



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY.**

329889
BIBLIOTECA



22 JUN 2012

**PROPUESTA DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD PARA
INVERNADEROS DE CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE
TOMATE ROJO EN MÉXICO.**

TESIS QUE PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA

MARCELA CABRERA CANO

Asesor: Dr. Carlos Antonio Caballero Valdés

Jurado: Dr. JOEL PINEDA PINEDA, Presidente

Dra. ELIZABETH GRISELDA TORIZ GARCÍA Secretario

Dr. CARLOS ANTONIO CABALLERO VALDÉS Vocal

Atizapán de Zaragoza, Edo. Méx., Mayo de 2012.

Resumen

Desde la antigüedad el hombre ha desarrollado cultivos alternativos con la finalidad de mejorar su calidad de vida y aprovechar los recursos naturales que el entorno le proporciona.

La agricultura, es la actividad que más interacción tiene con el ambiente y la sobrevivencia humana debido a que debe de cubrir la demanda de alimentos que ha ido incrementándose por la inequidad social y el crecimiento poblacional y a su vez le genera el deterioro, contaminación y agotamiento de los recursos naturales.

La FAO calcula, que para el año 2030 la población se nutrirá mejor, el consumo de calorías per cápita se incrementará de 2,800 kcal/día (2011) a 3,050 kcal/día, por lo cual es importante explorar nuevas técnicas de cultivo y medir su impacto en los ámbitos sociales, económicos y ambientales.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al medio Ambiente en 1996, estableció la definición de Desarrollo Sostenible como ***“el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de 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.”***, es por ello, que para medir la sostenibilidad de actividades agrícolas, es importante desarrollar indicadores de medición a través de los criterios de selección para determinar la viabilidad de los procesos con ello desarrollar políticas de regulación.

Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	12
1.1	Planteamiento y justificación.....	12
1.2	Estructura de la tesis.....	16
1.3	Objetivo.....	17
1.4	Objetivos específicos.....	17
2.	MARCO TEÓRICO	18
2.1	La agricultura en el mundo	18
2.2	La agricultura en México.....	22
2.3	Cultivo del tomate rojo en México	25
2.3.1	Descripción	25
2.3.2	Usos.....	27
2.3.3	Producción Mundial.....	27
2.3.4	Producción en México.....	28
2.3.5	Principales Estados Productores.....	28
2.3.6	Precios al mayoreo y al consumidor.....	30
3.	CULTIVOS HIDROPÓNICOS.....	31
3.1	Cultivo Hidropónico del tomate rojo	32
3.2	Invernaderos Hidropónicos	33
3.2.1	Recirculación	33
3.2.2	Necesidades de riego.....	35
3.2.3	Fertilizantes.....	36
3.2.4	Control Fitosanitario	37
3.2.5	Materiales de construcción.....	38
3.2.6	La luz y la fotosíntesis.....	39
3.2.7	Humedad relativa	39

3.2.8	Semillas.....	40
3.2.9	Nutrición controlada de las plantas	40
3.2.10	Germinación	41
3.2.11	Tipos de cultivo y medios de cultivo	41
3.2.12	Funciones de los elementos nutritivos en las plantas	42
3.2.13	Polinización	43
3.2.14	Fertilización carbónica.....	43
3.2.15	Ventajas de los cultivos hidropónicos.....	43
3.3	Hidroponia y sostenibilidad	45
4.	INDICADORES EN LA SOSTENIBILIDAD.	50
4.1	Indicadores.....	50
4.1.1	Definición de indicador.....	50
5.	METODOLOGÍA.....	60
5.1	Definición de sostenibilidad agrícola	60
5.2	Propuesta de indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos de Tomate rojo.....	60
5.3	Determinación de criterios de selección de indicadores	64
5.4	Selección de indicadores de sostenibilidad.	69
5.5	Criterios de selección de indicadores	73
6.	RESULTADOS.....	74
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	81
7.1	Cultivos hidropónicos y sostenibilidad	81
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	85
8.1	Futuras líneas de investigación.....	86

9. BIBLIOGRAFÍA.....88

Índice de tablas

Tabla 1: Crecimiento de la población humana (FAO, 2011).....	19
Tabla 2: Porcentaje de disponibilidad de tierra dedicada a cultivos y población económicamente activa en la agricultura en México	22
Tabla 3. Evolución y crecimiento anual de activa en la agricultura en México.	23
Tabla 4. Cantidad y valor de productos básicos producidos en México.....	24
Tabla 5. Evolución y composición de la población activa en la agricultura en México (FAOSTAT, 2011).....	24
Tabla 6. Principales productos de exportación en México (FAOSTAT, 2011).....	28
Tabla 7. Principales Estados en México con producción de tomate rojo en toneladas (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010)	28
Tabla 8. Necesidades de riego en función de la transpiración (Anton, 2004).	36
Tabla 9. Productividad del cultivo hidropónico versus cultivo tradicional en suelo (FAOSTAT, 2011).	44
Tabla 10. Criterios para seleccionar indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos...	66
Tabla 11. Criterios agrupados por afinidad.....	67
Tabla 12. Resultado de la selección de los criterios con mayor participación en instituciones. ..	68
Tabla 13. Selección de los indicadores compuestos, con base a la presencia en documentos y organizaciones internacionales.	71
Tabla 14. Valoración de indicadores compuestos a partir de criterios estratégicos.	72
Tabla 15. Propuesta de criterios estratégicos genéricos para selección de indicadores compuestos.	73
Tabla 16 Número de criterios revisados bibliográficamente.	76
Tabla 17. Criterios de selección de indicadores.....	76
Tabla 18. Número de indicadores consultados e	77

