4. 4. Estructura operativa del MESMIS: la relación entre atributos e indicadores	64
Figura 5. 1. Subsistema agrícola en el APB primario.....	73
Figura 5. 2. Subsistema de transformación en el APB primario. Tecnología Bioquímica, Fermentación.....	77
Figura 5. 3. Subsistema de transformación en el APB. Tecnología Termoquímica, Combustión directa.....	79
Figura 5. 4. Subsistema de transformación en el APB. Tecnología Termoquímica, Gasificación.....	81

Figura 5. 5. Subsistema de transformación en el APB primario. Tecnología Química, Transesterificación.	83
Figura 5. 6. Subsistema agrícola en el APB secundario.	85
Figura 5. 7. Subsistema de transformación en el APB secundario. Tecnología Bioquímica, Fermentación.	87
Figura 5. 8. Subsistema de transformación en el APB secundario. Tecnología Bioquímica, digestión anaerobia.	89
Figura 5. 9. Pregunta 1.	92
Figura 5. 10. Pregunta 1.1.	93
Figura 5. 11. Pregunta 2.	93
Figura 5. 12. Pregunta 5.	93
Figura 5. 13. Pregunta 6.	94
Figura 5. 14. Pregunta 7.	94
Figura 5. 15. Pregunta 8.	94
Figura 5. 16. Pregunta 9.	95
Figura 5. 17. Pregunta 10.	95
Figura 5. 18. Pregunta 11.	95
Figura 5. 19. Pregunta 12.	96
Figura 5. 20. Pregunta 13.	96
Figura 5. 21. Pregunta 14.	96
Figura 5. 22. Maquinaria agrícola en el corte de alfalfa.	98
Figura 5. 23. Infraestructura para riego agrícola en el Valle de Mexicali.	98
Figura 5. 24. Predios agrícolas y canal de riego del Valle de Mexicali.	99
Figura 5. 25. Trigueros del Valle de Mexicali, reunidos en el Ejido Nayarit.	100
Figura 5. 26. Pregunta 15.	101
Figura 5. 27. Pregunta 16.	102
Figura 5. 28. Pregunta 17.	102
Figura 5. 29. Pregunta 20.	102
Figura 5. 30. Pregunta 21.	103
Figura 5. 31. Pregunta 22.	103
Figura 5. 32. Pregunta 23.	103
Figura 5. 33. Pregunta 24.	104

INTRODUCCIÓN

La biomasa se conoce como cualquier material biológico de origen animal o vegetal, con características de ser renovable, abundante y versátil. La biomasa primaria (natural) es producida por la naturaleza sin la intervención humana, por ejemplo, plantas, frutos, madera, etcétera. Mientras que la biomasa secundaria (residual) es generada de alguna actividad humana, por ejemplo, residuos domésticos, industriales, agrícolas, animales, entre otros. La transformación de biomasa a bioenergía puede llevarse a cabo mediante tres métodos principales: bioquímicos, termoquímicos y químicos. Existen diferentes factores que determinan el método a utilizar, tales como el tipo y características del insumo u otros.

En los procesos bioquímicos son utilizados microorganismos o sus enzimas para la conversión de biomasa en algún biocombustible: en la fermentación anaerobia, azúcares como glucosa o almidón pueden ser convertidos a una gran variedad de biocombustibles como bioetanol, biobutanol e hidrógeno; en la digestión anaerobia se obtiene como producto principal un biogás rico en metano. En los procesos termoquímicos, la biomasa se somete a una digestión química llevada a cabo a temperaturas superiores a los 300°C, ya sea en presencia de oxígeno como la combustión y gasificación, o en ausencia de éste como la pirólisis, siendo el calor el principal producto, el cual es utilizado para la generación de vapor y finalmente convertido a electricidad, también pueden obtenerse biocombustibles gaseosos como metano o hidrógeno (Cantrell *et al.*, 2008). Por último, en los métodos químicos, se convierten aceites de origen vegetal o animal en biodiesel mediante una reacción de transesterificación (Demirbas, 2009).

Queda expuesta la versatilidad de la biomasa para su transformación en diferentes tipos de bioenergía, adaptándose a los recursos disponibles y requerimientos de cada región. Es por ello, que diversos países en el mundo, principalmente los industrializados, han visto en la bioenergía una alternativa para la sustitución gradual de los combustibles fósiles; actuales causantes de contaminación y con una disponibilidad gravemente comprometida.

Por la naturaleza misma de la biomasa, su obtención depende directa o indirectamente de ecosistemas agrícolas, también conocidos como agroecosistemas o agrosistemas. Éstos son

ecosistemas domesticados donde además de la energía solar, reciben una fuente de energía externa en forma de mano de obra, insumos y maquinaria con el fin de obtener un producto agrícola, forestal o animal. En este trabajo se define un Agrosistema de Producción de Bioenergía (APB) como aquel formado por sub-sistemas dirigidos a la producción de biomasa, su transformación en bioenergía, así como los recursos humanos implicados. Estos tres sub-sistemas, agrícola, de transformación y social, están estrechamente relacionados para que el APB tenga como producto algún tipo de bioenergético, ya sea en forma de calor, electricidad o biocombustible.

Se pueden reconocer dos tipos principales de APB; los primarios que tienen como principal producto el bioenergético, mientras que los secundarios generan además un producto agrícola. La diferencia entre los APB primarios y secundarios radica en el sub-sistema agrícola. El sub-sistema agrícola primario comprende cultivos energéticos; especies vegetales de rápido crecimiento que tienen como único propósito la producción de biomasa para su conversión en bioenergía, pudiendo ser aceites vegetales a partir de cultivos de *jatropha*, girasol y jojoba o azúcares a partir de cultivos de cereales. Contrario a esto, en el sub-sistema agrícola secundario se siembran cultivos vegetales para consumo humano o animal, y donde la biomasa residual es aprovechada para la obtención de bioenergía. La biomasa residual incluye todos aquellos materiales abandonados en el sitio de cosecha como rastrojos o aquellos subproductos generados del procesamiento del producto agrícola como cascarillas y bagazo.

En los APB, además del aspecto económico inherentemente involucrado existe el aspecto ambiental y social. Ya que tiene como base el manejo de recursos naturales durante la selección de tierras de cultivo, siembra y cosecha del producto; y los grupos sociales implicados que pueden o no, obtener un mayor bienestar con la implementación de esta actividad. Estos tres aspectos deben estar en equilibrio; generar ganancias económicas que logren un crecimiento social integral sin comprometer el ambiente. Además, un aspecto fundamental que debe asegurarse, es que los APB no entren en competencia con la producción de alimentos.

La integración de los aspectos económico, social y ambiental, puede lograrse al aplicar de los conceptos de sustentabilidad en los APB. Asegurar que un Agrosistema es sustentable con respecto a sí mismo después de la aplicación de mejoras, o respecto a otro Agrosistema, sólo puede ser concebido al realizar una evaluación integral en los dos sistemas en cuestión. Se han propuesto diversas metodologías para la evaluación de la sustentabilidad en agrosistemas agrícolas de diversas índoles. La estrategia propuesta en el presente trabajo es diseñar un “*ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD*”, que integre las tres áreas de evaluación. El proceso a seguir incluye primeramente la identificación de las variables o puntos críticos que inciden positiva o negativamente sobre cada Agrosistema. Posteriormente, las variables pueden ser medibles al ser relacionadas con indicadores, que finalmente son estandarizados, ponderados e integrados en el Índice de Sustentabilidad. Este Índice permitirá establecer criterios mínimos tendientes a la sustentabilidad, identificar variables para el fortalecimiento de la misma, y principalmente evaluar la sustentabilidad de forma longitudinal (a través del tiempo) o de forma transversal (comparación entre dos sistemas). Este Índice permitirá establecer criterios mínimos tendientes a la sustentabilidad, identificar variables para el fortalecimiento de la misma, y principalmente evaluar la sustentabilidad de forma longitudinal (a través del tiempo) o de forma transversal (comparación entre dos sistemas). Este Índice permitirá establecer criterios mínimos tendientes a la sustentabilidad, identificar variables para el fortalecimiento de la misma, y principalmente evaluar la sustentabilidad de forma longitudinal (a través del tiempo) o de forma transversal (comparación entre dos sistemas). Este Índice permitirá establecer criterios mínimos tendientes a la sustentabilidad, identificar variables para el fortalecimiento de la misma, y principalmente evaluar la sustentabilidad de forma longitudinal (a través del tiempo) o de forma transversal (comparación entre dos sistemas).

La investigación tomará como caso de estudio el Valle de Mexicali debido a que es una de las zonas agrícolas más importantes del país, por la alta generación de residuos agrícolas (Valdez-Vazquez *et al.*, 2010), además y por ser la zona agrícola más cercana.

CAPÍTULO I. BIOENERGÍA

Introducción

En este capítulo se expone la importancia del estudio de las energías alternativas, como un resultado de los impactos negativos de la producción y uso de combustibles fósiles, así como por la dependencia actual de la economía global hacia éstos. Se han originado un gran impulso hacia una amplia gama de energías alternativas, dentro de las que figura la Bioenergía, conocida también como la *energía de la biomasa*.

Se describen cómo los proyectos de bioenergía en Brasil, la Unión Europea, Estados Unidos y otros países, influyeron en las políticas públicas en México sobre bioenergía. Así mismo, se describen los tipos de insumos y tecnologías disponibles para la obtención de bioenergía en sus diferentes formas.

Al final del capítulo, se cuestiona cómo la regulación en materia de bioenergía, así como los criterios de sustentabilidad para su producción, se convierten en una necesidad.

1.1 Consumo y producción de energía en México

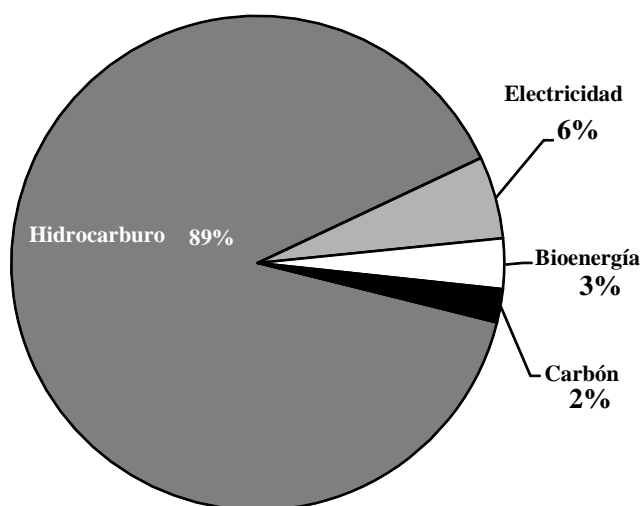
El consumo mundial de energía ha ido en aumento considerablemente en las últimas décadas, esto se debe principalmente al rápido crecimiento poblacional, a la urbanización, a los procesos de industrialización y a la demanda de transporte (IILSEN y CIE-UNAM, 2006). Esto hace que la energía se constituya como una parte fundamental para el desarrollo de las sociedades bajo los estándares actualmente marcados.

Las sociedades requieren abastecer sus necesidades mediante el consumo de energía la cual puede ser a) renovable, que incluye la energía eólica, solar, geotérmica, hidráulica y biomasa; y b) no renovable, como el petróleo, gas natural y carbón. Desde el siglo pasado, el hombre ha utilizado de forma preponderante energía no renovable, en especial petróleo. En México, fue después de la expropiación de la industria petrolera en 1938 cuando inició su auge

convirtiéndose en el combustible más importante, debido a los recursos destinados para su perforación y extracción, además del bajo costo con que se conceptualizó en aquella época (Álvarez, 2005).

En el 2008, México consumió 7,314 PJ¹ y produjo 10,500.16 PJ en total de energía primaria (Ver figura 1.1), permitiendo exportar 3,186 PJ. Del total de la energía primaria producida, se presenta en primer lugar los hidrocarburos incluyendo petróleo crudo con 91.45 PJ de los condensados y gas natural con 2,745.87 PJ; en segundo lugar la electricidad primaria a partir de hidroeléctricas con 386.78 PJ, nucleoelectricas con 106.64 PJ y geotérmicas con 70.17 PJ; en tercer lugar la bioenergía obtenida de leña con 246.31 PJ y bagazo de caña en ingenios azucareros con 99.13 PJ; y en cuarto lugar el carbón con 230.43 PJ (SENER, 2008).

Figura 1. 1. Estructura de la producción de energía primaria en México, 2008



Fuente: SENER, 2008.

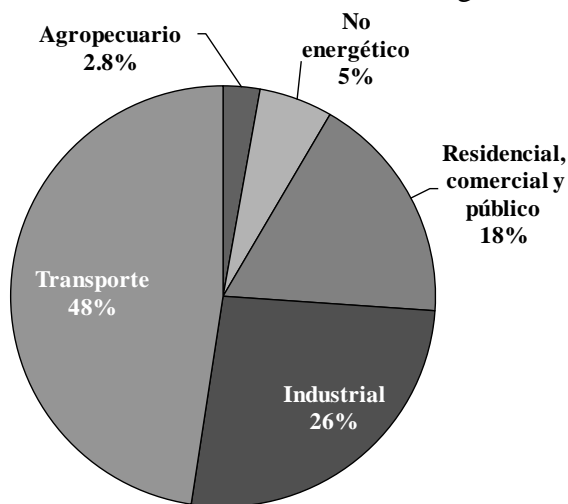
La gráfica de producción de energía primaria producida en México en el 2008, permite observar la gran dependencia existente de la nación ante los combustibles de origen fósil y como las energías renovables están claramente rezagadas. No obstante, de existir más

¹ Peta Joule (PJ): unidad de medida de energía equivalente a poco más de 277 millones de Kilowatts hora (KWh).

esfuerzos por disminuir esta dependencia y diversificar las fuentes de energía primaria, seguramente se fortalecería la seguridad energética del país.

El sector energético es parte fundamental para el desarrollo económico y social del país, ya sea por la extracción y exportación de hidrocarburos o por la generación de electricidad (Álvarez, 2005). La energía producida en México es utilizada en distintas actividades (ver figura 1.2), clasificadas en dos tipos de consumo: 1) no energético, que abastece los requerimientos de la petroquímica Pemex y otras ramas; y 2) energético, que abastece en primer lugar al sector transporte (donde la gasolina es el principal combustible), al sector industrial, seguido por el residencial, comercial y público, y por último el agropecuario (SENER, 2008).

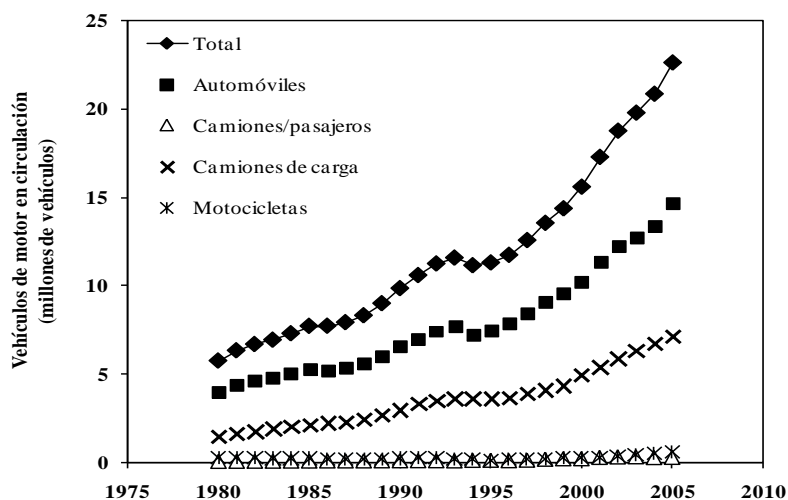
Figura 1. 2. Consumo final total de energía



Fuente: SENER, 2008.

En México, el sector transporte consume más del 40 por ciento de la energía total. Según datos presentados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2009, por medio del proyecto *La Estadística de Vehículos de Motor Registrados en Circulación (VMRC)*, en los últimos años el parque vehicular ha tenido un acelerado crecimiento (ver figura 1.3), siendo los automóviles de uso particular los que se encuentran en primer lugar.

Figura 1. 3. Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación 1980-2005



Fuente: INEGI, 2009.

Las estadísticas muestran que el sector transporte lidera el consumo de energía, especialmente de los derivados del petróleo como la gasolina y el diesel (SENER, 2008). Una de las razones existentes es la gran influencia en la sociedad por el uso del automóvil particular (INEGI, 2009). Una de las medidas a implementarse por parte de los gobiernos locales es la mejora en el transporte colectivo, y/o el incremento de otros medios de transporte como motocicletas y bicicletas, que podrían sin lugar a dudas disminuir el consumo de combustibles.

1.2 Impactos de los combustibles fósiles

La explotación de los hidrocarburos conlleva diversos efectos adversos a los ecosistemas. Pero son de especial interés, los gases emitidos durante la quema de los combustibles fósiles; hecho que ha tenido una tendencia creciente durante las últimas décadas.

Estos gases han provocado una serie de consecuencias negativas que incluyen: La disminución de la calidad atmosférica que repercute en la salud de quienes se encuentran expuestos a estos gases de combustión, originando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, alteraciones en el sistema nervioso, entre otras (INE-SEMARNAT, 2005); Algunos de los gases son conocidos como Gases de Efecto de Invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono

(CO₂), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x), que han producido cambios en los patrones climáticos a nivel mundial, lo que pudiera recrudecerse en décadas venideras; Y lo gases azufrados como los óxidos de azufre (SO_x) que han deteriorado gravemente diversos ecosistemas al ser precursores de la lluvia ácida.

En el compendio de estadísticas ambientales presentada por la Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales (SEMARNAT), (2008a) se publicó el inventario a nivel nacional de emisiones atmosféricas. Se presentaron las emisiones de CO con 7,493,908.90 toneladas, NO_x con 2,443,240.70 toneladas, SO_x con 5,463,065.50 toneladas, compuestos orgánicos volátiles con 20,040,556.20 toneladas, partículas menores a 10 micras con 2,749,262.00 toneladas, partículas menores a 2.5 micras con 965,370.20 toneladas y amonio con 1,305,441.90 toneladas (*Ibid*). El sector transporte representa el porcentaje más alto de emisiones contaminantes en las principales ciudades del país, contribuyendo con el 64.4 por ciento de las emisiones totales de CO y con el 28 por ciento de las emisiones de NO_x (*Ibid*).

Otros daños derivados por la producción y uso de los combustibles fósiles se encuentran en la hidrósfera, litosfera, así como impacto a humanos. Por ejemplo, en la actividad de exploración y extracción, producción y procesamiento de petróleo puede ocurrir un derrame de éste, originando severos problemas en las aves y contaminación en las costas, con consecuencias en los organismos que habitan en la zona de mareas y cerca de las costas, y en pesquerías de mariscos.

Otros efectos de los derrames petroleros, son el ensuciar embarcaciones, redes e instalaciones de bahías, lo que necesita una limpieza de costas. Aunque existen también daños en el medio marino abierto, que son complicados de evaluar, hay una gran probabilidad de impactos negativos en pesquerías, y en general en los organismos presentes en las aguas superficiales del océano (Runnalls y Mackay, 1999). El último accidente ocurrido fue el del golfo de México en abril de 2010, que se considera como uno de los desastres más grandes de la historia.

A continuación se presenta detalladamente los daños que se pueden producir por la exploración, extracción, producción, procesamiento, transmisión, uso y eliminación de petróleo, debido a que es el combustible más utilizado.

Cuadro 1. 1. Impactos ambientales del petróleo

AMBIENTE	TIPO DE ACTIVIDAD			
	EXPLORACIÓN	EXTRACCIÓN, PRODUCCIÓN, PROCESAMIENTO	TRANSMISIÓN	USO Y ELIMINACIÓN
Atmósfera	Emisiones de H ₂ S e hidrocarburos como resultado de un estallido	Emisiones de SO ₂ , H ₂ S, CO ₂ , NO _x e hidrocarburos de las refinerías	—	Emisiones de SO ₂ , CO ₂ e hidrocarburos
Hidrosfera	<i>Estallidos y derrames de pozos de exploración marina que originan contaminación por petróleo</i>	<i>Estallidos y derrames</i> Eliminación de salmueras y productos químicos de perforación efluentes de las refinerías	<i>Accidentes de buques cisternas que originan contaminación por petróleo derramado</i>	Contaminación de aguas subterráneas por tanques con fugas
Litósfera	Estallidos y derrames en tierra	Estallidos y derrames Eliminación de lodos	Construcción de tuberías y vertederos Daños al <i>permafrost</i>	Eliminación de aceites usados
Impactos humanos	Perturbación del estilo de vida	Interferencia con pesquerías	Interferencia con pesquerías o uso del suelo. Perturbaciones del estilo de vida durante la construcción	Hidrocarburos que provienen de la combustión, incluso los aromáticos polinucleados

Fuente: Runnalls y Mackay, 1999.

Existen otros problemas ambientales, sociales y económicos que se generan por la comercialización de combustibles fósiles. No obstante, hay una gran dependencia hacia éstos, y se considera que continuará este comportamiento por 20 ó 30 años más. Una de las razones de ello, es que las energías alternativas están en proceso de obtener la suficiente madurez tecnológica para su aplicación generalizada y lograr abastecer la demanda energética mundial, además de los costos y tiempo requeridos para contar con la infraestructura requerida para este cambio.

Por último, la explotación indiscriminada de estos recursos no renovables han reducido a niveles alarmantes las reservas mundiales, poniendo en grave riesgo su disponibilidad para las

generaciones futuras (Saxena *et al*, 2007). Es necesario realizar un esfuerzo decidido en la aplicación de energías alternas, y mitigar los daños mencionados anteriormente.

1.3 Desarrollo de las energías alternativas

Las altas tasas de emisiones de GEI debidas principalmente a la quema de combustibles fósiles por parte del sector transporte (SENER, 2008), y el fortalecimiento de la soberanía energética², han acelerado la implementación de fuentes de energía alternativas. Si bien, se reconoce que en el mediano plazo, estas energías alternativas no son competitivas con los energéticos de tipo fósil, si es una invaluable oportunidad para iniciar la transición a una economía libre de carbono.

En México, se ha iniciado la diversificación de la oferta energética aunque a un nivel muy por debajo de su potencial total disponible. La energía solar es una energía alternativa donde se aprovecha la energía del sol. Existen dos tipos de tecnologías: *Fotovoltaicas*, que convierten la energía solar en energía eléctrica con celdas fotoeléctricas, hechas principalmente de silicio que reacciona con la luz; y *Termosolares*, que usan la energía del sol para el calentamiento de fluidos, mediante colectores solares, que alcanzan temperaturas de 40 a 100 °C (planos), o “concentradores” con los que se obtienen temperaturas de hasta 500 °C. Por ejemplo, en el periodo de 1993-2003 el aprovechamiento de la energía solar mediante sistemas fotovoltaicos empleados para electrificación rural, comunicaciones, señalamiento y bombeo de agua; y por sistemas termosolares, para calentamiento de agua en albercas y uso sanitario, fue apenas de 0.029 PJ a pesar de contar con un potencial técnico estimado en 0.035 PJ (Torres y Gómez, 2006).

La energía eólica en el país ha sido utilizada para generar electricidad y el bombeo de agua mediante aerogeneradores. En 2008, este tipo de sistemas generaron una energía equivalente a 2.54 PJ, lo que aún sigue siendo limitado en comparación con la energía primaria producida. A pesar de esto, el aprovechamiento de la energía eólica tuvo un crecimiento del 3.1 por ciento en comparación del 2006 y 2007 debido a la operación de la central “La Venta II” en el estado

² Se refiere en este trabajo a la soberanía energética como a la disponibilidad de los recursos energéticos y la tecnología para usarlos.

de Oaxaca con una capacidad instalada de 83 MW (SENER, 2008). Sin embargo las capacidades instaladas de este tipo de energía aún pudieran incrementarse de forma considerable.

En 2008, la geoenergía generó 70.15 PJ en forma de electricidad (*Ibid*). En este rubro, México ocupa el tercer lugar en capacidad de generación con 953 MW, después de Estados Unidos con 2002 MW y de Filipinas con 1908 MW (Torres y Gómez, 2006). El campo geotérmico de Cerro Prieto en Baja California es uno de los más importantes de la nación con una capacidad instalada de 720 MW, después aparece el campo geotérmico de “Los Azufres” en Michoacán con 188 MW, “Los Humeros” en Puebla con 35 MW, y por último “Las Tres Vírgenes” en Baja California Sur con 10 MW. El potencial técnico de geoenergía es de 144 PJ/año, es decir más del doble de la energía producida.

La energía hidráulica aprovecha la caída del agua (energía cinética) para generar electricidad, en México se produjeron 386.78 PJ en 2008 por esta vía (SENER, 2008), donde hubo un crecimiento del 18 por ciento con respecto al 2006. Lo anterior se debió principalmente a la operación de la nueva central “El Cajón” en Nayarit con una capacidad instalada de 750 MW, además de un mayor uso de recursos hidráulicos derivado de los altos niveles de almacenamiento de agua en los embalses. El potencia técnico para México en este tipo de energía no supera mucho al producido ya que es de 389 PJ/año.

El Balance Nacional de Energía presentado por la Secretaría de Energía (SENER) en 2008, indicó que de la bioenergía generada el 71 por ciento se derivaron de leña y el resto de bagazo de caña, en su mayoría para autoabastecimiento de empresas privadas (SENER, s/a). No obstante, se tiene calculado que el potencial técnico a partir de bioenergía pudiera ser diez veces mayor. La energía pudiera ser recuperada en forma de biocombustibles como el biogás (metano) generado en rellenos sanitarios y de heces de ganado, biodiesel a partir de semillas oleaginosas, bioetanol a partir de granos, plantas azucareras y esquilmos agrícolas.

En este apartado se han presentado las diferentes energías alternativas que se generan en México, éstas aparecieron para disminuir el uso de los combustibles fósiles y evitar que se

sigan sobreexplotando los recursos petrolíferos. No obstante, no están siendo aprovechadas en su totalidad, porque los potenciales técnicos superan por mucho a las producciones, lo que muestra la necesidad de impulsar más la investigación, la producción y uso de estas energías.

1.4 Evolución de la bioenergía

El auge que han tenido en los últimos años los proyectos de energías alternativas ha llamado la atención tanto a nivel internacional como en la sociedad mexicana, este tipo de energías también son conocidas como energías verdes que tienen el propósito de conservar los recursos fósiles no renovables y mitigar los efectos de las emisiones generadas durante la producción y uso de los mismos.

La bioenergía es una energía alternativa que se define como la energía que se obtiene de la biomasa, es decir que se produce a partir de materiales orgánicos. Ésta a gran escala tiene sus orígenes en Brasil en la década de los setenta, donde se decretó la producción de bioetanol a partir de la fermentación de glucosa derivada de caña de azúcar en el proyecto denominado *Proalcool*. Cuando la propuesta nació, el objetivo fue reducir las importaciones de crudo después de la reciente crisis petrolera, además de resolver el problema de la fluctuación en los precios del azúcar en el mercado internacional (IILSEN Y CIE-UNAM, 2006).

El gobierno brasileño estableció en sus políticas incentivos para la producción y uso de bioetanol. Por ejemplo, con el programa *Proalcool* durante el periodo de 1975-1989 se invirtieron 4,920 millones de dólares en subsidios (*Ibid*). Actualmente, no existen subsidios para la producción de etanol y su precio de venta equivale entre el 60-70 por ciento del precio de la gasolina en las estaciones de servicio. Esto fue resultado de la reducción en los costos de producción, es decir, después de varias décadas de implementación, el bioetanol es competitivo con los precios de la gasolina. En 2008, Brasil es el segundo productor de bioetanol a nivel mundial con 6, 472 millones de galones líquidos (RFA, 2008).

Brasil a la fecha es autosuficiente en combustibles, puede producir toda la energía que consume, para llevar a cabo esto ha tenido que utilizar los recursos petroleros de la nación,

además de las pequeñas producciones de las demás energías alternativas con que cuentan. En este país se estima que los sectores público, privado y social podrían establecer juntos una industria para la producción de biodiesel.

Estados Unidos también es productor de bioetanol y su principal insumo es el almidón de maíz. Las políticas para la generación de bioenergía tienen en parte su fundamento en cuestiones ambientales, el gobierno federal se ha propuesto la reducción en el consumo de gasolina en un 20 por ciento para el año 2017 al sustituirlo por alcohol de maíz. Dentro de los apoyos otorgados por el gobierno, se encuentra una remuneración económica a los comercializadores de 0.14 USD por cada litro de etanol que mezclen con gasolina. Este incentivo económico ha provocado un incremento súbito en la generación y consumo de este biocombustible (Sánchez, 2008). Actualmente, EU es el máximo productor de bioetanol a nivel mundial, con 9 mil millones de galones líquidos producidos en el 2008, además de estimar una importación de 600 millones de galones (RFA, 2008).

La Unión Europea (UE) estableció en 1990 un grupo de políticas para fomentar el desarrollo de las energías renovables. Por ejemplo, el plan de acción de “Energía para el futuro: las fuentes de energías renovables” (ILSEN Y CIE-UNAM, 2006). Se apoyan proyectos de bioenergía principalmente porque colaboran con la disminución de los GEI y con las importaciones de petróleo y gas natural. La UE produce bioenergía a partir de diferentes fuentes, como cultivos energéticos (yuca, girasol, colza, soja, girasol), únicamente en España se utilizan los residuos del olivar. Actualmente, Andalucía, España, es el productor más importante en la UE, en donde existen 15 plantas de biocombustibles a partir de residuos forestales y agrícolas, principalmente de olivar (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

Colombia creó un programa para la generación de bioetanol en el 2002, después de aprobarse una Ley que exigía la utilización de bioetanol como aditivo en la gasolina, sin embargo, la producción de este biocombustible inició hasta octubre de 2005. Las fuentes principales fueron la yuca y la caña de azúcar. En la actualidad, Colombia es el segundo productor más importante de bioenergía en América Latina. En 2008, se estimó una producción de 79.2

millones de galones de bioetanol (RFA, 2008), además de iniciar la producción de biodiesel a partir de diferentes cultivos energéticos (Rodríguez, 2009).

En México las producciones más representativas de bioenergía son a partir de leña y de bagazo de caña, aunque en el 2008 la producción de bioenergía a partir de leña y de bagazo de caña solamente representaron el dos punto tres y cero punto siete por ciento respectivamente de la energía total producida (SENER, 2008). No obstante, existen otros insumos para la generación de bioenergía, en los cuales se ha venido trabajando en los últimos años. Por ejemplo, cultivos energéticos, residuos sólidos, industriales y agrícolas. Aunque el interés ha crecido lentamente, ha sido constante, y de seguir con el ritmo actual, México podría conseguir grandes avances en materia de bioenergía, ya que cuenta con el potencial para producir bioetanol y biodiesel a gran escala a partir de cultivos y residuos agrícolas.

Los proyectos más antiguos de bioenergía en México son los de generación eléctrica y biogás a partir del bagazo de caña, dentro de las plantas más importantes se tiene a: 1) Impulsora de la cuenca del Papaloapan, S.A. de C.V.; 2) Ingenio la Gloria S.A.; 3) Central Motzorongo S.A. de C.V., todas en el estado de Veracruz con una capacidad de producción poco mayor de 20 MW. Existen otras plantas de bioenergía en otros estados de la República, con capacidades menores a 20 MW (SENER, s/a). En el 2005, se crearon los primeros pequeños proyectos privados de bioenergía con insumos diferentes al bagazo de caña. Por ejemplo, el proyecto de Bioenergía de Nuevo León S.A. en Monterrey, donde se aprovecha el biogás liberado de un relleno sanitario, para la producción de energía eléctrica. Para el desarrollo de este proyecto se requirió de un apoyo parcial del GEF³, por medio del Banco Mundial. Actualmente, la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) ofrece apoyo para este tipo de proyectos, que involucran desde el diseño de rellenos sanitarios, hasta la obtención de la energía eléctrica (Torres y Gómez, 2006).

El Grupo Energético S.A. en colaboración con el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), generan biodiesel a partir de la grasa animal de desechos de rastros. En julio del 2005, en Cadereyta de Juárez Nuevo León, se inauguró la planta con una inversión de

³ Global Environment Facility (GEF), creado en 1990 para canalizar financiamiento con el objetivo de enfrentar problemas ambientales globales.

1.5 millones de dólares, con una capacidad de producción inicial de 500 mil litros por mes. El biodiesel producido se utiliza como combustible en medios de transporte para camiones industriales en el norte de México. Posteriormente, se tiene planeado comercializar el bioenergético en la Ciudad de Monterrey, debido a que el potencial de la planta puede incrementarse hasta un millón de litros por mes (*Ibid*).

Se están iniciando nuevos proyectos de bioenergía a partir de cultivos energéticos, como resultado de la Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. Esto ha generado nuevas facilidades para la implementación de este tipo de proyectos, donde se cultivan plantas exclusivamente para la generación de bioenergía. Por ejemplo, el proyecto Chiapaneco para producir biodiesel a partir de aceite de jatropha.

Otro proyecto a partir de cultivos energéticos es el de la comunidad de Empalme en el municipio de Valle Hermoso, Tamaulipas, donde los productores de sorgo de la región buscan generar bioetanol a partir de esta gramínea. Este proyecto se considera que podría iniciar a funcionar a mediados del 2010, el objetivo del proyecto es asegurar el mercado local de sorgo, mejorando sus beneficios y minimizando el riesgo de los precios internacionales de este grano. La planta tendrá la capacidad de procesar 478,000 toneladas/año de sorgo generando 190,365,000 litros de bioetanol desnaturalizado por año (Bioenergéticos Mexicanos, 2010).

Otro tipo de proyectos que pudieran implementarse a mediano plazo son aquellos que utilizan los residuos o subproductos de las actividades agrícolas, agroindustriales y forestales. Estos materiales incluyen pastos, hierbas, residuos de madera y podas, los cuales son ricos en compuestos lignocelulósicos. Este tipo de materiales son los más abundantes en el mundo, se estima que su producción anual está entre 10 a 50 millones de toneladas (Claassen *et al.*, 1999).

En conclusión, México ha iniciado los esfuerzos para la implementación de proyectos para la producción de bioenergía. Primero a partir de cultivos energéticos y residuos (sólidos, bagazo de caña y rastro); se espera que en un futuro cercano se comience con el aprovechamiento de compuestos lignocelulósicos (particularmente de residuos agrícolas).

1.5 Recursos agrícolas para la generación de bioenergía

La producción de bioenergía cuenta con diversos insumos que podrían utilizarse para esta transformación, puede ser biomasa primaria (natural) y secundaria (residual). Dentro de la biomasa primaria se encuentran los cultivos energéticos, es decir cultivos sembrados exclusivamente para la producción de bioenergía, los árboles, frutos, etc.; y dentro de la secundaria se encuentran los residuos agrícolas, animales, doméstico, industriales, etc.

A continuación se presenta la disponibilidad de biomasa para su transformación en energía en México, según la terminología sobre bioenergía (UBT) de la FAO (FAO, 2004 citado en SEMARNAT, INE, UNAM Y CIECO, 2008). Los biocombustibles se agrupan, por su origen en tres fuentes: 1) combustibles de madera; 2) agrocombustibles; y 3) subproductos de origen municipal (cuadro 1.2)

Cuadro 1. 2. Clasificación de los recursos biomásicos según su origen

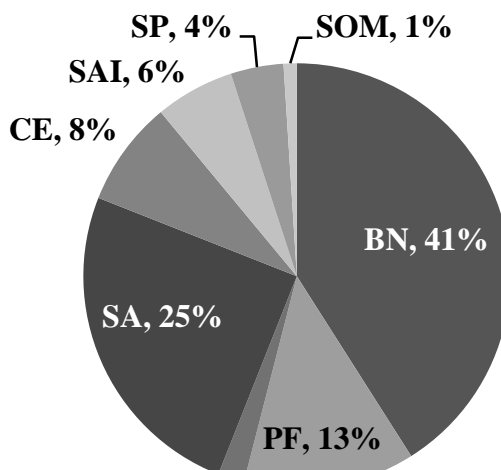
CLASIFICACIÓN DE LOS RECURSOS BIOMÁSICOS SEGÚN SU ORIGEN		
CATEGORÍA UBT	TIPO	ORIGEN O FUENTE DE BIOMASA
1. Combustibles de Madera	Directo	Cobertura natural (Bosques, selvas y matorrales)
	Plantaciones forestales	<i>Eucaliptus sp</i>
	Indirecto	Subproductos de origen forestal e industria maderera
2. Agrocombustibles	Subproductos agrícolas	Hojas y puntas para caña de azúcar y para otros cultivos rastrojo.
	Subproductos pecuarios	Excretas
	Subproductos agroindustriales	Bagazo para caña de azúcar, cascara, y granos
	Cultivos energéticos	-Cultivos para bioetanol como maíz, sorgo, caña de azúcar. -Cultivos para biodiesel como girasol, palma de aceite, jatropha
4. Subproductos de origen municipal	Basura municipal	Basura municipal

Fuente: FAO, 2004 citado en SEMARNAT, INE, UNAM Y CIECO, 2008.

En el trabajo realizado por Masera, 2005, se resume el potencial energético de la biomasa con respecto a las principales fuentes de bioenergía, y se muestra que del total de la producción

técnica potencial son los combustibles de madera los que tienen un mayor alcance con un promedio de 1800 PJ/año (ver figura 1.4).

Figura 1. 4. Potencial bioenergético en México.



Fuente: Modificado de Masera, 2005.

Combustibles de madera: BN Bosques naturales, PF Plantaciones forestales, SF Subproductos forestales; *Agrocombustibles:* SA subproductos agrícolas, SAI subproductos agroindustriales, SP subproductos pecuarios, CE cultivos energéticos; y *Subproductos origen municipal:* SOM subproductos de origen municipal.

En cuanto a los insumos para la generación de bioenergía provenientes de la actividad agrícola, se tienen los cultivos energéticos, así como residuos de esta actividad. Dentro de los insumos de primera generación (cultivos agrícolas) que pueden adaptarse a las condiciones geográficas y climáticas de México, según la Semarnat, INE, UNAM y CIECO, 2008 y la Sener, 2006 se encuentran los siguientes:

Cultivos ricos en carbohidratos para la producción de bioetanol:

- Caña de azúcar
- Sorgo dulce
- Remolacha azucarera
- Yuca
- Maíz grano
- Trigo grano
- Sorgo grano

Cultivos ricos en oleaginosas para la producción de biodiesel:

- Jatropha
- Soya
- Semilla de colza
- Cártamo
- Girasol
- Palma de aceite

A continuación se muestran algunas características de las especies agrícolas que podrían ser utilizadas como insumos para la producción de bioenergía.

La caña de azúcar (*Sacharum officinarum*) se compone de 12 especies de gramíneas autóctonas. Es un pasto perenne que puede durar varias décadas produciendo. Además de ser un cultivo duradero es muy autocompatible, según variedad y condiciones locales, la planta forma entre 4 y 12 tallos que pueden crecer hasta 3-5 m de altura, el contenido de azúcar (sacarosa) fluctúa entre 11 y 16 por ciento. Requiere abundante agua para su crecimiento (Asociación Naturand, 2000).

El sorgo dulce (*Sorghum bicolor*, L., Moench ssp. *Sacharatum*), es una planta anual, es un pasto o zacate de origen tropical, con un alto potencial para la producción de biomasa, debido a su eficiencia fotosintética. La planta se adapta a pH de suelos entre 5.5-8.2, en México se cultiva en el centro y sur de Sinaloa y Coahuila con altos rendimientos bajo riego, aunque también se cultiva en regiones de la Laguna y del Bajío con la misma tecnología, de temporal se siembra en Sinaloa, Chihuahua, Guerrero, Michoacán y Jalisco (Lazcano, 2006).

La remolacha (*Beta vulgaris*) durante el ciclo de su desarrollo produce una raíz con alto contenido de sacarosa (16-18% en peso) dependiendo de la variedad. La remolacha soporta bajas temperaturas siempre que éstas sean uniformes, aunque se ve perjudicada por los calores del verano y por vientos cálidos. Prefiere suelos profundos, frescos, ricos en materia orgánica, con pH neutro o ligeramente básico. (SIAP, 2010a).

La yuca (*Manihot esculenta*) es un tubérculo perteneciente a la familia Euphorbiacea y al género *Manihot*, es un arbusto muy ramificado, de hasta 2.5 m de altura, con flores de color

amarillo verdoso, la raíz alcanza hasta 8 cm de diámetro y 90 cm de longitud, los frutos se semejan pequeños plátanos comestibles; También se le conoce como mandioca, es tolerante a condiciones ambientales extremas, tales como que se adapta a ecosistemas diferentes, soporta sequias, es fuerte a las plagas, necesita pocos fertilizantes, plaguicidas y agua, y fácilmente se almacena bajo tierra (*Ibid*).

El maíz (*Zea mays*) pertenece a la familia de las gramíneas. Los granos de maíz están constituidos por tres partes, la cascarilla, el endospermo y el germen. La cascarilla es la piel que cubre el grano, que le sirve como protección. El endospermo, es la reserva energética del grano y constituye hasta el 80 por ciento del peso del grano, contiene aproximadamente 90 por ciento de almidón (es un carbohidrato) y el nueve por ciento de proteína, y en pequeñas cantidades aceites, minerales y elementos trazas. El germen está constituido por una pequeña planta, y de grandes cantidades de aceite, que su principal tarea es nutrir a la planta cuando inicia el periodo de crecimiento (Asturias, 2004).

El trigo grano (*Triticum vulgare*) es una gramínea anual con espigas ricas en almidón, la forma del grano de trigo es ovalado con extremos redondeados, es uno de ellos sobresale el germen y en el otro hay un mechón de pelos finos conocidos como el pincel. Los granos del trigo común pueden ser blandos o duros. La altura de planta varía entre 30 y 150 cm; el tallo es recto y cilíndrico; la hoja es lanceolada, con un ancho de 0.5 y 1 cm y una longitud de 15 a 25 cm., cada planta tiene de 4 a 6 hojas (*Ibid*).

El sorgo grano (*Sorghum vulgare*) es rico en almidón, pertenece a la familia de las gramíneas, es una planta anual o perenne, herbácea de tallos erectos y delgados, y hojas alargadas, puede medir entre 1 y 1.5 m de altura. Las hojas son asentadas, abrazadoras y su número cambia según la variedad. Tiene inflorescencia en panículas ramificadas de forma piramidal, ovoidal o cilíndrica, según la variedad (Lazcano, 2010).

La *Jatropha Curcas* también conocida como piñoncito, coquito, piñón, higos del duende, entre otros, es de la familia de las Euphorbiaceae. Es una oleaginosa de porte arbustivo con más de 3500 especies agrupadas en 210 géneros. Se localiza en climas tropicales y semi-tropicales, es

un arbusto-árbol que llega a medir de 1 a 8 metros y se desarrolla en altitudes que van de 5 a 1,500 msnm. Crece en suelos pobres y arenosos, es resistente a la sequía y la semilla posee un importante contenido de proteína y de grasa (Lazcano, 2006).

El frijol soya (*Glycine max*) pertenece a la familia de las leguminosas, es una herbácea anual, el ciclo vegetativo varia entre 3 a 7 meses. Las hojas, los tallos y las vainas son pubescentes, la semilla generalmente es esférica, del tamaño de un frijol y de color amarillo, el tamaño es mediano (semillas pesan de 5 a 40 g, aunque en las variedades comerciales oscila de 10 a 20 g). En peso seco, la semilla es rica en proteínas y en aceites, en algunas variedades mejoradas presenta alrededor del 40 a 42 por ciento de proteínas y del 20 al 22 por ciento en aceites (SIAP, 2010a).

La colza (*Brassica napus*) es una planta anual de raíz pivotante de 1 m de profundidad, el tallo es erecto y ramificado con alturas que van desde 0.50 hasta 1.70 m, las hojas son ásperas, color verde azulado, las inferiores son dentados, y más grandes que las superiores. Las flores son de color amarillo y se encuentran dispuestas en una inflorescencia racimo. El fruto tiene forma de vaina de 3 a 4 mm de ancho y 6 cm de largo, el silicua (fruto) contiene de 15 a 40 semillas, el contenido de aceite de la semilla oscila entre los 40 a 45 por ciento, constituido por más del 60 por ciento de ácido graso oleico y un bajo contenido de grasas saturadas (*Ibid*).

El cártamo (*Carthamus tinctorius*) es una planta oleaginosa anual erecta y ramificada de la familia Asteraceae, produce una roseta luego de la germinación, es un cultivo que presenta óptimo crecimiento en condiciones de aridez. Existen variedades con 40 por ciento de contenido de aceite, sus hojas y en general toda la planta produce espinas que dificultan el caminar por las parcelas. Las ramificaciones producen de una a cinco cabezas florales de 2 a 4 cm de diámetro cuyas brácteas son persistentes y sirven como protección natural; cada cabeza floral produce entre 15 y 30 semillas, la planta puede alcanzar de 40 a 150 cm de altura (*Ibid*).

El girasol (*Helianthus annuus*) es una planta herbácea de la familia de las Arteráceas, cultivada como oleaginosa y ornamental en todo el mundo. La semilla de girasol en base seca,

en peso, se compone de 42 por ciento de aceites; 16 por ciento de proteína y 40 por ciento de fibra (Lazcano, 2006).

La palma de aceite o africana (*Elaeis guineensis*) que pertenece a la familia Arecaceae, es una planta del trópico húmedo, que es la mejor opción para las tierras bajas de las regiones tropicales y ayuda a prevenir la erosión. La palma de aceite tiene un tallo erecto que puede alcanzar más de 40 m de altura, y para los cultivos industriales para obtener aceite puede medir entre 10-15 m, está fuertemente anillado y sin espinas (*Ibid*).

Después de mostrar las características más relevantes de algunos cultivos agrícolas que pueden utilizarse como insumos para la producción de bioenergía, se enlista otro tipo de biomasa que también podría emplearse para esta transformación, a ésta se le conoce como materia de segunda generación (Claridades agropecuarias, 2007).

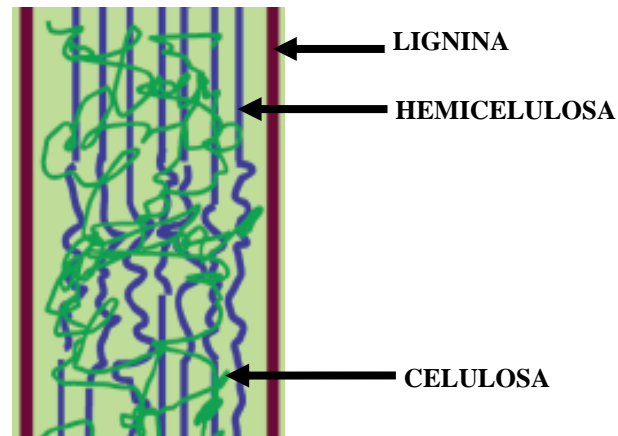
- Restos de podas
- Raíces hortícolas no comestibles
- Hojas hortícolas no comestibles
- Material leñoso
- Esquilmos (pajas, socas, bagazo, etc.)
- Restos de extracción (panoja de maíz, envoltorios de frutos y semillas)

El esquilmo agrícola es la biomasa más abundante que puede aprovecharse para la producción de bioenergía en forma de calor, metano o bioetanol, ya sea mediante procesos termoquímicos como la pirolisis, combustión directa o la gasificación así como procesos bioquímicos, tales como la digestión anaerobia o fermentación.

El esquilmo agrícola en su mayoría es rico en materia lignocelulósica, que se encuentra constituido por celulosa (44%), hemicelulosa (30%), y lignina (26%). De la fracción de celulosa se puede obtener bioetanol después del proceso de fermentación. La celulosa es el componente principal de cualquier célula vegetal y es un polímero de azúcares de seis carbonos como la glucosa; la hemicelulosa, une las moléculas de celulosa de la pared celular, es un polímero de azúcares de cinco carbonos; y la lignina es un polímero que está presente en

las paredes celulares de organismos del reino *plantae*, es la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos, tales como el cumarílico, coniferílico y sinapílico (DOE, 2006).

Figura 1. 5. Estructura de la materia lignocelulosa



Fuente: Modificada de DOE, 2006.

La complejidad estructural de este compuesto hace que el proceso para producir bioetanol a partir de materia lignocelulósica no sea actualmente rentable, y su implementación se perciba en el mediano plazo cuando la tecnología este plenamente desarrollada (Sánchez, 2008).

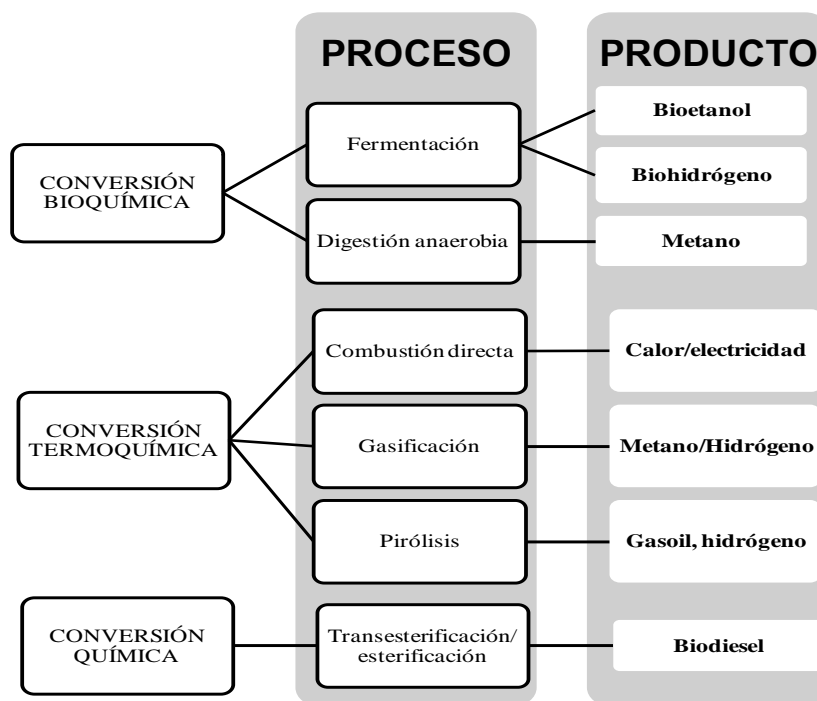
En este apartado se mostraron y describieron un poco a los recursos agrícolas de primera y segunda generación, potenciales en México para la producción de bioenergía. Para conocerlos un poco más e identificarlos como insumos para la obtención de este tipo de energía, unos cultivos como la jatropha son nuevos en el país, otros tienen muchos años, pero el uso para generar bioenergía es nuevo.

1.6 Tecnologías de producción de bioenergía

El uso de biomasa como combustible es muy antiguo, ya sea para cocinar, calefacción u otros fines. La conversión de biomasa a bioenergía se lleva a cabo por diferentes procesos, que dependerán principalmente del insumo (leña, residuos agrícolas o agro-industriales, cultivos energéticos, entre otros) y el uso final.

Los procesos disponibles para la transformación de biomasa en bioenergía pueden clasificarse en bioquímicos, termoquímicos y químicos (ver figura 1.6).

Figura 1. 6. Clasificación generalizada de las tecnologías para la obtención de Bioenergía



Fuente: Elaboración propia.

1.6.1 Tecnologías de conversión bioquímicas

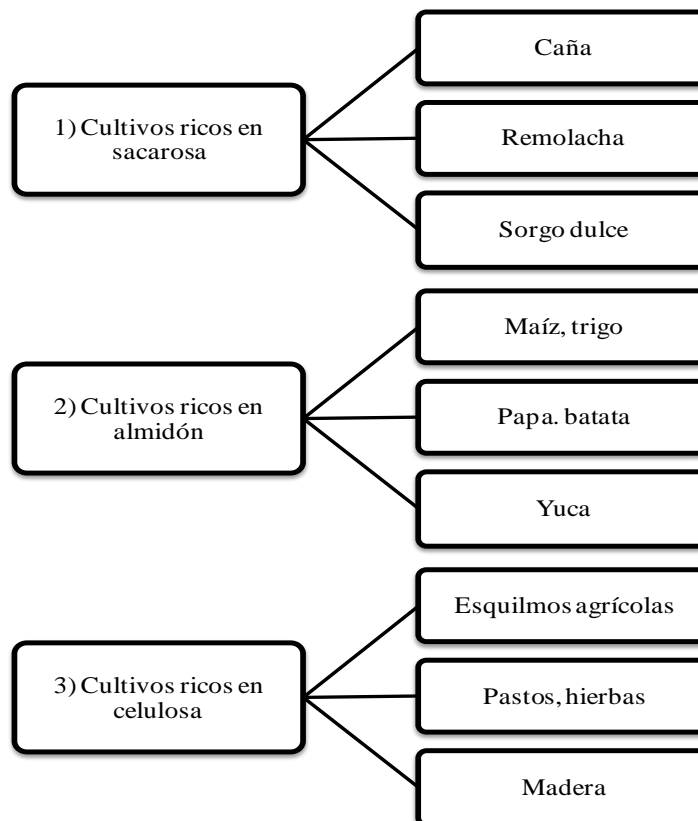
La conversión bioquímica utiliza la capacidad de ciertos microorganismos o sus enzimas para convertir materiales de origen orgánico en diversos productos, como la fermentación y la digestión anaerobia. Ambos procesos se llevan a cabo en ausencia de oxígeno (anaerobios) y la diferencia reside en el tipo de microorganismos empleados, las condiciones de operación y los productos obtenidos (Jiménez, 2008).

El primer proceso es la fermentación alcohólica, en éste, microorganismos como la levadura *Saccharomyces cerevisiae* convierten azúcares simples como glucosa en bioetanol con el desprendimiento de dióxido de carbono en forma de gas. El bioetanol o simplemente etanol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$), es un alcohol que puede ser utilizado como aditivo oxigenante de la gasolina

en sustitución de aditivos tóxicos como el MTBE (metil-ter-butil-eter), puede emplearse directamente como combustible en sustitución de la gasolina o mezclada con ella, y también es insumo de la industria química (vitaminas, antibióticos y otro).

Los insumos utilizados para la producción de etanol vía fermentación incluyen disacáridos como la sacarosa (monómeros de glucosa y fructuosa) obtenida directamente de la caña, sorgo dulce o la remolacha (ver figura 1.7). También es posible la utilización de polisacáridos como el almidón y la celulosa (ambos polímeros de glucosa), los cuales deben ser hidrolizados previo a su fermentación. En este paso, son requeridos ácidos, álcalis o enzimas (proteínas con capacidad hidrolítica) para efectuar el rompimiento de los polisacáridos a sus respectivos monómeros, con la eliminación de las partículas sólidas. También puede incluirse la aplicación de vapor, congelación irradiación y granulado mecánico (*Ibid*).

Figura 1. 7. Insumos para la producción de bioetanol

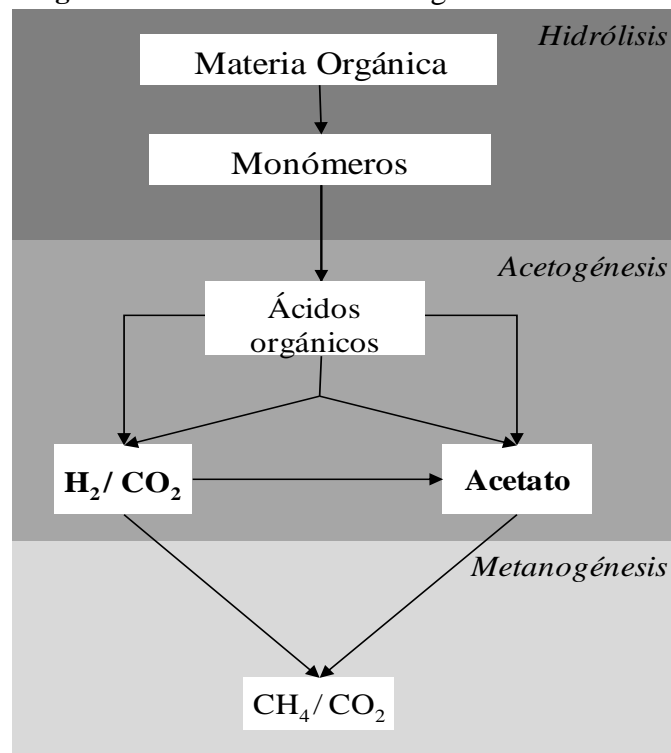


Fuente: Elaboración propia.

El segundo proceso es la digestión anaerobia o biometanización, aquí un conjunto de microorganismos llevan a cabo la mineralización de la materia orgánica mediante una serie de reacciones complejas de descomposición hasta metano (CH_4) y dióxido de carbono, mezcla conocida comúnmente como biogás. Este biogás puede aprovecharse como biocombustible, en diversos equipos para calentamiento o para la generación de electricidad.

Este proceso biológico se divide básicamente en seis etapas: i) hidrólisis de biopolímeros (rompimiento de proteínas, carbohidratos y lípidos); ii) fermentación de aminoácidos y azúcares; iii) oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes; iv) oxidación anaerobia de productos intermedios tales como ácido grasos volátiles excepto acetato; v) conversión de acetato a metano; y vi) conversión de hidrógeno a metano (Bermúdez *et al.*, 1988).

Figura 1. 8. Mecanismo de la digestión anaerobia.



Fuente: Valdez-Vazquez, 2010.

1.6.2 Tecnologías de conversión termoquímicas

La conversión termoquímica incluye tecnologías que hacen uso de altas temperaturas y presiones para convertir el carbono fijo en la biomasa en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, así como otros productos químicos. Las materias primas más adecuadas para estos procesos son aquellos con baja humedad, por ejemplo, madera y residuos agrícolas. Los principales procesos de conversión termoquímica son: combustión directa, gasificación y pirólisis. Los productos que se obtienen con estos procesos incluyen combustibles sólidos, aceites y gases de bajo o mediano contenido calorífico como metano (CH_4), metanol (CH_3OH) e hidrógeno (H_2) (Jiménez, 2008).

La combustión directa es la forma más sencilla de recuperar la energía contenida en la biomasa en forma de calor mediante su oxidación hasta dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Desde el punto de vista energético, la combustión directa de biomasa es el proceso con más altos rendimientos y por tanto es más popular, pero también significa que la materia orgánica es destruida totalmente (*Ibid*). Esta es la tecnología de generación de bioenergía predilecta de las poblaciones rurales debido a su sencillez, quemando leña o residuos agrícolas.

Entre las principales desventajas asociadas a la combustión directa, están los problemas ambientales resultado de la generación de gases de combustión como CO , SO_x y NO_x . Por lo que se requiere de investigación para mejorar el proceso y/o controlar las emisiones, específicamente en los equipos utilizados se cree que los mayores rendimientos se obtienen al evitar la pérdida de compuestos no quemados mediante una entrada de aire secundaria, así como la automatización de la alimentación (*Ibid*).

La gasificación es la oxidación incompleta de materia orgánica, la cual se somete a temperaturas entre 700 a 1500°C, presiones arriba de 6.8 atm y en presencia de pequeñas cantidades oxígeno (O_2), generando gases (CH_4 , H_2 , CO , SO_2 , NO_x y CO_2) y residuos sólidos (carbón vegetal y aceites piroleñosos) (Seoáñez *et al.*, 2000). Habitualmente, el gas que se produce tiene que purificarse antes de ser almacenado, transportado o empleado; el calor que

se obtiene se convierte en vapor para la generación de energía eléctrica y para calefacción. La gasificación es de los procesos de conversión más eficientes (Jiménez, 2008).

La pirólisis es una combustión incompleta en carencia de oxígeno. Se genera carbón vegetal, aceites piroleñosos y gas pobre, básicamente. Del carbón vegetal se obtiene calor, posteriormente vapor, energía eléctrica y calefacción; de los aceites piroleñosos se puede generar gasolinas; el gas pobre se convierte en calor, energía eléctrica y calefacción (Seoáñez *et al.*, 2000). Las materias primas más adecuadas para este proceso son la madera y la basura. Los productos de reacción son un gas de síntesis con la mitad del poder calorífico del gas natural, aceites combustibles con un contenido energético de tres cuartos comparado con el del petróleo y carbón vegetal con un poder calorífico semejante al del carbón mineral (Jiménez, 2008).

La pirólisis cuenta con cuatro etapas en el proceso según la temperatura: a) Se pierde agua y otros productos volátiles hasta 200°C; b) Los productos menos estables se descomponen entre 200 y 250°C hasta generar H₂O, CO₂ y CO. Los destilados aumentan su concentración de ácido acético y metanol; c) Reacción exotérmica de descomposición, inicia a 275°C; y d) A partir de los 300°C se inicia la producción de alquitranes.

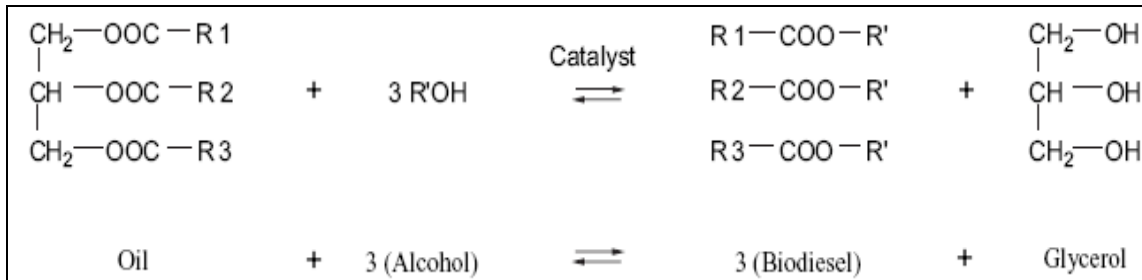
1.6.3 Tecnologías de conversión químicas

En las tecnologías de conversión química, el biodiesel es uno de los principales bioenergéticos producidos. El biodiesel es un compuesto orgánico de ésteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos, que se obtiene a partir de aceites vegetales de semillas y pulpas de fruta. Dentro de las materias primas más utilizadas destaca el aceite de colza, de palma, de girasol y de jatropha; y aceites vegetales usados en la industria de alimentación o caseros. Éstos insumos se caracterizan por tener altas concentraciones de ácidos grasos, generalmente saturados, mono insaturados y poli insaturados (Lozanoff *et al.*, 2007).

Después de la extracción de los aceites, éstos deben ser sometidos a una reacción de transesterificación para la obtención de la mezcla de ésteres. La transesterificación es el

proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base (ver figura 1.9).

Figura 1. 9. Reacción de transesterificación



Fuente: Harding *et al.*, 2007.

La transesterificación es una de las tecnologías químicas más estudiadas, y la que mejores resultados ha ofrecido hasta el día de hoy. Esta tecnología cuenta con un proceso muy simple, es de fácil adquisición, operación y mantenimiento, además requiere de un costo menor de mano de obra.

1.7 Los bioenergéticos y la legislación

Los bioenergéticos han cobrado relevancia como parte de la agenda gubernamental; en la política energética se define a estos mismos como “una manera de asegurar la disponibilidad energética al menor costo y que promueve el crecimiento y desarrollo económico de las generaciones actuales y futuras; generación de bioenergía de una forma amigable con el ambiente” (SENER, 2001).

Aunado a lo anterior, en el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 las cuestiones de seguridad energética se abordan en el eje dos, en *economía competitiva y generadora de empleos*. Dónde se prevé como estrategias la diversificación de las fuentes primarias de energía y el fomentar el aprovechamiento sustentable de energías renovables, como actividades importantes para asegurar un suministro confiable, de calidad y a precios competitivos de los insumos energéticos que requieran los consumidores.

Así mismo, el Programa Sectorial de Energía 2007-2012 adjuntó a los bioenergéticos, y los define como “la manera de disminuir la presión que existe hacia los combustibles fósiles, además que pueden contribuir asociados con la volatilidad de precios de petróleos al equilibrar el portafolio energético”. Dicho programa tiene como objetivo fomentar el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y biocombustible, que sean viables técnica, económica, ambiental y socialmente, siendo esto primordial para garantizar la seguridad energética de México.

Otro documento donde se encuentran presentes los bioenergéticos son en el Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario y Pesquero de la Sagarpa, 2007-2012. En el objetivo tres, ya que se establece mejorar los ingresos de los productores, incrementando su presencia en los mercados globales, promoviendo los procesos de agregación de valor y la producción de bioenergéticos, con la meta de diversificar las fuentes de ingreso de los productores mediante el aprovechamiento de la biomasa (SAGARPA, 2007a).

Las anotaciones que se hacen acerca de los bioenergéticos en los documentos anteriormente mencionados, fueron base para el nacimiento de la Ley de Promoción y desarrollo de los bioenergéticos (LPDB) en febrero de 2008, y un año cuatro meses después cuando sale el reglamento de esta ley, donde ya se plasman algunas cuestiones más claramente que en el primer documento.

La LPDB tiene como objetivo la promoción y desarrollo de los bioenergéticos con el fin de contribuir a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permiten garantizar el apoyo al campo mexicano y establece las bases para impulsar la producción de insumos para bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias y forestales; de procesos biotecnológicos y enzimáticos; y de producción de algas, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país.

Esta ley también pone como base el desarrollo de la producción, comercialización y uso eficiente de los Bioenergéticos para contribuir a la reactivación del sector rural, la generación de empleo y una mejor calidad de vida para la población; promover, en términos de la Ley de

planeación, el desarrollo regional y el de las comunidades rurales menos favorecidas; procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto de invernadero; y coordinar acciones entre los gobiernos Federal, Estatales, Distrito y Municipales, así como la concurrencia con los sectores social y privado, para el desarrollo de los Bioenergéticos.

La LPDB se creó debido a la necesidad de un conjunto de reglas que sirvan como apoyo para regular en materia de bioenergía. Tal es el caso de la polémica que generaron los proyectos de producción de bioetanol a partir de maíz. Por ejemplo, el caso de Sinaloa que generó controversia debido a la importancia cultural que tiene en México esta gramínea, y porque el país está importando altas cantidades anuales de este grano para cubrir la demanda alimentaria (SIAP, 2009).

Por lo anterior el Presidente Felipe Calderón vetó el proyecto de la Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos en septiembre de 2007, que había salido en abril del mismo año. Los cambios que el mandatario pidió fueron específicamente en la selección de los insumos, argumentó que deberían emplearse especies agrícolas que no pusieran en riesgo la seguridad alimentaria del país, cultivos donde el país fuera autosuficiente y que no formaran parte de la canasta básica. Después de estas observaciones, en febrero de 2008 se promulgó de nuevo.

En la LPDB se plasma que los principales actores para la interpretación de efectos administrativos y la aplicación de esta Ley, corresponde al Ejecutivo Federal, a través de la Sener, la Semarnant y la Sagarpa, dentro del ámbito de sus competencias. De la misma manera se mencionan las facultades para éstas Secretarías, en cuanto a los efectos de esta ley, y como éstas tres secretarías formarán la comisión intersecretarial para el desarrollo de los bioenergéticos.

En la LPDB también se exponen los instrumentos y acciones necesarias para impulsar el desarrollo sustentable de la producción y comercialización de insumos, y la producción, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de Bioenergéticos. Esto se llevará a cabo mediante programas emitidos por el ejecutivo federal a través de sus dependencias y entidades.

Otra cuestión relevante presentada en la LPDB, es la promoción de incentivos, los cuales estarán dirigidos a personas que contribuyan al desarrollo de la industria de los bioenergéticos y a la modernización de su infraestructura, a través de la fabricación, adquisición, instalación, operación o mantenimiento de maquinaria para la producción de bioenergéticos, como también se considerarán a aquellos que realicen investigaciones de tecnología; Tecnología que ayude a disminuir la producción y uso de energías contaminantes (energías que en su producción y/o uso ocasionen disturbios ambientales) .

En el área de investigación, según la LPDB serán la Sagarpa y la Sener los responsables de apoyar la investigación científica y tecnológica para la producción y uso de este tipo de energía, así como la capacitación en materia de bioenergéticos. Aunque será la Comisión intersecretarial de bioenergéticos quien establecerá las bases para impulsar la investigación científica y tecnológica, así como la capacitación en materia de bioenergéticos.

Asimismo, en cuestión de insumos, la LPDB estipula que será el Sistema Nacional de Investigación y Transferencia Tecnológica para el Desarrollo Rural Sustentable, previsto en la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS) quien coordine y oriente la investigación científica y tecnológica, así como el desarrollo, innovación y transferencia tecnológica que requiere el sector.

En la última sección de esta ley se habla sobre los permisos, infracciones y sanciones. Además, señala que cualquier actividad y servicio relacionado con la producción, el almacenamiento, el transporte y la distribución por ducto, así como la comercialización de bioenergéticos, se sujetarán a permisos previos de la Sener. También menciona que cualquier permiso que se haya otorgado será informado a la Comisión de bioenergéticos.

Por último, se presentan las infracciones hacia la LPDB, tales como la prestación de servicios o realización de actividades sin tener el permiso correspondiente, así como el incumplimiento a las condiciones de los permisos establecidos, y el incumplimiento de normar oficiales y demás disposiciones en materia de bioenergía.

La LPDB expone un escenario muy interesante en materia de bioenergía en el país, porque se estipulan las secretarías que serán los actores y muestran las competencias que tiene cada una de ellas, sin duda es un gran avance para el impulso de este tipo de energía. No obstante, falta más organización, detallar mejor en la parte de los permisos y sanciones, para evitar la generación de bioenergía a partir de cultivos que pueden poner en riesgo la seguridad alimentaria.

1.8 Criterios de sustentabilidad para la producción de Bioenergía

La generación de bioenergía a partir de cultivos energéticos, es una actividad que se pronostica que podría tener impactos positivos en el área ambiental, por la disminución en el uso de los combustibles fósiles; y en el área económica y social, mediante la promoción del desarrollo rural (Pfaumman, 2006). Sin embargo, existen aspectos que deben considerarse cuidadosos, porque esta producción también podría generar problemas, tales como el abuso en el uso de agroquímicos, la sobreexplotación de agua, la inseguridad alimentaria, entre otros.

Estos impactos negativos mencionados de la producción de bioenergía, se han discutido en diversos estudios para identificar los problemas derivados de esta generación, y mejorar el proceso productivo en el área económica, ambiental y social. A estos aspectos se les denomina como *criterios de sustentabilidad*.

A continuación se presenta una pequeña reseña de los trabajos más significativos que han contribuido en la definición de los criterios de sustentabilidad: en el 2006 de Worldwatch Institute for the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection - BMELV-, esta investigación plasmó las oportunidades y los límites de la producción y uso global de biocombustibles en materia de desarrollo energético, agrícola y ambiental.

También en el 2006 la Internacional Network for Sustainable Energy-Europe, presentó una investigación la cual se tituló “Criteria for sustainable use of biomass including biofuels”, básicamente en dicho documento se promueve la adecuada elección de los insumos a emplear. En el 2007 las Naciones Unidas (UN-ENERGY, 2007) propusieron criterios a nivel

mundial, para asegurar que las estrategias y políticas que se tomen en materia de bioenergía colaboren para asegurar un desarrollo económico, sustentable y equitativo de la bioenergía.

En 2007 la Commissioned by the Energy Transition's Interdepartmental Programme Management (IPM), mostró la investigación titulada "Testing framework for sustainable biomass", uno de los objetivos del trabajo fue exponer aspectos primordiales para la generación de bioenergía, tales como la disminución de las emisiones de los GEI por el cambio en el uso de tipo de energía, la competencia alimentaria que se puede generar a partir de esta producción, pérdida de biodiversidad (flora y fauna) y medio ambiente (implicaciones en la producción de la biomasa o en el proceso, uso de agroquímicos u otros compuestos químico.

En el 2008 la Umwelt Bundes Amt (UBA), presentó la investigación titulada "Criteria for a sustainable use of bioenergy on a global scale", en dicho documento se propusieron diversos criterios de sustentabilidad, pero la mayoría de estos criterios son enfocados a la reducción de los GEI, uso y cambios de suelo, y los efectos de los aspectos socio-económicos. En el mismo año la Royal Society, mostró el trabajo "sustainable biofuels: prospects and challenges", se expusieron criterios sobre el insumo a utilizar, y los efectos que se podrían ocasionar al hacer uso insustentable de ellos, hasta las ventajas y desventajas de cada uno de los procesos a utilizar para la conversión a bioenergía.

También en el 2008, la Biomass Technology Group (BTG) exhibió el documento titulado "Sustainability criteria & certification systems for biomass production", en este trabajo se mostraron los criterios mínimos de sustentabilidad y los sistemas de certificación para la producción de biomasa para la producción de bioenergía en Estados Unido, en éste se enfocó un poco más a los costos y beneficios sobre estos sistemas de certificación, ya sea en el aspecto ambiental, social y económico.

De las diferentes investigaciones que se han realizado en los últimos años con respecto a los criterios de sustentabilidad para la producción, comercialización y uso de bioenergía, se presenta una recopilación de los criterios más reiterados en los trabajos anteriormente mencionados (ver cuadro 1.3).

Cuadro 1. 3. Criterios de sustentabilidad para la producción de bioenergía

Económicos	Ambientales	Sociales
<ul style="list-style-type: none"> -Viable económicamente, todo el proceso de producción. -Empleos de calidad y en buenas condiciones. - Mecanismos de apoyo para los productores. - Un sistema de certificación para la biomasa importada. 	<ul style="list-style-type: none"> -Reducción de los Gases Efecto Invernadero. -Conservación de vegetación nativa. - No a la deforestación por la producción de bioenergía. -Respeto a áreas naturales protegidas. -Responsabilidad en el cambio de uso de suelo. -No promover el monocultivo -Evitar la competencia con alimentos. -Conservación en áreas de alta biodiversidad. -Producción de cultivos energéticos sin destrucción o degradación de los suelos. -Conservar las fuentes de agua. -No abusar en el uso de agroquímicos. -Cumplir con las leyes Nacionales y regulaciones aplicables de las emisiones y calidad del aire. -Balance de energía positivo. -Producción sustentable del cultivo energético. 	<ul style="list-style-type: none"> -No promover el abuso de los derechos humanos. -Contribución positiva al bienestar de la población local. -No a la violación de derechos de prosperidad y derechos de usos.

Fuente: Elaboración propia con información de BMELV, 2006; Internacional Network for Sustainable Energy-Europe, 2006; UN-ENERGY, 2007; Commissioned by the Energy Transition's Interdepartmental Programme Management (IPM), 2007; UBA, 2008; Royal Society, 2008; btg, 2008; SEMARNAT-INE-UNAM-CIEco, 2008.

Los criterios de sustentabilidad del ámbito económico promueven un proceso de producción viable económicamente, éstos hacen referencia a los empleos de calidad y en buenas condiciones, como a la regulación de horas de trabajo, el derecho a la salud pública, a la libertad de asociación y al derecho de negociación colectiva para los productores o trabajadores del subsistema agrícola o de transformación; en los mecanismos de apoyo a los productores, se refiere a exenciones fiscales o incentivos económicos para iniciar la producción de bioenergía; y el sistema de certificación se considera necesario para garantizar la calidad del insumo a utilizar.

Los criterios de sustentabilidad referentes al área ambiental se enfocan a la reducción de los GEI en toda la cadena productiva, desde la obtención del cultivo energético hasta el uso del bioenergético; en la conservación de la vegetación nativa se considera importante porque no se debería expandir el suelo agrícola para esta producción; la deforestación es un problema desde hace años, y la producción de bioenergía no debe acrecentarlos, por lo que se debe prohibir

utilizar arboles para este fin; en cuestión del cambio de uso de suelo, no debe convertirse de suelo para producir cultivos alimenticios a suelos para cultivos energéticos, para no repercutir negativamente en la seguridad alimentaria; en el balance de energía positiva, se refiere a que la energía que se produce no sea menor a la que se utilizó para la producción; entre otros aspectos.

Uno de los criterios de sustentabilidad del ámbito social destacados es la promoción a los derechos humanos, dentro de este aspecto se menciona el evitar el empleo infantil; otra cuestión relevante es impedir que se abuse de los derechos del uso de la tierra, porque al ser una producción rentable, podrían surgir este tipo de abusos; y por último, se plantea la producción de bioenergía como promotor del bienestar de la población local.

De los criterios de sustentabilidad relacionados con la producción de bioenergía se puede constatar que son muy generales, debido a que la mayoría son propuestas a nivel internacional. En México apenas inicia la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos a nivel industrial, lo cual conlleva a la necesidad de plantear criterios específicos para las condiciones del país, y no tomar únicamente los que son a nivel internacional. Además apoyarse de otros mecanismos para el óptimo desarrollo de esta energía. Por ejemplo, que los planes de desarrollo nacionales sean compatibles con la bioenergía, y no solamente mencionar en unos de sus apartados la existencia de este tipo de energía.

Por último, es importante que haya contribución por parte del gobiernos federal, estatales, municipales a la transición energética, coherencia con la ley y las futuras normas (porque no existen normas en materia de bioenergía), y participación de la sociedad civil en la formulación de políticas y programas de desarrollo (SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, 2008).

Capítulo II. AGRICULTURA Y SUSTENTABILIDAD

Introducción

En México la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos se encuentra en sus primeras etapas, por lo cual se deben considerar diversos aspectos económicos, ambientales y sociales para evitar los posibles impactos negativos por su aplicación. No obstante, la existencia de este tipo de proyectos de bioenergía en el país, posiciona al sector agrícola como el principal protagonista, debido a que los insumos requeridos dependen de forma importante de sistemas agrícolas. La producción de bioenergía requiere de suelos agrícolas, agua de riego, agroquímicos, mano de obra, y de todo aquello que provee el sector agrícola para la obtención de los cultivos agrícolas y/o sus desechos que serán transformados en algún tipo de bioenergía. El manejo de estos recursos naturales, hace necesario aplicar los conceptos de sustentabilidad con el fin de evitar el deterioro de los ecosistemas.

En este capítulo se abordan algunos estudios relevantes sobre sustentabilidad, su importancia, y cómo nace el concepto de agricultura sustentable. El estudio de la agricultura sustentable tiene diferentes objetivos, como el asegurar la seguridad y autosuficiencia alimentaria, conservación y regeneración de los recursos naturales, organización, entre otros. La principal herramienta en que se apoya es la agroecología, una disciplina científica que usa la teoría ecológica para el estudio, diseño y evaluación de sistemas agrícolas.

Los conceptos de sustentabilidad, agricultura sustentable y agroecología fueron adjuntados en este capítulo, porque son la base para el establecer mecanismos que permitan evaluar la sustentabilidad en sistemas agrícolas. Es así como se llega al Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), el cual permite evaluar la sustentabilidad en agrosistemas mediante el uso de indicadores. Con la aplicación de la metodología del MESMIS es posible evaluar el grado de observancia de las áreas económica, ambiental y social, así como la identificación de los puntos que fortalecen o debilitan la sustentabilidad del agrosistema.

En este capítulo también se describe la situación actual de la agricultura en México, presentando estadísticas de los cultivos más importantes, así como algunas teorías que tratan de explicar la crisis en este sector. Por último, se alude cómo la producción de bioenergía podría apoyar el crecimiento y fortalecimiento del sector rural, y su grado de correspondencia con el sector ambiental y energético.

2.1 Sustentabilidad, agricultura sustentable y agroecología

El concepto de sustentabilidad ha tenido diversas definiciones desde la propuesta en el informe Brundtland –Nuestro futuro común- en 1987, hasta la presentada en México con la Ley General de Equilibrio Ecológico de Protección al Ambiente (LGEEPA, 1998:3) que dice que el desarrollo sustentable⁴ es “el proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico, protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras”.

El término de sustentabilidad es complejo, y pueden encontrarse diversas definiciones. Lo que es cierto, es que surgió después de que fue evidenciado que la capacidad de carga de los ecosistemas había sido alcanzada. Es así, que desde hace décadas este término, ha estado presente tanto en los discursos políticos, medios de comunicación masivos y es objetivo de diversos y variados en trabajos académicos, llegando a ser del dominio popular. Lograr la sustentabilidad en el manejo de los recursos naturales, requiere de trabajo interdisciplinario así como la participación del estado en sus diversos niveles, y la colaboración entre países.

Si el concepto de sustentabilidad como tal es complejo, su evaluación lo es aún más, pues involucra la utilización de tecnología, inversión financiera, conocimiento y aplicación de prácticas ecológicas. La evaluación de la sustentabilidad es un reto pues debe reflexionar sobre cambios éticos y filosóficos respecto a las necesidades y grado de responsabilidad hacia la conservación de la diversidad de las especies, culturas, sociedades y medio ambiente (Torres

⁴ Se proporciona la definición de la LGEEPA y no la del informe Brundtland, porque se considera adecuada para esta investigación, debido a que se está trabajando con indicadores de sustentabilidad.

et al., 2004). Como lo plantea Quadri, 2001, para lograr evaluar la sustentabilidad, el primer paso es definir los distintos niveles espaciales y temporales de los sistemas de análisis.

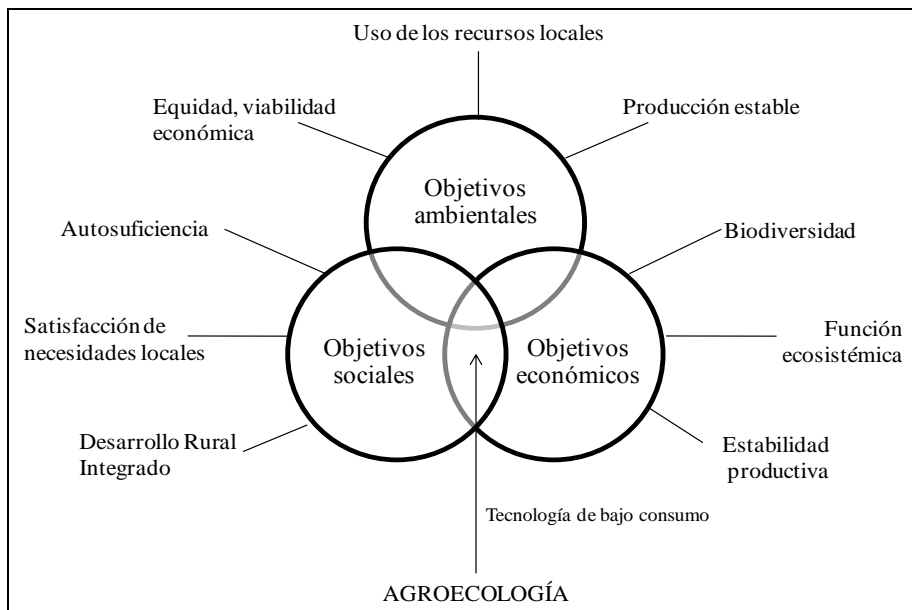
De la sustentabilidad han surgido nuevos conceptos como la *agricultura sustentable*. El estudio de la agricultura sustentable nació a finales de la década de los 80's. El principal motivo de su surgimiento fue la necesidad que se tenía y que aún persiste en el subsector agrícola, por asegurar la seguridad alimentaria, es decir, una producción estable de alimentos sin disminuir la calidad ambiental. También se busca la erradicación de la pobreza, conservar y proteger al ambiente y los recursos naturales.

La agricultura sustentable es definida por Altieri, 1994:371 como: “Un modo de agricultura que intenta proporcionar rendimientos sostenidos a largo plazo, mediante el uso de tecnologías y prácticas de manejo que mejoren la eficiencia biológica del sistema”. La agricultura sustentable busca una distribución justa y equitativa de los costos y beneficios derivados de la producción agrícola, procura el desarrollo de tecnologías y sistemas de manejo que se adaptan a las condiciones ecológicas, sociales y económicas locales, además que busca disminuir las desigualdades actuales en el acceso a recursos productivos. En otras palabras, la agricultura sustentable trata ser viable económicamente, pero también socialmente aceptable y ambientalmente efectiva (Maserá *et al.*, 1999).

Según Altieri y Nicholls, (2000), los objetivos de la agricultura sustentable son la producción estable y eficiente de recursos productivos; la seguridad y autosuficiencia alimentaria; el uso de prácticas agroecológicas o tradicionales de manejo; la preservación de la cultura local y de la pequeña propiedad; la asistencia de los más pobres a través de un proceso de autogestión; un alto nivel de participación de la comunidad en decidir la dirección de su propio desarrollo agrícola; y la conservación y regeneración de los recursos naturales.

Para el cumplimiento de estos objetivos, la agricultura sustentable utiliza como principal herramienta a la agroecología, que se convierte en un punto clave (ver figura 2.1).

Figura 2. 1. El rol de la agroecología en la satisfacción de los objetivos de la agricultura sustentable



Fuente: Altieri y Nicholls, 2000.

Se cree que la práctica de la agroecología es tan antigua como los orígenes de la agricultura, sin embargo, su estudio inició en la década de los setentas, y se incorporó a los estudios de la agricultura sustentable en los ochentas (Hecht, 1999:15). Se considera a éste término como:

Un enfoque de la agricultura más ligado al medio ambiente y más sensible socialmente; centrada no sólo en la producción sino también en la sostenibilidad ecológica del sistema de producción. A esto podría llamarse el uso «normativo» o «prescriptivo» del término agroecología, porque implica un número de características sobre la sociedad y la producción que van mucho más allá de los límites del predio agrícola. En un sentido más restringido, la agroecología se refiere al estudio de fenómenos netamente ecológicos dentro del campo de cultivo, tales como relaciones depredador/presa, o competencia de cultivo/maleza.

(Ibid)

Las influencias del pensamiento agroecológico nacieron a principios del siglo XX. Por ejemplo, los estudios de la agricultura ecológica en las ciencias formales iniciaron en 1928 con Klages, quien sugirió que en la agricultura se tomaran en cuenta los factores fisiológicos y agronómicos que influían en la distribución y adaptación de especies específicas de cultivos, todo para entender la complicada relación existente entre una planta de cultivo y su medio

ambiente. En 1942, este mismo amplió sus conocimientos al respecto y determinó cuáles cultivos podían producirse en una determinada región y en qué cantidad. Los estudios de Papadakis se presentaron en 1938, él argumentaba que el manejo de cultivos debería basarse en la respuesta del cultivo al medio ambiente. A pesar de esta visión tan acertada que ellos manejan, la ecología agrícola fue más desarrollada en los años 60 por Tischler (*Ibid*).