Índice de figuras

Figura 1: Producción Agrícola en el mundo (toneladas/año) FAOSTAT, 2011	21
Figura 2. Porcentaje del valor añadido de la agricultura en el PIB total en México (FAOSTAT, 2010)	23
Figura 3. Tomate rojo mexicano <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010)	25
Figura 4. Estadísticas de producción de tomate rojo a nivel mundial (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010)	27
Figura 5. Descripción de la estacionalidad y producción del Tomate rojo. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SAGARPA, 2010)	29
Figura 6. Estacionalidad del Tomate rojo. (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010)	30
Figura 7. Esquema de un sistema cerrado o de recirculación (Anton, 2004).	34
Figura 8. Principales Áreas de la Sostenibilidad. (World Commission on Environment and Development, Our Common Future, Oxford University Press, Nueva York, 1987).....	57
Figura 9. Interacciones entre capital humano, económico y ambiental. (The Government Statistical Service, Quality of life counts, UK, 1999).....	58
Figura 10. Propuesta de indicadores de sostenibilidad de cultivos hidropónicos.....	75
Figura 11. Número de indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos.	78

Índice de abreviaturas

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
PAC	Política Agraria Comunitaria
ISBRAM	International Board for Research and Management
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization of the Unit Nations
SAGARPA	Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
OCDE, OECD	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
TLC	Tratado del Libre Comercio
ACESYS	Automation Culture Environment Oriented Systems Analysis
CODEX	Código Alimentario
MST	Manejo Sostenible de la Tierra
PCI	Principios, Criterios e Indicadores
LCA	Life Cycle Assessment

UNCSD	United Nations Conference on Sustainable Development
WWF	World Wildlife Fund
INE	Instituto Nacional de Ecología
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
RAS	Red de Agricultura Sostenible
EAE	Evaluación Ambiental Estratégica
IA	Indicadores Ambientales
AMC	Análisis Mulicriterio
PDSEIB	Plan Director Sectorial Energético de las Islas Baleares
CIFOR	Centro Internacional de Investigación Forestal
OIMT	Organización Internacional de Maderas Tropicales
VIBO	Organización Vida para el Bosque
ONU	Organización de las Naciones Unidas

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Planteamiento y justificación

La **sostenibilidad** en la actualidad, ha tenido diferentes perspectivas y definiciones, en 1987 la Comisión Brundtland en su informe “Nuestro Futuro Común” marcó un hito importante, en un intento por introducir un nuevo marco conceptual para el desarrollo que permitiera tomar en cuenta los conflictos entre las necesidades de crecimiento económico y de conservación de la base de recursos naturales. Desde ese momento “la sostenibilidad de la agricultura ha ganado considerable espacio en la historia del desarrollo” aunque “subsisten aún amplias discrepancias tanto sobre las definiciones más apropiadas para caracterizarla, como sobre las prioridades y los énfasis que debe darse a cada una de las políticas para alcanzar la sostenibilidad” (Bejarano, 1998).

Muchas han sido las definiciones que han sido propuestas para caracterizar la sostenibilidad, el desarrollo sostenible o la agricultura sostenible. Autores especializados en los problemas de sostenibilidad (FAO, 1949; Repüo, 1987; WCDE, 1987; TAC/ CGIAR, 1989; Loyns y McMillan, 1990 y Nijkamp, Van der Bergh y Soetomon, 1991) manejan cuatro aspectos fundamentales que deben ser contemplados para alcanzar el desarrollo sostenible, estos son:

(1) Satisfacer las necesidades económicas de la población;

- (2) Conservar la base de los recursos naturales;
- (3) Ser socialmente aceptable; y,
- (4) Preservar la posibilidad de satisfacer las necesidades futuras.

Los gobiernos participantes en la Cumbre de Río de Janeiro (1992), proclamaron los principios de un desarrollo sostenible, principios que se basan en el derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza y en la colaboración internacional con el objetivo de igualar los desequilibrios económicos y asegurar las necesidades de las generaciones futuras, este desarrollo sostenible hace especial hincapié en la agricultura. También en la reforma de la Política Agraria Comunitaria (PAC) de 1992, se incluyen instrumentos específicos para reducir la presión ambiental de la agricultura. La posterior reforma de la PAC, que forma parte de la Agenda 2000, especifica la necesidad de establecer indicadores ambientales para las evaluaciones positivas y negativas de la agricultura sobre el medio ambiente.