La agroecología es una visión multidimensional de los agroecosistemas, porque incluye la genética, la edafología o la agronomía, para incorporar un entendimiento de los niveles ecológicos y sociales de coevolución, estructura y función (Altieri, 1994). La agroecología muestra el gran potencial que se origina al estructurar la biodiversidad para crear sinergismos positivos que proporcionen a los agroecosistemas la capacidad de permanecer y retornar a un estado original de estabilidad natural (*Ibid*).

La agroecología como “marco teórico” tiene la finalidad de analizar los procesos agrícolas de una manera más amplia (Altieri y Nicholls, 2000). Por tanto, la agroecología considera a los agrosistemas como las unidades fundamentales de estudio, dentro de esta disciplina, los ciclos minerales, las transformaciones de la energía, los procesos biológicos y las relaciones socioeconómicas son investigados y analizados como un todo (*Ibid*).

Sin embargo, es válido decir que la aplicación de la agroecología en el país no ha funcionado del todo, ya que actualmente existen problemas de diversas índoles que han sumergido al sector en una crisis. Dentro de los problemas sociales y económicos se encuentra el desempleo, el envejecimiento de la población rural, el incremento de los costos de producción, la pérdida de rentabilidad agrícola, etc. Dentro del área ambiental, se estipula que la manera en que se ha practicado la agricultura ha ocasionado el agotamiento de algunos recursos, la reducción de la fertilidad del suelo, erosión, contaminación de aguas, pérdida de recursos genéticos, entre otros (Altieri y Nicholls, 2000).

2.2 *El MESMIS*

A pesar de la dificultad en la conceptualización de sustentabilidad, es un hecho que es una necesidad su evaluación como un punto de partida para mejorar los sistemas productivos. Es

así, que se han tenido avances en el desarrollo de marcos de análisis y evaluación que hacen operativo dicho término de manera coherente.

Según Rendón (2004), para la medición de sustentabilidad en el sector agropecuario nacional es necesario el desarrollo de metodologías de evaluación que reflejen la pertinencia social, económica y ambiental de las diversas alternativas presentes o futuras en cuanto al manejo de producción. Para ello, se estima que el reto más grande al acoger el concepto de sustentabilidad, es el diseño de metodologías de evaluación que dejen determinar el grado de sustentabilidad de los sistemas, y las alternativas que existen para su desarrollo futuro, lo que ha detonado el desarrollo de los indicadores de sustentabilidad fijados a cumplir dicha necesidad (*Ibid*).

Según Stockle *et al.*, 1994, la evaluación de sustentabilidad en el sector agropecuario, debe promover a largo plazo la calidad del medio ambiente y de los recursos bases de los cuales los sistemas agrícolas dependen, además de permitir satisfacer con alimentos y otros productos las necesidades humanas, sostener la viabilidad económica y promover la calidad de vida de los productores, familias y sociedad en conjunto.

Se considera que los marcos de evaluación de sustentabilidad en el sector agropecuario parten del enfoque de sistemas y tienen bases metodológicas similares, como producir una visión de sustentabilidad, estipulando un marco paradigmático que oriente el modelo de evaluación; ordenar criterios empleados según los objetivos plasmados en el proyecto de sustentabilidad a evaluar; determinar definiciones donde todos estén de acuerdo para cada criterio; poner límites a las fronteras del sistemas; definir a todos los indicadores utilizados; establecer metodología de medición para cada indicador así como las unidades de medida, escalas nominales, ordinales e intervalos; estandarizar los valores asignados de los datos obtenidos, así como jerarquizar cada criterio de acuerdo al contexto del proyecto analizado; y sintetizar los valores de apreciación mediante la comparación de éstos para los diferentes criterios empleados (Bosshard, 2000 citado en Torres *et al.*, 2004).

Uno de los marcos para la evaluación de sustentabilidad en el sector agropecuario es el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), el cual se deriva del Marco de Evaluación del Manejo Sustentable de Tierras, conocido como el FESLM. Este marco se encuentra dentro de los más populares en México y América latina durante los últimos diez años.

El MESMIS es una de las herramientas más ventajosas para hacer operativo el concepto de sustentabilidad en el sector agropecuario nacional y de América latina, ya que ha permitido clarificar y reforzar las cuestiones teóricas de la discusión sobre el tema, así como proporcionar sugerencias técnicas y políticas para el diseño de sistemas de manejo de recursos naturales sustentables (Astier *et al.*, 2008).

El proyecto del MESMIS, inició entre 1994 y 1997, cuando la Fundación Rockefeller de México solicitó desarrollar un método para evaluar la sustentabilidad de los proyectos productivos que integran la Red “Manejo de Recursos Naturales”. Se aplicó la metodología a cinco estudios de caso, en sistemas agrícolas, forestales y pecuarios de diferentes regiones de la Nación (*Ibid*).

El MESMIS contribuyó para el trabajo interdisciplinario y de los sistemas complejos, forjó a los sistemas como “totalidades organizadas”; proporcionó ideas sobre el “ciclo adaptativo” con respecto a dinámica de regulación-transformación de los sistemas, así como su organización jerárquica en diferentes escalas espaciales y temporales, y en cuanto a los procesos de autoorganización; también se dió coherencia teórica a los atributos sistémicos de los sistemas de manejo (Astier *et al.*, 2008).

De esta forma, se pretendió entender de manera integral las limitantes y las posibilidades para fortalecer la sustentabilidad de los sistemas de manejo que surgieron de la intersección de procesos ambientales con los ámbitos social y económico. En el proceso de evaluación, el MESMIS muestra una estructura flexible para adaptarse a diferentes niveles de información y capacidades técnicas disponibles localmente, e implica un proceso de evaluación participativo, con dinámicas de grupo y una retroalimentación constante del grupo evaluador (*Ibid*).

El objetivo principal del MESMIS fue proponer un marco metodológico para evaluar la sustentabilidad de diferentes sistemas de manejo de recursos naturales (agrícolas, pecuarios o forestales) a escala local (parcela, unidad productiva, comunidad) sustentándose en cuatro premisas. La primera premisa integra los siete atributos generales de los agrosistemas: productividad; estabilidad, confiabilidad y resiliencia; adaptabilidad; equidad; y autodependencia (autogestión).

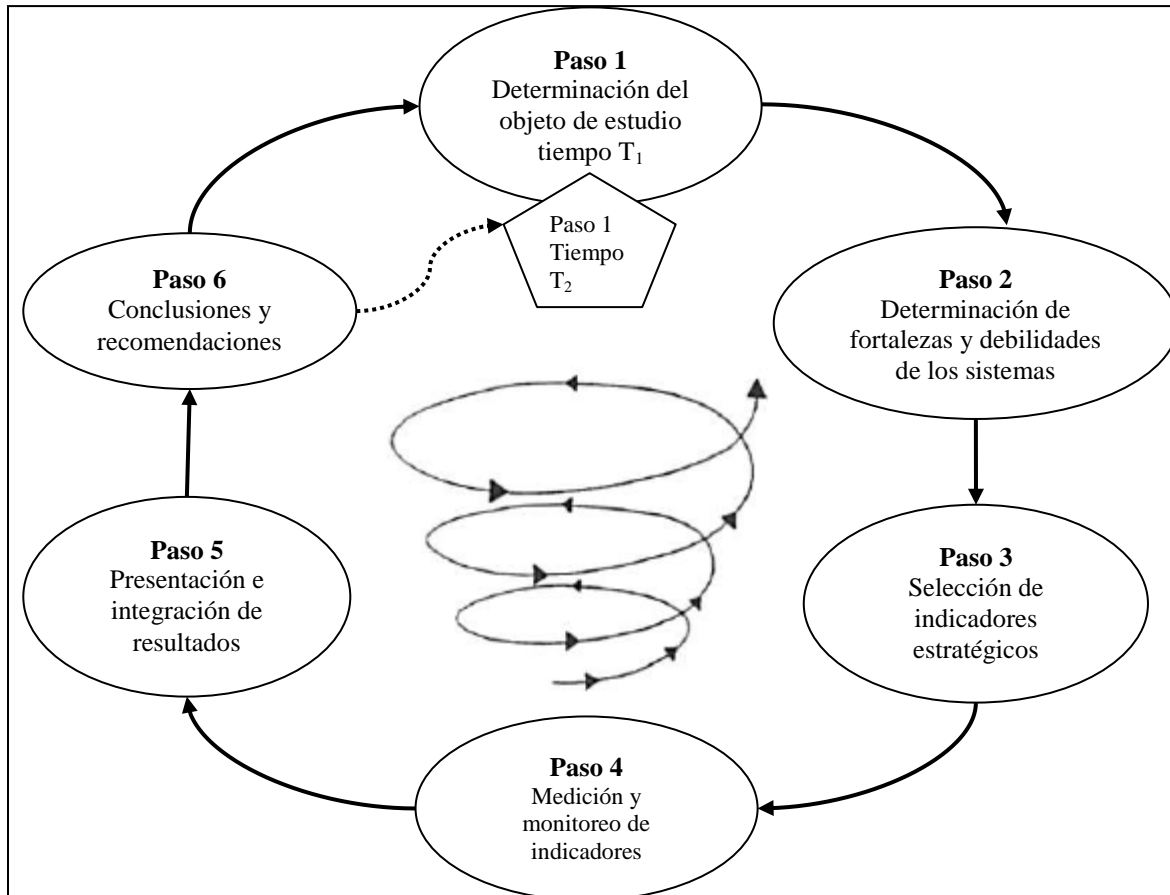
La segunda premisa es que la evaluación se desarrolla para un sistema de manejo específico, bajo un definido contexto social y político, además a una escala específica, y a una escala espacial (parcela, unidad de producción y comunidad) y temporal determinada. La tercer premisa es que esta evaluación requiere ser participativa y necesita un equipo de trabajo interdisciplinario e intercultural. Por último, la cuarta premisa señala que la sustentabilidad se debe evaluar de manera comparativa o relativa, es decir, de un mismo sistemas a través del tiempo (longitudinal) o transversal que son simultáneamente dos o más sistemas de manejo.

Los siete atributos del MESMIS se definen de la siguiente manera: el primero, la *productividad* se refiere a la capacidad del sistema para producir cierto nivel de bienes y servicios; el segundo, la *estabilidad* que es la capacidad de mantener constante la productividad; el tercero, la *confiabilidad* que es la capacidad de mantener el nivel de beneficios sin grandes fluctuaciones a niveles cercanos al equilibrio, ante perturbaciones periódicas normales. El cuarto atributo es la *resiliencia* la cual se define como la capacidad de retornar a la estabilidad después de una perturbación grave; el quinto, es la *adaptabilidad* que se refiere a la flexibilidad del sistema para encontrar nuevos niveles de equilibrio ante cambio importantes económicos o ambientales; el sexto es la *equidad*, que se refiere a la capacidad del sistema para distribución de los costos, tanto productivos como ambientales en cuanto a los beneficios y costos productivos; y el séptimo es la *autogestión o autosuficiencia* que se refiere a la capacidad de controlar las interacciones con el exterior, según prioridades, objetivos y valores endógenos.

El MESMIS está integrado por seis pasos. El primero es la caracterización de los sistemas de manejo, aquí se identifica el o los sistemas de manejo que se van a analizar, así como su contexto socioambiental y las escalas espacial y temporal de la evaluación. Abarca los

componentes biofísicos del sistema, insumos, prácticas, niveles de organización, etc., para los estudios longitudinales, es decir comparaciones multitemporales. Si la evaluación es longitudinal, la caracterización deberá realizarse antes y después de la aplicación de mejoras.

Figura 2. 2. El ciclo de evaluación en el MESMIS.



Fuente: Masera, *et al.*, 1999.

El segundo paso consiste en determinar las fortalezas y debilidades de los sistemas de manejo. Se analizan los aspectos o los procesos que limitan o fortalecen la capacidad de los sistemas para sostenerse en el tiempo, esto es necesario para la evaluación porque permite centrar y dar dimensiones manejables al problema bajo análisis.

El tercer paso, incluye la selección de criterios de diagnóstico e indicadores estratégicos. Se identifican los diferentes indicadores que permitirán evaluar el grado de sustentabilidad de los sistemas de manejo propuestos, donde no existe una lista de indicadores universales (Bakkes

et al., 1994). Los indicadores dependerán de las características del problema específico bajo estudio, de la escala del proyecto, del tipo de acceso y de la disponibilidad de datos. En esta parte se determinan los niveles de sustentabilidad, por ejemplo, 5 lo más sustentable y cero lo menos sustentable, o también, +5 lo más sustentable y -5 lo menos sustentable.

Una vez seleccionados los indicadores económicos, sociales y económicos que se utilizarán para la evaluación, éstos son medidos, como lo indica el cuarto paso. Se debe detallar el procedimiento para evaluar cada indicador, ya que existen diversos procedimientos, es decir, un indicador se puede medir de diferentes maneras, por eso es importante elegir una forma accesible para hacerlo, y evitar sesgos por descuidos o por otro motivo.

Como quinto paso, se deben integrar los resultados. Es un momento importante y complicado, ya que se trabaja con indicadores que tienen información muy diversa, aunque pertenezcan al mismo ámbito, social, económico o ambiental. Se han desarrollado técnicas cuantitativas como el análisis estadístico multivariado (Krzanowski, 2000), o el diseño de índices de sustentabilidad (Taylor *et al.*, 1993) que facilitan la integración y comprensión de resultados. Aunque algunos expertos han optado por técnicas cualitativas como el método AMIBA (Brink *et al.*, 1991 citado en Masera *et al.*, 1999). Él o los evaluadores podrán elegir el método que consideren más conveniente.

Por último, una vez analizados los resultados, se proporcionan las conclusiones y recomendaciones (sexto paso). Se indica qué ámbito (social, ambiental o económico) y qué indicadores mostraron los valores más o menos sustentables. Se emiten las recomendaciones sobre las fallas o aciertos de los sistemas en comparación con otro o con él mismo en el tiempo.

El MESMIS fue elegido en esta investigación como apoyo para cumplir los objetivos propuestos. Sin embargo, no todos los pasos estipulados por este marco fueron ejecutados, ya que en este trabajo no se realizó la evaluación de ningún agrosistema, solamente se llegó a la fase de propuesta de indicadores y un índice de sustentabilidad para evaluar la sustentabilidad de Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB). Es decir, los pasos desarrollados en la

presente investigación fueron cinco, en el paso uno, se determinó el objeto de estudio que fueron los APB; en el paso dos, se identificaron las fortalezas y debilidades de los APB; en el tercer paso se seleccionaron los indicadores, algunos se crearon y otros se retomaron de otras investigaciones; por último, en el paso cinco se eligió el índice de sustentabilidad para integrar los indicadores identificados.

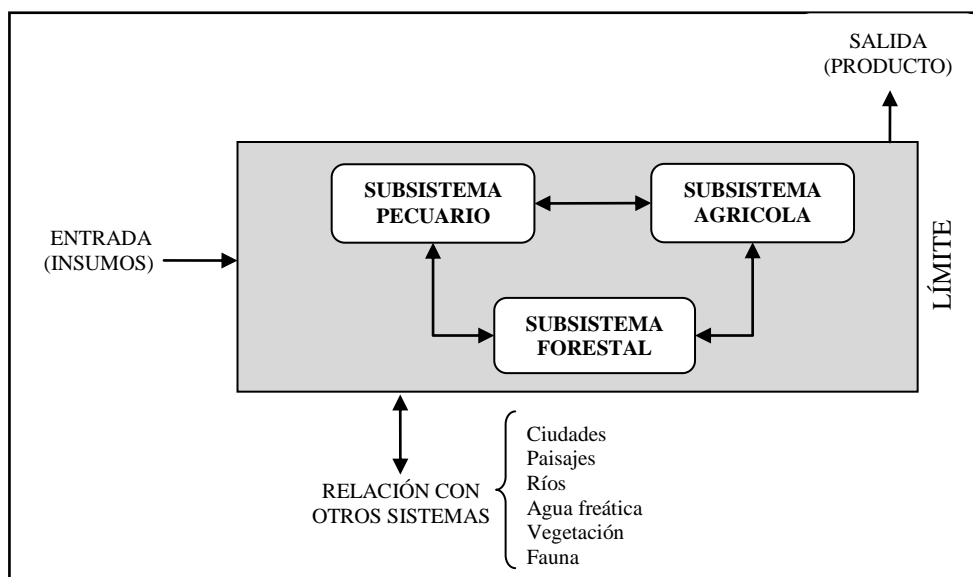
2.3 Agrosistemas

Los agrosistemas son las unidades de estudio para la agroecología y el MESMIS. Es posible distinguir cuatro tipos de marcos metodológicos según la escala espacial: a) nacionales o macrorregionales que tienden a la formulación de políticas, b) análisis regionales, c) evaluación de sistemas de manejo (unidades de producción), d) modelos integrales la cual implica la combinación de anteriores niveles (OECD, 2000). El MESMIS se ubica en el inciso “c”.

Los agrosistemas o agroecosistemas se definen como “a biological and natural resource system managed by humans for the primary purpose of producing food as well as other socially valuable nonfood goods and environmental services” (Wood *et al.*, 2000:1). Aunque también se les puede conocer como “sistema de manejo” que puede ser sistema de manejo agrícola, pecuario o forestal definiéndose como “un arreglo de componentes, un conjunto o colección de cosas, unidas o relacionadas entre sí de tal manera que formen y actúan como una unidad, una entidad o un todo” (Hart, 1985:32).

Según Masera *et al.*, (1999) en el agrosistema se integran componentes físicos, biológicos y socioeconómicos, y define a éste como la interacción entre sus elementos que determinan las entradas, las salidas y los límites del sistema. Dentro de los componentes físicos están: sustrato geológico, suelo, clima, parcela de cultivo; dentro de los biológicos están: plantas, animales y microorganismo; y en los componentes socioeconómicos se incluyen: familia, unidad de producción, etcétera. Las entradas y salidas son todos flujos de productos materiales, energía o información hacia el interior o el exterior del sistema. Los límites del sistema determinan el universo de estudio y se definen de acuerdo a los objetivos de investigación (ver figura 2.3).

Figura 2. 3. Estructura general de un sistema de manejo agrícola o agrosistema.



Fuente: Masera *et al.*, 1999.

Los agrosistemas son la base de estudios para la agroecología, el MESMIS, y también para la presente investigación. Debido a que esta conceptualización permitió facilitar la caracterización de los APB propuestos para este trabajo, y de esta manera poder proponer indicadores y el índice de sustentabilidad para la producción de bioenergía a partir de sistemas agrícolas.

2.4 La agricultura en México. Situación actual

El estudio de la agricultura sustentable, agroecología, el MESMIS y los agrosistemas, muestran el enfoque teórico para la presente investigación. Sin embargo, también es relevante mostrar la situación de la agricultura en el país, ya que es la base para la producción de bioenergía propuesta en este trabajo.

El sector agropecuario desde 1983 hasta el día de hoy se encuentra en un proceso de estructuración, cuyas vertientes principales son: la disminución de la participación del Estado en la promoción del desarrollo económico sectorial; la apertura comercial externa que hizo que se introdujera el sector agropecuario en el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN); y las modificaciones en el artículo 27 Constitucional donde se suprime el carácter

inalienable, inembargable e imprescriptible de la propiedad campesina ejidal y comunal, instituido por la Revolución mexicana, abriendo múltiples vías para la concentración de la tierra en grandes unidades de producción (Calva, 1996).

Con este programa liberalizador, que permitía al sector privado y a las fuerzas espontáneas del mercado la libre asignación de los factores productivos, se esperaba un aumento de las inversiones de capital en la agricultura, incremento de la eficiencia y desarrollo de la producción de alimentos y materias primas agropecuarias (*Ibid*). No obstante, los resultados obtenidos en el sector no son lo que se estimaba ya que las inversiones agrícolas han declinado simultáneamente con la producción interna de alimentos (teniendo como contraparte un alto crecimiento en las importaciones alimentarias). Además, de que se ha agravado la problemática social campesina, originando un éxodo rural y conflictos políticos (*Ibid*).

Romero (1995) argumenta que la crisis agrícola y la creciente dependencia alimentaria de México no radican solamente en la existencia de formas pre-modernas de tenencia de la tierra, más bien en la pérdida de rentabilidad del sector, que ha provocado una profunda descapitalización del agro. Al igual que Calva, (1996) se plantea que este proceso de descapitalización, ha influido fuertemente en las recientes políticas neoliberales de privatización, desregulación y apertura comercial indiscriminada. La ejecución de un esquema de supuestas ventajas comparativas en sustitución de la defensa de la autosuficiencia productiva como base de la seguridad alimentaria pone en peligro la existencia de millones de productores rurales y eleva sensiblemente el grado de dependencia de la agricultura mexicana frente al exterior.

El subsector agrícola es el más importante del sector agropecuario, debido a que contribuye con el 69 por ciento de la producción total. Según el *censo agropecuario*, (2007), México cuenta con 29 902 091.66 hectáreas de superficie agrícola, divididas en 17 por ciento de riego y 83 por ciento de temporal (INEGI, 2007), además se cuenta con una diversidad de cultivos agrícolas. A continuación se muestran las zonas agrícolas del país y los cultivo más importantes de cada una de ellas (ver cuadro 2.1).

Cuadro 2. 1. Principales regiones y cultivos agrícolas del país.

PRINCIPALES REGIONES Y CULTIVOS AGRÍCOLAS DEL PAÍS		
REGIÓN AGRÍCOLA	ZONA	CULTIVOS
Mar de Cortés	1.- Valle de Mexicali y San Luís Rio Colorado 2.- Valle ríos Yaqui y Mayo 3.- Valles del Fuerte y Culiacán Sinaloa	1.- Trigo y algodón 2.- Trigo y cártamo 3.- Maíz, hortalizas y frijol
Occidente	Sur Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Sur Michoacán y Colima	Maíz, caña de azúcar, aguacate y agave tequilero.
Pacífico Sur	Costas de Chiapas, Oaxaca y Guerrero	Café, frutales (plátano y mango)
Norte	Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León, Zacatecas norte y San Luís Potosí sin huasteca	Maíz, frijol y avena
El Bajío	Guanajuato sin el norte, Querétaro sin huasteca, Michoacán sin el norte, Aguascalientes y sur de Zacatecas	Maíz, sorgo y hortalizas
Centro-Valles Altos	México, Puebla e Hidalgo sin huasteca, Tlaxcala y Morelos norte	Maíz, avena y cebada
La Laguna	Sureste de Coahuila y este de Durango	Forrajes y maíz
Golfo norte	Tamaulipas sin huasteca	Maíz y sorgo
Huastecas	Límites de los estados vecinos de Tamaulipas, Veracruz, San Luís Potosí, Puebla, Hidalgo y Querétaro	Maíz, caña de azúcar y café
Golfo centro	Centro de Veracruz	Caña de azúcar, café y cítricos
Cuenca del Papaloapan	Sur de Veracruz	Caña de azúcar y maíz
Valles centrales de Chiapas y Oaxaca	Valles centrales de Chiapas y Oaxaca	Maíz y frijol
Peninsular	Yucatán, Quintana Roo, Campeche y Tabasco	Maíz, cacao, caña de azúcar y cítricos

Fuente: IMF, A.C., 2005 en Lazcano, 2006.

A pesar de la diversidad de cultivos agrícolas en el país, en los últimos años se ha presentado un insuficiencia para satisfacer la demanda del mercado interno (Escalante y Catalán, 2008). Las variaciones en la producción agrícola muestran una mayor volatilidad respecto al resto de los sectores de la economía (*Ibid*). De los cultivos sembrados en México, el que presenta mayor rentabilidad son las hortalizas y frutas, sobre todo en el marco del Tratado Libre Comercio (Mestiza y Escalante, 2003 citado en Escalante y Catalán, 2008), por lo que sus exportaciones son las más importantes y presenta un crecimiento en la superficie cultivada.

Contrario a esto, los cultivos que constituyen la base de la dieta de los mexicanos, también conocidos como básicos o sensibles, no son actualmente rentables y requieren de subsidios

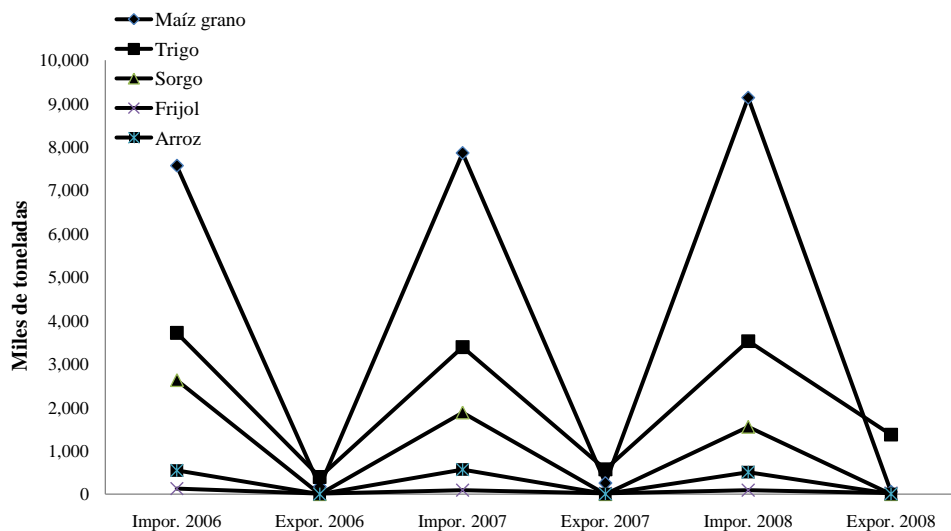
gubernamentales, por lo que se ha originado un estancamiento en la producción de estos productos. A continuación se presenta la producción anual de algunos cultivos agrícolas sensibles durante el periodo 2006-2008 (ver cuadro 2.2), también se muestra el crecimiento en las importaciones de estos cultivos en los últimos años (ver figura 2.4), que es evidencia de este estancamiento.

Cuadro 2. 2. Producción anual de cultivos agrícolas sensibles (Miles de toneladas)

PRODUCCIÓN ANUAL DE CULTIVOS AGRÍCOLAS SENSIBLES			
Cultivo	2006	2007	2008
Maíz grano	21, 893.20	23, 512.75	24,410.00
Trigo	3, 378.11	3, 515. 39	4,213.54
Sorgo	5, 518. 51	6,202.92	6, 593.05
Frijol	1, 385.78	993.95	1,111.08
Arroz	337. 24	294. 69	224. 37

Fuente: SIAP, 2009.

Figura 2. 4. Importaciones y exportaciones de productos sensibles (Miles de toneladas)



Fuente: SIAP, 2009.

Aunque el subsector agrícola es el más importante del sector agropecuario, el agro tiene muchas deficiencias, y una de ellas es la actual política agropecuaria, la cual se basa en una mayor especialización en las unidades productoras ocasionando un cambio en la estructura productiva de las actividades agrícolas (Escalante y Catalán, 2008). Por ello, se necesita una política agropecuaria que se incorpore en el marco de una estrategia de desarrollo rural y regional, integrando a la política pública, el enfoque de la dimensión territorial y conozca la heterogeneidad y complejidad del espacio rural, y las dinámicas y condiciones del campo en el contexto de la globalización, e introduzca a la sociedad en la formulación de esta política (*Ibid*)

2.5 Desarrollo rural mediante producción de bioenergía

El desarrollo rural es un concepto que nació para mejorar la calidad de vida en las comunidades no urbanas, impulsando las siguientes acciones e iniciativas: magnitud de recursos; voluntad y conciencia de superación; mejoramiento en los índices de seguridad laboral; y desarrollo humano expresado en oportunidades y aumento de la capacidad productiva de las organizaciones campesinas. (Jiménez, 1996).

Para el cumplimiento de los objetivos estipulados para el desarrollo rural, se apoya en la reforma agraria; en programas de asistencia especial para los pequeños productores en tecnología, educación, salud, nutrición y protección de derechos; programas especiales para la creación de empleos basados en la industrialización; políticas de incentivos económicos vinculados con precios, créditos, mercadeo, y planificación del desarrollo.

En México, el pilar más importante para regular y cumplir con los objetivos planteados para este concepto, es la *Ley del Desarrollo Rural Sustentable (LDRS)*, publicada en diciembre de 2001 en el diario oficial de la federación. En dicho documento se promueve el desarrollo rural mediante el impulso de políticas, acciones y programas en el medio rural que serán considerados prioritarios para el desarrollo del país y que estarán orientados a promover el bienestar social y económico de los productores, de sus comunidades, de los trabajadores del

campo, incluyendo la diversificación y la generación de empleo, agregando el no agropecuario en el medio rural.

En la LDRS, (2001) también se promueve la contribución a la soberanía y seguridad alimentaria del país, mediante la producción agropecuaria; se fomenta la conservación de la biodiversidad y el mejoramiento de la calidad de los recursos naturales, mediante su aprovechamiento sustentable; y el valorar las diversas funciones económicas, ambientales, sociales y culturales de las diferentes manifestaciones de la agricultura nacional.

Resulta imprescindible que el desarrollo rural funcione de la misma manera como está diseñado en la LDRS. No obstante, la realidad es diferente a pesar de la existencia de esta ley, en el apartado anterior se presentó la problemática actual del sector agropecuario y específicamente de la agricultura, que es la actividad más importante en el sector, lo cual permite asegurar que la situación de la población rural en el país es deplorable. Por lo anterior, se considera que la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos o esquilmos agrícolas es una actividad que podría impulsar al desarrollo rural (Demirbas y Demirbas, 2007).

El sector energía también podría verse beneficiado por esta producción, porque se disminuiría el uso de los combustibles basados en petróleo, lo que aumentaría la seguridad energética, se reduciría la dependencia frente a la volatilidad de los precios de petróleo, bajarían los costos de los combustibles o de las importaciones; y en el sector ambiental porque se minimizarían las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), y otros problemas relacionados con la cadena de explotación de hidrocarburos, como los derrames de petróleo (Pfaumann, 2006).

Figura 2. 5. Sectores beneficiados por la producción de bioenergía en sistemas agrícolas



Fuente: Modificado de Pfaumann, 2006.

La producción de bioenergía a partir de productos o subproductos agrícolas promete ser de gran apoyo para impulsar el desarrollo rural, mediante la creación de empleos en las actividades agrícolas o en las plantas de transformación a bioenergía. Se abriría un nuevo mercado para ciertos cultivos agrícolas y los residuos agrícolas serían revalorizados. Sin embargo, es muy temprano para aseverar que todo lo anterior podrá lograrse; tendrán que transcurrir algunos años junto con la implementación de varios proyectos de bioenergía para verificarlo.

Capítulo III. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

Introducción

Este capítulo desarrolla la propuesta de investigación para este trabajo. Se inicia con el planteamiento del problema, donde se muestra la manera en que los apoyos brindados a la producción de bioenergía podrían generar diversas complicaciones en distintos ámbitos, y aunque existen destacados impactos positivos, se requieren de distintas herramientas que regulen esta generación, y el índice de sustentabilidad (IS) es de gran apoyo.

Posteriormente se muestran las preguntas de investigación y la hipótesis planteada. A partir de esto, fue posible identificar el objetivo principal de la investigación y los objetivos específicos que permitieron cumplir con el general.

3.1 Planteamiento del problema

La producción de bioenergía en México a partir de cultivos energéticos según lo estipulado en el programa de introducción de los bioenergéticos (SENER, 2009), se plantea como una estrategia para elevar el nivel de desarrollo humano, social y patrimonial de las zonas rurales del país. Además se pretende fortalecer la seguridad energética nacional al diversificar la oferta y reducir la dependencia por recursos fósiles no renovables. Finalmente, la producción y uso de bioenergía permitirá disminuir el impacto ambiental ocasionado por los combustibles fósiles. Según Pfaumann (2006), en América Latina la producción de bioenergía podrá apoyar el desarrollo de la agricultura nacional, mejorar los ingresos de los agricultores y por ende la situación económica de las áreas rurales.

Lo anterior se deriva de algunas experiencias de éxito a nivel internacional, como el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía, España, en donde se produce bioenergía a partir de los excedentes del cultivo del olivar y de sus industrias derivadas. La creación de agroindustrias en el sector rural, han contribuido al mantenimiento de la actividad rural, mediante la creación de empleos (Agencia Andaluza de la Energía, 2007).

En México, los proyectos de bioenergía se han considerado como un mercado de oportunidades económicas, ambientales y sociales. Además que su desarrollo figura múltiples beneficios para las zonas rurales, una de las principales consideraciones es que pueden crear sinergias entre el sector agrícola y forestal con el sector energético e industrial, y apoyar el crecimiento de los servicios ambientales y ser impulsora de empleo local o regional para las poblaciones rurales (González, 2009).

Los impactos positivos que se estiman para el sector rural mexicano por la producción de bioenergía, han llamado la atención, especialmente porque se reconoce que éste sector enfrenta una crisis (Romero, 1995). Desde hace algunos años, el sector rural ha sufrido reducciones del presupuesto federal, una competitividad negativa en la región del TLCAN, aumento en las importaciones y una balanza comercial crónicamente deficitaria que ha puesto en riesgo la soberanía alimentaria, además de enfrentar un alto índice de desempleo y por consiguiente incremento de la pobreza (Gómez y Schwentesius, 2003). Se estima que en 2006, el 16.1 por ciento de los habitantes en zonas rurales se encontraba en niveles de pobreza extrema y el 40.1 por ciento en pobreza moderada (CEPAL, 2009).

No obstante, la producción de bioenergía también conlleva impactos negativos que deberían ser considerados en los proyectos. Por ejemplo, Pfaummann (2006) menciona que si el manejo de los recursos naturales no es adecuado, pueden existir riesgos en los sistemas productivos que conduzcan a una concentración de tierras, liberación de mano de obra con la mecanización, aumento en el precios de los insumos así como de alimentos atentando con la seguridad alimentaria, originarse o agravarse problemas de desertificación, contaminación de suelos y agua por el uso intensivo de fertilizantes y pesticidas, entre otros. Como ejemplo, en Colombia, organizaciones defensoras de los derechos humanos denuncian que la expansión de los cultivos de palma de aceite para la producción de biodiesel, amenazan las tierras de comunidades afrocolombianas, campesinas e indígenas, y argumentan que estos cultivos son responsables de la crisis global de alimentos (Rodríguez, 2009).

Se pueden encontrar opiniones opuestas acerca de los proyectos de producción de bioenergía, es incuestionable que no son la panacea al problema energético mundial, ni la fórmula mágica para solucionar el estado actual del sector rural. Sin embargo, llevados a cabo de una forma

responsable, son una alternativa real en aquellas regiones que cuenten con el potencial para su implementación (FAO, 2009). Lo primordial es tomar en cuenta todos los aspectos relacionados con su desarrollo, positivos y negativos, y las implicaciones que tiene en la seguridad alimentaria y el medio ambiente (González, 2009).

3.2 Preguntas centrales de investigación

Los Agrosistema de Producción de Bioenergía (APB) primarios y secundarios, están conformados por subsistemas, tales como el subsistema agrícola, de transformación y social. El funcionamiento de los subsistemas y del APB en general, involucra aspectos económicos, ambientales y sociales que son requeridos para que se marche sustentablemente.

Los subsistemas del APB pueden contar con puntos críticos que aseguran o ponen en riesgo su funcionamiento sustentable, los cuales son necesarios identificar para conocer su estado actual y si es necesario poner en práctica acciones de mejora.

Es por ello que se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son los componentes y flujos de entrada y salida en los agrosistemas de producción de bioenergía primarios y secundario?
- De acuerdo a la conformación de los agrosistemas de producción de bioenergía primarios y secundarios, ¿Qué variables o puntos críticos en común permiten su evaluación en el ámbito social, ambiental y económico?
- ¿Cómo pueden ser integradas las variables o puntos críticos identificadas para determinar el grado de sustentabilidad de diferentes agrosistemas de producción de bioenergía?

3.3 *Objetivo general y objetivos específicos*

La premisa de este trabajo es que los proyectos basados en Agrosistemas de Producción de Bioenergía, puedan aplicar una herramienta para evaluar su grado de sustentabilidad.

Por ello se propone como objetivo general diseñar un índice que integre el área social, ambiental y económica que permita la evaluación, comparación y monitoreo de la sustentabilidad en Agrosistemas de Producción de Bioenergía, a partir de cultivos energéticos o esquilmos agrícolas (primarios y secundarios, respectivamente) que utilicen los métodos de transformación de biomasa en bioenergía, que se proponen y definen en este trabajo.

Para cumplir lo anterior se plasmaron los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Definir los componentes y flujos de entrada y salida en agrosistemas de producción de bioenergía primario y secundario.
- 2.- Identificar las variables en común en los agrosistemas de producción de bioenergía primarios y secundarios basados en los atributos propuestos por la MESMIS reflejando el ámbito social, económico y ambiental.
- 3.- Proponer una serie de indicadores que permitan la medición de la sustentabilidad en los agrosistemas de producción de bioenergía primario o secundario.

3.4 *Hipótesis*

Los agrosistemas de producción de bioenergía basados en cultivos energéticos o residuos (primarios y secundarios, respectivamente) poseen *variables o puntos críticos en común* en el ámbito económico, social y ambiental, que permiten proponer una serie de indicadores que pueden integrarse para el diseño de un índice de sustentabilidad.

Capítulo IV. METODOLOGÍA

Introducción

En este capítulo se describe y se justifica la metodología utilizada para diseñar el Índice de Sustentabilidad (IS) aplicable para los Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB). La formulación del Índice se basó en sus primeras etapas en la metodología propuesta por el Marco de Evaluación de Sistemas de Manejo de recursos naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS). Con ello se llegó a la proposición de una serie de indicadores dentro de las áreas de estudio social, económico y ambiental que se pretende, que una vez diagnosticados, determinen el grado de sustentabilidad de APB. Posteriormente, los indicadores fueron integrados por área de estudio para obtener un subíndice social (SIS), subíndice económico (SIE) y un subíndice ambiental (SIA) que finalmente formaron parte del IS.

El IS deberá ser suficientemente robusto para aplicarse tanto a la evaluación de un mismo APB en el tiempo, y más aún, a la evaluación transversal entre APB primario-primario, secundario-secundario o primario-secundario.

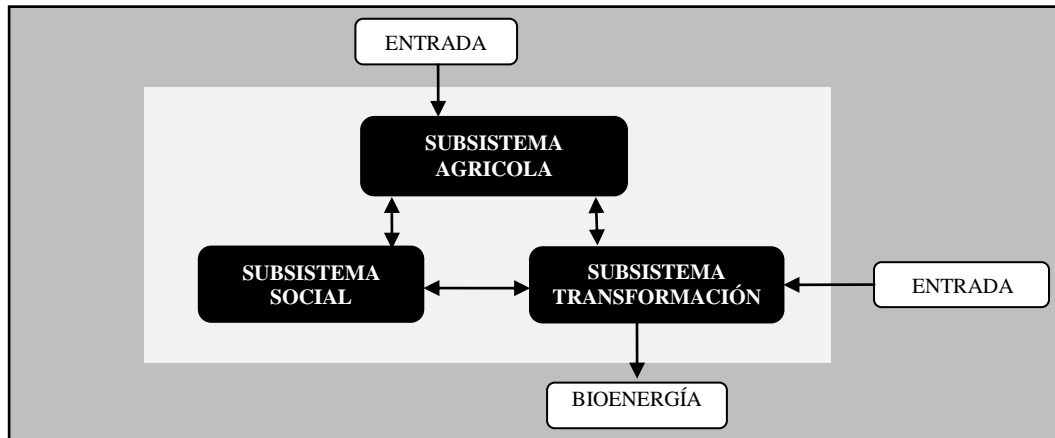
4.1 Selección y caracterización de los sistemas a evaluar

La sustentabilidad sólo adquiere significado, cuando dos Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB) con diferentes prácticas son comparados y se demuestra cuál de ellos es más o menos sustentable, o bien, cuando un mismo sistema es comparado antes y después de la implementación de nuevas prácticas y/o mejoras (Masera *et al.*, 1999). Por lo tanto, es común hablar de un *sistema de referencia*, como aquel tradicional o que no ha sido modificado; y un *sistema alternativo* el cual conlleva diversas mejoras.

Este concepto debió ser interpolado a los APB, seleccionando dos tipos de sistemas para su caracterización y contraste. La metodología a desarrollar debió ser robusta e incluyente para aplicarse en estudios de evaluación de la sustentabilidad de cualquier tipo de APB. Se ha definido a un APB como aquellos formados por tres subsistemas principales: el agrícola, de transformación y el social. Estos fueron clasificados en función del insumo utilizado; en

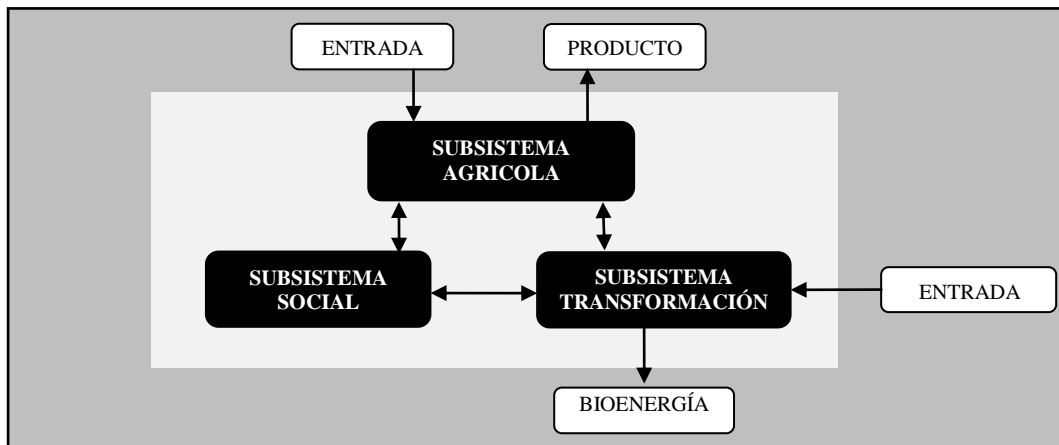
primarios si el insumo proviene de cultivo agrícola destinado principalmente para la obtención de bioenergía (Ver figura 4.1), y en *secundarios* cuando el insumo para la generación de bioenergía se obtiene de algún tipo de residuo agrícola o subproducto agroindustrial (ver figura 4.2).

Figura 4. 1. APB primario, o de referencia



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. 2. APB secundario, o alternativo



Fuente: Elaboración propia.

El APB secundario, se concibe en principio como una opción más sustentable de producción de bioenergía debido a la generación de dos productos; alimento humano/animal y la bioenergía a partir de residuos. Los sistemas a caracterizar fueron hipotéticos tomando a los APB primarios como el de referencia y a los APB secundarios como el sistema alternativo.

No obstante, cada APB primario o secundario, podrá ramificarse dependiendo de la conformación del subsistema de transformación, en el cual se utiliza alguno de los métodos disponibles para la obtención de energía (químicos, termoquímicos o bioquímicos). Por tanto, fueron formulados diferentes escenarios de APB primarios y secundarios, en los cuales el subsistema de transformación explota alguna de las tecnologías disponibles en el corto y mediano plazo para la conversión de biomasa en bioenergía.

Cuadro 4. 1. Tipo de tecnología de conversión aplicada según el APB

SUB-SISTEMA AGRÍCOLA	SUB-SISTEMA DE TRANSFORMACIÓN (TECNOLOGÍA DE CONVERSIÓN)
Primario	1.- Fermentación, 2.- Transesterificación, 3.- Combustión directa, y 4.- Gasificación
Secundario	1.- Fermentación, 2.- Digestión anaerobia, 3.- Combustión directa, y 4.- Gasificación

Fuente: Elaboración propia.

Las tecnologías incluidas en los escenarios de APB primarios fueron la de fermentación, transesterificación, combustión directa y gasificación. Todas ellas se encuentran disponibles en el mercado y pueden implementarse en el corto plazo para transformar insumos ricos en sacarosa y almidón para la obtención de etanol mediante su fermentación; aceites obtenidos de plantas oleaginosas pueden ser transesterificados a biodiesel; mientras que cultivos de rápido crecimiento y/o madera pueden ser convertidos a calor, electricidad o gases mediante su combustión o gasificación.

Las tecnologías disponibles en el corto y mediano plazo, que fueron incluidas en los diferentes escenarios de APB secundarios fueron la de fermentación, digestión anaerobia, combustión directa y gasificación. Diferentes tipos de residuos agrícolas, agroindustriales y pecuarios pueden ser procesados hasta biocombustibles mediante su fermentación o digestión; también pueden ser aprovechados mediante su combustión o gasificación.

De esta forma, fueron representados cuatro diferentes escenarios dentro de los APB primarios, y cuatro más dentro de los APB secundarios. Estos fueron caracterizados incluyendo también el sub-sistema social, el cual está integrado por el capital humano involucrado en el sub-sistema agrícola y de transformación. La caracterización se basó en la delimitación del sistema, identificación de flujos de entrada y salida en forma de energía, insumos, productos y residuos, así como las relaciones entre los diferentes sub-sistemas. La información requerida se obtuvo de referencias bibliográficas especializadas, con la cual se construyeron diagramas específicos para cada tipo de agrosistema.

4.2 Definición de las áreas de evaluación, variables e indicadores

El incremento en la producción de bioenergía a nivel mundial originó una necesidad de proponer diversos criterios que permitan evaluar la sustentabilidad en dicha producción. Dentro de los criterios de sustentabilidad que más destacan son la disminución de gases efecto invernadero (GEI), que la producción de bioenergía no afecte la conservación de la biodiversidad, ni dañe o deteriore los recursos naturales, un uso adecuado agroquímicos, lo cual muestra la relevancia del *área ambiental*.

Otros criterios de sustentabilidad que son considerados fueron la viabilidad económica del proceso, salarios justos, incentivos económicos, lo cual determinó la importancia de análisis del *área económica*. También fueron considerados criterios como la contribución positiva al bienestar de la población local, evitar y prevenir el trabajo infantil, derecho a la salud pública, entre otros, estos criterios expone la importancia de estudiar el *área social*. Por lo anterior, fue primordial el estudio del área ambiental, económica y social en la evaluación de sustentabilidad en los Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB).

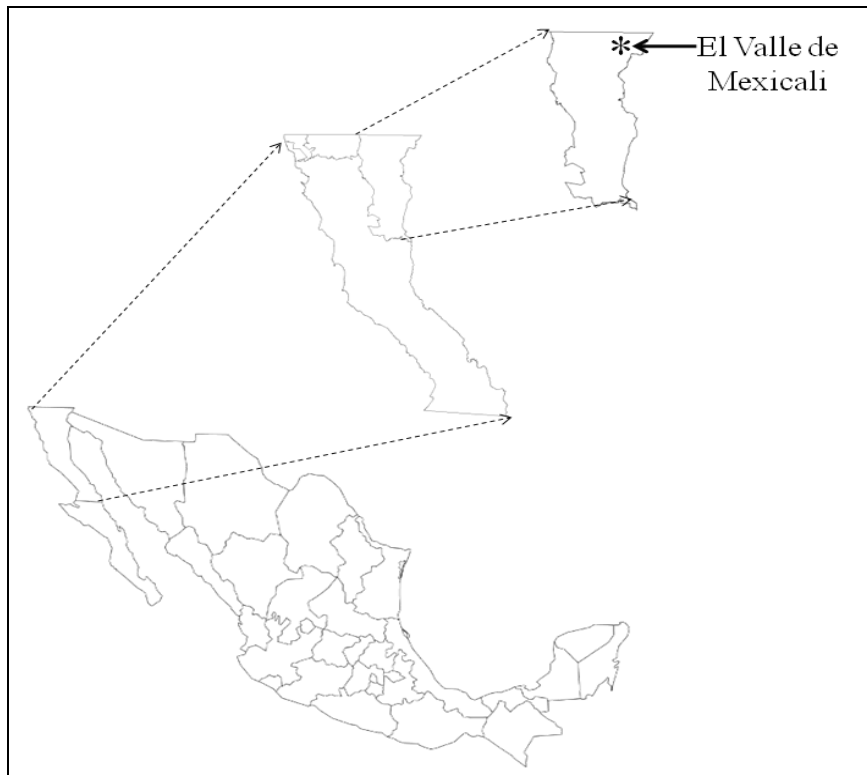
Una vez definidas las áreas de evaluación, se procedió a identificar las variables o puntos críticos de cada uno de los escenarios del Agrosistema de Producción de Bioenergía (APB) primarios y secundarios. Los puntos críticos son aquellos aspectos o procesos que incrementan o disminuyen la sustentabilidad del agrosistema respectivo. Esto se realizó en primer lugar al analizar y contrastar todos los escenarios propuestos de APB primarios y secundarios, privilegiando aquellos puntos críticos que fueran en común.

En segundo lugar, la información fue complementada con literatura; para la identificación de puntos críticos en el sub-sistema agrícola y el social fueron revisados casos de estudio de sustentabilidad en diversos agrosistemas; los puntos críticos del sub-sistema de transformación fueron complementados con bibliografía científica en la cual fueron citados los puntos de mejora así como ventajas de los diferentes métodos de obtención de bioenergía.

En tercer lugar, fue de interés conocer la percepción sobre los APB por parte de productores agrícolas, se tomó a los agricultores de la región del Valle de Mexicali. Este Valle está ubicado en el municipio de Mexicali al noreste de Baja California (ver figura 4.3).

La zona agrícola de Mexicali es la cuarta más importante del país, en cuanto a la superficie sembrada y a la generación de cultivos y esquilmos agrícolas (SIAP, 2010b; Valdez-Vázquez *et al.*, 2010). Y es debido a la cercanía y a la importancia de esta zona que se eligió para conocer la percepción sobre los APB.

Figura 4. 3. Ubicación del Valle de Mexicali



Fuente: Elaboración propia.

Se aplicaron entrevistas semi-estructuradas a los representantes de los seis sistema-producto⁵ agrícola de Mexicali (ajo, alfalfa, algodón, cebollín, sorgo y trigo), en febrero de 2010. La elección de la muestra se debió al involucramiento de estos actores en todos los aspectos relacionados con la agricultura en Mexicali, tales como la preparación del suelo, insumos, comercialización, organización, etcétera. Estos representantes tienen conocimiento sobre las debilidades y fortalezas del sistema-producto que representan y también están familiarizados con los demás cultivos que se siembran en esta región.

La entrevista se formuló con la ayuda de la caracterización teórica de los APB y revisión bibliográfica de diversos trabajos de evaluaciones de sustentabilidad, dicha entrevista estuvo dividida en dos secciones. La primera se enfocó en revelar la percepción de los agricultores con respecto a la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos, y la segunda a partir de esquilmos agrícolas. La entrevista estuvo dirigida a exponer el grado de conocimiento e interés de los productores sobre la producción de bioenergía, y principalmente que exteriorizaran las ventajas, desventajas y obstáculos que ellos percibían.

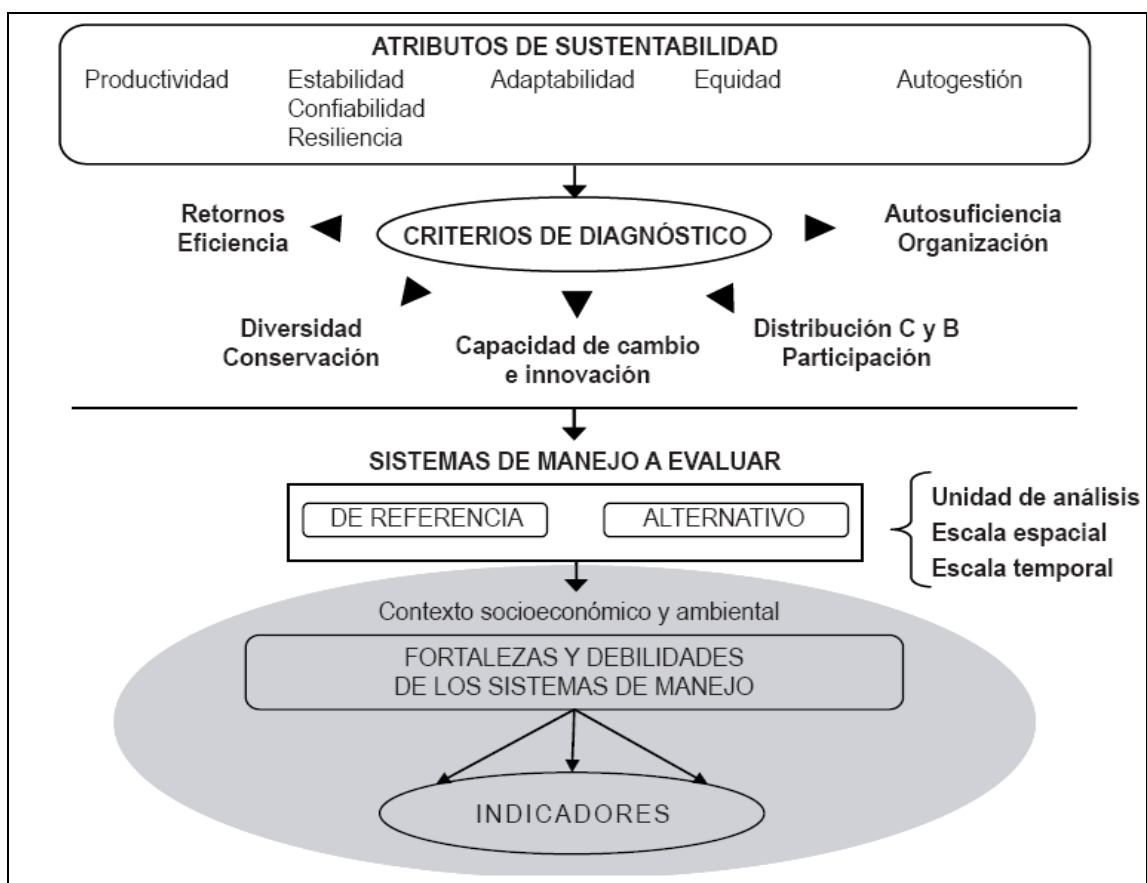
Particularmente de la sección de cultivos energéticos, se les cuestionó sobre la necesidad de organización, qué aspectos identificaban para cambiar su actividad a la producción de bioenergía, y sobre uso de suelo. En la segunda sección sobre la utilización de esquilmos, además de lo mencionado anteriormente, se quiso conocer el destino actual de sus residuos agrícolas. El instrumento para la recolección de la información puede encontrarse en el Anexo. Finalmente, se identificaron los puntos críticos a partir de la caracterización de los diferentes escenarios de APB y de las entrevistas, éstos fueron revisados y discutidos por personal académico de las áreas de producción de bioenergía, social y natural. Con esto, se obtuvo una lista extensiva de puntos críticos identificados para cada escenario de APB. Después, estos fueron relacionados con los atributos de sustentabilidad según el MESMIS; productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autosuficiencia (Mäsera *et al.*, 1999; López-Ridaura *et al.*, 2002).

⁵ La manera en que la SAGARPA organiza a los agricultores y ganaderos, se define como el conjunto de elementos y agentes concurrentes de los procesos productivos de productos agropecuarios, abastecimiento de equipo técnico, insumos y servicios de producción primaria, acopio, transformación, distribución y comercialización.

Posteriormente, los atributos fueron relacionados con un criterio de diagnóstico, los cuales sirvieron como vínculo entre los problemas o virtudes identificadas (puntos críticos) con variables cuantificables (indicadores). Los criterios de diagnóstico describen los atributos de sustentabilidad, son un nivel de análisis más detallado que los atributos, pero más generales que los indicadores, son el vínculo entre el atributo e indicador, pero más generales que los indicadores, son el vínculo entre el atributo e indicador, sirven para evaluar correctamente la sustentabilidad (Masera *et al.*, 1999).

A partir de los criterios de diagnóstico, fueron propuestos una serie de indicadores que tratarán de explicar el comportamiento o tendencia de los puntos críticos y atributos una vez que sean evaluados (ver figura 4.4). Es necesario hacer hincapié que el alcance de este trabajo sólo estará enfocado a la proposición de indicadores y su integración, y no en su evaluación.

Figura 4. 4. Estructura operativa del MESMIS: la relación entre atributos e indicadores



Fuente: Masera *et al.*, 1999.

4.3 Integración de indicadores

Los indicadores propuestos en este trabajo para evaluar sustentabilidad en los Agrosistema de Producción de Bioenergía (APB) tuvieron los siguientes orígenes: 1) de referencias bibliográficas especializadas donde los rangos de sustentabilidad ya habían sido asignados; 2) de bibliografía especializada donde los niveles de sustentabilidad fueron establecidos después de un análisis; y 3) diseñados a partir de la información generada de la caracterización teórica los APB y/o de la aplicación de las entrevistas a los representantes de los sistema-producto agrícola del Valle de Mexicali, donde los niveles de sustentabilidad se fijaron después de un análisis.

Una vez que se contó con la lista de indicadores que evaluarían las áreas económica, ambiental y social, se procedió a su integración siendo la normalización el primer paso. Al tener un conjunto de indicadores de diferentes áreas, éstos están expresados en diferentes unidades y su integración resulta imposible. Es decir, en el área ambiental se pueden tener indicadores que miden la calidad de los suelos, en el área social se pueden tener indicadores que miden el grado de discriminación racial o de género, mientras que en el área económica se pueden tener indicadores que midan la rentabilidad. Así el problema consiste en cómo integrar y comparar la información obtenida después de la evaluación de los indicadores. De esta forma, la normalización consistió en asignar a cada indicador nuevos valores bajo un criterio en común con el fin de que todos tuvieran en una escala homogénea y comparable.

El procedimiento de la normalización se basó en diferentes niveles de sustentabilidad, tal como se propone en Sarandón *et al.*, 2006 y López-Ridaura *et al.*, 2002. En este trabajo se propuso un gradiente de sustentabilidad de 5 niveles, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 y 1.0. En esta escala ordinal se definió que aquellas condiciones deseables, óptimas o altamente sustentables tendrían un valor de 1.0, mientras que aquellas condiciones desfavorables y que ponen en riesgo la sustentabilidad del APB tendrían un valor de 0.10.

Cuadro 4. 2. Gradiente de sustentabilidad propuesto para la normalización de los indicadores

VALORES DE SUSTENTABILIDAD				
Insustentable	No sustentable	Moderadamente sustentable	Sustentable	Altamente sustentable
0.10	0.25	0.50	0.75	1.0
Ningún beneficio	Escaso beneficio	Poco beneficio	Beneficios perceptibles	Beneficios esperados

Fuente: Elaboración propia.

Descripción de la escala ordinal:

Valor 0.10: Este es el nivel más bajo de sustentabilidad fijado durante la normalización de los indicadores. Se asignará el valor 0.10 al indicador cuando no haya ningún beneficio, existan condiciones totalmente favorables o no deseadas, y que signifique una situación de alto riesgo en la sustentabilidad del APB. Este nivel pone en alerta a los evaluadores e indica que se debe poner especial atención en ese atributo que se está evaluando con ese indicador.

Valor 0.25: Este nivel refleja escasos beneficios en el APB, aunque no es el nivel más bajo de sustentabilidad, indica que se debe poner gran atención en este atributo pues de seguir la misma tendencia podría caerse a una situación altamente no sustentable.

Valor 0.50: Este nivel indica que hay poco beneficio en el atributo que se está evaluando, expresa pocos beneficios en el APB, y exhorta a seguir trabajando en las mejoras en el atributo que se está evaluando con ese indicador.

Valor 0.75: Este nivel de sustentabilidad muestra que hay beneficios perceptibles en el APB, y expresa un sistema sustentable, aunque se encuentra en los niveles más altos de sustentabilidad, invita a seguir trabajando en las mejoras en el atributo que se está evaluando con ese indicador.

Valor 1.0: Este valor indica el nivel más alto de sustentabilidad durante la normalización, este rango expresa las condiciones deseables y óptimas para el APB, donde los beneficios mostrados son palpables y reconocidos como altamente sustentables.

Una vez normalizados los indicadores de las tres áreas de estudio se procedió a su integración. Se han propuestos diferentes métodos cualitativos y cuantitativos para ello, en esta investigación se eligió el diseño de índices de sustentabilidad (Taylor *et al.*, 1993).

4.31. Diseño del Índice de Sustentabilidad

Los indicadores son herramientas que permiten evaluar, medir, definir, clarificar, (cuantitativamente), o describir (cualitativamente) objetivos o impactos; y los indicadores de desarrollo sustentable facilitan la evaluación del desarrollo sustentable en una región, un país o cualquier otro sistema (Mondragón, 2002; Quiroga, 2001).

Los indicadores deben estar en un marco teórico o conceptual, que se asocie con el tema de investigación; ser específico, que exista una vinculación con el fenómeno que se pretende actuar, económico, cultural, físico, entre otros; estar disponibles para varios años, con el fin de que se pueda observar el fenómeno a través del tiempo y diferentes regiones; ser claro y de fácil comprensión; fácil de medir; técnicamente debe ser sólido, válido, confiable y comparable; entre otras características (Mondragón, 2002).

Los indicadores propuestos en esta investigación, que fueron derivados de la caracterización teórica por bibliografía y de las entrevistas, se dividieron por área de estudio, económica, ambiental y social, y se conformaron tres subíndices: subíndice económico (SIE), subíndice ambiental (SIA) y subíndice social (SIS).

Posteriormente, estos tres subíndices formaron parte del índice de sustentabilidad (IS), teniendo la misma representatividad. La conformación del IS en tres subíndices por área de estudio permitirá no sólo comparar el grado de sustentabilidad en APB, sino realizar un análisis más profundo sobre la posible vulnerabilidad de algunas de las áreas de interés.

La formulación de cada subíndice fue similar y tuvo las siguientes características principales; i) cada subíndice tiene el mismo rango de valores que dependerá de la evaluación de los indicadores, este rango será de cero punto cincuenta a cinco; ii) cada subíndice es independiente del número de indicadores normalizados que lo integran, de esta forma cada

subíndice puede tener diferente número de indicadores normalizados sin afectar su rango; iii) existe la oportunidad de que cada indicador normalizado pueda o no ser *ponderado* según su grado de importancia en la zona de evaluación, por ejemplo, un indicador que mida la disponibilidad de agua tendrá mayor relevancia en zonas áridas o semi-áridas que en zonas tropicales. Por tanto, cada indicador normalizado podrá ser ponderado a juicio de los evaluadores dependiendo la región y entorno en el que se encuentre el APB de interés. La ponderación propuesta fue del uno al cinco, como se describe a continuación.

Cuadro 4. 3. Ponderación aplicable a los indicadores normalizados

VALORES PONDERADOS DE LOS INDICADORES				
1	2	3	4	5
Muy poco importante	Poco importante	Moderadamente importante	Importante	Muy importante

Fuente: elaboración propia

Descripción de la escala ordinal:

Valor 1: Cuando a criterio del evaluador, el indicador normalizado tiene muy poca importancia en el APB y/o aporta escasa información.

Valor 2: Cuando a criterio del evaluador, el indicador normalizado es poco relevante en el APB, pero se requiere su evaluación.

Valor 3: Cuando a criterio del evaluador, el indicador normalizado es moderadamente importante para la evaluación, y se requiere su monitoreo.

Valor 4: Cuando a criterio del evaluador, el indicador normalizado es importante para la evaluación de sustentabilidad del sistema, es muy importante su consideración ya que mide aspectos críticos para la región y/o del contexto económico, social o ambiental prevaletientes.

Valor 5: Cuando a criterio del evaluador, el indicador normalizado es muy relevante en la evaluación de sustentabilidad y por tanto debe tener una mayor representatividad en el subíndice respectivo. Se trata de un indicador prioritario, y al asignarle esta ponderación tendrá una notoriedad dentro de la evaluación.

Es importante hacer hincapié, que la ponderación de los indicadores normalizados deberá hacerse a juicio de los evaluadores y con la participación de los involucrados en los APB. También será posible que todos los indicadores tengan la misma importancia, lo cual podrá hacerse al asignar el mismo valor ponderado. Esta flexibilidad permitirá que el IS pueda ser aplicado de forma indistinta en diferentes contextos y regiones, pero bajo los mismos criterios de sustentabilidad. Siempre con la premisa de que la ponderación asignada deberá ser igual en los APB que se estén comparando.

Una vez que se han ponderados los indicadores normalizados, éstos formaran parte de cada subíndice, económico (SIE), ambiental (SIA) y el social (SIS). Finalmente, los tres subíndices fueron promediados para obtener el IS; el integrar los subíndices de esta forma permite que cada área tenga la misma importancia, y no existan sesgos hacia alguna de las áreas en particular.

Capítulo V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción

A continuación se muestran los resultados obtenidos según la metodología aplicada en esta investigación. Al inicio se presenta la descripción de los escenarios del Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB) primario y secundario, ésta se obtuvo mediante la consulta bibliográfica de diversas investigaciones sobre el funcionamiento de los sistemas agrícolas y de los diferentes tipos de tecnologías disponibles de transformación de biomasa en bioenergía. La caracterización de los dos tipos de subsistemas agrícolas (primario y secundario) y de los diferentes escenarios de subsistemas de transformación fue representada mediante diagramas. El objetivo fue encontrar los puntos críticos en común de los diferentes APB, es decir aspectos que incrementan o disminuyen su sustentabilidad.

Posteriormente, se exponen los resultados y discusión de las entrevistas aplicadas a los representantes de los sistema-producto agrícola del Valle de Mexicali. En este apartado se detallan los aspectos obtenidos de esta actividad, divididos en dos secciones: 1) percepción hacia los cultivos energéticos y 2) percepción hacia los esquilmos agrícolas. Para facilitar la discusión de los resultados se apoyó en gráficas, el objetivo de las entrevistas fue complementar la identificación de puntos críticos.

Después, se muestran los indicadores divididos por área de investigación, económica, ambiental y social. Se brinda a detalle la información de cada uno de los indicadores (unidades, método de evaluación); y su origen, ya que algunos fueron diseñados específicamente para esta tesis a partir de la caracterización teórica y la entrevista, y otros fueron tomados de bibliografía especializada sobre sistemas agrícolas y producción de bioenergía. Por último, se presenta la ecuación que representa el Índice de Sustentabilidad (IS).

5.1. Agrosistemas de Producción de Bioenergía

Los agrosistemas básicamente son sistemas de un recurso natural y biológico manejado por un grupo social con el principal objetivo de producir alimento, otros bienes no alimenticios de valor (mercancías) y/o servicios ambientales, y bajo el contexto de este trabajo la producción de bioenergía.

Este trabajo se enfoca en APB representativos, que se encuentran en explotación industrial o en vías de ello. Se les ha clasificado de acuerdo al insumo utilizado para la producción de bioenergía el cual es previamente generado en el subsistema agrícola. El APB primario tiene como producto del subsistema agrícola algún tipo de cultivo energético, que posteriormente sirve como insumo para la producción de bioenergía en el subsistema de transformación. El APB secundario genera algún producto en el subsistema agrícola y sólo los desechos de esta actividad son utilizados como insumo para la producción de bioenergía en el subsistema de transformación.

5.1.1. Descripción de los escenarios

Como se mencionó, los APB están formados por tres subsistemas que interactúan entre sí y son interdependientes: el agrícola, de transformación y el social. El subsistema agrícola es aquel donde se produce la biomasa que una vez lista, es enviada al subsistema de transformación para su posterior conversión a bioenergía. Dentro del subsistema agrícola pueden utilizarse diferentes materiales (agroquímicos y semillas), tecnologías o técnicas de manejo (Smeets *et al.*, 2005), depende de los factores económicos, culturales o climáticos de cada región donde este situado el agrosistema.

El subsistema de transformación es donde se convierte la biomasa producida en el subsistema agrícola en bioenergía, ya sea en algún biocombustible (bioetanol, biodiesel o biogás) o electricidad. Se pueden utilizar métodos termoquímicos, químicos o bioquímicos dependiendo del insumo a utilizar y del bioenergético de interés (Hansson *et al.*, 2007). Por último, aunque no menos importante se encuentra el subsistema social, el cual está compuesto por las familias que laboran, dependen o habitan dentro del agrosistema.

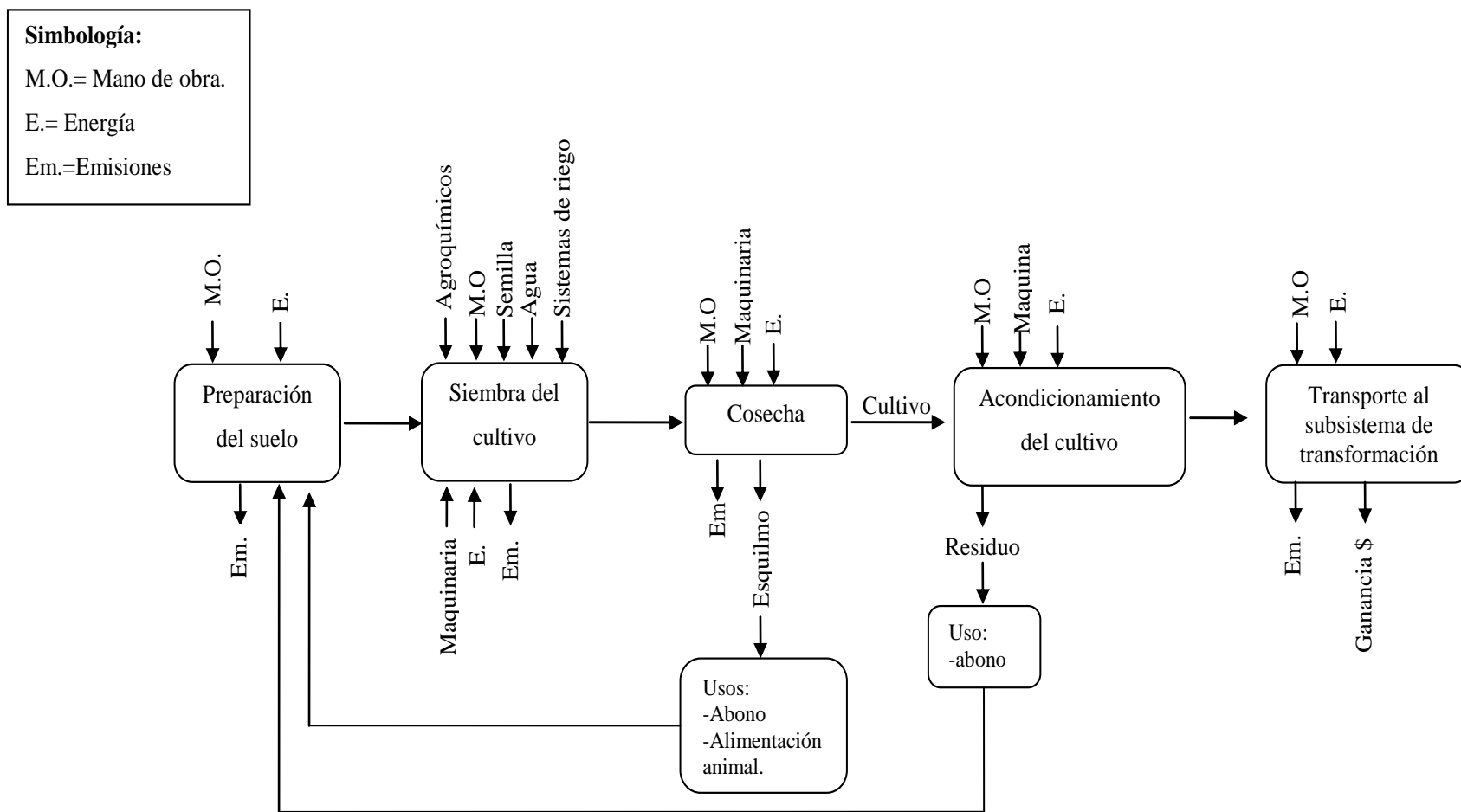
Además de estos tres subsistemas base pueden existir o no, otros subsistemas como el pecuario, donde se lleva a cabo la crianza, manejo, producción y reproducción de distintos tipos de ganado: bovino, porcino, ovino y caprino⁶ para la obtención principalmente de carne, leche o pieles (Villa *et al.*, 2008). El subsistema pecuario puede tener diferentes variantes en cada APB, pero existen factores muy relevantes para su funcionamiento tales como: la unidad animal, tamaño del hato, cantidad de ordeñas, leche producida, medicinas requeridas, tratamiento de heces, agua, calidad nutricional de los recursos alimenticios, tamaño de agostadero, capacidad de carga animal, condición de las tierras de pastoreo, vientre en edad reproductiva, sobrepastoreo, tipo de tecnología aplicada, tierras de pastoreo, tamaño del establo y ubicación del establo (Villa *et al.*, 2008; SAGARPA, 2007b; Espinosa *et al.*, 2004).

5.1.11. Particularidades del Agrosistema de Producción de Bioenergía primario

El APB primario funciona sembrando algún cultivo que tienen como fin primordial su transformación en bioenergía (cultivos energéticos). En el subsistema agrícola (ver figura 5.1) se pueden obtener una gran diversidad de cultivos, según el estudio realizado por la Sener, (2006), en materia bioenergética, en México es fácil la producción de caña de azúcar, sorgo, sorgo dulce, yuca o remolacha azucarera, jatropha, soya, girasol, semilla de colza y cártamo. Algunos de ellos son cultivos nuevos en el país, como el cultivo de jatropha, mientras que otros son muy tradicionales como la caña de azúcar.

⁶ Productos de mayor importancia en México según el “resumen nacional producción, precio, valor, animales sacrificados y peso 2008”, SIAP, 2009.

Figura 5. 1. Subsistema agrícola en el APB primario.



Fuente: Elaboración propia.

El subsistema agrícola inicia con la selección y preparación del suelo, ya que ésta es la base para el buen crecimiento y desarrollo del cultivo. El suelo se mulle para un adecuado establecimiento del cultivo, y se requiere mano de obra así como la utilización de maquinaria. Los objetivos generales de esta actividad son: preparar la cama de siembra, para que la semilla o plántula pueda germinar en el suelo y posteriormente propicie un buen enraizamiento y desarrollo; conseguir un suelo permeable y controlar el intercambio de agua del suelo, evitar una rápida pérdida de agua existente en el suelo, y permitir la fácil penetración de la lluvia y su almacenamiento; facilitar la actividad química y biológica, favoreciendo la degradación y liberación de nutrientes, así como la descomposición eficiente de materia orgánica (M.O.) (Bello y Pino, 2000). Cabe mencionar, que existen distintas técnicas para la preparación de suelo, cada una se adecua a las necesidades el cultivo, a las características de la región, así como las cuestiones culturales y económicas del agricultor.

Después de la preparación de suelo continúa la siembra del cultivo, en esta parte, se considera primeramente la compra de la semilla y la tecnología a aplicar para esta actividad. Posteriormente, el agricultor necesita cuidar el óptimo crecimiento de la planta y obtener un cultivo de buena calidad, para ello requiere el uso de agroquímicos (pesticidas y fertilizantes), agua, mano de obra y maquinaria, también puede agregarse la adopción de sistemas de riego para optimizar el uso de agua, así como la contratación de asistencia técnica (Smeets *et al.*, 2005).

La energía utilizada en el subsistema agrícola puede ser de origen biomásico, es decir, bioenergía producida en este o en otro APB, o de tipo fósil (Hansson *et al.*, 2007). Los agroquímicos utilizados pueden sustituirse por fertilizantes orgánicos y/o control de plagas biológicos (biocontrol) (Brunett *et al.*, 2005). Dentro de las salidas de esta parte del subsistema agrícola, se pueden obtener emisiones ocasionadas por la maquinaria movida por energía fósil y/o biocombustibles, así como recipientes vacíos de los agroquímicos utilizados.

Una vez listo el cultivo, es cosechado con la ayuda de maquinaria y mano de obra. Cuando no toda la planta cosechada es utilizada para la obtención del bioenergético, los subproductos generados tales como las hojas, paja, material de poda, y otros subproductos podrán ser

reutilizados como abono del suelo agrícola, alimento animal, u otros, sin que esta actividad sea económicamente relevante.

Después de haber sido cosechado, el producto agrícola puede ser vendido directamente al subsistema de transformación (biorefinería), o bien puede ser acondicionado y transportado al subsistema de transformación (Hansson *et al.*, 2007). Dentro de las tecnologías aplicables para el acondicionamiento están el secado y triturado o molienda, en esta parte se utiliza energía eléctrica o algún combustible, generando emisiones y residuos del proceso que después pueden o no ser reutilizados como abono. Realizar el acondicionamiento en el sitio de cosecha tendría como ventajas disminuir los costos de transporte, sin embargo tiene la limitante de requerir de equipo especializado que puede o no estar actualmente disponible en los predios agrícolas. Ya sea que se realice en el predio agrícola, o en el sitio de transformación, el acondicionamiento del insumo es una actividad imprescindible.

Ya en el subsistema de transformación, también conocido como biorefinería, el insumo agrícola acondicionado es convertido en bioenergía. En este trabajo, el subsistema de transformación fue dividido según la tecnología aplicada considerando las más representativas y utilizada para los APB primarios, éstas fueron: termoquímica, química o bioquímica. Dentro de la tecnología termoquímica está la combustión directa y gasificación; en la química se considera la transesterificación de aceites; y por último, dentro de la tecnología bioquímica sólo se considera la fermentación. La planta de conversión puede o no estar cerca del subsistema agrícola, la distancia puede variar según cada APB, así como los costos de mano de obra, administrativos y mantenimiento para la conservación de la planta (Horta, 2006).

La tecnología bioquímica aplicable para el APB primario, es la fermentación (ver figura 5.2.), es un proceso anaerobio que se lleva a cabo por la actividad de algunos microorganismos que procesan los carbohidratos presentes en el insumo agrícola (glucosa, fructosa, sacarosa y almidón), obteniéndose como productos finales el bioetanol, dióxido de carbono (CO₂) en forma de gas y energía para el crecimiento celular en forma de ATP⁷.

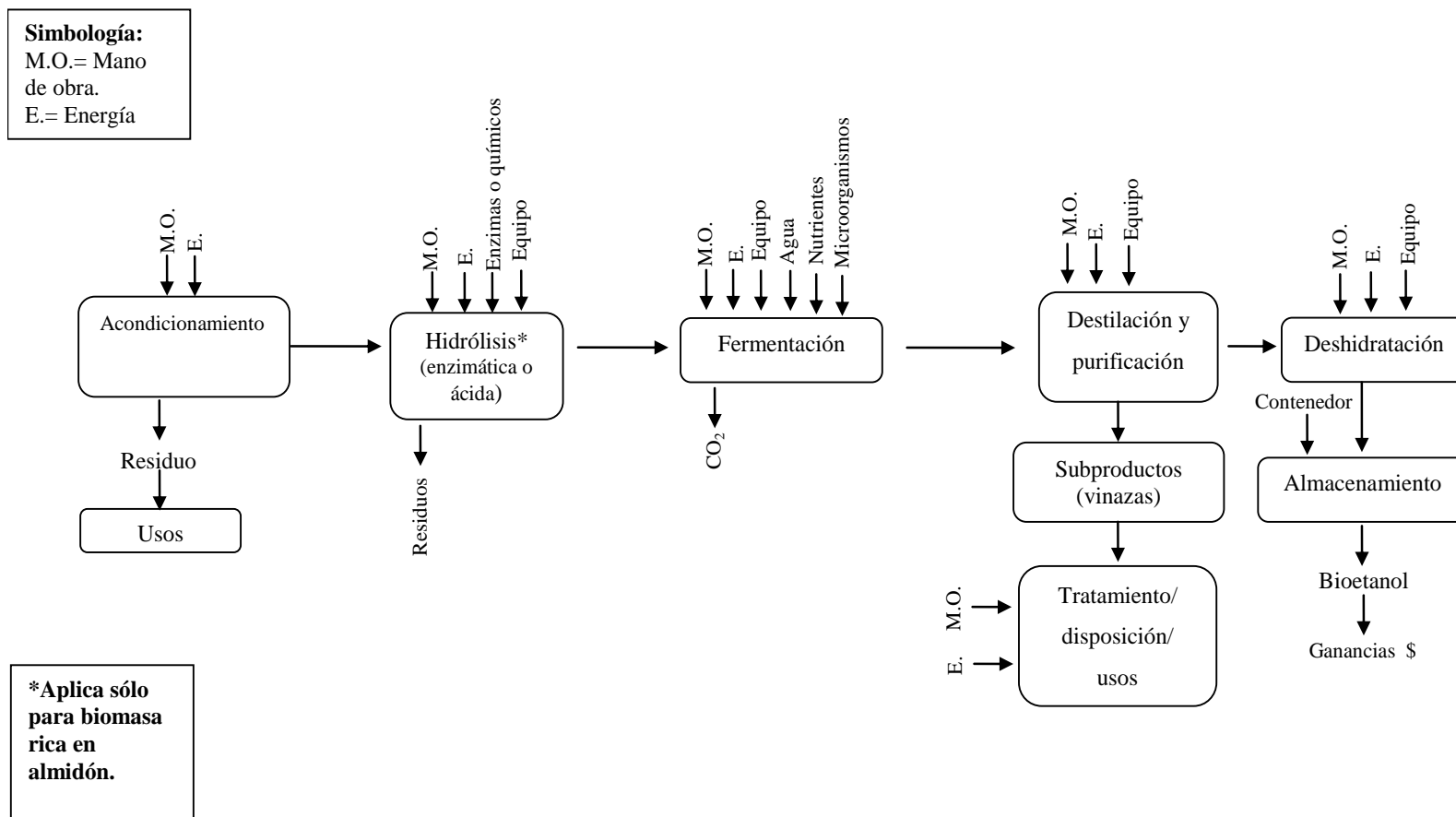
⁷ Adenosín trifosfato (ATP), es una molécula utilizada por los organismos vivos para proporcionar energía en las reacciones químicas.

Los cultivos agrícolas utilizados para esta conversión pueden dividirse en carbohidratos directamente fermentables e indirectamente fermentables. Los directamente fermentables son insumos agrícolas ricos en carbohidratos simples o disacáridos como la sacarosa, que no requieren de una hidrólisis para que los microorganismos productores de etanol puedan consumirlos, destacando la caña de azúcar, remolacha y sorgo dulce. Los indirectamente fermentables, son cultivos constituidos por polímeros de azúcares lo que confiere mayor complejidad a la molécula, por lo que requieren de una hidrólisis o rompimiento de los polímeros para permitir su consumo por los microorganismos productores de alcohol. En esta clase de insumos agrícolas se encuentran todos aquellos con altos porcentajes de almidón, como los cereales (maíz, trigo, sorgo), y tubérculos como la papa y la yuca.

La fermentación inicia con el acondicionamiento del cultivo, mediante una trituración o molienda, la finalidad de esto es facilitar los posteriores procesos. Después, en dado caso de ser una especie agrícola rica en biomasa amilácea, prosigue la hidrólisis enzimática o ácida, para una mayor biodisponibilidad para los microorganismos que llevaran a cabo la fermentación. Luego, la biomasa es trasladada para llevar a cabo la fermentación, existen tres diferentes procesos para llevar a cabo la fermentación: semi-continuo, continuo y batch, la elección de cada tipo de proceso depende de las necesidades e intereses de los productores (Sánchez y Cardona, 2007).

Para la realización de la fermentación se requieren microorganismos, que pueden ser levaduras o bacterias, también se requieren enzimas, agua y nutrientes, con el curso de la fermentación se genera CO_2 . Le sigue la destilación y la purificación para recuperar el bioetanol, las vinazas son el residuo generado de este paso. Las vinazas en un líquido residual con alta carga de materia orgánica, por lo que debe ser tratada antes de ser vertida al desagüe, o bien puede ser reutilizada. Por último, el bioetanol deshidratado, es almacenado y distribuido para su venta. En todas las etapas antes mencionadas se requiere de mano de obra y energía (Hansson *et al.*, 2007; Saxena *et al.*, 2007).

Figura 5.2. Subsistema de transformación en el APB primario. Tecnología Bioquímica, Fermentación.

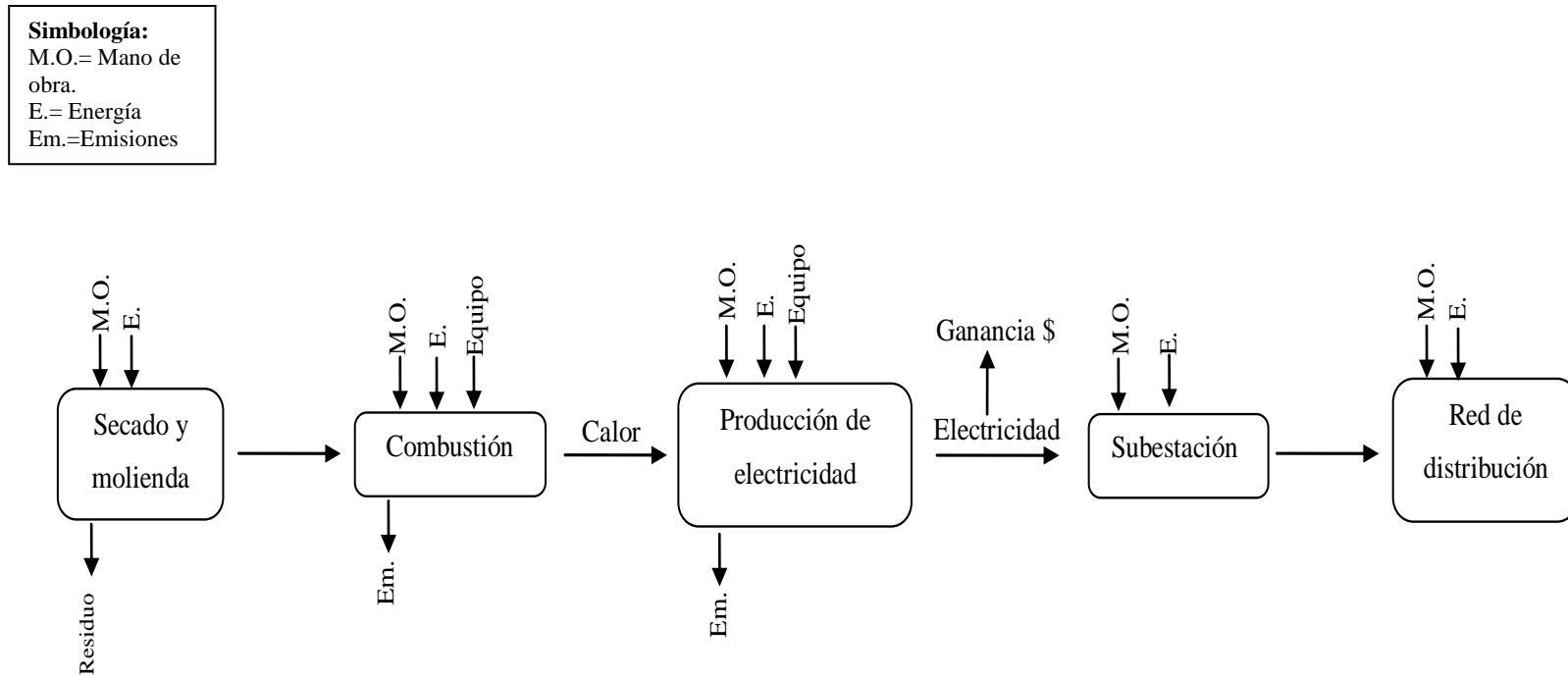


En la tecnología termoquímica utilizada en el APB primario, corresponde a la combustión directa (ver figura 5.3) y gasificación, siendo los pastos el insumo más manejado (Hansson, *et al.*, 2007). En estas dos tecnologías se pueden obtener calor y una mezcla de gases, que posteriormente serán procesados para obtener electricidad, siendo el principal producto bioenergético de estas tecnologías.