Uno de los problemas que se plantean con el concepto de sostenibilidad es la dificultad de llevar a la práctica el concepto y definir en el día a día cuáles son las acciones y políticas que contribuyen a la sostenibilidad y que requisitos que deben cumplirse.

Por otra parte, la valoración actual de la calidad ambiental de los productos agrícolas está sujeta a menudo a confusión, la que se debe a que no existen parámetros de medida aceptados de manera general por la sociedad, productores y consumidores. El concepto de producto sostenible, es interpretado de diversas maneras usándose en diferentes contextos. Existe una opinión generalizada de que los productos artesanales, sustentables o aquellos en los que no se han utilizado plaguicidas son más ecológicos y poseen propiedades organolépticas superiores en contraposición a los obtenidos con una agricultura tradicional.

Entre 1991 y 1993, un grupo de trabajo internacional promovido por el International Board for Research and Management (ISBRAM), en el que participaron la FAO y varias organizaciones internacionales vinculadas al desarrollarlo agropecuario sostenible desarrollaron un marco

conceptual para definir más precisamente el manejo sostenible del territorio (Smith y Dumansky, 1995).

De acuerdo a este marco conceptual, el manejo sostenible del territorio debe cumplir satisfactoria y simultáneamente con los siguientes requisitos:

- Mantener o incrementar la producción /servicios (productividad);
- Reducir el riesgo productivo (seguridad);
- Proteger la calidad y el potencial de los recursos naturales y prevenir la degradación del suelo y el agua (protección);
- Ser económicamente viable (viabilidad); y,
- Ser socialmente aceptable (aceptabilidad).

A partir de estos objetivos se han indicado una serie de principios que deben guiar las estrategias para desarrollar la agricultura sostenible. Por ejemplo, desde la perspectiva de la Preservación Daily (1990), propone cuatro principios básicos:

1. **El principio de la irreversibilidad cero:** Esto es, reducir a cero las intervenciones acumulativas y los daños irreversibles. El ejemplo por excelencia es el de la biodiversidad debiendo impedirse la extinción de especies animales y vegetales;
2. **El principio de la recolección sostenible:** Las tasas de extracción de recursos deben ser iguales o inferiores a la tasa de regeneración de esos recursos. Ejemplos de ello son el suelo, las especies silvestres y domesticadas, los bosques, las praderas, etc.;
3. **El principio de la emisión sostenible:** Las tasas de emisión de recursos deben ser iguales a las capacidades naturales de asimilación de los ecosistemas donde se vierten esos residuos; y,

4. **El principio de selección sostenible de tecnologías:** Se deben de favorecer las tecnologías que aumenten la productividad de los recursos, pero asegurando su preservación.

Debido a las diferentes definiciones y contenidos de la sostenibilidad en la agricultura, es necesario plantear formas de medición que permitan valorar y cuantificar en qué medida se cumplen los requisitos antes mencionados.

Es así que para poder valorar la sostenibilidad de un producto hidropónico deberán de establecerse indicadores transparentes, cuantificables y medibles, que contribuyan a valorar el concepto de desarrollo sostenible en la producción hidropónica bajo invernadero. Estos parámetros deberán incluir aspectos como el consumo de recursos bióticos y abióticos, consumo de energía, emisiones nocivas al aire, agua y suelo, toxicidad potencial para los seres humanos y ecosistemas entre otros.

Los indicadores sostenibles deben ser específicos para cada lugar o región y sistema productivo, así como también los procedimientos utilizados para su medición deben ser los mismos, independientemente del contexto.

Esto supone aceptar que la sostenibilidad de un cultivo hidropónico no se puede definir con un solo parámetro, sino con una serie de indicadores que se deben de integrar (ver capítulo 5).

La evaluación de la sostenibilidad de los cultivos hidropónicos, no cuenta hasta el momento con una metodología exacta para su medición que permita valorarla de forma práctica y objetiva, es por esa razón que para desarrollar y utilizar indicadores es fundamental consensuar una definición de agricultura hidropónica sostenible, definir una escala temporal y espacial adecuada, establecer el contexto, precisar los valores o unidades de los indicadores y establecer una ponderación de los mismos de acuerdo a su confiabilidad, así como establecer criterios de selección de indicadores a partir de las propuestas internacionales y normas en agricultura sostenible.

En esta investigación se pretende realizar una propuesta de indicadores de sostenibilidad asociados a cultivos hidropónicos del Tomate rojo en México, utilizando como base los

antecedentes bibliográficos de estudios y normas aplicados a la sostenibilidad y cuantificando los factores socioeconómicos y ambientales asociados a este sistema de producción.

Se pretende además, que la propuesta de indicadores de sostenibilidad pueda ser fácilmente aplicable en otros cultivos hidropónicos y en diferentes zonas geográficas del país.

1.2 Estructura de la tesis.

La tesis se ha estructurado en ocho capítulos divididos de la siguiente manera:

El capítulo uno presenta el planteamiento del problema así como los objetivos y la estructura de la investigación.

El capítulo dos introduce a los cultivos en México, como se desarrolla el cultivo de tomate rojo, su importancia a nivel económico y social en la agricultura.