La combustión directa es un proceso termoquímico muy sencillo y practicado desde la antigüedad, el cual consta en quemar la biomasa en un horno o una caldera, que produce vapor a presión, el cual es dirigido a una turbina para la generación de electricidad (Demirbas *et al.*, 2009).

La biomasa antes de ser introducida al horno o caldera es secada y molida para una mejor combustión, en esta parte del proceso se generan residuos que pueden ser utilizados como abono en el subsistema agrícola. Después del secado y la molienda, la biomasa se transporta a la caldera para ser quemada, de esto se obtendrán emisiones que deberán ser controladas; por último se obtiene el calor, el cual con la ayuda de las turbinas y generadores se produce la electricidad (*Ibid*), en todos los procesos requeridos se necesita energía y mano de obra.

Figura 5. 3. Subsistema de transformación en el APB. Tecnología Termoquímica, Combustión directa.



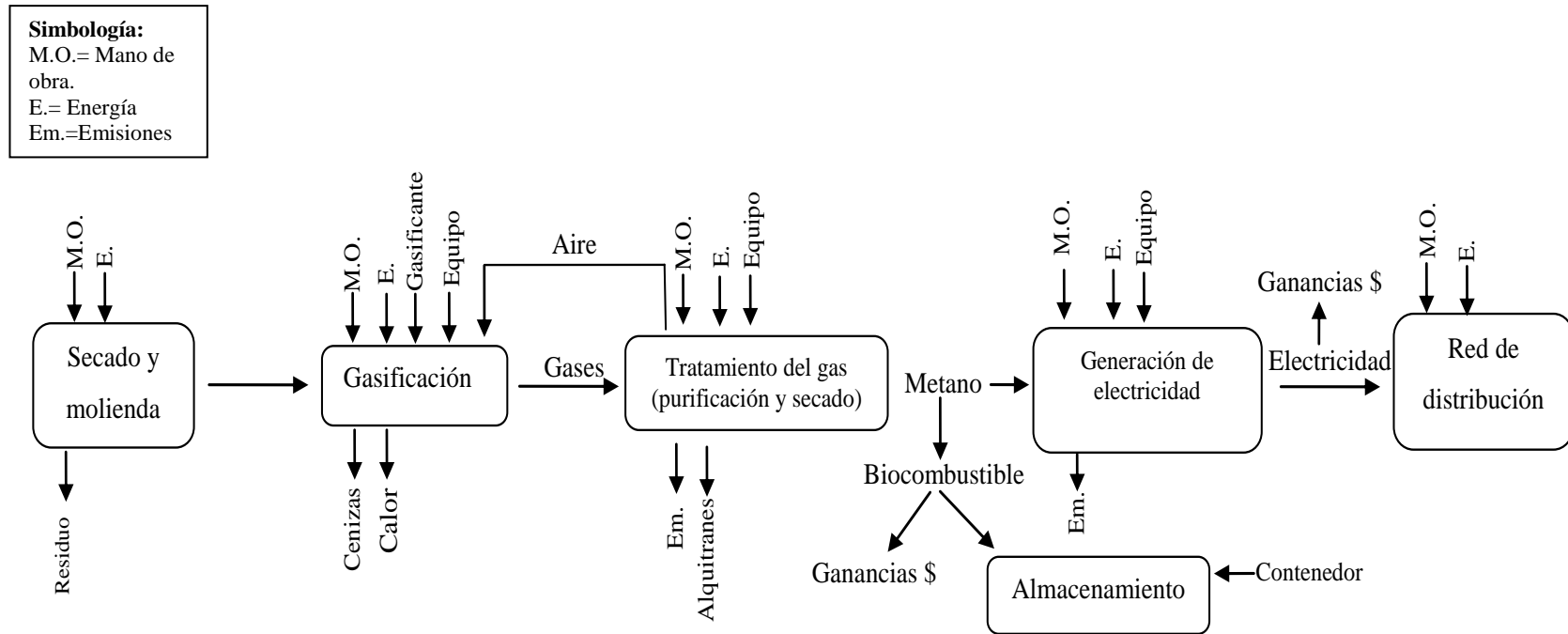
Fuente: Elaboración propia.

La gasificación de biomasa es una combustión incompleta a altas temperaturas (1000°C), que genera la producción de gases combustibles como hidrógeno (H₂), monóxido de carbono (CO) y trazas de metano (CH₄), sustancias no útiles como alquitrán y cenizas. Existen principalmente tres sistemas o tipos de gasificación: aire ascendente o contracorriente (updraft), decorriente descendente (downdraft) y lecho fluidizado (crossdraft). Estas clasificaciones son dadas según la forma en que el oxígeno o el aire son introducidos al reactor gasificador (Rajvanshi, 1986).

El producto principal de esta tecnología son los gases combustibles tales como el H₂, CO y CH₄ (metano), el metano que se obtiene puede utilizarse como biocombustible en motores de combustión interna (comprensión e ignición de chispas) o como sustituto del aceite que se usa en horno de calor; y también se puede utilizar para obtener energía eléctrica en centrales de gasificación con ciclo combinado (*Ibid*).

El proceso de gasificación (ver figura 5.4) inicia con el secado de la biomasa por calentamiento, la cual es después trasladada al reactor gasificador donde se lleva a cabo la gasificación. Se requiere de una sustancia gasificante y de aire, obteniendo cenizas como residuo, calor y los gases de interés. Los gases son posteriormente tratados, obteniendo aire que puede ser reutilizado en la gasificación. En esta misma parte también se retira el alquitrán de los gases combustibles, que posteriormente serán quemados para producir la energía (Sequeira *et al.*, 2007). En todos los pasos realizados para la obtención del producto principal se requiere de energía y mano de obra.

Figura 5. 4. Subsistema de transformación en el APB. Tecnología Termoquímica, Gasificación.

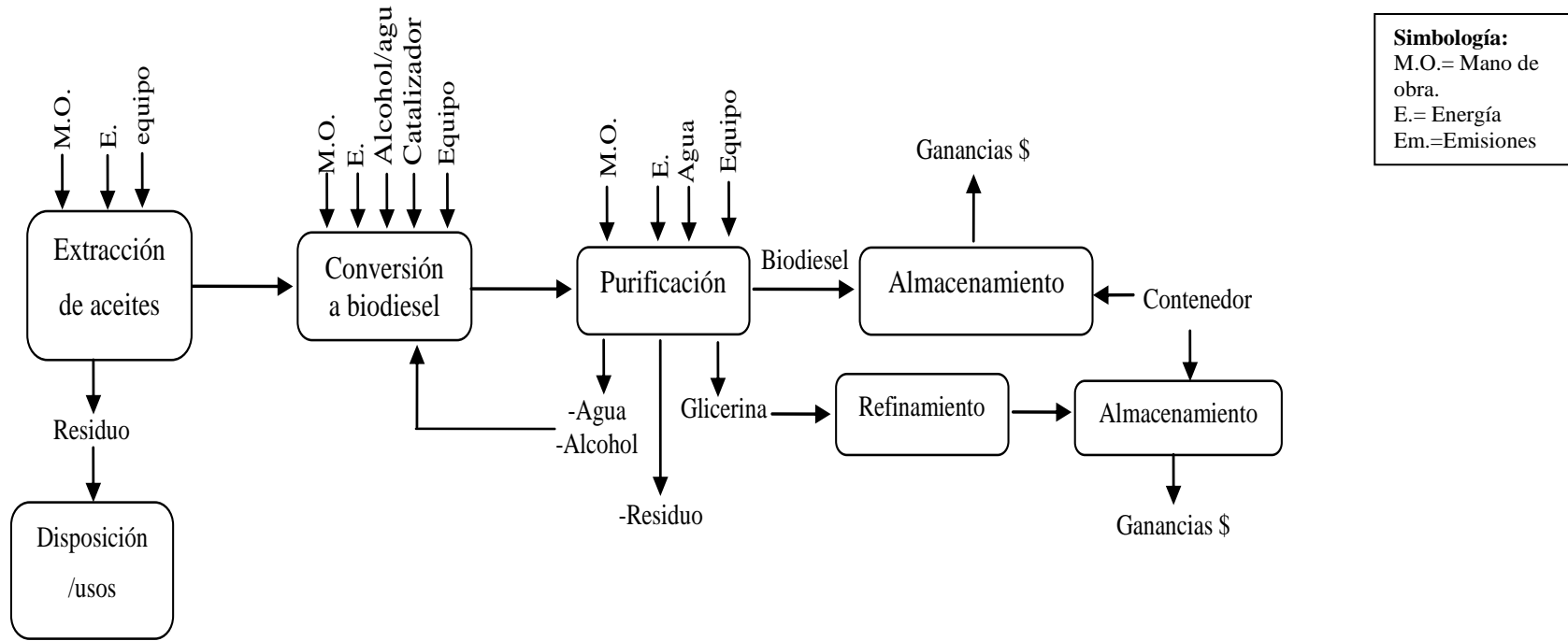


Fuente: Elaboración propia.

La tecnología química aplicada para el APB primario es la transesterificación de aceites vegetales (ver figura 5.5), los insumos son los cultivos oleaginosos. Es una tecnología relativamente sencilla y la más utilizada para la obtención de biodiesel. Dentro de los cultivos destinados para esta producción están la jatropha, soya, girasol, semilla de colza y cártamo. Cabe señalar que este proceso tiene sus variantes, por ello en este trabajo se presenta de una manera general, dividiéndose básicamente en cuatro pasos: extracción, conversión a biodiesel, purificación y almacenado (Marchetti *et al.*, 2007).

La extracción de aceite del cultivo es el primer paso de este procedimiento, obteniendo residuos que posteriormente pueden ser utilizados como abono en el subsistema agrícola. Después se lleva a cabo la reacción de transesterificación para convertir los aceites en biodiesel, utilizando alcohol (metanol o etanol), catalizadores biológicos (enzimas) o químicos (ácido o base) y agua. Le sigue la purificación, donde se obtiene por un lado el biodiesel, y por otro, los residuos como glicerina, alcohol, agua y sales. Por último, se almacena el biodiesel en contenedores especiales para este biocombustible, donde se le brindan las medidas de seguridad necesarias para evitar algún derrame, dañar la calidad del producto u otro accidente (Hansson *et al.*, 2007). Para todo el proceso se requiere de energía y mano de obra.

Figura 5. 5. Subsistema de transformación en el APB primario. Tecnología Química, Transesterificación.



Fuente: Elaboración propia.

Además del subsistema agrícola y de transformación, para la obtención del bioenergético se requiere del subsistema social, debido a que éste aporta la mano de obra requerida en ambos subsistemas. Dentro de este subsistema existen factores muy importantes a considerar para sus los cuales pueden variar en cada APB, como son los ingresos, ya sean directos o indirectos, beneficios sociales adquiridos, seguridad y estabilidad económica, su grado de implicación en el APB, entre otros.

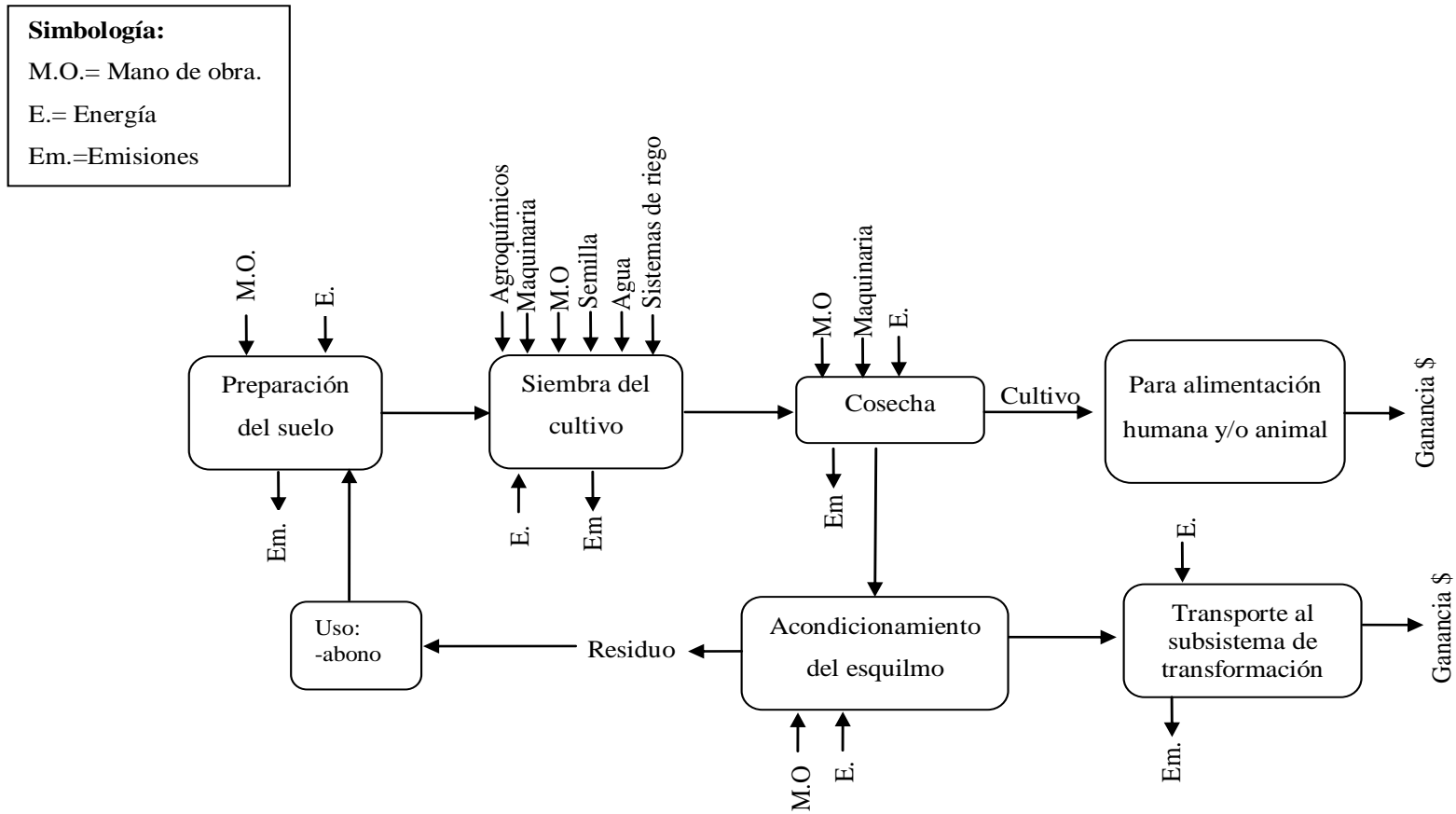
Factores importantes para el subsistema social son aquellos relacionados con la calidad de vida de los integrantes del APB. Por ejemplo, la forma en que su participación en el Agrosistema mejora la calidad de la vivienda y alimentación, les garantiza el acceso a servicios de salud y educación, se proveen condiciones laborales adecuadas y se tiene un grado de especialización adecuado a las actividades realizadas dentro del sistema. La existencia de asociaciones, o cualquier otro medio por el cual los productores se organicen, tanto para tomar decisiones sobre el sistema, como para resolver los problemas que se presenten. Otros factores económicos importantes de considerar para un buen funcionamiento del APB son aquellos relacionados con el nivel de autofinanciamiento de los productores, acceso a créditos, entre otros (Chiappe *et al.*, 2009; Ballesteros *et al.*, 2008; Brunett *et al.*, 2005; Smeets *et al.*, 2005).

5.1.12. Particularidades del Agrosistema de Producción de Bioenergía Secundario

El APB secundario (ver figura 5.6) tiene un funcionamiento muy similar al primario, la variante más representativa es el insumo que se utiliza para la producción de bioenergía; en el primario se utiliza cultivos energéticos, mientras que en el secundario se utiliza el esquilmo agrícola, por tanto, algunas tecnologías de conversión sufren modificaciones.

El insumo para generar bioenergía es acondicionado y debe haber la contratación de asistencia técnica. La variante existente es que en este APB, el cultivo agrícola se destina para la alimentación humana y/o animal, y el esquilmo se traslada al subsistema de transformación para ser convertido en bioenergía. De estos dos productos, el agricultor recibe una ganancia monetaria.

Figura 5. 6. Subsistema agrícola en el APB secundario.



Fuente: Elaboración propia.

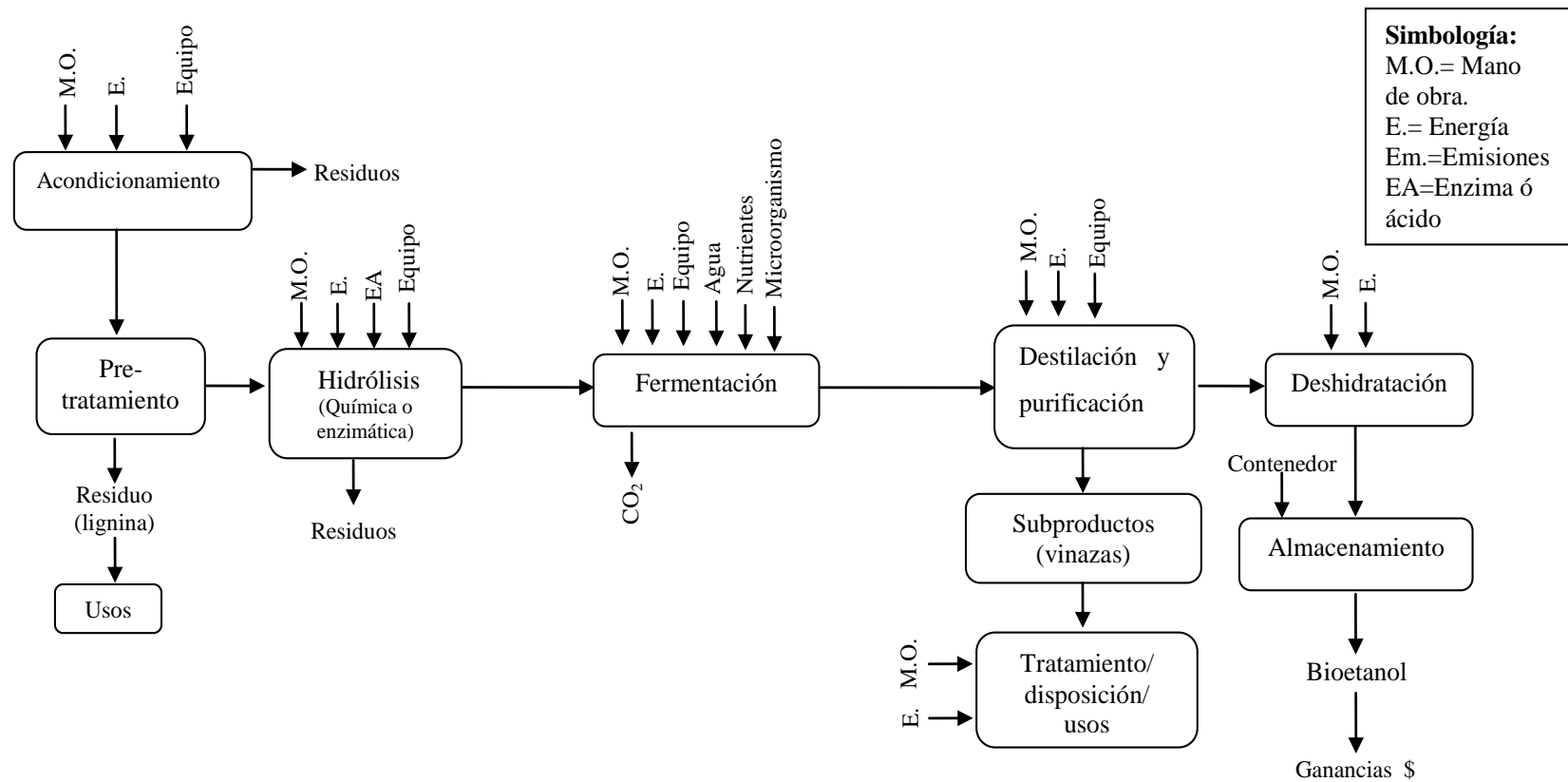
En el subsistema de transformación el esquileo es convertido en bioenergía, ya sea en forma de bioetanol, biogás o electricidad. Las tecnologías más utilizadas para el APB secundario son la bioquímica y la termoquímica, dentro de la bioquímica está la fermentación y digestión anaerobia, y pertenecientes a la termoquímica está la combustión directa y gasificación.

La fermentación realizada para este agrosistema para la obtención de bioetanol, lleva casi el mismo procedimiento de la fermentación en el APB primario, la principal diferencia es un paso más entre la trituración o molienda y la hidrólisis, ya que la materia fermentable en la mayoría de los cultivos energéticos es la sacarosa o el almidón, y en los esquileos agrícolas los azúcares que se fermentan son aquellos contenidos en la celulosa (y en ocasiones en la hemicelulosa) que forma parte de la materia de lignocelulosa.

Para que la celulosa pueda ser fermentada por los microorganismos productores de etanol, ésta tiene que ser primeramente separada de la hemicelulosa y lignina mediante procesos químicos, termoquímicos o enzimáticos. El principal residuo generado en esta etapa es un sólido que corresponde a la lignina. Después procede una hidrólisis enzimática o química para convertir la celulosa (y/o hemicelulosa) en sus azúcares simples fermentables, es decir, glucosa. Inmediatamente después se lleva a cabo la fermentación para la obtención de bioetanol.

Luego se realiza la destilación y evaporación para la separación del bioetanol por un lado, y por otro los residuos como vinazas, compuestos químicos residuales y agua (Sánchez y Cardona, 2007). Estos residuos pueden ser tratados y utilizados como abono en el subsistema agrícola, o bien debe ser dispuestos de forma adecuada por su alto contenido de materia orgánica. Esta tecnología está aún sujeta a cambios para mejorar el proceso, en trabajos presentados por Balat *et al.*, (2007), se considera realizar en un solo paso la separación de la hemicelulosa y lignina, y la hidrólisis de la celulosa, para optimizar tiempo y dinero.

Figura 5. 7. Subsistema de transformación en el APB secundario. Tecnología Bioquímica, Fermentación



Fuente: Elaboración propia.

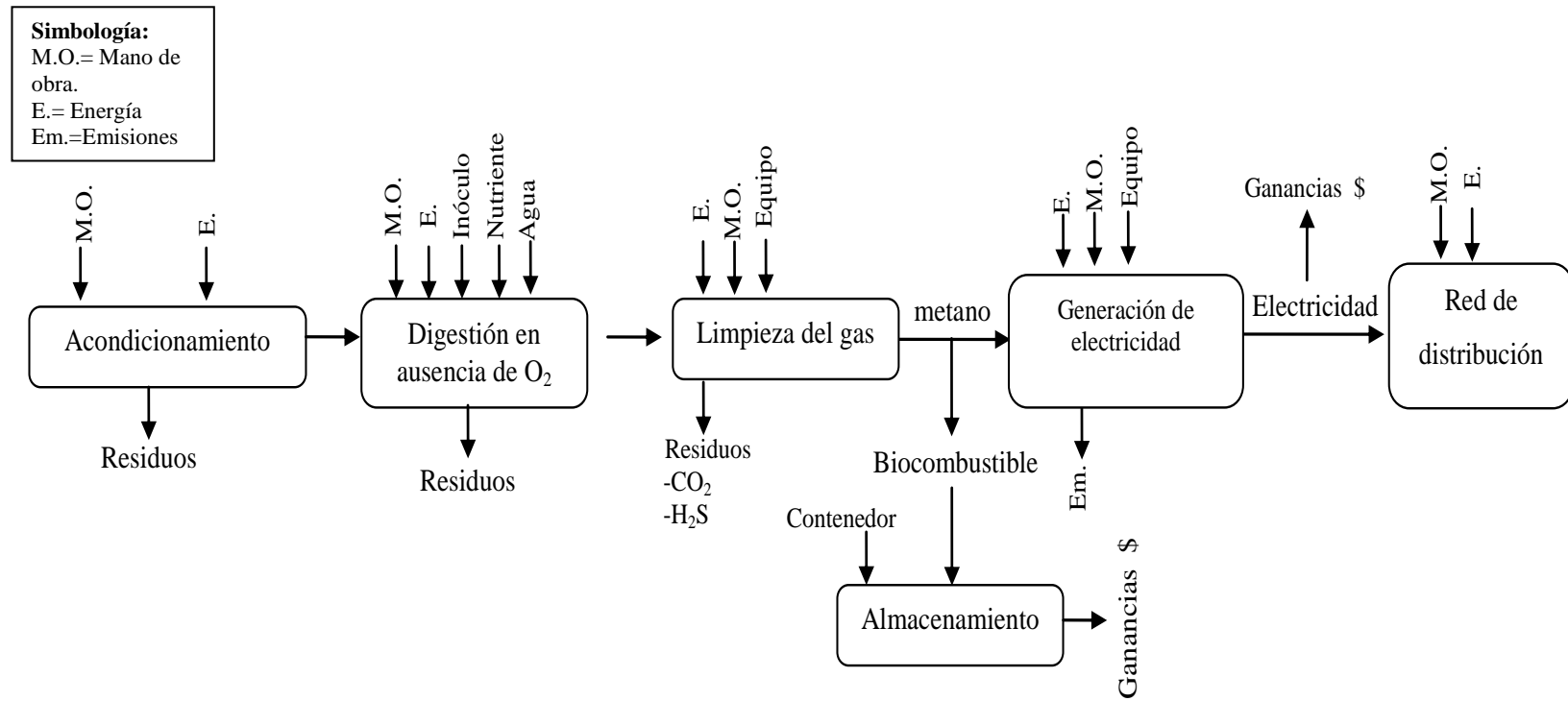
La digestión anaerobia es un proceso de mineralización de la materia orgánica, que su producto principal es una mezcla de gases conocido como biogás, compuesto por dos tercios de metano CH_4 y un tercio de dióxido de carbono (CO_2), y trazas de H_2S .

El primer paso de la digestión anaerobia es el acondicionamiento de la biomasa, utilizándose energía y mano de obra. Posteriormente, se realiza la digestión en un reactor, esta tecnología está constituida básicamente por dos fases; en la primera etapa, la hidrólisis (licuefacción) de la materia orgánica y su conversión biológica en ácidos orgánicos e hidrógeno con rapidez, en la segunda etapa, las bacterias productoras de metano de lento crecimiento y sensibles al entorno utilizan el ácido acético y CO_2 y el hidrógeno y CO_2 para producir el biogás y trazas de H_2S . Los valores extremos de pH (debajo de 7.0 o arriba de 8.0), cambios bruscos de temperaturas o la entrada de oxígeno alteran el proceso (*Ibid*). Para llevar a cabo la digestión se requieren microorganismos anaerobios aclimatados, y nutrientes para asegurar su crecimiento, agua, sustancias alcalinas para mantener el pH cercano a la neutralidad, energía y mano de obra. Los residuos están constituidos por efluentes y lodos que pueden ser utilizados como abono en el subsistema agrícola.

Una vez producida la mezcla de gases, estos pueden ser procesados para la separación del metano y dióxido de carbono de las trazas de ácido sulfhídrico (H_2S) (Hansson *et al.*, 2007). En este proceso se requiere de energía y mano de obra, con la generación de los residuos en forma de emisiones. Después de obtener el biogás limpio, se almacena dentro del subsistema de transformación o es transportado a otro subsistema del APB, factores como el tipo de contenedor y la capacidad para ellos son importantes a considerar. El biogás también puede utilizarse en una caldera para la generación de calor o electricidad.

El funcionamiento de la tecnología termoquímica utilizada en el APB secundario, no varía en mucho respecto aquella descrita en el primario. El calor es el producto en la combustión directa y la mezcla de gases en la gasificación, los cuales posteriormente con la ayuda de turbinas y en centrales de gasificación con ciclo combinado, son convertidos en electricidad (Demirbas *et al.*, 2009; Rajvanshi, 1986).

Figura 5. 8. Subsistema de transformación en el APB secundario. Tecnología Bioquímica, digestión anaerobia.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Análisis y puntos críticos identificados en la caracterización teórica

El objetivo de la caracterización teórica de los APB primario y secundario, fue la identificación de puntos críticos, que serían la base para proponer una serie de indicadores.

Los aspectos que resultaron comunes en la mayoría de los subsistemas analizados fue la importancia de la eficiencia energética, ya que se requiere de energía en todo el ciclo de producción desde la obtención del cultivo hasta su transformación, tales como los hidrocarburos, los agroquímicos (se agregan porque la mayoría provienen de fuentes fósiles) y consumo de energía interna.

El consumo de energía está muy relacionado con la emisión de GEI, por lo que es necesario colocar la ineficiencia energética o el abuso de combustibles fósiles como punto crítico para esta investigación. En los trabajos de Castro y Amador, (2006) y Fallas *et al.*, (2009) plantean que en los sistemas agrícolas, el uso de la energía se encuentra muy ligado al cambio climático, ocasionado por el uso irracional de energía fósil.

En la UBA, (2008) se considera que en la generación de bioenergía en sistemas agrícolas, debe existir un uso eficiente de energía y optar por las energías renovables. Especialmente porque uno de los principios de sustentabilidad para la producción de bioenergía, es la disminución por la dependencia hacia los combustibles fósiles paulatinamente y de esta manera decrecer la emisión de los GEI en estos procesos.

Se observó que el uso de agroquímicos también fue común en la caracterización teórica realizada, el punto crítico encontrado fue la dependencia que pudiera generarse hacia estas sustancias o el uso de algún agroquímico que se encuentre prohibido o severamente restringido por alguna dependencia nacional o internacional.

Una de las consideraciones que se hacen en la producción de bioenergía, es que el uso de agroquímicos no ponga en riesgo la salud y el medio ambiente. Por ello en las investigaciones de UN-ENERGY, (2007) y WWF, (2008), postulan que podrían emplearse fertilizantes orgánicos, biocontrol u otras actividades que pudieran sustituir a los agroquímicos, no se refieren a la

sustitución total, pero sí la disminución y el uso controlado de estas sustancias, así como utilizar cultivos que no requieran altas cantidades de pesticidas o fertilizantes.

Asimismo en los flujos de entrada, se encontró como punto en común el uso de agua tanto para las actividades del subsistema agrícola como en el subsistema de transformación. El manejo del agua es uno de los aspectos más discutidos a nivel internacional para la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos, porque los problemas de escasez de agua se han agravado en los últimos años. En EPFL, (2008) se afirma que en la generación de esta energía, se debe reducir al mínimo la contaminación del agua y optimizar su uso, además de no violar los derechos existentes relacionados con este recurso.

Debido a los problemas de escasez de agua, en EPFL, (2008) se asegura que para la producción de bioenergía es necesario cuidar la calidad del agua de productos químicos y un manejo adecuado del agua residual; no se debe poner en riesgo las necesidades básicas diarias de este recurso hídrico en las comunidades locales involucradas en dicho proyecto; y que no se deben establecer este tipo de proyectos en zonas que padezcan estrés hídrico y menos si el cultivo a utilizar requiere de uso intensivo del agua, aunque en UN-ENERGY, (2007) se afirma que se debe poner especial atención en los cultivos que requieran grandes cantidades agua, y optar por aquellos que sus requerimientos sean menores.

Al analizar los flujos de salida de los diversos escenarios propuestos de APB primario y secundario, se pudo observa como punto en común las generación de residuos, ya que estos generados por las actividades realizadas en el sistema, por ejemplo, agroquímicos, químicos gastados y gases contaminantes. Por tanto, de existir un manejo inadecuado de estos residuos sólidos (dentro de los cuales algunos pueden ser residuos peligrosos) se podrían ocasionar graves problemas ambientales.

Aguirre, (2007) en su investigación sobre sustentabilidad en predios hortícolas, asegura que el uso y manejo inadecuado de residuos, provoca daños en el ambiente (desequilibrios potenciales provocados en los agroecosistemas) y en la salud en personas expuestas, por lo que es primordial asegurar un buen manejo y destino de dichos residuos. No obstante, más

lejos de un buen manejo o disposición, es primordial adoptar una posición de reducción y reciclaje de estos residuos.

5.2. Entrevistas a representantes de agricultores en el Valle de Mexicali

La aplicación de las entrevistas a los representantes de los seis sistema-producto agrícola (ajo, alfalfa, algodón, cebollín, sorgo y trigo) del Valle de Mexicali permitió encontrar variables o puntos críticos que ayudaron posteriormente a proponer algunos indicadores.

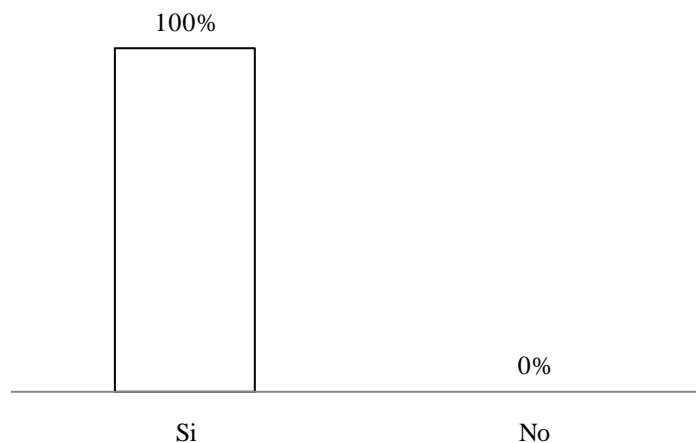
La entrevista se dividió en dos secciones, la primera fue sobre la percepción de los agricultores hacia la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos, y la segunda a partir de esquilmos agrícolas.

5.2.1. Primera sección de la entrevista, cultivos energéticos

En la primera sección de la entrevista se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 5. 9. Pregunta 1.

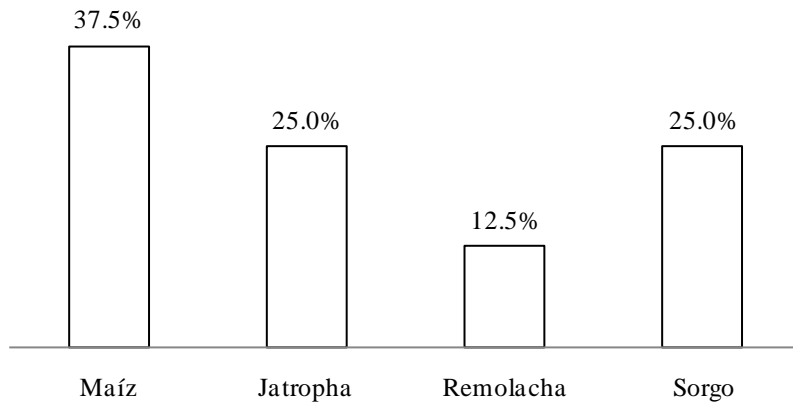
¿Conoce usted sobre la producción de bioenergía, a partir de cultivos energéticos?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 10. Pregunta 1.1.

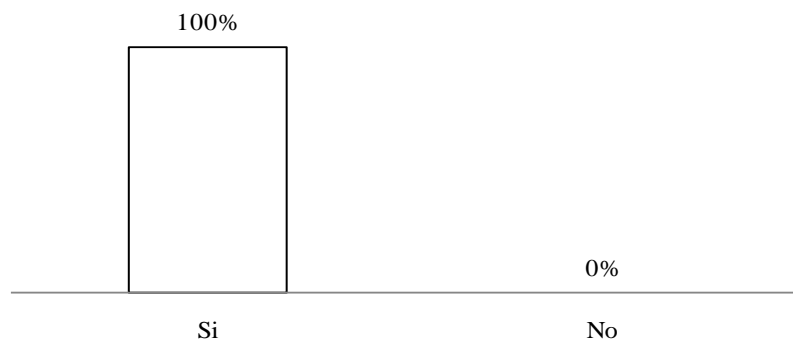
¿Cuáles cultivos energéticos conoce?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 11. Pregunta 2.

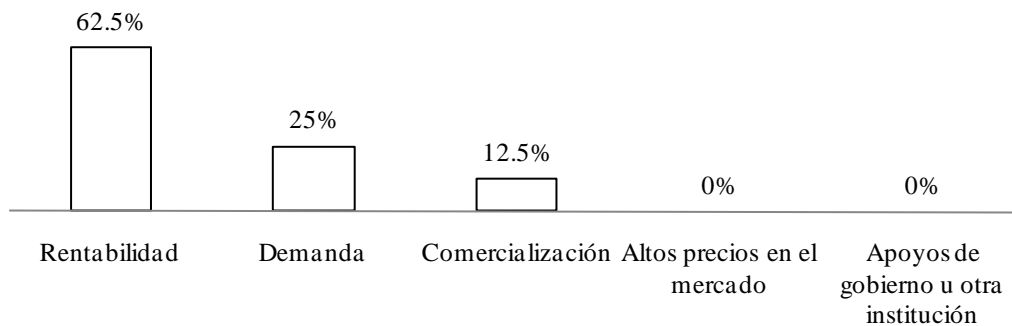
¿Estaría interesado en dedicarse a este tipo de cultivos?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 12. Pregunta 5.

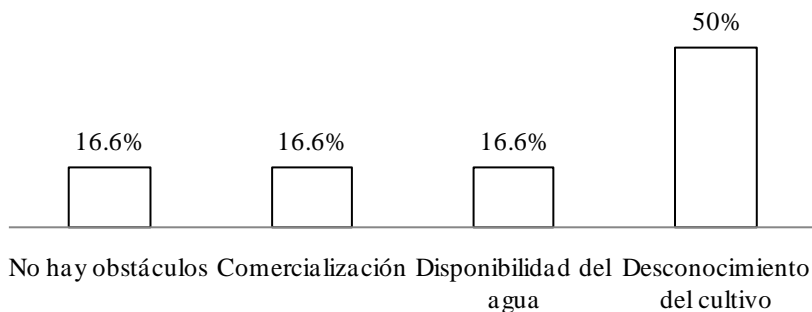
¿Cuál sería la principal razón para dedicarse a estos cultivos?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 13. Pregunta 6.

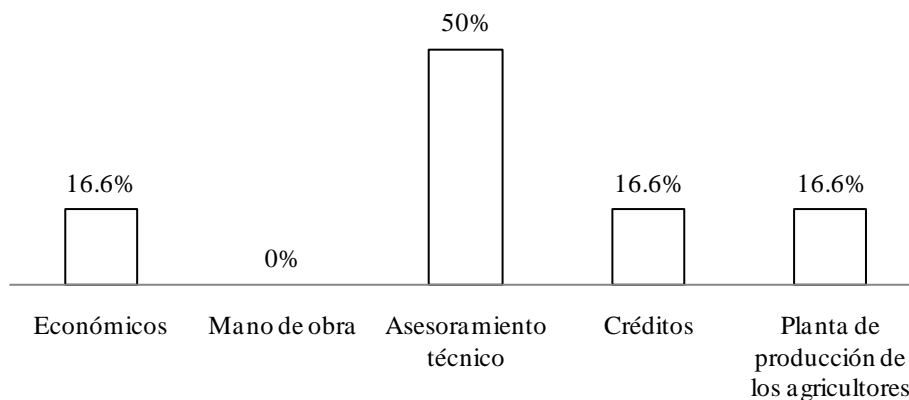
¿Obstáculos a enfrentarse al sembrar cultivos energéticos?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 14. Pregunta 7.

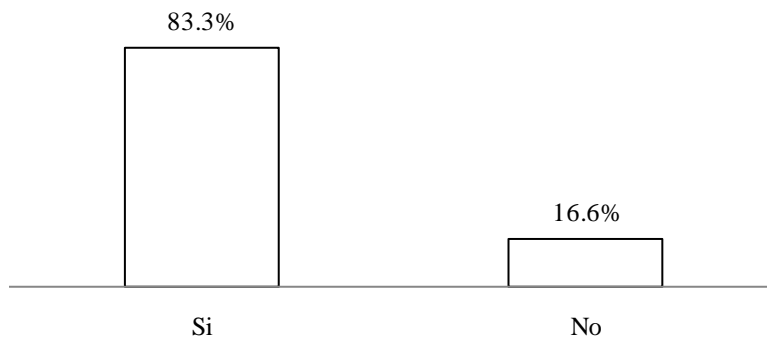
Para implementarse estos cultivos, ¿qué tipo de apoyos serían necesarios?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 15. Pregunta 8.

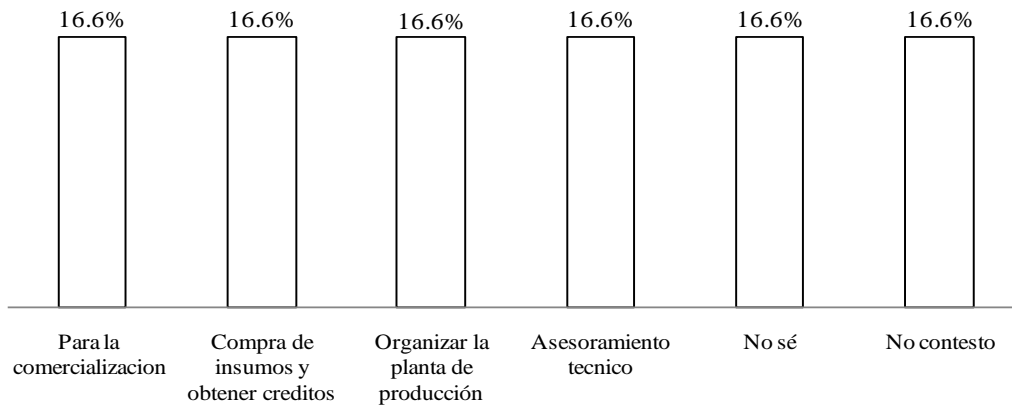
¿Cree usted necesario organizarse en un tipo de asociación o sociedad?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 16. Pregunta 9.

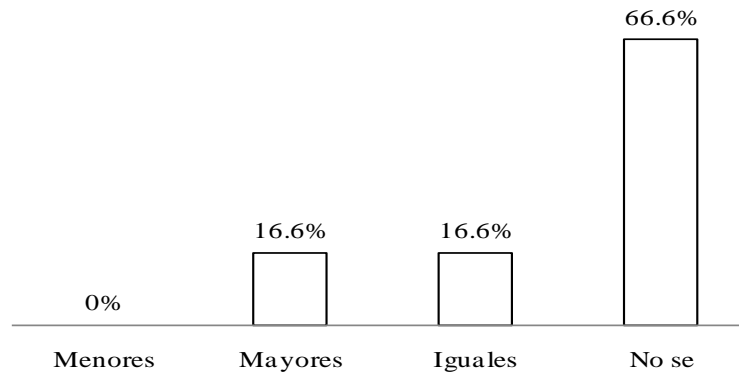
Si considera importante organizarse, ¿Qué tipo de servicios o actividades se requerirían de esta asociación o sociedad?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 17. Pregunta 10.

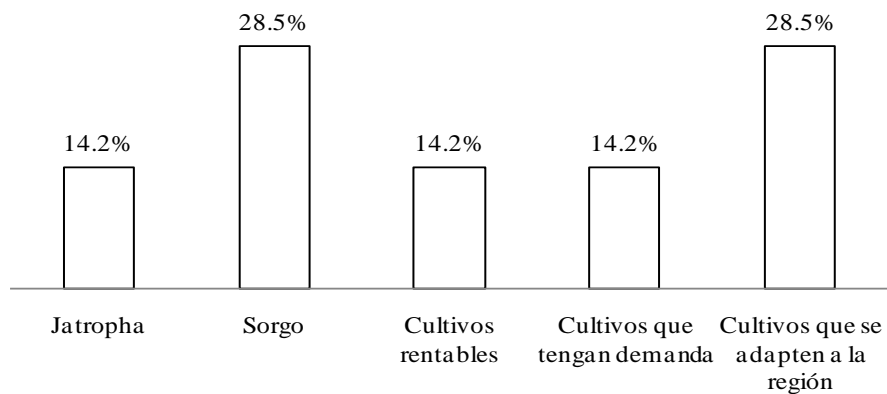
¿Cómo percibe los costos de producción en estos cultivos?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 18. Pregunta 11.

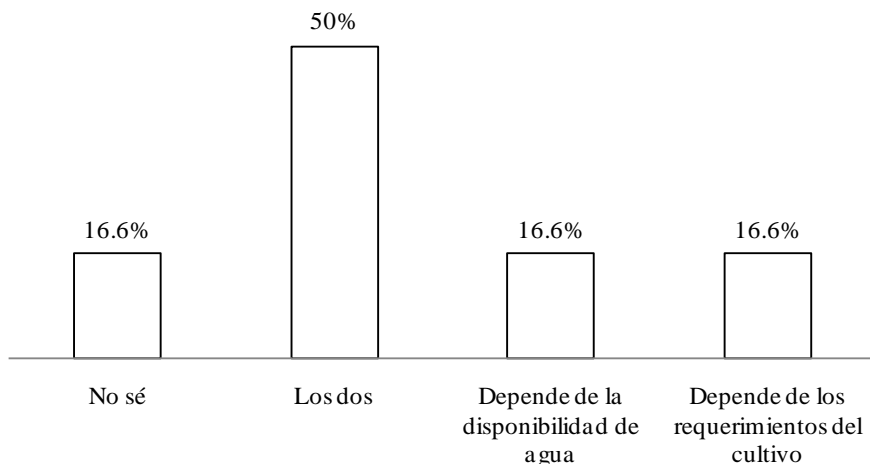
¿Qué variedad estaría interesado en cultivar?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 19. Pregunta 12.

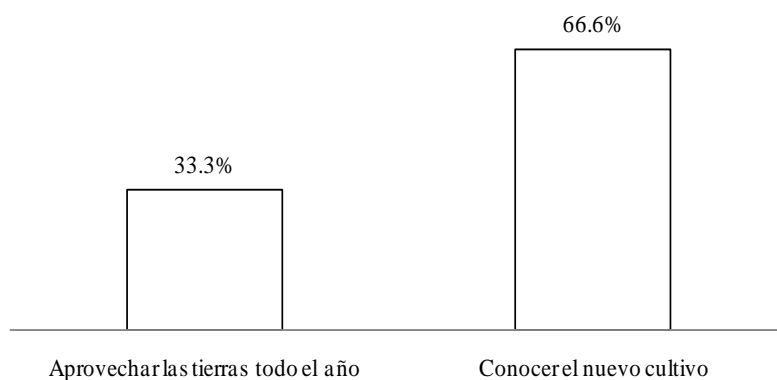
En un temporada, ¿sembraría dos cultivos, el energético y el que habitualmente siembra, o solamente el energético?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 20. Pregunta 13.

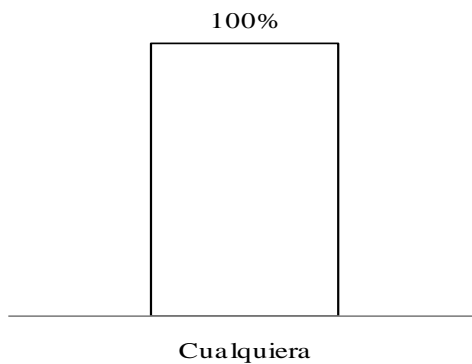
Si siembra en un año el cultivo habitual y el energético, ¿qué beneficios encontraría al tener los dos cultivos?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 21. Pregunta 14.

Si siembra en un año el cultivo habitual y el energético, ¿qué tierra destinaría para el cultivo?



Fuente: Elaboración propia.

5.2.11. Análisis y puntos críticos identificados en la primera sección

Los resultados que se obtuvieron de la primera sección de la entrevista dan luz sobre la percepción y grado de conocimiento de los representantes hacia los cultivos energéticos. El cultivo agrícola más popular fue el maíz, seguido del sorgo, jatropha y remolacha azucarera, esto debido a la popularidad que adquirió la generación de bioenergía a partir de estos cultivos en los medios de comunicación. Pero, aunque los entrevistados conozcan a estas especies agrícolas como insumos para esta producción, no significa que estén familiarizados en su totalidad en el proceso de obtención.

También se puede apreciar que existe una gran disponibilidad por parte de los agricultores para dedicarse a la siembra de cultivos energéticos. Ya que se mostraron interesados en la reconversión hacia este cultivo, ellos consideraron que mientras sea un cultivo rentable no tienen ningún inconveniente en dedicarse a ellos. Esto se debe a que todos los encuestados así como la mayoría de los agricultores del Valle de Mexicali son *agricultores/empresarios*⁸, porque lo que producen no solamente para autoconsumo, si no para comercializar.

Las personas entrevistadas reconocieron que los obstáculos que podrían existir en el Valle de Mexicali respecto a los cultivos energéticos, es el desconocimiento sobre estas especies agrícolas y la disponibilidad de agua. Lo cual permitió identificar a estos dos obstáculos como puntos críticos para esta investigación.

El desconocimiento hacia el proceso de producción de los cultivos energéticos, es un obstáculo, porque gran parte de los agricultores en la mayoría de las ocasiones se dedican solamente a especies que ya han sembrado, y consideran que la falta de conocimiento a fondo hacia estos cultivos, podría generar alguna inseguridad. Por eso, los entrevistados sugirieron que el primer paso antes de difundir este tipo de cultivos en el Valle, es la asesoría técnica como un aspecto muy relevante que va de la mano con la innovación tecnológica.

⁸ Partiendo que existen agricultores que cultivan sus tierras exclusivamente para autoconsumo, porque no hay quien les compre su producto, es muy pequeño su predio o cualquier otro motivo; y el agricultor/empresario es aquel que puede comercializar su cosecha con uno o varios compradores, y podría o no consumir ésta.

Figura 5. 22. Maquinaria agrícola en el corte de alfalfa



Foto: **Carolina Sánchez (Febrero, 2010).**

La disponibilidad de agua fue considerada como un punto crítico, pues el agua utilizada en el Valle de Mexicali para uso urbano y agrícola proviene del Río Colorado, según el Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales de 1944. El problema del agua para riego agrícola en el Valle, se debe principalmente a la infraestructura hidroagrícola, porque hay fallas en la distribución, además que la conservación y el mantenimiento de la red ocasionan desperdicios de agua (López, 2001, citado en Peña y Rojas, 2005).

Figura 5. 23. Infraestructura para riego agrícola en el Valle de Mexicali



Foto: **Carolina Sánchez (Febrero, 2010).**

Figura 5. 24. Predios agrícolas y canal de riego del Valle de Mexicali



Foto: **Carolina Sánchez (Febrero, 2010).**

Otros aspectos importantes que proporcionó la entrevista, fueron los apoyos económicos, la accesibilidad a créditos, y la importancia de que la planta de transformación pertenezca a los productores de la región donde se produzca el bioenergético, y no de personas ajenas al gremio de los agricultores del Valle. Los entrevistados consideraron que el ser solamente proveedores del cultivo energético para la planta de producción de bioenergía, no es una gran ventaja.

Tema también relevante para la producción de bioenergía, mencionado por los agricultores, fueron los apoyos gubernamentales, pues consideran que se requieren subsidios u otros apoyos al iniciar este tipo de proyectos. Sin embargo, los individuos entrevistados también creen que no todo el tiempo se puede depender de estos apoyos. Relacionado con la anterior, Aguirre, 2007; Priego-Castillo *et al.*, 2009; Alvarado, s/a en sus trabajos sobre sustentabilidad en sistemas agrícolas, señalan que los subsidios llegan a ser puntos críticos, porque al existir una alta dependencia a éstos se muestra un sistema frágil económicamente, respecto a otro que no dependa de subsidios o apoyos para la producción.

En materia de organización, más del 83 por ciento consideró importante organizarse en algún tipo de asociación o sociedad, para apoyarse en la comercialización, compra de insumos, obtención de créditos, capacitación, para organizar la planta de conversión de bioenergía y

para el asesoramiento técnico. Lo cual mostró la poca capacitación, y la baja capacidad organizativa y de participación como *puntos críticos*, en otras investigaciones relacionadas con la sustentabilidad en agrosistemas se refiere a estos aspectos como fundamentales para un funcionamiento sustentable en el área social (Fallas *et al.*, 2009; Gomero y Velásquez, 2003; Frías y Delgado, 2003).

Figura 5. 25. Trigueros del Valle de Mexicali, reunidos en el Ejido Nayarit



Foto: **Carolina Sánchez (Febrero, 2010).**

Lo que respecta a los costos de producción, más del 60 por ciento de los productores mostraron desconocimiento a este tema, y 16.6 por ciento creen que podría ser mayores o iguales, pero de forma interesante no consideraron que pudiesen ser menores a los actuales.

En cuanto a la variedad que estarían interesados en cultivar, el 28.5 por ciento consideró al sorgo o cualquier otro cultivo que se adapte a las condiciones de la región, mientras que el 14.2 por ciento consideraron el cultivo de jatropha, o cultivos que tengan demanda en el mercado o que sean rentables. Lo cual permitió asegurar que el sorgo se situó en el primer lugar, porque es un cultivo que se siembra en el Valle de Mexicali y por tanto el proceso de producción de esta especie agrícola es conocida por la mayoría de los agricultores de la región.

El uso de suelo fue otro aspecto importante que se abordó en la entrevista, el 50 por ciento afirmaron que en un ciclo agrícola sembrarían el cultivo que usualmente siembran y además el

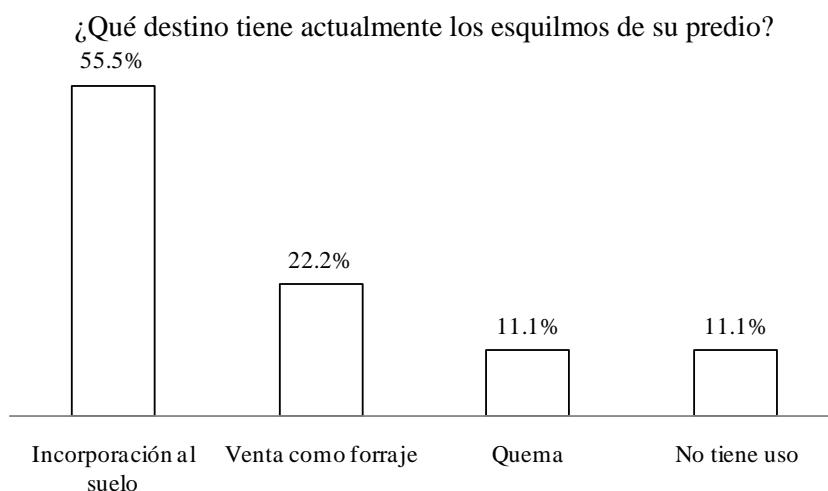
cultivo energético; otros respondieron que depende de la disponibilidad del agua, de los requerimientos del cultivo y unos más que no sabían. Las respuestas brindadas por los encuestados se deben a que no conocen bien este tipo de cultivos y no se arriesgan a dedicar el total de sus tierras a estas especies. También durante la entrevista, comentaron lo peligroso que sería el abandonar por completo la producción de especies agrícolas para alimentación humana y/o animal, y sustituirlos por cultivos energéticos, como aseguran WWF, 2006; SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, 2008 y BTG, 2008 en diversos trabajos sobre la posible competencia alimentaria por esta manera de generar bioenergía.

Referente a si sembrarían dos tipos de cultivos en un ciclo agrícola o año (dependiendo del agua disponible), más del 60 por ciento de los agricultores opinó que los beneficios que encontrarían serían conocer el cultivo, mientras que el 33 por ciento consideró que de esta forma se aprovecha mejor la tierra durante todo el año. Estos mismos agricultores, aseguraron que es indistinto si la tierra destinada es propia o rentada.

5.22. Segunda sección de la entrevista, esquilmos agrícolas

Posterior al análisis de los resultados de la primera sección de la entrevista, sobre cultivos energéticos. A continuación se muestran los resultados de la segunda sección, que agrupa la percepción de los agricultores en cuanto a la producción de bioenergía a partir de esquilmos agrícolas, es decir el APB secundario.

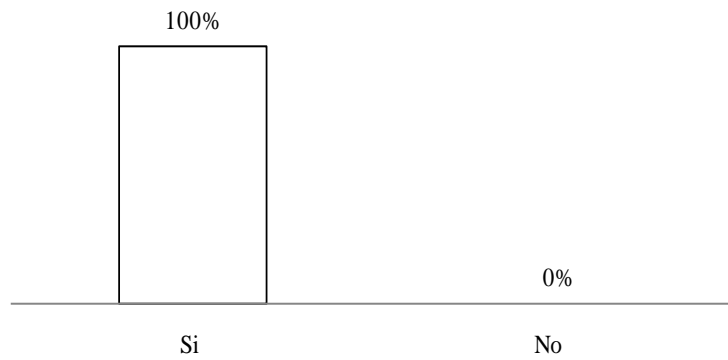
Figura 5. 26. Pregunta 15.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 27. Pregunta 16.

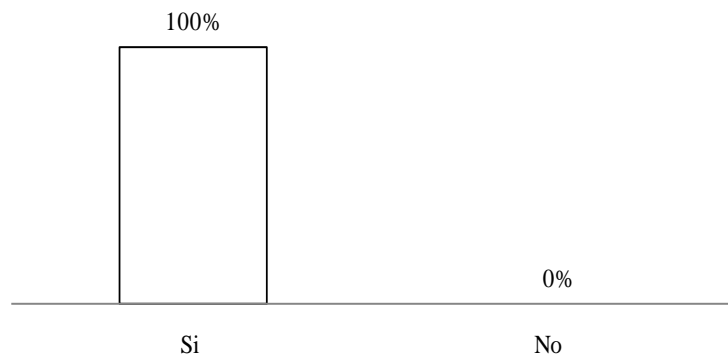
Sabía usted que el residuo agrícola se puede utilizar como insumo para la producción de bioenergía



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 28. Pregunta 17.

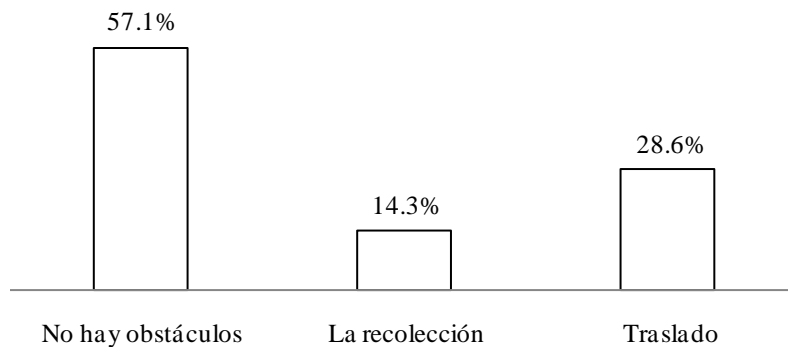
Estaría interesado en vender sus esquilmos para esta producción



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 29. Pregunta 20.

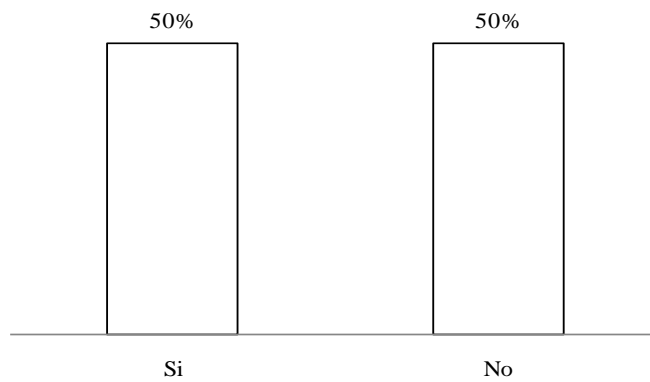
Si se instalara una industria que comprara sus esquilmos y aceptara vendérselos, ¿ A qué obstáculos se enfrentaría Ud. Como agricultor para realizar dicha venta?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 30. Pregunta 21.

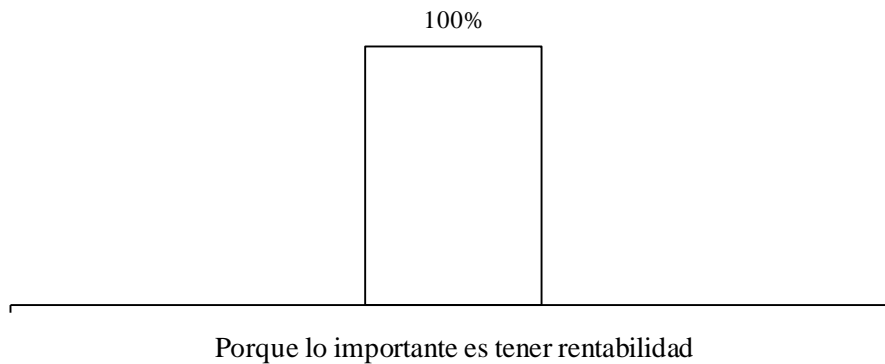
Existe una ventaja de un APB respecto al otro



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 31. Pregunta 22.

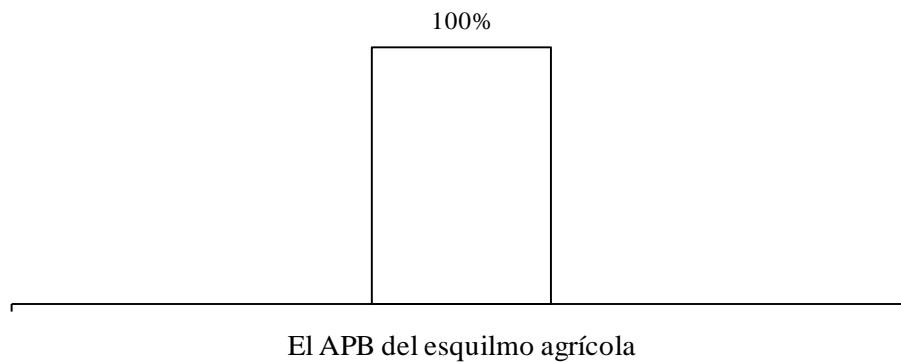
Si no percibe ventajas de un APB respecto al otro, ¿por qué?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 32. Pregunta 23.

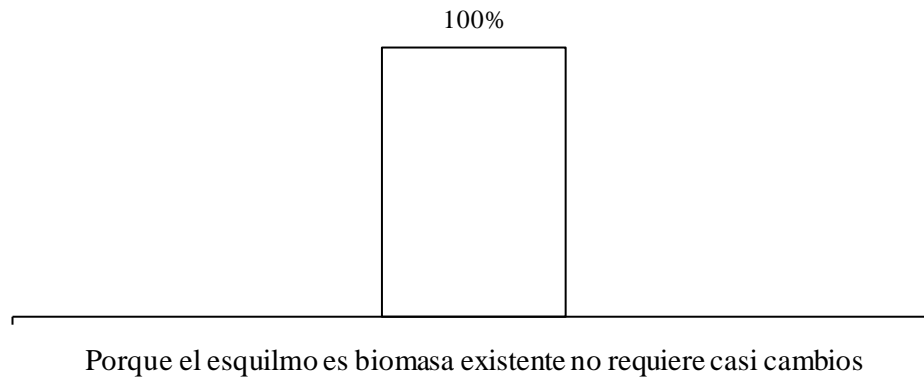
Si percibe ventajas de un APB respecto a otro, ¿Cuál tiene ventaja?



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 33. Pregunto 24.

¿Por qué percibe ventajas del APB secundario con respecto al primario?



Fuente: Elaboración propia.

5.2.21. Análisis y puntos críticos identificados en la segunda sección

La segunda sección de la entrevista permitió encontrar diversos puntos críticos, dentro de ellos la quema de los esquilmos agrícolas. Aunque la mayoría de los agricultores declararon que los esquilmos son incorporados al suelo como abono, el 22.2 por ciento los vende como forraje, mientras que el 11.2 por ciento los quema y el otro 11.2 por ciento no tienen ningún uso, es relevante su estudio y su control.

La importancia y la consideración como punto crítico de la quema de los esquilmos agrícolas, radicó en que esta actividad es una fuente importante de emisión de GEI. Además, se pueden generar gases tóxicos, pues los agricultores además de incinerar sus esquilmos, agregan otros desechos como bolsas, sacos, botes, frascos, bandejas, baldes, entre otros materiales que estuvieron en contacto con plaguicidas y fertilizantes. La quema actual de estos residuos sólidos, es motivo de molestia en los residentes de esta región ya que las emisiones generadas tiene afectaciones en ojos y olores desagradables, entre otros problemas de salud relacionados con la quema (Murillo, 2010).

Existe una norma oficial Mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, donde se establecen las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario; y a nivel local está *el reglamento de Protección al*

Ambiente para el Municipio de Mexicali, Baja California, donde se estipulan los lineamientos a seguir para llevar a cabo la quema de los residuos agrícolas. No obstante, la quema de esquilmos agrícolas de trigo, cártamo, cebada y maíz no está totalmente controlada (Quintero y Moncada, 2008). Esto se debe a que económicamente, el agricultor prefiere quemar los sobrantes de la cosecha que invertir en el uso de maquinaria, diesel, sueldo del operador y desgaste del equipo para recoger el esquilmo. Además, es más fácil y rápido incinerar los residuos y la maleza presente en la parcela que recolectarla, para preparar a tierra para el próximo ciclo de cultivo (*Ibid*).

La quema de esquilmos agrícolas en el Valle de Mexicali pudiera ser controlada al aplicar políticas o estímulos económicos para quienes no quemen sus residuos. Este esquema de recompensa, se aplica con éxito en el Valle Imperial, California, donde existe un programa llamado “crédito por reducción de emisiones”, lo cual ha reducido la emisión de GEI. Además, podrían implementarse multas por incumplimiento de la norma o el reglamento establecido.

En esta investigación presto especial interés en la quema de esquilmos agrícolas punto crítico, por dos razones; la primera es por los problemas ambientales y de salud pública que se generan, y la segunda, porque este tipo de biomasa podría ser utilizada como insumo para la producción de bioenergía, en lugar de ser desaprovechada. Skoulou y Zabaniotou (2005) señalan que los agricultores podrían obtener ventajas económicas al vender los esquilmos agrícolas en lugar de su quema, y mitigar los impactos ambientales negativos ocasionados.

En las siguientes preguntas de investigación se abordó el tema de los obstáculos que enfrentaría el agricultor para realizar la venta de los esquilmos para la producción de bioenergía. El 57.1 por ciento de los entrevistados respondieron que no hay obstáculos a enfrentar; sin embargo, el 28.6 por ciento opinó que el traslado es un problema, y 14.4 por ciento la recolección. En el trabajo presentado por Singh *et al.*, 2008, se diseñó un modelo matemático para la recolección del esquilmo en campo, mediante la ayuda de un sistema de información geográfico que evaluaba el potencial de esta biomasa. Por ejemplo, métodos para la recolección del esquilmo y diseño de rutas para el traslado, todo esto para optimizar los costos de estas actividades.

En la última parte de la entrevista, fue importante conocer la percepción de los agricultores respecto a las ventajas del APB primario sobre el secundario. Se encontró que la mitad de los encuestados no visualiza ventajas entre APB, mientras que la otra mitad dijo que sí existe una ventaja. Los agricultores que respondieron que no existen ventajas entre APB, argumentaron que lo importante para el buen funcionamiento de los sistemas agrícolas es su rentabilidad y la existencia de un mercado. Mientras que los agricultores que perciben ventajas, mencionaron que ven en los esquilmos una fuente de biomasa ya existente que pudiera ser aprovechada, y que no se requieren cambios en su actividad agrícola actual, además que existe un gran potencial en el Valle de Mexicali pues actualmente tiene usos.

Los resultados fueron inconclusos probablemente por un desconocimiento a fondo de los APB por parte de los productores. Es decir, no han puesto en práctica ninguno de los dos APB y sólo tenían la información que se les proporcionó durante la entrevista. Esta percepción pudiera cambiar, una vez que los productores agrícolas implementen alguno de estos sistemas agrícolas, teniendo la información necesaria para aseverar cual sistema es más ventajoso.

5.3 Indicadores de los Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB)

A continuación se presentan los indicadores propuestos para evaluar la sustentabilidad en APB primarios y secundarios. Estos indicadores se derivaron de los criterios de diagnóstico que a su vez fueron relacionados con los puntos críticos identificados de la caracterización teórica de los diferentes escenarios de APB primarios y secundarios; de las entrevistas aplicadas a los representantes de los sistema-producto agrícola del Valle de Mexicali; y de la consulta bibliográfica especializada. A continuación se presentan los indicadores divididos por área de evaluación, económica, ambiental y social.

5.3.1 Indicadores Económicos

El área económica es un aspecto muy relevante en los APB, es casi imposible mantener el funcionamiento del agrosistema, cuando no se cuenta con rentabilidad, productividad, u otra cuestión económica fundamental. Una manera de comprobar que un APB está funcionando

correctamente en el aspecto económico, es mediante el uso de indicadores, a continuación se presentan los propuestos en esta investigación.

Cuadro 5. 1. Indicadores Económicos.

ATRIBUTOS DE SUSTENTABILIDAD	PUNTOS CRÍTICOS	CRITERIO DE DIAGNÓSTICO	INDICADOR
PRODUCTIVIDAD	Baja productividad	Rendimiento del sistema	Rendimiento del sistema
	Baja rentabilidad	Rentabilidad	Relación Costo/Beneficio
	Baja calidad del producto	Calidad del bioenergético	Cumplimiento de normas de calidad
ESTABILIDAD, RESILIENCIA Y CONFIABILIDAD	Competencia alimentaria	Seguridad alimentaria y uso de suelo	Competencia alimentaria y uso de suelo
	Alta dependencia de subsidios e insumos externos (cambiar a estabilidad)	Autosuficiencia	Independencia económica (nivel de autofinanciamiento)
ADAPTABILIDAD	Baja innovación tecnológica	Capacidad de innovación	Vinculación para la innovación tecnológica
EQUIDAD	Escasa remuneración y diversidad de ingreso	Remuneración	Remuneración y diversificación de ingresos

Rendimiento del sistema: Este indicador se encarga de monitorear el rendimiento obtenido en los subsistemas agrícolas (ton/ha) y de transformación (KJ/kg) del Agrosistema de Producción de Bioenergía (APB). Se propone que este indicador mida el comportamiento del rendimiento en el subsistema agrícola y de transformación, en lugar de precisar valores de rendimientos deseados. Esto debido a la gran heterogeneidad de escenarios disponibles, es decir, el rendimiento en el subsistema agrícola dependerá del cultivo sembrado, mientras que el rendimiento en el subsistema de transformación dependerá de la tecnología aplicada.

Por lo tanto, este indicador busca monitorear que en cada ciclo agrícola el rendimiento incremente debido a la implementación de medidas o mejoras, mientras que rendimientos inferiores indican problemas en el sistema. La determinación de este indicador se realizará de la siguiente manera: 1) para el subsistema agrícola se cuantificará por peso (ton) únicamente la biomasa que será directamente transformada en bioenergía, dividida entre la superficie sembrada; y 2) para el subsistema de transformación, se medirá el rendimiento en términos de energía obtenida (KJ) por tonelada (ton) de biomasa seca procesada. En el caso de la producción biocombustibles el contenido energético será determinado mediante calorimetría.

El gradiente de sustentabilidad fue asignado de la siguiente manera. Se le colocó el valor de 1.0, cuando ambos subsistemas (agrícola y de transformación) muestren rendimientos (kJ/ha) superiores al ciclo anterior (al menos un 5%); un valor de 0.75 cuando sólo un subsistema muestre un rendimiento mayor, el otro un rendimiento igual ($\pm 2\%$ respecto al ciclo anterior); un valor de 0.50 cuando ambos subsistemas muestran rendimientos similares al ciclo anterior; 0.25 cuando sólo un subsistema muestra un rendimiento similar o mayor, el otro muestre un rendimiento inferior; y finalmente, 0.10 cuando ambos subsistemas muestren rendimientos inferiores al ciclo anterior.

Relación Costo/Beneficio: Este indicador se encarga de medir la rentabilidad en un APB, siendo el análisis de costo-beneficio el método de su medición. Para la determinación de este indicador se proponen los pasos planteados en el trabajo de la Sociedad Latinoamericana para la Calidad, (2000): se suman los todos beneficios económicos obtenidos de la actividad, y son divididos entre los costos totales.

Los rangos de sustentabilidad se tomaron del trabajo de Rendón, (2004) y de las entrevistas aplicadas a los agricultores del Valle de Mexicali, quedando de la siguiente manera. Se asignó un valor de 1.0 cuando la relación costo beneficio es ≥ 2.5 ; 0.75 cuando la relación está entre 2.1 - 2.5; 0.50 cuando está entre 1.6 - 2.0; 0.25 cuando está entre 1.0 - 1.5; y 1.0 cuando es ≤ 1 .

Cumplimiento de la norma de calidad: Este indicador se encarga de medir el grado del cumplimiento de la norma en términos de calidad del bioenergético. En esta investigación se propone la Norma American Society for Testing and Material (ASTM) D 6751 para la calidad del biodiesel (ver cuadro 5.2), y la ASTM D 4806 para la calidad del bioetanol (ver cuadro 5.3). Para determinar cada uno de los parámetros se recomienda seguir los métodos que se estipulan en dichas normas. Aunque es posible basarse en otra norma nacional o internacional aplicable.

La creación del indicador se derivó de la caracterización teórica de los APB, y la asignación de los rangos de sustentabilidad surgió después de un análisis quedando de la siguiente manera. Se asignó un valor de 1.0 cuando se cumple con más del 80 por ciento de los parámetros estipulados en la norma aplicable; 0.75 cuando se cumple entre el 60-79 por ciento de los

parámetros; 0.50 cuando cumple entre el 40-59 por ciento de los parámetros; 0.25 entre 20-39 por ciento; y 0.10 cuando el cumplimiento sean menor del 20 por ciento.

Cuadro 5. 2. Especificación normativa D6751 para el Biodiesel.

Propiedad	Método de ensayo ASTM	Límites	Unidad
Punto de inflamación	D93	130.0 min.	°C
Agua y sedimentos	D2709	0.050 máx.	% vol.
Viscosidad cinemática 40 °C	D445	1.9-6.0	mm ² /s
Contenido de ceniza sulfatada	D874	0.020 máx.	% masa
Azufre (S 15 Grade)	D5453	0.0015	Ppm
Azufre (S 500 Grade)	D5453	0.05 máx.	Ppm
Corrosión de la lámina de cobre (3h, 50°C)	D130	No. 3 máx.	Grado de corrosión
Número de cetano	D613	47 min.	
Punto de nube (enturbiamiento)	D2500	Informe al cliente	°C
Residuo carbonoso	D4530*	0.050 máx.	% masa
Índice de acidez	D664	0.80 máx.	mg KOH/g
Glicerol libre	D6584	0.020 máx.	% masa
Glicerol total	D6584	0.240 máx.	% masa
Fósforo	D4951	0.001 máx.	% masa
Destilación: la temperatura, la temperatura atmosférica equivalente, el 90% recuperado	D1160	360 máx.	°C

*El residuo carbonoso debe ser ejecutado en una muestra de 100%

Fuente: ASTM, 2010a.

Cuadro 5. 3. Especificación normativa D4806 para el alcohol desnaturalizado.

Propiedad	Método de ensayo ASTM	Límites	Unidad
Contenido de etanol	D 5501	92.1	% vol., min.
Contenido metanol		0.5	% vol., máx.
Goma lavada	D 381	5	mg/100 ml, máx.
Contenido de agua	E 203	1	% vol., máx.
Contenido de desnaturalizador		1.96	% vol., min.
		4.76	% vol., máx.
Contenido de cloruro inorganico	D 512	40	ppm (mg/L), máx.
Contenido de cobre, mg/kg, max	D1688	0.1	mg/kg, máx.
Acidez (como ácido acético CH ₃ COOH)	D1613	0.007	(mg/L), máx.
pHe	D 6423	6.5-9.0	
Apariencia	Visiblemente libre de contaminantes suspendidos o precipitados (claro y brillantes)		

Fuente: ASTM, 2010b.

Competencia alimentaria y uso de suelo: Este indicador se encarga de medir la seguridad alimentaria y uso de suelo en el (APB), privilegiando aquella situación que evite la competencia alimentaria. Para la realización de este indicador se basó en trabajos realizados por SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, 2008. Para la determinación de este indicador el evaluador hará una consulta del uso de suelo para los últimos cinco años.

La asignación de niveles de sustentabilidad resultaron de un análisis sobre el tipo de suelo que se utiliza para la siembra del cultivo energético, los cuales quedaron de la siguiente manera. Se asignó un valor de 1.0 cuando se utiliza suelo agrícola no fértil; 0.75 cuando se usa suelo agrícola fértil sin uso; 0.50 cuando se usa suelo agrícola fértil en uso; 0.25 cuando se usa suelo con vegetación/fauna sin riesgo; y 0.10 cuando se utiliza suelo con vegetación/fauna en riesgo y/o un área de alto valor de conservación.

Independencia económica (nivel de autofinanciamiento): Este indicador se encarga de medir el nivel de autofinanciamiento de los productores del APB, para la realización de este indicador se basó en la entrevista realizada a los productores del Valle de Mexicali. Este indicador se obtendrá mediante la aplicación de entrevistas o encuestas a los productores por parte del evaluador.

Los rangos de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando el sistema no depende de subsidios externos o créditos, y opera sólo con ingresos propios; 0.75 cuando el sistema depende en parte de créditos, y los complementa con ingresos propios; 0.50 cuando el sistema de transformación depende en parte de subsidios/créditos; 0.25 cuando sólo el subsistema agrícola depende en parte de subsidios/créditos; y 0.10 cuando el sistema depende preponderadamente de subsidios externos.

Vinculación para la innovación tecnológica: Este indicador se encarga de medir la vinculación existente entre centros de investigación y/o transferencia de tecnología con el subsistema agrícola y/o de transformación. Para la realización de este indicador se basó en la ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. Para la determinación de este indicador el evaluador consultará los documentos que validen la relación o colaboración de los productores del APB con los centros de investigación.

Los rangos de sustentabilidad se eligieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando existen convenios permanentes con universidades, centro de investigaciones y/o de transferencia de tecnología, y la aplicación de innovaciones o mejoras tecnológicas fue en los últimos 5 años; 0.75 cuando existen convenios permanentes de colaboración con centros de investigación y/o de transferencia de tecnología, y la aplicación de innovación o mejoras tecnológicas fue hace más de 5 años; 0.50 cuando hay convenios de colaboración, aún sin la aplicación de innovación o mejoras tecnológicas; 0.25 cuando existe la vinculación, sin mecanismos claros de transferencia de tecnología y/o conocimiento; y 0.10 cuando no hay convenios de colaboración.

Remuneración y diversificación de ingresos: Este indicador se encarga de medir el nivel de remuneración y diversificación en el APB. Para la realización de este indicador se basó en el trabajo de Aguirre, 2007, para la determinación de este indicador se aplicarán entrevistas o encuestas a los productores por parte del evaluador.

Los rangos de sustentabilidad se asignaron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando los ingresos obtenidos son suficientes para cubrir necesidades, y no se prohíben otras actividades económicas; 0.75 cuando los ingresos obtenidos son suficientes para cubrir necesidades, y se prohíben otras actividades; 0.50 cuando los ingresos son fluctuantes, pero cubre sus necesidades; 0.25 cuando el ingreso es suficiente, y no se prohíbe que se complemente con otra actividad; y 0.10 cuando el ingreso es insuficiente y se prohíbe que se complemente con otra actividad.

5.3.11. Análisis de los indicadores económicos

En esta investigación se proponen siete indicadores que servirán para evaluar el desempeño económico en los APB primarios y/o secundarios. El MESMIS propone siete atributos de sustentabilidad, en este trabajo para el área económica se utilizaron seis: productividad, estabilidad, resiliencia, confiabilidad, adaptabilidad y equidad, cada uno dividido en diferente puntos críticos, criterios de diagnóstico e indicadores. La productividad será evaluada mediante los indicadores de rendimientos del sistema, la relación costo/beneficio, y el

cumplimiento de normas de calidad. Para el atributo de estabilidad, resiliencia y confiabilidad se asignó el indicador de competencia alimentaria y uso de suelo e independencia económica. Estos indicadores cuentan con gran relevancia debido a que el cambio de uso de suelo es un aspecto considerado en la mayoría de los trabajos de sustentabilidad en la producción de bioenergía. El indicador de independencia económica hace referencia al nivel de autofinanciamiento de los agricultores, para solventar los gastos del ciclo agrícola, así como la operación de la biorefinería. Es conveniente que el APB no dependa de subsidios externos o créditos, ya que esto es signo de una alta seguridad económica, donde las ganancias generadas son suficientes para solventar los gastos e invertir en el siguiente ciclo agrícola.

Para el atributo de adaptabilidad se le asignó el indicador de vinculación para la innovación tecnológica, siendo la capacidad de innovación el criterio de diagnóstico y la baja innovación tecnológica el punto crítico. La elección de este indicador obedece al hecho de que el APB tendrá mayor oportunidad de adaptarse a nuevos escenarios económicos de competitividad y nuevas regulaciones ambientales, al mantener sus sistemas productivos en continua innovación. Es por ello que la ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos muestra la relevancia en la vinculación entre los centros de investigación públicos o privados con los sistemas de producción de bioenergía, con el objetivo de fomentar y desarrollar la investigación científica para la producción sustentable de insumos y el proceso de transformación.

Para el atributo de equidad se asignó el indicador de remuneración y diversificación de ingresos. Los integrantes de los APB deben satisfacer sus necesidades básicas de alimentación, salud, vestido, educación, entretenimiento, entre otros, con los ingresos percibidos de su participación en el APB. Pero también deben estar en la libertad de complementar sus ingresos con otra actividad económica.

5.32 Indicadores Ambientales

Para la producción de bioenergía a partir de sistemas agrícolas, el área ambiental ha sido uno de los ámbitos que más se han estudiado, por la gran importancia que representan los recursos naturales, en el sector ambiental pueden presentarse impactos positivos y negativos muy

relevantes. Por ejemplo, se espera la disminución en la emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI), utilización de esquilmos agrícolas para la generar bioenergía, evitando su quema no controlada. Impactos negativos pueden incluir la contaminación de agua y suelo por el abuso de agroquímicos, uso inadecuado de Organismos Genéticamente Modificados (OGM).

A continuación se presentan los indicadores ambientales propuestos para esta investigación.

Cuadro 5. 4. Indicadores ambientales.

ATRIBUTO	PUNTOS CRÍTICOS	CRITERIO DE DIAGNÓSTICO	INDICADOR
Productividad	Alta degradación de suelos	Degradación o conservación de suelo fértiles	Grado de erosión de suelo Niveles de fertilidad
	Agrocontaminación de suelos	Uso de agroquímicos	Aplicación de agroquímicos
	Poco uso de prácticas agroecológicas	Prácticas agroecológicas	Número de prácticas agroecológicas aplicadas (%)
Estabilidad, resiliencia y confiabilidad	Disposición inadecuada de residuos y limpieza de tierras cultivadas	Calidad de aire	Manejo de esquilmos agrícolas
	Altas emisiones de GEI	Reducción de GEI	Emisiones de GEI
	Baja disponibilidad y reciclaje de agua	Conservación y uso de agua	Disponibilidad y reciclaje de agua
	Abuso y uso inadecuado de OGM	Uso de OGM	Empleo de organismos genéticamente modificados
	Alta vulnerabilidad de cultivos a efectos externos	Daños a los cultivo	Incidencia de plagas, enfermedades , malezas y otros factores externos
Equidad	Contaminación por residuos	Manejo de residuos	Manejo de residuos
Autodependencia	Alta dependencia a los combustibles fósiles y emisiones de GEI	Dependencia a la energía fósil	Uso de energía renovable

Grado de erosión de suelo: Este indicador mide los niveles de erosión en suelo, la creación del indicador y la asignación de los rangos de sustentabilidad se basan en los parámetros presentados por la metodología MAG-FAO, 1994 en Ramírez *et al.*, 2008. Para la determinación de este indicador se requerirá de los resultados de los análisis químicos de las muestras de suelo. Los valores de sustentabilidad se asignaron de la siguiente manera: valor de 1.0 cuando

la erosión es nula, 0.75 cuando es ligera o leve, 0.50 cuando es moderada, 0.25 cuando es severa; y 0.10 cuando es muy severa.

- *Nula*: Sin síntomas de erosión.

- *Ligera o leve (Erosión laminar y/o en surcos ligera)*: Los suelos presentan pocos canalículos de escasos centímetros de profundidad después de las lluvias, la presencia de pedestales de poca altura (menores a 3 cm) puede ser un índice de erosión leve, lo mismo que marcas livianas de pisoteo en pastos. Se considera que se ha perdido menos del 25 por ciento del horizonte A original.