El capítulo tres con carácter introductorio, permite conocer de forma concisa que son los cultivos hidropónicos, su origen, funcionamiento y técnicas.

El capítulo cuatro, establece el contexto ¿qué son y cómo funcionan los indicadores? Así como su amplia aplicación en el estudio de la sostenibilidad.

El capítulo cinco muestra la metodología del desarrollo de criterios de selección necesarios para determinar los indicadores de sostenibilidad con base en los antecedentes bibliográficos de las instituciones y normas con experiencia en sostenibilidad.

Adicionalmente presenta el desarrollo de la propuesta de indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos, determinados a través de los criterios de selección y la naturaleza del proceso.

En el capítulo seis se establece la discusión de los resultados.

El capítulo siete presenta las conclusiones de la propuesta de indicadores de sostenibilidad y futuras líneas de investigación.

Finalmente en el capítulo ocho, la bibliografía citada y los anexos presentes en la investigación.

Esta investigación está dirigida a instituciones que desarrollan conocimientos de temas tanto agrícolas así como a inversionistas, auditores ambientales, analistas sociales, gobierno y a todos los interesados en asuntos agrícolas de manera que tengan un panorama más completo del desarrollo de programas y toma de decisiones responsables en el sector.

1.3 Objetivo

Desarrollar una propuesta de indicadores de sostenibilidad (socioeconómicos y ambientales) a través de la identificación de criterios de selección y propuestas internacionales para evaluar invernaderos de cultivo hidropónico de tomate rojo en el sector agrícola en México.

1.4 Objetivos específicos

- A. Determinar los criterios relevantes para la selección de indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos en invernaderos a partir de propuestas internacionales.
- B. Generar una propuesta de indicadores socioeconómicos y ambientales para medir la sostenibilidad de los invernaderos de cultivos hidropónicos a partir de propuestas internacionales en el sector.

2. Marco Teórico

2.1 La agricultura en el mundo

La agricultura es la actividad humana que más estrecha relación tiene con el medio ambiente y con la sobrevivencia del hombre en el planeta, pues debe atender la demanda de alimentos provocada por la explosión demográfica y la inequidad social. Así mismo, se ha convertido en una causa significativa del deterioro, la contaminación y el agotamiento de los recursos naturales (FAO, 2011).

La población mundial pasará de los siete mil millones de personas actuales a los ocho mil trescientos millones en 2030. La población crecerá al promedio anual del 1.1% hasta el 2030, un ritmo más lento de la media anual del 1.7 de los últimos 30 años. Cada vez es mayor la parte de la población mundial que está bien alimentada. En consecuencia, el aumento de la demanda mundial de productos agrícolas tendría que disminuir, pasando del promedio anual del 2.2% de los últimos 30 años al 1.5 % anual hasta 2030. En los países en desarrollo el descenso será aún más fuerte pasando del 3.7 % anual de los 30 últimos años al promedio de 2 % hasta el 2030, (Tabla 1) (FAO, 2011).

Tabla 1: Crecimiento de la población humana (FAO, 2011)

Población mundial 1981	Población mundial 2011	Población mundial 2030
	6,000 millones de personas	8,300 millones de personas
Media anual de 1.7	Crecimiento anual de 1.1%	

Sin embargo, los países en desarrollo con niveles de consumo de bajo a medio, que representan alrededor de la mitad de la población de esas naciones, presenciarán un lento descenso en la demanda de alimentos que pasará apenas del 2.9 al 2.5 % anual, y a un aumento del consumo *per cápita*.

La población mundial, de aquí al 2030, se nutrirá cada vez mejor, con 3.050 kilocalorías (Kcal.) disponibles por persona, comparadas con las 2.360 Kcal/persona/día de mediados de los años 60's y con las 2.800 Kcal actuales. Este cambio refleja ante todo el aumento del consumo en muchos países en desarrollo cuyo promedio rondará las 3.000 Kcal en el 2030.

Se espera que el número de personas hambrientas en los países en desarrollo baje de los 777 millones actuales hasta unos 440 millones en el año 2030, según el estudio de la FAO. Esto significa que el objetivo de la Cumbre Mundial de la Alimentación de 1996, de reducir el número de personas hambrientas a la mitad de los niveles de los años 1990-92 (815 millones) no se alcanzará ni siquiera en el año 2030. África subsahariana es motivo de profunda preocupación ya que el número de personas crónicamente sub-nutridas pasará sólo de 194 a 183 millones, según la FAO.

Buena parte del aumento en la producción de alimentos en el futuro será debido a una mayor productividad. En los países en desarrollo, casi el 70% del aumento de la producción de cultivos se deberá a un mayor rendimiento; alrededor del 20% será debido a la expansión de la superficie de labranza y alrededor del 10% será el resultado de diferentes técnicas mejoradas de cultivos.

La expansión de la tierra cultivable destinada a la producción de alimentos crecerá más despacio que en el pasado. En los próximos 30 años, los países en desarrollo necesitarán otros 120

millones de hectáreas para cultivos; esto significa menos terrenos nuevos, comparativamente, que en el pasado. La expansión tendrá lugar, sobre todo, en África subsahariana y en América Latina. Una parte considerable de los nuevos terrenos procederá de la deforestación. En otras regiones en desarrollo, casi todo el terreno disponible está ya explotado. Diversos países y comunidades tendrán que hacer frente a problemas relacionados con la escasez de tierras (FAO, 2011).

Durante los años 90's, el mundo perdió una superficie forestal de 9.4 millones de hectáreas anuales, casi tres veces la superficie de Bélgica. Sin embargo, el porcentaje de deforestación fue más bajo que en los años 80's y a nivel mundial se prevé que la deforestación siga disminuyendo en el futuro, si bien, una buena parte de la expansión de la tierra cultivable tendrá que proceder de los bosques y las previsiones sobre el consumo mundial de madera en rollo industrial se espera que aumente en un 60% sobre el nivel actual.

El riego es fundamental para las existencias de alimentos en todo el mundo. La superficie irrigada en los países en desarrollo pasará con toda probabilidad de las 202 millones de hectáreas actuales a los 242 millones de hectáreas en 2030 (FAO, 2011).

A nivel mundial todavía hay bastante agua disponible, pero algunas regiones tendrán que enfrentarse con graves restricciones. De aquí al 2030 se prevé un aumento del 14% en la extracción de aguas para el riego en los países en desarrollo. Uno de cada cinco países en desarrollo se verá afectado por la escasez de agua. Dos países: Jamahiriya Árabe Libia y Arabia Saudita ya utilizan más agua de regadío que la de sus recursos anuales renovables, extrayéndola del subsuelo fósil. En vastas zonas de India y China, los niveles de aguas subterráneas bajan de 1 a 3 metros/año. Estas regiones tendrán que usar el agua de forma más eficaz. La agricultura se lleva el 70% de toda el agua dulce extraída para el consumo humano. Ahorrar agua en la agricultura significa que habrá más agua disponible en otros sectores (FAO, 2011).

Las modernas biotecnologías podrían servir para mejorar la seguridad alimentaria. Si se abordan los posibles peligros que las biotecnologías pueden representar para el medio ambiente, y si se pone la tecnología al alcance de los más pobres y sub-nutridos y si estas tecnologías se orientan a satisfacer las necesidades de los que tienen menos recursos, las variedades modificadas de

cultivos pueden servir de ayuda para reforzar la agricultura en las zonas marginales y para restablecer la producción en los terrenos degradados. La FAO (2011), ha pedido pruebas eficaces y protocolos de seguridad para los organismos modificados genéticamente, con el fin de dar una respuesta a las preocupaciones de los consumidores.

También han surgido otras tecnologías prometedoras que combinan el aumento de producción con una mayor atención al ambiente. Entre ellas la agricultura de conservación sin labranza y el control integrado de plagas o uso eficiente de los fertilizantes. A nivel local, la agricultura orgánica podría ser una alternativa realista a la agricultura tradicional en los próximos 30 años (FAO, 2011).

Los cambios de clima podrían intensificar la dependencia de algunos países en desarrollo de las importaciones de alimentos. El efecto general del cambio de clima en la producción mundial de alimentos hasta el 2030 será limitado. Probablemente se potenciará la producción en los países en desarrollo. Los que sufrirán las peores consecuencias serán los agricultores en pequeña escala en las zonas afectadas por las sequías, las inundaciones, la invasión de aguas saladas o las fuertes oleadas marinas. Algunos países, sobre todo en África, pasarán a ser más vulnerables a la inseguridad alimentaria (Figura 1) (FAO, 2011).

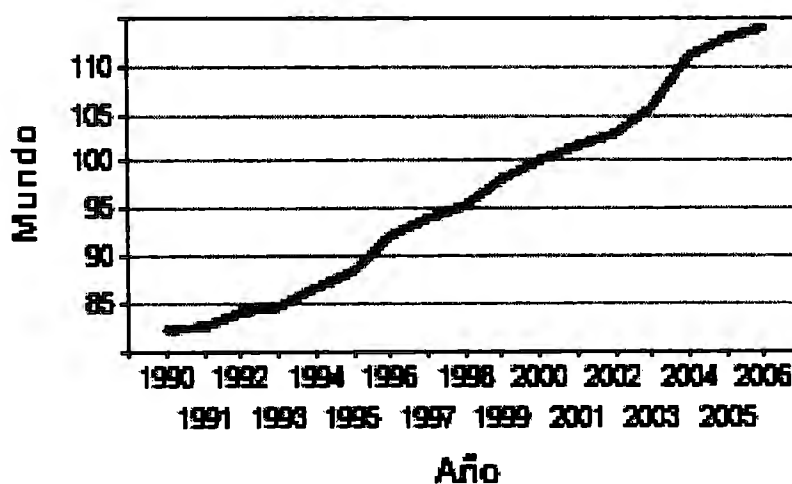


Figura 1: Producción Agrícola en el mundo (toneladas/año) FAOSTAT, 2011

2.2 La agricultura en México

La destrucción de bosques y selvas tiene como causa primordial a las actividades agropecuarias que cada año eliminan entre 400 mil y un millón de hectáreas de ecosistemas forestales. Se debe recordar que la agricultura consume cerca del 80% del agua disponible en el país, y que desperdicia casi las dos terceras partes (Tabla 2).