-*Moderada (Erosión laminar y/o en surcos moderada)*: Se observan síntomas de erosión a través de la presencia generalizada de canalículos y surcos pocos profundos en campos de cultivos en maduración, y de trillas poco profundos entre las macollas de gramíneas, en pastos o pedestal es altos (3 a 5 cm). Se considera que se ha perdido hasta un 50 por ciento del horizonte A original.

-*Severa (Erosión laminar y/o en surcos fuertes, o cárcavas incipientes)*: Se observa la presencia de abundantes surcos aún después del arado, de canalículos y surcos profundos en campos con cultivos en maduración y la presencia de trillas profundos sin vegetación y pequeños deslizamientos en laderas, con macollas sobre pedestales (5 a 10 cm) de tierras en pastos. El suelo ha sido erosionado hasta en un 100 por ciento del horizonte A original.

- *Muy severa (Cárcavas profundas y/o densas)*: Los suelos están prácticamente destruidos o son fuertemente truncados, con exposición del horizonte B. En algunos suelos se produce un microrelieve con cárcavas profundas en patrones dendríticos y en otros hay truncación extrema de los horizontes superficiales, con o sin la presencia de cárcavas. En esta categoría se incluyen los deslizamientos y/o deposiciones masivas de suelos que se han desplazado desde su lugar de origen.

Niveles de Fertilidad: Para efectos de la clasificación, el criterio de fertilidad se deberá utilizar en aquellos terrenos con pendientes menores del 30 por ciento. En levantamientos a

nivel de reconocimiento o menores, se puede utilizar información disponible de estudios realizados con anterioridad.

Para evaluar la fertilidad del suelo se deberá utilizar la determinación de:

- Suma de bases extraíbles.
- Porcentaje de saturación de acidez, la cual se determinará por medio de la siguiente fórmula:

Acidez x 100; donde la acidez se extrae con KCl 1N

Suma de bases + acidez

La creación de este indicador y la asignación de rangos de sustentabilidad se basó en el trabajo realizado por MAG-MIRENEM, 1995 en Ramírez *et al.*, 2008. Los niveles de sustentabilidad quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando la fertilidad es alta; 0.75 cuando la fertilidad es media; 0.50 cuando la fertilidad es de media-baja; 0.25 cuando la fertilidad es baja; y 0.10 cuando la fertilidad es muy baja. Los criterios de fertilidad en base a la suma de bases y grado de saturación de acidez son los siguientes.

Alta: Suma de bases mayor que 10 meq/1 00 mi y saturación de acidez menor de 10 por ciento

Media: Suma de bases mayor de 5 meq/1 00 mi y saturación de acidez menor de 50 por ciento

Media-baja: Suma de bases menor a 5 meq/1 00 mi y saturación de acidez menor a 50 por ciento.

Baja: Suma de bases menor a 5 meq/1 00 mi y saturación de acidez mayor a 50 por ciento.

Muy baja: Suma de bases menor a 3 meq/1 00 mi y saturación de acidez mayor a 50 por ciento.

Aplicación de agroquímicos: Se encarga de medir el grado de contaminación ocasionada por agroquímicos como pesticidas y fertilizantes, privilegiando a aquellos agroquímicos enlistados como *seguros* según las categorías 1A y 1B del WHO, (2009), o en los convenios de Stockolmo/Rotterdam. Ese indicador se obtendrá mediante la aplicación de entrevistas o encuestas a los productores por parte del evaluador, además de verificar que la información proporcionada sea la correcta, para esto podrán pedir a su asesor técnico o al productor una factura u otra muestra de lo testificado.

Se desea que la aplicación de agroquímicos sea controlada, es decir, tener un registro sobre la duración y cantidad o dosis aplicadas. El indicador se derivó en cierta parte de la caracterización teórica de los APB y la asignación de los rangos de sustentabilidad surgió después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando todos los agroquímicos utilizados están listados como seguros, y tienen una aplicación controlada en todos o la mayoría; 0.75 cuando todos están listados como seguros, pero su aplicación es en su mayoría sin control; 0.50 cuando algunos de los agroquímicos utilizados están listados como seguros, y la aplicación es controlada en aquellos que no son seguros; 0.25 cuando algunos de los agroquímicos utilizados están listados como seguros, pero la aplicación es llevada sin control en aquellos que no son seguros; y 0.25 cuando ninguno de los agroquímicos utilizados se encuentra listado como seguro, y su aplicación puede ser o no controlada.

Número de prácticas agroecológicas aplicadas (%): Este indicador se encarga de medir en porcentaje el número de prácticas agroecológicas implementadas en el APB, para el manejo óptimo de los recursos naturales. Para la realización de este indicador se basó en el trabajo de Altieri y Nicholls, 2007. Para determinar este indicador se requerirá de la aplicación de entrevistas o encuestas a los productores por parte del evaluador, además de visitas en campo.

Los rangos de sustentabilidad surgieron de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera: un valor de 1.0 cuando más del 80 por ciento de las prácticas utilizadas son agroecológicas; 0.75 cuando entre el 60-79.9 por ciento de las prácticas utilizadas son agroecológicas; 0.50 cuando entre el 40-59.9 por ciento son prácticas agroecológicas; 0.25 cuando entre el 20-39 por ciento son prácticas agroecológicas; y 0.10 cuando menos del 20 por ciento son prácticas agroecológicas.

A continuación se presentan una lista no exhaustiva de prácticas o tecnologías identificadas como agroecológicas presentadas por Altieri y Nicholls, 2007.

- Control biológico
- Manejo integrado de plagas
- Uso de fertilización biológica y orgánica

- Reciclaje de desechos
- Manejo y conservación de suelos con técnicas tales como labranza mínima, sistemas agroforestales, rotación de cultivos, etc.
- Manejo eficiente del agua y del riego
- Manejo de praderas
- Estabilización selección de variedades de plantas y razas de animales resistentes a plagas, enfermedades o tolerantes a estrés ambiental.

Manejo de esquilmos agrícolas: Este indicador se encarga de monitorear el manejo del esquilmo agrícola en el predio, la evaluación de sustentabilidad puede basarse en normas nacionales o internacionales. En este trabajo se tomó de referencia la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, *Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario*; se define el *reuso* refiriéndose a su utilización para la producción de bioenergía, forraje y/o abono. El diseño de este indicador se derivó de los resultados arrojados por las entrevistas a los representantes de los sistemas-producto del Valle de Mexicali. Este indicador se obtendrá mediante la aplicación de entrevistas o encuestas a los productores por parte del evaluador, de la base de datos al respecto de la Sagarpa, y visitas a campo.

Los niveles de sustentabilidad surgieron de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Una valor de 1.0 cuando más o igual del 60 por ciento de los esquilmos producidos son reusados y no se práctica la quema; 0.75 cuando menos del 60 por ciento de los esquilmos son reusados y no se practica la quema; 0.50 cuando hay quemas pero con el pleno cumplimiento de la norma; 0.25 cuando hay quemas y con el cumplimiento parcial de la norma correspondiente; y 0.10 cuando hay quemas de esquilmos sin cumplimiento alguno de la norma.

Emisiones de GEI: Este indicador se encarga de medir el cumplimiento de la norma de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) de los vehículos automotores utilizados en el subsistema agrícola y de transformación. Para la evaluación de sustentabilidad se pueden tomar de referencia normas nacionales o internaciones existentes al respecto, el evaluador optará por la que considere más adecuada.

El diseño de este indicador y la asignación de los rangos de sustentabilidad surgieron de la caracterización teórica de los APB y de un análisis. Para el cálculo de las emisiones de GEI, se propone la metodología utilizada en el “Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del Estado de Baja California”. La estimación de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O por parte del transporte se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones de GEI} = \sum \text{Combustible consumido} \times \text{FE GEI}$$

donde:

- **Emisiones de GEI:** emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O por tipo de combustible (Kg GEI).
- **Combustible consumido:** cantidad de combustible quemado (en TJ).
- **FE GEI:** factor de emisiones predeterminado de GEI según el tipo de combustible (Kg gas/TJ). Se asume que el factor de oxidación de C es 1.

Cuadro 5. 5. Factores de emisión por tipo de combustible.

Tipo de combustible	Factor de emisión	
	INEGEI ⁹ 2002 (Kg C/GJ)	INEGEI 2002 (Kg CO ₂ /GJ)
COMBUSTIBLES DERIVADOS DEL PETRÓLEO		
Gasolina	18.9	68.61
Diesel	20.2	73.33
Combustóleo	21.1	76.59
Queroseno	19.6	71.15
Gas LP	17.2	62.44
COMBUSTIBLES DERIVADOS DEL GAS		
Gas natural	15.3	55.82

Fuente: Secretaría de Protección al Ambiente del gobierno del Estado de Baja California, 2007.

⁹ Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (INEGEI).

Cuadro 5. 6. Factores de emisión para metano y óxido nítrico.

Tipo de combustible	Factor de emisión	
	Metano (Kg CH ₄ /GJ)	Óxido nítrico (Kg N ₂ H/GJ)
Gasolina	110	11
Diesel vehicular	9.5	12
Diesel industrial	10	2
Combustóleo	10	2
Queroseno	10	2
Gas LP	3	0.3
COMBUSTIBLE DERIVADO DEL GAS		
Gas natural	3	0.3

Fuente: Secretaría de Protección al Ambiente del gobierno del Estado de Baja California, 2007.

Una vez que han sido determinados los niveles de emisiones de GEI, se determinará un promedio para cada tipo de vehículo automotor utilizado, y se contrastará cuando aplique con los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes de la NOM-041-SEMARNAT-2006, NOM-042-SEMARNAT-2003.

Para los niveles de sustentabilidad se asignó un valor de 1.0 cuando ambos subsistemas superan los requerimientos establecidos en la norma; 0.75 cuando sólo un subsistema supera con los requerimientos de la norma correspondiente, el otro solo la cumple; 0.50 cuando ambos cumplen la norma; 0.25 cuando sólo uno cumple la norma, el otro no cumple; y 0.10 cuando ambos no cumplen la norma.

Disponibilidad y reuso de agua (%): Este indicador se encarga de medir en porcentaje, la disponibilidad y reuso de agua para el subsistema agrícola y de transformación. Para la realización del indicador y la asignación de rangos de sustentabilidad se basó en la entrevista realizada a los productores del Valle de Mexicali y en la caracterización teórica del APB. Para la obtención de este indicador se acudirá a la Conagua para conocer el estado de los cuerpos de

agua que abastecen a los APB que se están evaluando, ya que este organismo es el encargado de administrar y preservar las aguas nacionales y sus bienes inherentes.

Los niveles de sustentabilidad quedaron de la siguiente manera. 1.0 cuando más del 70% del agua está disponible para riego y más del 50% es reciclada; 0.75 cuando más del 70% del agua está disponible pero menos del 50% es reciclada; 0.50 cuando del 30-69% está disponible y más del 50% del agua es reciclada; 0.25 cuando del 30-69% del agua está disponible pero menos del 50% es reciclada; 0.10 cuando menos de 29% está disponible y no se recicla el agua.

Empleo de organismos genéticamente modificados (OGM): Este indicador se encarga de monitorear el empleo OGM en el subsistema agrícola y/o de transformación. Se privilegia aquellos casos en donde no son utilizados, aunque en caso de ser así, es conveniente se realice bajo las medidas de control y seguridad estipuladas en normas nacionales o internacionales aplicables. En México, no existe una norma para el uso de OGM, sólo se cuenta con la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados y su reglamento. Para la elaboración de este indicador se basó en los criterios de sustentabilidad para la producción de bioenergía que propone en International Network for sustainable Energy-Europe, 2006; Umwelt Bundes Amt (UBA), 2008; y SEMARNAT-INE-UNAM-CIEco, 2008. Para la determinación de este indicador se aplicará una encuesta al personal del subsistema agrícola y de transformación que sean los encargados de manejar esta área y si es posible confirmar la información proporcionada con la dependencia de gobierno que gestione el uso de OGM para estos dos subsistemas.

Los niveles de sustentabilidad se crearon después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando no se usan OGM en el subsistema de transformación ni agrícola; 0.75 cuando se utilizan OGM solamente en el subsistema de transformación, con el cumplimiento de las normas correspondientes; 0.50 cuando en ambos subsistemas se utilizan OGM con el cumplimiento de las normas; 0.25 cuando en ambos subsistemas se utilizan OGM, pero solamente en uno es controlado; y 0.10 cuando en ambos subsistemas se usan OGM y en ninguno se cumplen las normas.

Incidencia de plagas, enfermedades, malezas, y otros factores externos: Este indicador se encarga de medir la incidencia que hay en el subsistema agrícola con respecto a plagas, enfermedades, malezas, y factores de estrés, tales como las sequías, las lluvias intensas, calor o frío extremo. Para la realización del indicador se basó y se modificó del propuesto por Altieri y Nicholls 2002; y para su determinación se realizará una encuesta a los productores y consulta a la base de datos de la Sagarpa.

Los niveles de sustentabilidad quedaron de la siguiente manera. Se fijó un valor de 1.0 cuando los cultivos son resistentes a plagas, enfermedades, malezas, y factores de estrés, es decir se tienen cultivos siempre vigorosos; 0.75 cuando son cultivos resistentes a plagas, enfermedades, malezas, y factores de estrés, donde menos del 20% presentan síntomas leves, y con rápida recuperación; 0.50 cuando los cultivos son resistentes a plagas, enfermedades, malezas, y factores de estrés, donde entre 20-45% presentan síntomas leves a severos con muestras de recuperación; 0.25 cuando los cultivos son susceptibles a factores externos, donde más del 50% presente síntomas severos pero con muestra de recuperación; y 0.10 cuando los cultivos son susceptibles a factores externos, donde más del 50% presenta síntomas con lenta recuperación.

Manejo de residuos: Este indicador se encarga de medir el manejo de los residuos generados por las actividades realizadas en el subsistema agrícola y de transformación, con excepción del esquileo agrícola. Para la realización de este indicador se basó en la caracterización teórica de los APB; y para su determinación se realizará una encuesta a los productores.

Los niveles de sustentabilidad se asignaron de la siguiente manera: se fijó un valor de 1.0 cuando hay reducción, reuso y disposición de residuos, según las normas nacionales o internacionales aplicables, y no hay generación de residuos peligrosos; 0.75 cuando hay reducción, reuso y disposición según las normas, pero hay generación de residuos peligrosos; 0.50 cuando los residuos son dispuestos adecuadamente según las normas correspondientes; 0.25 cuando la mayoría de estos residuos son dispuestos adecuadamente según normas; 0.10 cuando no hay disposición adecuada de los residuos.

Uso de energía renovable: Este indicador se encarga de medir la dependencia por combustibles fósiles en el subsistema agrícola y de transformación, ya que es muy importante

comprobar si se utiliza energía renovable y en qué porcentaje. Para la realización de este indicador se basó en la caracterización teórica de los APB y en el trabajo de Castro y Amador, 2007, y para su determinación se requerirá de una encuesta a los productores, para conocer los tipos y porcentajes de energías utilizadas.

Los niveles de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando ambos subsistemas utilizan preponderantemente formas de energías renovables (>60%); 0.75 cuando sólo un subsistema utiliza preponderantemente formas de energía renovables (>60%), y el otro subsistema usa algún tipo de energía renovable (<60%); 0.50 cuando ambos subsistemas han diversificado su consumo energético sin ser predominante; 0.25 cuando sólo un subsistema es altamente dependiente de energía fósil (>60%); 0.10 cuando ambos subsistemas son altamente dependientes de energía fósil (>60%).

5.3.21. Análisis de los indicadores ambientales

En esta investigación se eligieron once indicadores que permitirán medir la sustentabilidad en el área ambiental. Se conoce la existencia de una gran cantidad de indicadores aplicables para los sistemas agrícolas en este ámbito. No obstante, los indicadores propuestos en este trabajo son los que permiten medir los problemas ambientales más comunes que pudieran presentarse los APB.

Para la evaluación de sustentabilidad en el área ambiental en esta investigación se proponen seis atributos propuestos por el MESMIS, productividad, estabilidad, resiliencia, confiabilidad, equidad y autodependencia, con diez puntos críticos, diez criterios de diagnóstico y once indicadores.

En el atributo de productividad se propusieron cuatro indicadores, grado de erosión de suelo, niveles de fertilidad, aplicación de agroquímicos y números de prácticas agroecológicas aplicadas. Para el grado de erosión y los niveles de fertilidad se encuentran en el mismo

criterio de diagnóstico, degradación o conservación de suelos fértiles, y la alta degradación de suelos como punto crítico.

Para el atributo de estabilidad, resiliencia y confiabilidad se asignaron cinco indicadores, manejo de esquilmos agrícolas; emisiones de GEI, disponibilidad y reciclaje de agua, empleo de organismos genéticamente modificados, e incidencia de plagas, enfermedades, malezas y otros factores externos. El indicador de emisiones de GEI fue elegido ya que uno de los objetivos a cumplir es que el APB, sea con el curso del tiempo independiente de energías fósiles, y se reduzcan las emisiones de GEI. Por ello, se consideró fundamental proponer un indicador que permita corroborar que en el subsistema agrícola y de transformación se cumple lo estipulado en la NOM-041-SEMARNAT-2006 y LA NOM-042-SEMARNAT-2003.

El indicador de disponibilidad y reuso de agua fue elegido debido a la importancia de este recurso para el funcionamiento de los APB, y por los problemas de abastecimiento de agua que se han recrudecido en los últimos años. Los niveles de sustentabilidad se asignaron considerando que no se deben afectar otros usuarios del recurso, y que debe ser implementadas políticas para su tratamiento y reuso, sobre todo en el subsistema de transformación.

El indicador del empleo de OGM fue elegido y desarrollado porque es una de los aspectos más delicados que se manejan en la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos. El nivel más alto de sustentabilidad está vinculado con el rechazo en la utilización de OGM, aunque en caso de ser utilizados deben ser cumpliendo con los requerimientos de seguridad.

El indicador de incidencia de plagas, enfermedades, malezas, y otros factores externos, fue elegido pues es una medida del grado de vulnerabilidad del subsistema agrícola. Un agrosistema que sufre constantemente de estos problemas, sin una pronta recuperación es vulnerable, débil, que seguramente requerirá el uso de grandes cantidades de agroquímicos, lo que repercute económica y ambientalmente.

En el atributo de la equidad se propuso el indicador de manejo de residuos, siendo la contaminación por residuos sólidos el punto crítico. Se consideró necesario postular este indicador en la presente investigación, porque en todo el proceso de producción de bioenergía, desde la siembra del cultivo hasta su transformación a bioenergía, se generan diversos residuos, los cuales deben tener un buen manejo y disposición, y así como la implementación de políticas para la reducción y reuso.

En el atributo de autodependencia se propuso el indicador de uso de energía renovable, que a diferencia del indicador de emisiones de GEI, este indicador mide el porcentaje de combustibles fósiles utilizados. Se busca que a largo plazo, estos APB operen utilizando energías renovables, y los combustibles utilizados sean de origen no fósil. Además de la relevancia de este indicador, su medición es fácil y económica.

Los indicadores ambientales propuestos en esta investigación, se espera puedan utilizarse todos en las futuras evaluaciones de sustentabilidad para los APB, no se descarta que puedan utilizarse otros complementarios, ya que los APB tienen características que pueden variar en cada región.

5.33 Indicadores Sociales

Dentro de la sustentabilidad, los recursos humanos representan una parte muy fundamental, ya que además de las ganancias económicas y la conservación de los recursos naturales, se espera hayan beneficios, que se vean reflejados en la calidad de vida de los involucrados directa o indirectamente en el APB. A continuación se presentan los once indicadores sociales propuestos para esta investigación.

Cuadro 5. 7. Indicadores Sociales.

ATRIBUTOS DE SUSTENTABILIDAD	PUNTOS CRÍTICOS EN EL APB	CRITERIO DE DIAGNÓSTICO	INDICADOR
ADAPTABILIDAD	Poca capacitación	Capacidad de innovación	Capacitación
EQUIDAD	Bajo acceso a servicios de salud y básicos	Calidad de vida	Servicios básicos Servicios de salud (%)

EQUIDAD	Baja participación familiar	Participación activa de los miembros de la familia	Participación familiar
	Mano de obra infantil	Empleo infantil	Niños empleados
	Alto índice de deserción	Estabilidad de la producción del bioenergético	Permanencia de los productores (años)
AUTODEPENDENCIA (AUTOGESTIÓN)	Afectación a grupos vulnerables y discriminación	Grupos vulnerables	Participación de grupos vulnerables
	Abusos contra los derechos de la tierra	Derechos de la tierra	Respeto a los derechos de la tierra
	Bajo porcentaje de productores dueños de la parcela	Tenencia de la tierra	Productores con parcelas propias (%)
	Baja capacidad organizativa y de participación.	Autosuficiencia	Capacidad de organización y participación.
	Alta inseguridad alimentaria	Seguridad alimentaria	Uso de cultivos básicos en la producción

Productores capacitados: Este indicador mide la cantidad de productores que son capacitados continuamente mediante cursos, talleres, intercambios con otros sistemas productivos, donde estas capacitaciones están dirigidas a la calidad, protección al ambiente, y al bienestar ocupacional. Para la realización de este indicador se basó y modificó del trabajo presentado por Gomero y Velásquez, 2003, y para su determinación se consultará la base de datos de la asociación de productores de cultivos energéticos (en caso de existir) o quien cuente con esta información.

Los rangos de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando existen mecanismos continuos y documentados para la capacitación del personal, las capacitaciones están dirigidas a la calidad, protección al ambiente, y bienestar ocupacional; 0.75 cuando existen mecanismos continuos y documentados para la capacitación del personal, las capacitaciones son dirigidas hacia una o más áreas de calidad, protección al ambiente, y bienestar ocupacional; 0.50 cuando existen mecanismos para la capacitación, no hay calendarización y pueden o no estar documentados; 0.25 cuando los empleados fueron capacitados sólo una vez durante su permanencia en el sistema; y 0.10 cuando no existen mecanismos para la capacitación del personal.

Servicios básicos: Este indicador se encarga de medir la calidad de vida mediante la cantidad de servicios básicos contratados y regularizados con los que cuenta el personal asociado al APB. Para la realización de este indicador y los niveles de sustentabilidad se basó con algunas modificaciones del trabajo presentado por Rendón, 2004; y UN-ENERGY, 2007 y para su determinación se requerirá de la aplicación de una encuesta a los productores.

Los niveles de sustentabilidad quedaron de la siguiente manera: 1.0 cuando todos tienen acceso a servicio de agua potable entubada, electrificación y drenaje; 0.75 cuando se tiene acceso a servicio de agua potable entubada, electrificación, y desagüe y sanitario; 0.50 cuando se tiene acceso al servicio de agua potable y electrificación; 0.25 cuando se tiene únicamente el servicios de agua potable; y 0.10 cuando no se tiene acceso a ningún servicio.

Servicio de Salud (%): Este indicador se encarga de medir la calidad de vida mediante el porcentaje de integrantes del APB que cuentan con servicio médico. Para la realización de este indicador se basó en el trabajo presentado por González, 2004; UN-ENERGY, 2007 y para su determinación se requerirá de una encuesta a los productores del subsistema agrícola o acudir a las oficinas de recursos humanos de la empresa para consultar esta información en el subsistema de transformación.

Los rangos de sustentabilidad fueron adaptados de Cárdenas-Grajales *et al.*, s/a quedando de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando más del 80% cuentan con servicio médico; 0.75 cuando entre 60-79% cuentan con servicio médico; 0.50 cuando 40-59% cuentan con servicio médico; 0.25 cuando 20-39.9% cuentan con servicio médico; 0.10 cuando menos del 20 cuentan con servicio médico.

Participación familiar: Este indicador se encarga de medir la participación de los integrantes de la familia en las actividades de producción en el APB. La condición deseada es el involucramiento de toda la familia y minimizar la mano de obra externa a la comunidad o región. Una situación conveniente cuando hay participación de hijos, es que cuando éstos sean menores de 16 años, asistan a la escuela y su participación en el agrosistema sea de medio

tiempo. Este indicador se tomó del trabajo de Cárdenas-Grajales *et al.*, s/a, y para su determinación se requerirá de la aplicación de una encuesta a los productores y visita a campo.

Para los rangos de sustentabilidad quedaron de la siguiente manera: un valor de 1.0 cuando todos los integrantes de la familia participan; 0.75 cuando participa el padre, alguno de los hijos y otro integrante; 0.50 cuando el padre y/o madre participan y alguno de los hijos y/u otro integrante; 0.25 cuando participa sólo un integrante; y 0.10 cuando no hay participación familiar.

Niños empleados: Este indicador se encarga de medir si se emplean niños para la producción en el APB. La relevancia de este indicador es porque en el sector agrícola es donde se concentra la mayor mano de obra infantil, sin importar que es una actividad peligrosa para los menores (ADRS, 2007), por lo que se busca evitar su participación en la producción de cultivos energéticos y/o en la biorefinería.

La realización de este indicador se basó en los criterios de sustentabilidad que se proponen para los sistemas de producción de bioenergía en Umwelt Bundes Amt (UBA), 2008; SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, 2008, y para la determinación de este indicador se aplicarán encuestas a los productores, además de ser fundamental la visita a campo.

Los niveles de sustentabilidad surgieron de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando no se emplean niños; 0.75 cuando se emplean niños con remuneración económica y beneficios sociales¹⁰ suficientes, y educación; 0.50 cuando se emplean niños con remuneración económica y beneficios sociales insuficientes, y educación; 0.25 cuando los niños empleados tienen remuneración económica y beneficios sociales insuficientes, sin educación; 0.10 cuando los niños empleados tienen remuneración económica y beneficios sociales insuficientes, escasos o nulos, sin educación.

¹⁰ Los beneficios sociales son las prestaciones de naturaleza jurídica de seguridad social, no remunerativa, no dinerarias, no acumulable ni sustituible de dinero, que se le da al trabajador por si o por medio de terceros.

Permanencia de los productores en el APB: Este indicador mide en años la cantidad de productores que permanecen en el APB, debido a que esto ayuda a medir la estabilidad de la producción. La elaboración de este indicador se basó en el trabajo de Gomero y Velásquez, 2003, y para su determinación se consultará la base de datos de la asociación de productores de cultivos energéticos (en caso de existir) o quien cuente con esta información.

La asignación de los niveles de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Se fijó un valor de 1.0 cuando el productor ha permanecido más de 5 años en el sistema productivo; 0.75 cuando a permanecido entre 4 - 5 años en el sistema; 0.50 cuando ha permanecido entre 3 - 4 años en el sistema; 0.25 cuando ha permanecido entre 2 - 3 años en el sistema; y 0.10 cuando el productor ha permanecido 2 años o menos en el sistema.

Participación de grupos vulnerables: Este indicador se encarga de medir la participación de los grupos vulnerables en las actividades de producción del APB, refiriéndose como *vulnerables* a la población endémica de la región donde se encuentre el APB u otras zonas rurales cercanas. Uno de los impactos positivos que se promueven en este tipo de proyectos es la creación de empleos en las zonas y poblaciones rurales. La realización de este indicador se basó en el trabajo de Pfaumman, 2006, y de la entrevista aplicada a los agricultores del Valle de Mexicali. Para la determinación de este indicador se consultará en el departamento de recursos humanos en el subsistema agrícola y de transformación, y verificar el lugar de procedencia los empleados del APB.

Los niveles de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera: un valor de 1.0 cuando la mayoría de los trabajadores son endémicos de la región o de otras zonas rurales cercanas; 0.75 cuando existe un equilibrio entre el grupo vulnerable y los que habitan en zonas no rurales; 0.50 cuando la mayoría de los trabajadores no son endémicos de la región ni de otras zonas rurales aledañas; 0.25 cuando la participación de los grupos vulnerables puede o no ser representativa; 0.10 cuando la participación de las comunidades endémicas y/o zonas rurales cercanas es escasa o nula.

Respeto a los derechos de la tierra: Este indicador se encarga de medir si se cumplen los derechos del uso de la tierra¹¹ destinada a la producción de cultivos energético en el APB según la ley o reglamento correspondiente. Porque uno de los problemas que pueden surgir por la producción de bioenergía es el abuso hacia los derechos del uso de la tierra. En este trabajo se tomó de referencia la *Ley agraria y el reglamento de la ley agraria en materia de certificación de derechos ejidales y titulación de solares*. Para la realización de este indicador se basó en los trabajos presentados por EPFL, 2008; Umwelt Bundes Amt (UBA), 2008 y SEMARNAT-INE-UNAM-CIEco, 2008; la manera en que este indicador se puede determinar es mediante la verificación que no existan quejas al respecto, por parte de los productores.

Los niveles de sustentabilidad se asignaron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Se asignó un valor de 1.0 cuando no se han presentado abusos contra los derechos de la tierra de los productores según la ley o reglamento aplicable; 0.75 cuando del 1 al 20% de los productores han sido objeto de algún tipo de abuso contra sus derechos según lo estipulado en la ley o el reglamento; 0.50 cuando más del 20 al 40% de los productores han sufrido algún tipo de abuso contra sus derechos de la tierra según los estipulados en la ley o reglamento correspondiente; 0.25 cuando entre el 40 - 60% de los productores han sufrido algún tipo de abuso contra sus derechos; 0.10 cuando más del 60% de los productores han sufrido algún tipo de abuso.

Productores con parcelas propias (%): Este indicador permite medir en porcentaje los productores del APB que son propietarios de las parcelas utilizadas para la producción de cultivos agrícolas. La relevancia de conocer esta información es porque lo ideal es que el agricultor dueño de la parcela sea el que salga beneficiado con la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos. Para la realización del indicador se basó en el trabajo presentado por Ramírez *et al.*, 2008, y para su determinación se requerirá de la aplicación de encuestas, o mediante una consulta a la base de datos en la institución correspondiente.

¹¹ “El uso de la tierra” implica todo uso de la tierra, ya sea agrícola, habitual, recreativa, entre otros. Los métodos para establecer la propiedad y el uso de la tierra deben incluir publicidad, comunicación con líderes locales y métodos establecidos localmente para la recolección de datos. La falta de un título de propiedad legal no debe impedir la inclusión de las comunidades locales en los proyectos de biocombustible (EPFL, 2008).

Los niveles de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando más del 80% de los productores son propietarios; 0.75 cuando entre 60-79% con propietarios; 0.50 cuando entre el 40-59% de los productores son propietarios; 0.25 cuando entre el 20-39% con propietarios; y 0.10 cuando menos del 20% son propietarios.

Capacidad de organización y participación: Este indicador se encarga de medir la capacidad organizativa que se tiene entre los subsistemas del APB, para la venta, compra, asesoría y otros aspectos donde participe el productor, donde el objetivo sea mejorar la producción en el APB. Para la realización de este indicador se basó en la entrevista aplicada a los agricultores del Valle de Mexicali, Gomero y Velásquez, 2003 y Frías y Delgado, 2003; y para su determinación se aplicaran encuestas a los productores, y visita a campo.

Los niveles de sustentabilidad surgieron después de un análisis, los cuales quedaron de la siguiente manera. Un valor de 1.0 cuando existe una organización oficial (documentada) entre subsistemas. La participación de los involucrados en la toma de decisiones es continua y activa, el productor está involucrado en toda la cadena de producción, es decir desde el cultivo hasta el bioenergético; 0.75 cuando existe una organización oficial, la participación de los involucrados en la toma de decisiones es coyuntural; 0.50 cuando se tienen como objetivo establecer una organización pero no se ha concretado, existe la participación de los involucrados; 0.25 cuando existe la participación de los involucrados en forma moderadamente organizada; 0.10 cuando no hay organización ni participación de los involucrados.

Uso de cultivos básicos y autosuficiencia: Este indicador se encarga de medir si en el APB se emplean cultivos básicos para la generación de bioenergía, y donde el país no sea autosuficiente, es decir, se importe para abastecer la demanda nacional. El objetivo de este indicador es evitar que esta producción genere competencia con alimentos. Según la Sagarpa, 2009 se consideran cultivos básicos: Maíz grano, trigo, frijol, sorgo y arroz pulido. La realización de este indicador se basó en diversos trabajos sobre criterios de sustentabilidad para la obtención de bioenergía presentados por WWF, 2006; Umwelt Bundes Amt (UBA),

2008; Roy Society, 2008; Biomass Technology Group (BTG), 2008; y SEMARNAT-INE-UNAM-CIEco, 2008; y para su determinación se aplicaran encuestas a los productores, consulta a la base de datos de la Sagarpa y visitas a campo.

La asignación de los niveles de sustentabilidad surgieron después de un análisis, y quedaron de la siguiente manera: un valor de 1.0 cuando no se utilizan cultivos básicos para la producción de bioenergía; 0.50 cuando se emplean cultivos básicos para esta producción, pero el país es autosuficiente en ellos; 0.10 cuando se utilizan cultivos básicos y el país no es autosuficiente en ellos.

5.3.31. Análisis de los indicadores sociales

Los indicadores de sustentabilidad para el área social, aplicables para los sistemas agrícolas en general, están menos desarrollados que los económicos y ambientales (Maser *et al.*, 1999). Por lo anterior, en esta investigación se hace un mayor esfuerzo en esta área, y se proponen once indicadores, divididos en diez criterios de diagnóstico, diez puntos críticos y tres atributos de sustentabilidad, la adaptabilidad, equidad y autodependencia.

En el atributo de adaptabilidad se asignó el indicador de capacitación, éste fue propuesto porque se considera primordial la capacitación de los agricultores y del personal contratado en el subsistema de transformación. Esto porque los cultivos energéticos son especies nuevas en algunas regiones y los productores pueden desconocer sobre plagas, cantidad de riegos, tipos de fertilizantes, entre otras cuestiones que son necesarias para el óptimo desarrollo del cultivo, además de intercambiar otro tipo de información mediante los cursos y talleres con otros productores y mejorar el funcionamiento del APB. La capacitación en el subsistema de transformación es importante pues es importante que conozcan a la perfección el proceso y capacitarlos en todas las innovaciones que se vayan incorporando a esta producción.

En el atributo de equidad se propusieron cinco indicadores, servicios básicos, servicios de salud, participación familiar, niños empleados y permanencia de los productores en un APB. Los indicadores de servicios básicos y servicio de salud, fueron elegidos para medir la calidad

de vida de los integrantes, lo deseable es que derivado de la instalación del APB en la región, influya de forma positiva en la calidad de vida, mediante la mejora en la oportunidad al acceso a los servicios básicos y de salud en las familias. Los indicadores se basaron de los trabajos de González, 2004; Rendón, 2004; y UN-ENERGY, 2007.

El indicador de participación familiar fue considerado en este grupo de indicadores, porque se considera que la participación en las actividades del APB de los integrantes de la familia disminuye la mano de obra externa. Es decir, se busca que de forma preferencial sean involucrados/contratados personas de las comunidades rurales, en lugar de personal externo lo que puede segregar a la comunidad rural de los beneficios del APB.

El indicador de niños empleados en el APB fue considerado en esta investigación, porque el empleo de mano de obra infantil en la agricultura es muy común en los países subdesarrollados (ADRS, 2007). Aunque en México existe la Ley para la protección de los derechos de niñas, niños y adolescentes, donde se estipula que se debe proteger a los niños de los abusos y explotación, esta actividad no se detiene.

Por las razones anteriormente mencionadas, en los trabajos de Umwelt Bundes Amt (UBA), 2008 y SEMARNAT-INE-UNAM-CIEco, 2008, se plantea que debería prohibirse y no fomentarse el empleo de mano de obra infantil en los APB. Excepto en los agrosistemas familiares y únicamente cuando el trabajo no interfiera con las actividades de educación y de recreación del niño. Por esos motivos los niveles que se asignaron como el óptimo es cuando no se emplean niños; los intermedios cuando se emplean niños pero con remuneración económica, beneficios sociales y educación; y el peor escenario es que se empleen niños sin remuneración económica, beneficios sociales suficientes y sin educación.

Permanencia de los productores en los APB fue el último indicador del atributo de equidad. Este indicador se tomó del trabajo de Gomero y Velásquez, 2003, pues se considera que la permanencia de los productores en los APB es muy importante para que éstos pueden seguir funcionando.

El último atributo propuesto para el área social fue autodependencia o autogestión. En este atributo se propusieron cinco indicadores; participación de grupos vulnerables, respeto a los derechos de la tierra, productores con parcelas propias, capacidad de organización y participación, y uso de cultivos básicos en la producción.

El indicador sobre participación de los grupos vulnerables, busca comprobar que las ventajas generadas de la producción de bioenergía sean materializadas como desarrollo rural (Pfaumman, 2006). Con este indicador se permite medir en porcentajes que cantidad de los empleados del subsistema de transformación y agrícola pertenecen a la región o ejidos cercanos al APB. Por eso, se señala como óptimo cuando la mayoría de los trabajadores son endémicos de la región de zonas rurales cercanas, en los niveles intermedios que algunos de los trabajadores sean endémicos, y como el escenario no deseado cuando la mayoría de los empleados no son de la región.

Respeto a los derechos de la tierra se eligió en este grupo de indicadores, ya que los proyectos de producción de bioenergía podrían originar abusos en la compra o renta de los predios agrícolas. Por ello, la tierra destinada a la generación de cultivos energéticos, en relación a los títulos de propiedad o permisos, debe estar bien definida. El indicador se determina mediante las quejas de los productores, donde el valor óptimo es que no se hayan presentado abusos y el peor escenario es que la mayoría de los productores hayan sufrido algún tipo de abuso.

El indicador de los productores con parcelas propias se adjuntó a los demás indicadores sociales, ya que se espera que las ventajas que pudieran surgir de la producción de bioenergía en sistemas agrícolas, sea la ganancia económica de los agricultores dueños de las parcelas, que en su mayoría son pequeños propietarios. Este indicador se basó en el trabajo de Ramírez *et al.*, 2008; y en los niveles de sustentabilidad, se asignó como óptimo cuando la mayoría de los productores son los dueños de las parcelas, y el escenario menos alentador cuando menos del 20 por ciento son propietarios.

La capacidad de organización y participación es un indicador que se propone en esta investigación, porque los cultivos energéticos son especies agrícolas poco conocidas o

desconocidos por algunos de los agricultores, por lo que requerirán organizarse para la venta, compra de insumos, y asesoría técnica. El indicador se tomó del trabajo de Gomero y Velásquez, 2003 y Frías y Delgado, 2003, y se le dio el valor óptimo cuando existe una organización oficial (documentada) entre subsistemas; y el peor escenario es cuando no hay organización ni participación de los involucrados.

Por último, se propuso el indicador del uso de cultivos básicos y autosuficientes, porque unos de los aspectos más temidos de la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos es el empleo de cultivos conocidos como básicos, es decir, que son parte de la alimentación humana de la región o país. Por esta razón, este indicador tomado de las consideraciones de WWF, 2006; Umwelt Bundes Amt (UBA), 2008; Royo Society, 2008; Biomass Technology Group (BTG), 2008; y SEMARNAT-INE-UNAM-CIEco, 2008, se asigna el mejor escenario cuando no se utilizan los cultivos básicos, y el peor nivel cuando se utilizan cultivos básicos, porque pone en riesgo la seguridad alimenticia.

5.4 Índice de sustentabilidad

La realización del índice de sustentabilidad (IS) se basó en los indicadores económicos, ambientales y sociales propuestos. Después que estos indicadores fueron normalizados en una escala ordinal de 0.10 a 1.0, donde 0.10 indica condiciones menos favorables y 1.0 las condiciones óptimas o deseables. Cada indicador normalizado podrá ser ponderado en una escala 1 – 5, según su relevancia en la región de estudio, donde 1 indica menos relevancia y 5 altamente relevante.

De esta forma, fue posible agrupar los indicadores normalizados por área de evaluación, económica, social y ambiental (SIE, SIA y SIS). Así, se generaron tres subíndices de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$SI_x = \sum_{i=1}^n \left[I_{N_i} \times \left(\frac{V_{P_i}}{\sum_{i=1}^n V_{P_i}} \times 5 \right) \right] \quad [1]$$

donde:

SI_x es el subíndice del área de estudio (económica, social o ambiental), rango de 0.5 – 5.0

I_N es el valor del indicador normalizado, rango de 0.10 – 1.00

V_P es el valor ponderado asignado, rango de 1.0 – 5.0

De esta forma, los tres subíndices obtenidos (SIE, SIA y SIS), pueden adquirir un valor de 0.5 cuando las condiciones de sustentabilidad son mínimas y un valor máximo de 5.0 en condiciones de alta sustentabilidad. Dentro de las principales características de estos subíndices radica su homogeneidad a pesar de evaluar diferentes áreas, su independencia en el número de indicadores normalizados usados por lo pueden agregarse o quitarse indicadores normalizados según se considere necesario, y principalmente la sencillez en su interpretación. De esta forma, al llevar a cabo una evaluación de sustentabilidad en un caso de estudio, será fácilmente identificable cuál de las dos situaciones es más sustentable que la otra.

Finalmente, estos tres subíndices fueron promediados para obtener el Índice de Sustentabilidad (IS) según la siguiente ecuación:

$$IS = \frac{SIE + SIA + SIS}{3} \quad [2]$$

donde:

IS índice de sustentabilidad, rango de 0.5 – 5.0

SIE subíndice económico

SIA subíndice ambiental

SIS subíndice social

El objetivo de integrar los subíndices mediante un promedio, fue que cada uno de ellos tenga una representación equitativa en el IS, es decir, se considera con la misma importancia el área social, económica y ambiental a pesar de que el número de indicadores propuestos pudiera ser diferente.

Al igual que los subíndices, el IS adquirirá un valor máximo de 5.0 cuando todos los indicadores se encuentren en los niveles marcados como deseados o sustentables durante la evaluación de un APB, mientras que adquirirá un valor mínimo de 0.5 cuando la evaluación de los indicadores indique niveles no deseados o no sustentables según lo establecido previamente. Este IS representa una herramienta sencilla para monitorear el grado de sustentabilidad entre diferentes escenarios de APB primarios o secundarios, ya sea en forma longitudinal o transversal.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Actualmente, existe una gran variedad de tecnologías disponibles para la producción de bioenergía, ya sea en forma de calor, electricidad y biocombustibles. Así mismo, hay un amplio rango de materias primas que pueden ser aprovechadas para este fin, desde azúcares simples como la sacarosa, hasta polisacáridos complejos como la celulosa. A pesar de esto, fue posible la sistematización de estas tecnologías y materias primas en lo que se denominó como Agrosistemas de Producción de Bioenergía (APB).

Estos APB, fueron definidos como aquellos conformados por el subsistema agrícola, de transformación y social. La caracterización propuesta de los diferentes escenarios de APB, mediante la definición de flujos de entrada y salida, así como la relación entre los subsistemas, fue una herramienta útil que permitió identificar los puntos críticos clave en común. La identificación de estos puntos en común para los APB ayudó a disminuir el abanico de puntos críticos e indicadores existentes en todos los agrosistemas.

Para encontrar puntos críticos se realizaron diferentes actividades, tales como la caracterización teórica, entrevistas a los agricultores del Valle de Mexicali, y revisión bibliografía especializada. De la primera actividad se logró encontrar los puntos críticos relacionados principalmente con el área ambiental. Los puntos críticos identificados fueron la alta dependencia a los combustibles fósiles y las emisiones de GEI, la agrocontaminación, la baja disponibilidad y/o reciclaje de agua, y la contaminación por residuos.