Tabla 2: Porcentaje de disponibilidad de tierra dedicada a cultivos y población económicamente activa en la agricultura en México

Disponibilidad de tierra cultivable y tierra dedicada a cultivos permanentes (proporción por persona)	Proporción [hectáreas]			
	1994	1999	2004	2009
	Población total	0.30	0.28	0.26
Población dependiente de la agricultura	1.09	1.15	1.24	1.35
Población económicamente activa en la agricultura	3.11	3.14	3.28	3.48

Estos datos hacen evidente la urgencia de respuestas efectivas al doble reto de aumentar la productividad, al tiempo de alcanzar un manejo ambientalmente adecuado de los recursos. El cumplimiento de las funciones que el sector agropecuario puede jugar en el desarrollo económico de México, radica en enfrentar simultáneamente los objetivos de rentabilidad, productividad, competitividad, equidad y sostenibilidad. Este reto exige pensar en formas alternativas de hacer agricultura, si es que se desea promover un crecimiento agropecuario sostenible, pues la atención a los problemas del campo es urgente y fundamental para la viabilidad del país (FAOSTAT, 2010).

La Figura 2 muestra el porcentaje de participación de la agricultura en el Producto Interno Bruto (PIB) del país y la Tabla 3, la relación entre la evolución y el crecimiento anual del sector en México.

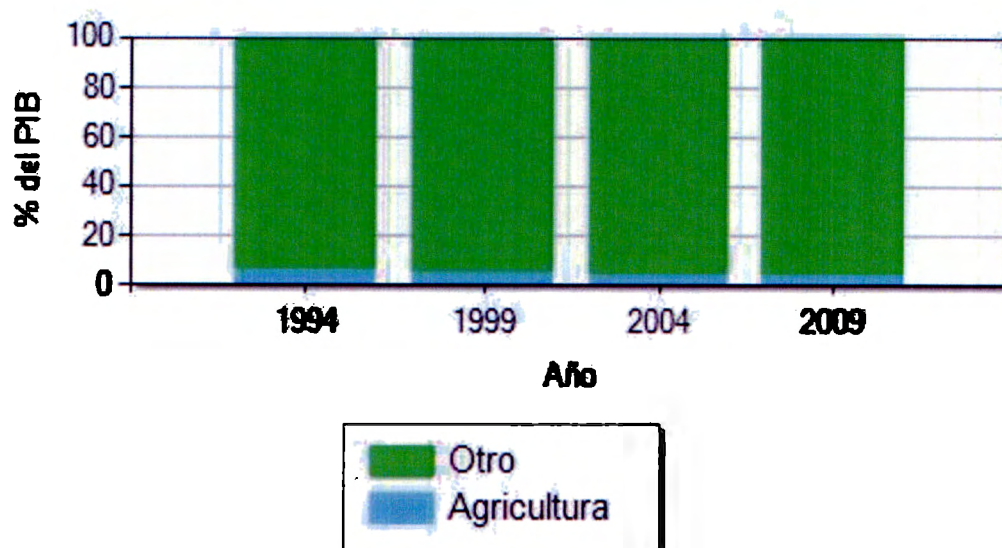


Figura 2. Porcentaje del valor añadido de la agricultura en el PIB total en México (FAOSTAT, 2010)

Tabla 3. Evolución y crecimiento anual de activa en la agricultura en México.

Evolución de la población y tamaño de la población activa							
	Tamaño [millones]				Annual growth rate [%]		
	1995	2000	2005	2010	1995-2000	2000-2005	2005-2010
Población total	92.27	99.96	106.48	113.42	1,61	1,27	1,27
Población agrícola	24.63	23.62	21.98	20.34	-0,83	-1,43	-1,54
Población activa total	35.44	40.26	44.67	48.75	2,58	2,1	1,76
Población activa en la agricultura	8.64	8.66	8.37	7.91	0,05	-0,68	-1,12

En México, se ha venido incrementando la producción del café, algodón, tomate, plátano, piña y otros productos que integran una cantidad apreciable de las exportaciones nacionales dando una significativa cantidad de entrada de divisas (Tabla 4).