La aplicación de entrevistas a los agricultores del Valle de Mexicali, permitió complementar la información obtenida de la caracterización de los Agrosistemas. En el área económica se reveló la importancia de la rentabilidad, de la competencia alimentaria, la innovación tecnológica, los apoyos económicos, la accesibilidad a créditos, y la independencia económica; en el área ambiental se identificó la problemática que puede generar la quema de

los esquilmos agrícolas; y en el área social destacó la capacitación, la capacidad organizativa y la inseguridad alimentaria.

La consulta bibliográfica especializada consiguió encontrar puntos críticos en las tres áreas de estudio. En el área económica se identificaron la productividad, la baja calidad del producto, la baja innovación tecnológica, y la escasa remuneración y diversidad de ingreso; en el ámbito ambiental se permitió localizar la calidad del suelo, el uso de las prácticas agroecológicas, las emisiones de GEI, uso de organismos genéticamente modificados , y la incidencias de plagas, enfermedades, malezas y otros factores que afecten a los cultivos; y por último en el área social se logró identificar el acceso a servicios de salud y básicos, la participación familiar, la mano de obra infantil, el índice de deserción, creación de empleos para los habitantes de las comunidades rurales donde se encuentre el APB, los derechos de la tierra, productores dueños de parcelas y seguridad alimentaria.

De acuerdo a la conformación de los APB primarios y secundarios, los puntos críticos en común identificados, son los que permiten evaluar la sustentabilidad de estos sistemas en el ámbito económico, ambiental y social, lo cual fue suficiente para validar la primera parte de la hipótesis planteada.

La aplicación de la metodología propuesta por el MESMIS, permitió trasladar la información contenida en los puntos críticos en indicadores. De esta manera, la sistematización de la información en APB, y la aplicación de la metodología de MESMIS permitió plantear un conjunto de indicadores dentro del área social, económica y ambiental, que en principio son suficientemente robustos para su aplicación en la mayoría de los contextos regionales y nacionales.

La integración de los indicadores de las diferentes áreas de estudio (económico, social y ambiental), se logró mediante su normalización en una escala ordinal, la cual fue vinculada con un gradiente de sustentabilidad. Así, los indicadores fueron integrados por área de estudio, resultando en tres subíndices, ambiental, económico y social.

Lo anterior simplificó el diseño del Índice de Sustentabilidad (IS), al incorporar cada subíndice como una media aritmética. Siendo está la manera en que las variables o puntos críticos fueron integrados para evaluar la sustentabilidad en los APB por lo que se valida la segunda parte de la hipótesis.

Los puntos críticos identificados en este trabajo, han sido previamente planteados en diversos trabajos, pero hasta el momento no se habían concretado en forma de indicadores. Por lo que, la principal contribución del presente trabajo fue la recopilación de los criterios más relevantes y aplicables a todos los escenarios de APB y, su conceptualización en indicadores e integración cuantitativa mediante un Índice de Sustentabilidad.

El concepto de sustentabilidad en un sistema productivo, sólo puede ser concebido al evaluar y comparar dicho sistema con otro de referencia, bajo ciertos criterios previamente fijados dentro de las áreas de estudio económica, ambiental y social. De esta forma, será posible decir cuál de los sistemas es más o menos sustentable. La producción de bioenergía sustentable, requiere de herramientas que permita evaluar el grado de cumplimiento de las metas económicas, el manejo adecuado y respetuoso de los recursos naturales, y la satisfacción de las necesidades de las comunidades involucradas. En este trabajo, se propone como herramienta de evaluación de la sustentabilidad en APB, un Índice de Sustentabilidad. Sin embargo, la aplicación de este Índice, requiere apoyarse de leyes, normas, programas, planes de desarrollo que estén orientados a regular puntos clave del proceso de obtención del bioenergético, desde la obtención del cultivo hasta su transformación en energía.

A este último respecto, durante la presente investigación se encontró que en el país se carece de normas que rijan en materia de insumo, calidad del producto, proceso, u otras actividades relacionadas con la producción de bioenergía. Tampoco existe un programa específico que apoye a los agricultores y/o productores durante el establecimiento de estos sistemas productivos y hay una total carencia de incentivos económicos. Los planes de desarrollo no son compatibles con el modelo energético en donde se incluye a los bioenergéticos, y aunque se cuenta con la Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, no hay regulaciones sobre cuestiones básicas como las mezclas de gasolina con etanol, o diesel con biodiesel.

Por último, durante todo el proceso para el diseño del IS para los APB, se advirtió la importancia de aplicar conocimientos en diferentes áreas de estudio. Por lo que, se asegura que para cualquier estudio sobre la sustentabilidad, es indispensable trabajar de una manera multidisciplinaria.

6.2 Recomendaciones

Al culminar esta investigación, el diseño de un Índice de Sustentabilidad no está completo hasta su aplicación y validación. Por tanto, es necesario que el Índice propuesto en este trabajo sea aplicado para comparar la sustentabilidad en dos agrosistemas de interés, así como probar su aplicabilidad bajo diferentes contextos locales y nacionales.

Se recomienda que la evaluación de sustentabilidad en los APB, se conforme de un grupo multidisciplinario para la proposición de herramientas que intenten emplearse para la comparación de la sustentabilidad de diferentes tipos de sistemas. La sustentabilidad debe ser concebida como la suma integral del desarrollo de las áreas económica, social y ambiental. Por tanto, expertos de cada área deben participar en este tipo de proyectos con el fin de asegurar un equilibrio. El presente trabajo, contó con la participación de expertos de diferentes áreas del conocimiento, sin embargo, se reconoce la necesidad de abrir la discusión a otros sectores.

Existe una deficiencia a nivel nacional sobre normatividad, programas, leyes o planes de desarrollo referentes a la producción de bioenergía, que podrían ser subsanadas por diversas actividades. Por ejemplo, es área de la Sener estipular normas referentes al proceso de transformación. En el caso de la calidad faltan normas compatibles con los estándares a nivel mundial, para que los productores de bioenergía estén en posibilidad de competir en los mercados internacionales, como lo han hecho en países como Austria, Estados Unidos, España y otros.

En base a la revisión de la normatividad con respecto a todo el proceso de producción de bioenergía. La Sagarpa podría ser el organismo que elaboré las normas para el proceso de obtención del cultivo energético, tales como el uso de agroquímicos, de agua, de cambio de

uso de suelo, entre otras cuestiones relacionadas con la producción de bioenergía en sistemas agrícolas. Por ejemplo, no se cuentan con normas que regulen el uso de algunos plaguicidas, que han sido restringidos en otros países, y en México aún se siguen utilizando (Jiménez, 2008); el uso de agua y suelo para esta producción tampoco se han regulado.

Este trabajo sugiere incentivar a los productores de bioenergía, por los impactos positivos que se considera generaría estos sistemas. Se recomienda que la Sagarpa sea la encargada de brindar y regular los incentivos económicos a los agricultores que estén produciendo cultivos energéticos para la transformación en bioenergía.

Es importante que la Sagarpa organice talleres de información para los agricultores de cultivos energéticos, con el objetivo de mostrarles los impactos positivos y negativos de la producción de bioenergía. Los aspectos que deben destacarse son los problemas que pudieran surgir por utilizar cultivos agrícolas que son básicos para la alimentación, y los beneficios de cultivar insumos para el mercado del bioetanol y biodiesel. También es relevante que la Sagarpa lleve un control con las materias primas a utilizar, y regularlo mediante permisos o cualquier otra herramienta.

Por lo anterior, se considera importante continuar con los estudios sobre la obtención de bioenergía a partir de la materia lignocelulosa, y destinar más recursos a los centros de investigación que están trabajando en implementar procesos eficientes, rentables y ambientalmente adecuados. Especialmente a partir de esquilmos agrícolas, ya que es un tipo de biomasa abundante y que en ciertas regiones se encuentra disponible. Para los proyectos de bioenergía a partir de esquilmos agrícolas, podría existir un programa donde se brinden incentivos económicos a los agricultores que vendan estos residuos para su transformación. La Sagarpa o la Semarnat podrían ser las secretarías encargadas de regular este programa.

En el caso de la elección del insumo agrícola, se recomienda utilizar cultivos que no requieran suelos fértiles, de grandes cantidades de agroquímicos y agua. No es posible recomendar de forma general especies agrícolas para la obtención de bioenergía, ya que esto dependerá de las condiciones geográficas, climáticas y sociales de la región.

BIBLIOGRAFÍA

- ADRS, 2007, *El trabajo infantil*, Agricultura y Desarrollo Rural Sostenibles (ADRS), en <[ftp://ftp.fao.org/SD/SDA/SDAR/sard/SARD%20Child%20Labour%20%20spanish%20\(electronic%20version\).pdf](ftp://ftp.fao.org/SD/SDA/SDAR/sard/SARD%20Child%20Labour%20%20spanish%20(electronic%20version).pdf)>, consultado el 20 de junio de 2010.
- Agencia Andaluza de la energía, 2007, *Situación de la biomasa en Andalucía*. Consejería de innovación, ciencia y empresa. Comunidad Autónoma de Andalucía, España. 35 p., en <<http://www.dibiosur.com/doc/es-situacion-biomasa-andalucia.pdf>>, consultado 13 de julio de 2009.
- Aguirre Sergio, 2007, *Evaluación de la sustentabilidad en predios hortícolas Salteños, resumen del trabajo*, Universidad de la República, 13 p.
- Altieri, Miguel, 1994, “Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable”, *Agricultura técnica*, Chile, vol. 54, núm. 4:371-386
- Altieri, Miguel, 1999, *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*, Editorial Nordan–Comunidad, 4ª edición, Uruguay, 338 p.
- Altieri, Miguel y Clara, Nicholls, 2000, *Agroecología. Teoría y práctica por una agricultura sustentable*, serie textos básicos para la formación ambiental, Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, México, 250 p.
- Altieri Miguel y Clara Nicholls, 2007, “Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales”, *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, Costa Rica, núm. 64, pp. 17-24
- Altieri M. y C. Nicholls, 2007, “Conversión agroecológica de sistemas convencionales de producción: teoría, estrategias y evaluación”, *Ecosistemas*, núm. 1, pp. 1-10
- Alvarado Carol, s/a, [tesis de grado], Bases para un uso sustentable del agroecosistema ganadero, en los sectores cuesta Alvarado y cerro rosado, en la cuenca del río Emperador, XI región Aysén, Universidad Católica de Temuco.
- Álvarez, Joel, 2005, *Los orígenes de la industria petrolera en México 1900-1925*, Archivos históricos de petróleos mexicanos PEMEX, México, 307 p.
- Asociación Naturland, 2000, *Agricultura orgánica en el trópico y subtropical*, guías de 18 cultivos: caña de azúcar, Asociación Naturland, Alemania, 20 p.
- Astier, Marta, Omar Masera y Yankuic Galván-Miyoshi, 2008, *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*, Editado por la Sociedad Española de agricultura ecológica (SEAE), el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM), el Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), el Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIECO-UNAM), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C. (GIRA), Mundi-Prensa México, S.A. de C.V. y la Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable, España, 200 p.
- ASTM, 2010a, D6751 Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100), American Society for Testing Materials (ASTM), en <<http://www.astm.org/Standards/D6751.htm>>, consultado el 13 de mayo de 2010.
- ASTM, 2010b, D4806-Standard specification for denatured fuel ethanol for blending with gasolines for use as automotive spark-ignition engine fuel, American Society for Testing Materials (ASTM), en <<http://www.astm.org/Standards/D4806.htm>>, consultado el 13 de mayo de 2010.

- Asturias Miguel, 2004, *Maíz de alimento sagrado a negocio del hambre*, Acción ecológica, Red por una América latina libre de transgénicos, Ecuador, 111 p.
- Bakkes C., G. Van Den Born, J. Helder, R. Swart, C. Hope y J. Parker, 1994, *An Overview of environmental indicators: State of the art perspectives*, UNEP/RIVM, Kenia, 72 p.
- Balat Mustafa, Havva Balat y Cahide Oz, 2007, “Progress in bioethanol processing”, *Progress in energy and combustion science*, Turquía, 23 p.
- Ballesteros William, Marco Otto y Héctor Ordóñez, 2008, “Sistemas agroforestales tradicionales en el Consejo Comunitario del Bajo Mira y Frontera en Tumaco, Nariño, Colombia”, *Agroforestería en las Américas*, núm. 46, pp. 73-80.
- Bello Marco y María Pino, 2000, *Preparación de suelos*, Centro Regional de Investigaciones Kampenaike, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, Punta Arenas, Chile, Boletín núm. 18, pp. 5-21
- Bermúdez J., M. Canovas, A. Manjon, J. Iborra y J. Howell, 1988, *La digestión anaerobia*, Secretariado de Publicaciones, Murcia: Universidad, España, 75 p.
- Bioenergéticos Mexicanos SAPI de CV, 2010, en: < <http://biomex.org.mx>>, consultado el 2 de mayo de 2010.
- Bosshard, A, 2000, “A methodology and terminology of sustainability assessment and its perspectives for rural planning”, en Torres, Pablo, Luis Rodríguez y Oscar Sánchez, 2004, “Evaluación de la sustentabilidad del desarrollo regional. El marco de la agricultura”, *Sociedad y Región*, vol. XVI, núm. 29, pp.109-144
- Brink Ten, B. J., S. Hosper y F. Colin, 1991, A quantitative method for description and assessment of ecosystems: the AMOEBA-approach, en Masera, Omar, Marta Astier y Santiago López-Ridaura, 1999, *Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales*, Mundi-Prensa México, S.A. de C.V, México, 109 p.
- Brunett L., C. González y García L., 2005, “Evaluación de la sustentabilidad de dos agroecosistemas campesinos de producción de maíz y leche, utilizando indicadores”, *Livestock Research for Rural Development*, núm. 17, vol. 17, 14 p.
- BTG, 2008, Sustainability criteria & certification systems for biomass production, Biomass Technology Group (BTG), DG TREN-European Commission, The Netherlands, 117 p.
- Calva, José Luis, 1996, “La reforma económica de México y sus impactos en el sector agropecuario”, Capítulo I, en Bovin, Philippe, comp., *El campo Mexicano. Una modernización a marchas forzadas*, Centro Francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, México, pp. 31-55.
- Cantrell KB, T. Ducey , KS Ro y PG. Hunt, 2008, “Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities”, *Bioresource Technology*, núm. 99, pp. 7941–7953.
- Cárdenas-Grajales Gloria, Hernán Giraldo, Álvaro Idárrago y Laura Vásquez, s/a, “Desarrollo y validación de metodología para evaluar con indicadores la sustentabilidad de sistemas productivos campesinos de la asociación de caficultores orgánicos de Colombia – acoc”, ponencia, Disponible en internet: <http://www.javeriana.edu.co/fear/m_des_rur/documents/Cardenas-ponencia.pdf>, consultado el 8 de marzo de 2010.
- Castro, J. y M. Amador, 2006, *Enfoque metodológico: emisión de gases efecto invernadero, la fijación de carbono y la agricultura orgánica*, CEDECO, San José, Costa Rica, 59 p.
- CEPAL, 2009, *Base de datos y publicaciones estadísticas*, Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL), en: < <http://websie.eclac.cl/sisgen/ConsultaIntegrada.asp?IdApl icacion=14&idioma=e>>, consultado el 2 de noviembre de 2009.

- Chiappe M., G. F. Bacigalupe y S. Dogliotti, 2009, *Indicadores sociales para sistemas de producción familiares intensivos*, en el 3er. seminario de cooperación y desarrollo en espacios rurales iberoamericanos. Sostenibilidad e indicadores, 1-4 de junio, Almería España, 8 p.
- Claassen, P.A.M., van Lier, J.B., López Contreras, A.M., van Niel, E.W.J., Sijtsma, L., Stams, A.J.M., de Vries, S.S., Weusthuis, R.A., 1999. "Utilisation of biomass for the supply of energy carriers". *Applied Microbiology and Biotechnology*, núm. 52, pp. 741-755.
- Claridades agropecuarias, 2007, "Biocombustibles de segunda generación", *Claridades agropecuaria*, México, núm. 169, pp. 73-74.
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 1993, *Reglamento de la Ley Agraria*, en *en materia de certificación de derechos ejidales y titulación de solares*, Diario Oficial de la Federación (DOF), México, 14 p.
- Commissioned by the Energy Transition's Interdepartmental Programme Management (IPM), 2007, "Testing framework for sustainable biomass", *sustainable production of biomass*, 60 p.
- Demirbas Ayse y Imren Demirbas, 2007, "Importance of rural bioenergy for developing countries", *Energy conversion and management*, núm. 48, pp. 2386-2398.
- Demirbas A., 2009, "Progress and recent trends in biodiesel fuels", *Energy Conversion and Management*, núm. 50, pp. 14-34.
- Demirbas Fatih, Mustafa Balat y Havva Balat, 2009, "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development", *Energy Conversion and Management*, núm. 50, pp. 1746-1760.
- DOE, 2006, *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol. A Joint Research Agenda*, Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), Estados Unidos. en <<http://www.doegenomestolife.org/biofuels>>, consultado 13 Abril de 2009.
- EPFL, 2008, *Principios y criterios globales para la producción sostenible de biocombustibles, Versión Cero*, Centro de energía de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Mesa redonda sobre biocombustibles sostenibles, 10 p.
- Escalante, Roberto y Horacio, Catalán, 2008, "Situación actual del sector agropecuario en México: perspectivas y retos", *Economía informa*, núm. 350, pp. 9-25.
- Espinosa José, Steve Wiggins, Arturo González y Ubaldo Aguilar, 2004, "Sustentabilidad económica a nivel de empresa: aplicación a unidades familiares de producción de leche en México", *Téc Pecu Méx*, México, núm. 42, pp. 55-70
- Fallas, Greivin, Mario, Chacon y Jonathan Castro, 2009, "Sostenibilidad de sistemas agrícolas de fincas ecológicas y tradicionales en Costa Rica", *Cuaderno de investigación UNED, edición en línea*, Costa Rica, núm. 1, vol. 2, pp.151-161
- FAO, 2004, Unified Bioenergy Terminology (UBET), en SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, 2008, *Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México*, SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, México, 99 p.
- FAO, 2008, *Oportunidades y desafíos de la producción de biocombustibles para la seguridad alimentaria y del medio ambiente en América Latina y el Caribe*, 30ª Conferencia regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Food and Agricultural Organization (FAO), Brasil, 8 p.
- Frías Sandy y Freddy Delgado, 2003, Estudio de indicadores de sostenibilidad del sistema familiar campesino en ecosistema de montaña: el caso de la comunidad de Tres Cruces, *LEISA Revista de Agroecología*, ocho estudios de caso, pp. 32-38.

- Gomero Luis y Héctor Velásquez, 2003, “Evaluación de la sustentabilidad del sistema de algodón orgánico en la zona de trópico húmedo del Perú”, *LEISA Revista de Agroecología*, ocho estudios de caso, pp. 47-52.
- González, Héctor [tesis de doctorado], 2004, “Análisis de la sostenibilidad del cultivo de camarón en sonora, México”, La Paz, Baja California Sur, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR), 73 p.
- Gómez, Manuel y Rita Schwentesius, 2004, *TLCAN y Sector Agroalimentario: 10 años de experiencia*, CIESTAAM-Chapingo, México, 16 p.
- González, María Eugenia, 2009, “Producción de bioenergía en el Norte de México: tan lejos y tan cerca”, *Frontera Norte*, Colegio de la Frontera Norte A.C., México, vol. 21, núm. 41, enero-junio, pp. 177-183.
- Hansson P., A. Baky, S. Ahlgren, S. Bernesson, A. Nordberg, O. Noreén y O. Pettersson, 2007, “Self-sufficiency of motor fuels on organic farms – Evaluation of systems based on fuels produced in industrial-scale plants”, *agricultural systems*, núm. 94, pp. 704-714
- Harding K.G., J.S. Dennis, H. Von Blottnitz y S.T.L. Harrison, 2007, “A life-cycle comparison between inorganic and biological catalysis for the production of biodiesel”, *Journal of cleaner production*, núm. 16, pp. 1368-1378.
- Hart, R., 1985, *Conceptos básicos sobre agroecosistemas*, en Masera, Omar, Marta Astier y Santiago López-Ridaura, 1999, *Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales*, Mundi-Prensa México, S.A. de C.V, México, 109 p.
- Hecht, Susanna, 1999, “La evolución del pensamiento agroecológico”, Capítulo I, en Altieri, Miguel, 1999, *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*, Editorial Nordan–Comunidad, 4ª ed., Uruguay, 338 p.
- Horta, Luiz, 2006, “Ethanol and ETBE production and end-use in Mexico”, Task 5, en SENER, 2006, *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*, Secretaría de Energía (SENER), México, 42 p.
- IILSEN y CIE-UNAM, 2006, *Nuevas Energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México*, Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República (IILSEN) y Centro de Investigaciones de Energía-Universidad Nacional Autónoma de México (CIE-UNAM), México, 171 p. en <http://www.senado.gob.mx/iilsen/content/lineas/docs/varios/Nuevas_Energias_Renovables.pdf>, consultado el 15 de febrero de 2009.
- IMF, A.C., 2005, “Las Regiones Agrícolas de México”, en Lazcano, Ignacio, 2006, “ethanol feedstocks”, Task 4 en SENER, 2006, *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*, Secretaría de Energía (SENER), México, 42 p.
- INE-SEMARNAT, 2005, *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 508 p.
- INEGI, 2007, *Censo Agropecuario 2007*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Unidades de producción con superficie agrícola y su distribución según disponibilidad de agua para riego y área de temporal por Entidad Federativa, México.
- INEGI, 2009, *Síntesis Metodológica de la Estadística de Vehículos de Motor Registrados en Circulación*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), México, 17 p., en <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/metodologias/registros/economicas/sm_evmmc.pdf>, consultado el 26 de febrero de 2009.

- International Network for Sustainable Energy-Europe, 2006, *Criteria for sustainable use of biomass including biofuels*, Inforse Europe, 3 p.
- Jiménez, Leobardo, 1996, “Desarrollo Rural Sustentable, Dimensiones y Principios”, en SAGAR, 1996, Red Nacional de Proyectos de Desarrollo Rural Sustentable, Memoria, SAGAR, Colegio de Postgraduados, UAAAN, México. Páginas 11-26.
- Jiménez, Blanca Elena, 2008, *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnologías apropiadas*, 2da. Ed., Editorial Limusa, S.A. de C.V., Grupo Noriega editores, México, 926 p.
- Krzanowski W. J., 2000, *Principles of multivariate Analysis*, Oxford university Press Inc., 2^{da}. Ed., New York, 586 p.
- LA, 1992, *Ley Agraria*, Diario Oficial de la Federación (DOF), México, 41 p.
- Lazcano, Ignacio, 2006, “etanol feedstocks”, Task 4 en SENER, 2006, *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*, Secretaría de Energía (SENER), México, 42 p.
- LDRS, 2001, *Ley de Desarrollo Rural Sustentable*, Diario Oficial de la Federación (DOF), México, 57 p.
- LGEEPA, 1988, *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*, Diario Oficial de la Federación (DOF), México, 97 p.
- López, L.A., 2001, Uso del Agua en la Agricultura del valle de Mexicali, Baja California, en Peña, César y Rosa Rojas, 2005, Promoción de Áreas Verdes vs. Consumo de Agua: Dilema o Desafío de la Planificación Urbana, El Caso de Mexicali, B.C., XXVIII encuentro RNIU, Dilemas de la sociedad fronteriza, 22 y 23 de septiembre, Ciudad Juárez, Chihuahua.
- López-Ridaura, Santiago, Omar, Masera y Martha Astier, 2002, “Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework”, *Elservier science Ltd*, México, núm. 2, pp. 135-148.
- Lozanoff, Jorge, Susana Heinichen, Gabriel, Marchi y Eduardo Risso, 2007, *Revisión de tecnologías para la producción de bioenergía en países emergentes*, Observatorios de políticas públicas del cuerpo de administradores gubernamentales de la jefatura de gabinete de ministros, 58 p.
- LPDB, 2008, *Ley de Promoción y desarrollo de los bioenergético*, Diario Oficial de la Federación (DOF), México, 10 p.
- MAG-FAO, 1994, *Análisis de los niveles de adopción y de conocimiento sobre prácticas de conservación de suelos de los grupos de agricultores de las áreas piloto de Tierra Blanca*, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)-Food and Agricultural Organization (FAO), Cartago, 100 p. en Ramírez Laura, Alfredo Alvarado, Rosendo Pujol, Antonio McHugh y Luis Brenes, 2008, “Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río reventado, Cartago, Costa Rica”, *Agronomía Costarricense*, vol. 2, núm. 32, pp. 93-118.
- MAG-MIRENEM, 1995, *Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica*, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)-Ministerio de Recursos Naturales Energía y Minas (MIRENEM), Costa Rica, 59 p. en Ramírez Laura, Alfredo Alvarado, Rosendo Pujol, Antonio McHugh y Luis Brenes, 2008, “Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río reventado, Cartago, Costa Rica”, *Agronomía Costarricense*, vol. 2, núm. 32, pp. 93-118.

- Marchetti JM., Miguel VU. y Errazu AF., 2007, “Possible methods for biodiesel production”. *Renewable and Sustainable Energy, Reviews*, núm. 11, pp. 1300–1311.
- Masera, Omar, Marta Astier y Santiago López-Ridaura, 1999, *Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales*, Mundi-Prensa México, S.A. de C.V, México, 109 p.
- Masera Omar, Coordinador, 2005, *La bioenergía en México, Un catalizador del desarrollo sustentable*, REMBIO, México. 119 p.
- Masera, Omar y Santiago López-Ridaura, 2000, *Sustentabilidad y sistemas campesinos*, Mundi-Prensa México, S.A. de C.V., México, 346 p.
- Mestiza, M. de J. y Roberto Escalante, 2003, “Exportaciones hortofrutícolas mexicanas en el tlan: ¿Ventaja comparativa?”, en Escalante, Roberto y Horacio, Catalán, 2008, “Situación actual del sector agropecuario en México: perspectivas y retos”, *Economía informa*, núm. 350, pp. 9-25.
- Mondragón, Angélica Rocío, 2002, “¿Qué son los indicadores?”, *cultura, estadística y geográfica*, núm. 19, pp. 52-58.
- Murillo, Yadira, 2009, “Aqueja quemas agrícolas a residentes del Valle”, *La crónica*, en línea, Mexicali, B.C., 08 de junio, en <<http://www.lacronica.com/EdicionEnLinea/Notas/Noticias/08062010/451682.aspx>>, consultado el 22 de junio 2010.
- OECD, 2000, *Environmental Indicators for agricultura methods and results*, Organisation for economic co-operation and development Executive summary, OECD, Paris.
- Pfaumann Peter, 2006, *Biocombustible: ¿La fórmula mágica para las economías rurales de ALC? Banco Interamericano de Desarrollo*, 23 p., en <http://www.iadb.org/sds/doc/RUR-Biocombustibles_Desarrollo_Rural_s.pdf>, consultado el 11 de febrero de 2009.
- Presidencia de la República, Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos, 2007, *Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012*, México, 324 p.
- Priego-Castillo G.A., A. Galmiche-Tejeda, M. Castelán-Estrada, O. Ruiz-Rrosado, y A.I. Ortiz-Ceballos, 2009, “Evaluación de la sustentabilidad de dos sistemas de producción de cacao: estudios de caso en unidades de producción rural en Comalcalco, Tabasco”, *Universidad y ciencia: Trópico húmedo*, México, núm. 25 vol. 1, pp. 39-57.
- Quintero, Margarito y Andrés Moncada, 2008, “Contaminación y control de las quemas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California”, *Región y Sociedad*, el Colegio de Sonora, México, vol. XX, núm. 43, pp. 3-24
- Quadri, G., 2001, *Índice de sustentabilidad ambiental. Sustentabilidad ambiental comparada en las entidades federativas de México*, México, CÉSPEDES.
- Quiroga Rayén, 2001, *Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas*, CEPAL, serie de manuales: 16, Chile, 116 p.
- Rajvanshi Anil, 1986, “Biomass gasification”, capítulo 4, en Yogi Goswami ed., *Alternative energy in agriculture*, vol. II, CRC Press, pp. 83-102.
- Ramírez Laura, Alfredo Alvarado, Rosendo Pujol, Antonio McHugh y Luis Brenes, 2008, “Indicadores para estimar la sostenibilidad agrícola de la cuenca media del río reventado, Cartago, Costa Rica”, *Agronomía Costarricense*, vol. 2, núm. 32, pp. 93-118
- Rendón, Roberto [tesis de doctorado], 2004, “Evaluación comparativa de sustentabilidad en sistemas agrícolas convencionales, mixtos y orgánicos de México”, Estado de México, Universidad Autónoma de Chapingo, Centro de investigaciones económicas, sociales y tecnológicas de la agroindustria y la agricultura mundial, 230 p.
- RFA, 2008, *Ethanol industry statistics*, Renewable Fuel Association (RFA), Washington, DC, Estados Unidos, en <<http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>>, consultado el 4 de noviembre de 2009.

- Rodríguez Margarita, 2009, “Biocombustibles en Colombia ¿a qué precio?”, *BBC Mundo*, América Latina, 3 de junio de 2009, en <http://www.bbc.co.uk/mundo/america_latina/2009/06/090602_1855_biocombustibles_colombia_mr.shtml>, Consultado el 24 de junio de 2009.
- Romero, Emilio, 1995, “La modernización del campo mexicano: saldos y perspectivas”, en Alejandro Encinas, *et al.*, comps., *El campo mexicano en el umbral del siglo XXI*, Espasa, México, pp. 69-90.
- Royal Society, 2008, *sustainable biofuels: prospects and challenges*, The Clyvedon Press Ltd, Cardiff, UK, 82 p.
- Runnalls O.J. C. y Donald, Mackay, 1999, “Crecimientos de la energía”, en Henry, Glynn y Gary, Heinke, comps., *Ingeniería Ambiental*, 2da. Edición, editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. de C.V., México, 800 p.
- Sánchez Arturo, 2008, “Una perspectiva sobre la producción y el uso de biocombustibles en México”, *Avance y perspectiva*, Cinvestav, México, pp. 29-35
- Sánchez Óscar y Carlos Cardona, 2007, “Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks: Review”, *Bioresource Technology*, Colombia, 26 p.
- Sarandón, Santiago, María Zuluaga, Ramón Cieza, Camila Gómez, Leonardo Janjetic y Eliana Negrete, 2006, “Evaluación de la sustentabilidad de sistemas agrícolas de fincas en misiones, Argentina, mediante el uso de indicadores”, *Agroecología*, Facultad de Ciencias agrarias y forestales, Argentina, Núm. 1, pp. 19-28.
- SAGARPA, 2007a, El Programa Sectorial de Desarrollo Agropecuario y Pesquero 2007-2012, Diario Oficial de la Federación (DOF), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA)
- _____, 2007b, *Programa de Estímulos a la Productividad Ganadera (PROGAN)*, Diario Oficial de la Federación (DOF), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).
- Saxena R.C., Adhikari D.K. y Goyal H.B., 2007, “Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review”, *Renewable & sustainable energy reviews*, India, pp. 1-12.
- Secretaría de Protección al Ambiente del Gobierno del Estado de Baja California, 2007, *Inventario de Emisiones de Gases Efecto Invernadero de Baja California*, 55 p.
- SEMARNAT, 2008a, *Compendio de estadísticas ambientales 2008*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, México, en <http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/compendio2008/10.100.8.236_8080/ibi_apps/WFServlet52b0>, consultado el 14 de abril de 2009.
- _____, 2008b, Reglamento de la Ley de bioseguridad de organismos genéticamente modificados, Diario Oficial de la Federación, México, 23 p.
- SEMARNAT-SAGARPA, 2009, Norma Oficial NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario, Diario Oficial de le Federación, México, 69 p.
- SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, 2008, *Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México*, SEMARNAT-INE-UNAM-CIECO, México, 99 p.
- SENER, 2001, *Energía renovable en México y la política energética*, Secretaría de Energía SENER, México, 21 p.

- _____, 2006, *Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*, Secretaría de Energía SENER, México
- _____, 2007, *Programa Sectorial de Energía 2007-2012*, Diario Oficial de la Federación (DOF), Secretaría de Energía SENER, México, 52 p.
- _____, 2008, *Balance Nacional de Energía*, Secretaría de Energía SENER, México, 139 p.
- _____, 2009, Programa de Introducción de los Bioenergéticos, Secretaría de Energía SENER, México, 37 p.
- _____, s/a, *Programa especial para el aprovechamiento de las energías renovables*, Secretaría de Energía SENER, México, 108 p. en <<http://www.sener.gob.mx/webSener/res/0/Programa%20Energias%20Renovables.pdf>>, consultado el 30 de septiembre de 2009.
- Seoáñez, Mariano, Elena Bellas, Pedro Ladaria y Pilar Seoáñez, 2000, *Tratado de reciclado y recuperación de productos de los Residuos*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 605 p.
- Sequeira C., P. Brito, A. Mota, J. Carvalho, L. Rodrigues, D. Santos, D. Barrio y D. Justo, 2007, “Fermentation, gasification and pyrolysis of carbonaceous residues towards usage in fuel cells”, *Energy Conversion and Management*, núm. 48, pp. 2203–2220
- SIAP, 2009, *Balanza Comercial Agroalimentaria*, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, México, en: <<http://www.siap.gob.mx/ventana.php?idLiga=1485&tipo=0>>, consultado el 22 de septiembre de 2009.
- SIAP, 2010a, *Breves monografías agrícolas, Grupos naturales*, Consulta en línea, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesqueras, México.
- SIAP, 2010b, *Cierre de la producción agrícola por Estado*, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 11 de abril, 2010, en <http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=15>, consultado el 28 de mayo de 2010.
- Singh, Jagtar, B.S. Panesar y S.K. Sharma, 2008, “Energy potential through agricultural biomass using geographical information system—A case study of Punjab”, *Biomass & bioenergy*, núm. 32, India, pp. 301-307.
- Skoulou V., y A. Zabaniotou, 2007, “Investigation of agricultural and animal wastes in greece and their allocation to potential application for energy production”, *Science Direct, Renewable & sustainable energy reviews*, núm. 11, Grecia, pp. 1698-1719.
- Smeets, Edward, André Faaij and Iris Lewandowski, 2005, *The impact of sustainability criteria on the cost and potentials of bioenergy production*, Copernicus Institute, Department of science, technology and society, Holanda, 104 p.
- Sociedad latinoamericana para la calidad, 2000, *Análisis costo/beneficio*, Sociedad latinoamericana para la calidad, en <http://www.gestionescolar.cl/UserFiles/P0001%5CFile%5Carticles-101189_recurso_1.pdf>, consultado el 23 de junio de 2010.
- Stockle C., R. Papendick, K. Saxton, G. Campbell y F. van Evert, 1994, “A framework for evaluating the sustainability of agricultural production systems” en Torres, Pablo, Luis Rodríguez y Oscar Sánchez, 2004, “Evaluación de la sustentabilidad del desarrollo regional. El marco de la agricultura”, *Sociedad y Región*, vol. XVI, núm. 29, pp.109-144
- Taylor, D., M. Abidin, S. Nasier, M. Ghazali y E. Chiew, 1993, “Creating a farmer sustainability index: A Malaysian case study”, *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. 8, Núm. 4, pp. 175-84.

- Torres, Pablo, Luis Rodríguez y Oscar Sánchez, 2004, “Evaluación de la sustentabilidad del desarrollo regional. El marco de la agricultura”, *Sociedad y Región*, vol. XVI, núm. 29, pp.109-144
- Torres, Francisco y Emmanuel Gómez, 2006, *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México*, Secretaría de Energía (SENER). México. 91 p.
- UBA, 2008, “Criteria for a sustainable use of bioenergy on a global scale”, Umwelt Bundes Amt (UBA), Federal Environment Agency (Umweltbundesamt), 127 p.
- UN-Energy, 2007, *Sustainable bioenergy: A framework for Decision Makers*, United Nations-Energy, New York, United States of America, 61 p.
- Valdez-Vazquez I., J.A. Acevedo-Benítez, C. Hernández-Santiago, 2010. “Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, núm. 14, pp. 2147–2153.
- Villa C., M. Tena, R. Tzintzun y D. Val., 2008, “Caracterización de los sistemas ganaderos en dos comunidades del municipio de Tuzantla de la Región de tierra caliente, Michoacán”, *Avances en investigación agropecuaria*, México, Universidad de Colima, vol. 12, núm. 002, pp. 45-58.
- WHO, 2009, *The WHO recommended classification of pesticides by Hazard*, World Health Organization (WHO), en <http://www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard_2009.pdf>, consultado el 28 de Julio de 2010.
- Wood, Stanley, Kate, Sebastian y Sara, Scherr, 2000, *Pilot analysis of global ecosystems. Agroecosystems*, World Resources Institute, United States of America, 110 p.
- Woldwatch Institute for the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer protection –BMELV-, 2006, *biofuel for transportation. Global potential and implications for sustainable agriculture and energy in the 21st century*, Extended summary, Woldwatch Institute for the German Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer protection, United States of America. 37 p.
- WWF, 2008[Presentación], *Las Mesas Redondas de Aceite de Palma y Biocombustibles Sostenibles*, World Wide Fund for Nature, Colombia.

ANEXO

Formato de la entrevista a los representantes de los sistema-producto agrícola de Mexicali



El Colegio de la Frontera Norte y El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada con apoyo del CONACYT, patrocinan la investigación:

“DISEÑO DE UN ÍNDICE DE SUSTENTABILIDAD EN AGROSISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA. CASO DE ESTUDIO EN EL VALLE DE MEXICALI”

Para ello se ha elaborado una entrevista que tiene objetivo obtener información que servirá para la realización de esta investigación. Ésta va dirigida a los agricultores representantes de los sistema-producto agrícola del Valle de Mexicali, toda la información que revele será CONFIDENCIAL, y se utilizará únicamente con fines académicos.

Se le agradece de antemano su cooperación y si existieran preguntas acerca del estudio, favor de hacerlas llegar a la dirección electrónica:

casaga_86@hotmail.com

Ingeniera Carolina del Rosario Sánchez Gastélum
Estudiante de la Maestría en Administración Integral del Ambiente

FORMATO DE LA ENTREVISTA

Datos del entrevistado

- A) Nombre: _____
B) Ubicación del predio agrícola: _____
C) Propietario o arrendatario: _____
D) Cultivo agrícola sembrado: _____
E) Tamaño del predio agrícola: _____

Información relevante

La bioenergía es energía derivada de biomasa. Los insumos para dicha producción son diversos, dentro de esta investigación se presentan dos, los cultivos energéticos y los esquilmos agrícolas. Los cultivos energéticos son especies cultivadas exclusivamente para la producción de bioenergía y el esquilmo es la biomasa que se genera a partir de diferentes cultivos agrícolas. Los bioenergéticos producidos, más conocidos y utilizados para esta investigación son energía eléctrica, o biocombustibles como el bioetanol, biodiesel o el biogás, sin embargo existen otro tipo de bioenergía que se puede producir.

Primera sección. Percepción de la producción de bioenergía a partir de cultivos energéticos

- 1) ¿Conoce usted sobre la producción de bioenergía, a partir de cultivos energéticos?
a. Si b. No
1.1) ¿Cuales cultivos energéticos conoce?: _____
2) ¿Estaría interesado en dedicarse a este tipo de cultivo?
a. Si b. No

Si su respuesta fue negativa conteste las siguientes preguntas

- 3) ¿Qué desventaja observa en este tipo de cultivo? _____
4) ¿Qué motivaría el que Ud. reconsiderara el dedicarse a este tipo de cultivos? _____

Si su respuesta fue afirmativa conteste las siguientes preguntas

- 5) ¿Cuál sería la principal razón para dedicarse a estos cultivos?
a. Demanda b. Altos precios en el mercado c. apoyos del gobierno u otra institución
d. otros, cuáles _____
6) Sí usted decidiera sembrar este tipo de cultivos, ¿cuáles serían los obstáculos a los que se enfrentaría?: _____
7) Para implementar estos cultivos, que tipo de apoyo serían necesarios:
a) económicos b) mano de obra c) asesoramiento técnico d) otro _____
8) ¿Cree usted necesario organizarse en un tipo de asociación o sociedad?
a. Si, de que tipo: _____ b. No

Si su respuesta fue afirmativa conteste la siguiente pregunta

9) ¿Qué tipo de servicios o actividades se requerirían de esta organización?

10) ¿Cómo percibe los costos de producción en estos cultivos?

a) menores b) mayores c) iguales d) no sé _____

11) ¿Qué variedad estaría interesado en cultivar? _____

12) En una temporada, ¿sembraría dos cultivos, el energético y el que habitualmente siembra, o solamente el energético? _____

Si su respuesta fue dos cultivos conteste las dos siguientes preguntas

13) ¿Qué beneficios encontraría al tener dos cultivos? (energético y habitual): _____

14) ¿qué tierra destinaría para el nuevo tipo de cultivo? _____

Segunda Sección. Percepción sobre la producción de bioenergía a partir de esquilmos agrícolas

15) ¿Qué destino tienen actualmente los esquilmos de su predio?

16) Sabía usted que el residuo agrícola se puede utilizar como insumo para la producción de bioenergía: a. Si b. No

17) Estaría interesado en vender sus esquilmos para esta producción:

a. Si b. No

Si su respuesta fue negativa conteste las siguientes dos preguntas:

18) Sí además de la paga por el residuo agrícola para la producción de bioenergía, se le entregara un estímulo económico, reconsideraría el vender el residuo agrícola de su predio para dicha generación:

a. Si b. No

19) Por qué _____

20) Si se instalara una industria que le compraría sus esquilmos agrícolas para producir bioenergía, ¿a qué obstáculos se enfrentaría Ud. como agricultor para realizar dicha venta?

Sección 2.1. Información relevante sobre las formas de producción de bioenergía (sistemas de producción).

Existen dos formas básicas en los sistemas de producción de bioenergía. En la primera, todo el producto agrícola es destinado para la producción de bioenergía, mientras que en la segunda una parte del cultivo se vende como alimento animal/humano y otra parte (el esquilmo) se vende para la producción de bioenergía.

21) Considera usted que alguna de estas dos formas tiene mayores ventajas que la otra:

a. Si : _____ b. No: _____

Si su respuesta fue negativa conteste lo siguiente:

22) ¿Por qué?

Si su respuesta fue positiva conteste lo siguiente:

23) ¿Cuáles percibe?

24) ¿Por qué?

La autora es Ingeniera Biotecnóloga por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) y egresada de la Maestría en Administración Integral del Ambiente de el Colegio de la Frontera Norte, A.C.
Correo electrónico: casaga_86@hotmail.com

© Todos los derechos reservados. Se autorizan la reproducción y difusión total o parcial por cualquier medio, indicando la fuente.

Forma de citar:

Sánchez-Gastélum, Carolina, (2010), “Diseño de un índice de sustentabilidad en Agrosistemas de Producción de Bioenergía. Caso de estudio en el valle de Mexicali”, tesis de maestría, México, El Colegio de la Frontera Norte, A.C., 150 pp.