Tabla 4. Cantidad y valor de productos básicos producidos en México

Diez productos básicos principales Cantidad producida 2009			Diez productos básicos principales Valor de producción 2009		
	Producto básico	Cantidad [t]		Producto básico	Valor [1000 USD Internacionales]
1	Café de azúcar	49492700	1	Carne Vacuna Indígena	4966183
2	Maíz	20142800	2	Carne de Pollo Indígena	3734896
3	Leche entera vaca (fresca)	10549000	3	Leche entera vaca (fresca)	3291931
4	Naranjas	4193480	4	Huevos gallina cásc.	1957607
5	Trigo	4116160	5	Carne de Cerdo Indígena	1778219
6	Carne de Pollo Indígena	2622070	6	Café de azúcar	1625192
7	Tomates	2591400	7	Maíz	986228
8	Huevos gallina cásc.	2360300	8	Tomates	957688
9	Bananos	2232360	9	Chiles, pim. pic., pim. (verde)	914005
10	Limonos y limas	1987450	10	Mangos, mangostanes y guayabas	904305

Tabla 5. Evolución y composición de la población activa en la agricultura en México (FAOSTAT, 2011)

Evolución de la población y composición de la población activa							
	Porcentaje [%]				Annual growth rate [%]		
	1995	2000	2005	2010	1995-2000	2000-2005	2005-2010
Población rural [% de la población total]	26.63	25.28	23.69	22.17	-1.04	-1.29	-1.32
Población activa en la agricultura [% de la población activa total]	24.38	21.51	18.73	16.22	-2.47	-2.73	-2.84
Mujeres [% de población activa en la agricultura]	12.71	12.29	12.29	12.31	-0.67	0	0.03

En México el porcentaje de participación de las mujeres en este sector, ha permanecido constante en los últimos 15 años y siendo casi del 50% a partir de la participación total de la población en la agricultura (Tabla 5).

2.3 Cultivo del tomate rojo en México

2.3.1 Descripción

El tomate rojo (jitomate), pertenece a la especie botánica *Lycopersicon esculentum* Mill, de la familia solanáceas, es el nombre común que se le ha dado a una planta herbácea de tallo voluble, largo; las hojas son lobuladas con los bordes dentados; las flores pentámeras se reúnen en ramilletes laterales y son amarillas; es una fruta de forma generalmente redondeada y achatada a excepción de algunas variedades de fruto alargado, el tamaño es variable pero tiende a ser un fruto grande, a veces no es completamente liso sino que presenta gajos más o menos profundos, la sección transversal muestra la epidermis delgada y resistente, color rojo al madurar, al igual que la pulpa, un tanto gelatinosa, que se halla dividida en lóculos que alojan a las semillas. El color del tomate, verde al principio y rojo cuando madura, se debe a una sustitución de clorofila por carotenos en los cromoplastos de las células (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010).

El tomate rojo, contiene vitamina C y sales minerales, es refrescante y poderoso aperitivo (Figura 3).



Figura 3. Tomate rojo mexicano *Lycopersicon esculentum* Mill (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010)

El tomate rojo es originario de América del Sur, aunque se considera a México como centro de su domesticación. Con la llegada de los españoles se expandió al viejo continente y de ahí a todo el mundo; con su comercialización y difusión lograda, actualmente forma parte de la dieta alimenticia de varias culturas en el globo terráqueo (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010).

Se considera que a nivel internacional, las hortalizas junto con las frutas ocupan actualmente el segundo lugar de los productos agropecuarios, apenas aventajadas por los cereales. Se estima que tan solo dos hortalizas contribuyen con el 50% de la producción en el mundo: la papa y el tomate rojo, lo cual indica el enorme valor que este último cultivo representa no solo en el comercio, sino también en el sistema alimentario mundial (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010).

En México, como en otras partes del mundo, se prefiere consumir el tomate rojo fresco, pero también es utilizado como producto industrializado para elaborar pastas, salsas, purés, jugos, etc., gracias a los avances tecnológicos para su procesamiento y a las modificaciones en los gustos y costumbres de las nuevas generaciones, la que exige calidad en cuanto a su distribución y venta en fresco, determinando y condicionando nichos de mercado (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010).

El tomate rojo es una de las especies hortícolas más importantes de México debido al valor de su producción y a la demanda de mano de obra que genera. Es el principal producto hortícola de exportación, ya que representa el 37% del valor total de las exportaciones de legumbres y hortalizas y el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias, sólo superada por el ganado vacuno (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010).

2.3.2 Usos

Su principal utilización es en ensaladas y jugo en fresco, la industria alimenticia actual procesa los Tomates rojos en infinidad de formas, desde jugos, purés, conservas de Tomate rojos enteros y pelados, fritos, en componentes de diversas salsas picantes o dulces, mermeladas, esencia para la elaboración de alimentos, saborizantes y otros productos. Los hay del tipo saladette, bola y cherry (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2010).

2.3.3 Producción Mundial

Según informes de la FAO en el año de 1999, la producción mundial del tomate rojo alcanzó 95.10 millones de toneladas siendo los principales países productores: China, EUA, Turquía, Italia, Egipto, e India que aportaron el 50% de la producción total.

Como se observa en la Figura 4, China es el más grande productor de tomate, seguido de Estados Unidos de Norte América y Turquía. México aparece en el lugar número diez.

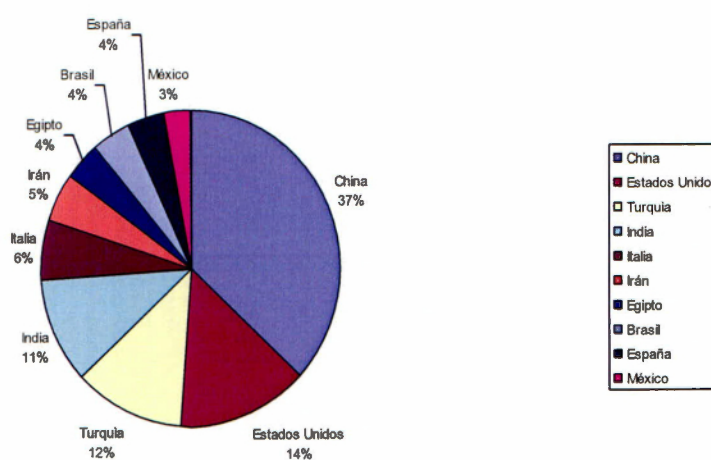


Figura 4. Estadísticas de producción de tomate rojo a nivel mundial (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010)

2.3.4 Producción en México

México es el principal exportador de tomate, sin ser el principal productor. Lo siguen España y los Países Bajos, con el 24%, el 20% y el 19%, respectivamente (Tabla 6).

Tabla 6. Principales productos de exportación en México (FAOSTAT, 2011)

	Producto básico	Cantidad [t]
1	Cerveza de Cebada	2026870
2	Trigo	1397630
3	Tomates	1042730
4	Bebidas N Al	761444
5	Pepinos y pepinillos	699938
6	Azúcar Refin	599103
7	Chiles, pim. pic., pim. (verde)	580864
8	Sandías	580703
9	Hortal Nep	576500
10	Limonos y limas	487085

2.3.5 Principales Estados Productores

En el 2001, el Estado tomatero más importante fue Sinaloa, alrededor del 42.56% de la producción total del país se produjo en dicho Estado, seguido por Baja California Norte 10.2%, Michoacán y San Luis Potosí 9.32% y 6.02%, respectivamente, lo que cubre el 73.01% de la producción total (Tabla 7).

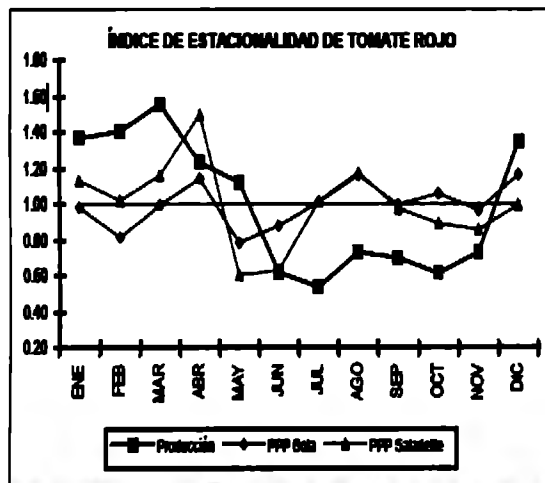
Tabla 7. Principales Estados en México con producción de tomate rojo en toneladas (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010)

ESTADOS	2004	2005	2006	2007	2008
Sinaloa	991,113.1	845,477.18	783,314.03	827,010.94	782,909.5
Baja California	294,076.06	262,457.52	216,000.04	196,388.03	206,257.11
Michoacán	162,476.07	150,730.08	134,177.84	224,897.88	175,702.64
San Luis Potosí	125,122.75	162,052.7	120,120	120,289.4	139,653
Jalisco	109,929.87	117,500.45	87,533.64	141,796.28	122,420.73
TOTAL	2,314,629.9	2,246,246.34	2,093,431.59	2,425,402.77	2,263,201.65

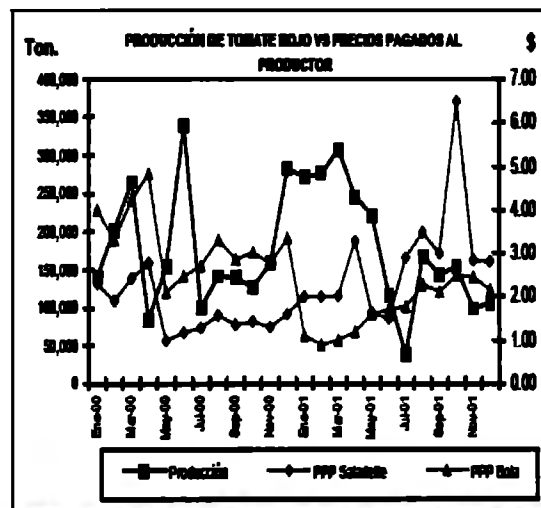
Las especies de tomate rojo que registran una mayor producción son el tomate rojo 90.38% y el tomate rojo de exportación 5.59%, el cual es producido totalmente en el Estado de Sinaloa (Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria, 2010).

El 52.06% de la producción del tomate rojo se cosechó en el ciclo otoño - invierno, mientras que el 47.94%, correspondió al ciclo primavera - verano. El 86.88% de la producción pertenece al sistema de riego, mientras que sólo el 13.12% corresponde al de temporal (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010).

La producción del tomate rojo se da todo el año; sin embargo, se observa una estacionalidad alta en los meses de enero a mayo, la participación de producción en estos meses es del 50.65% dentro de la producción anual; mientras que de junio a noviembre se detecta una estacionalidad baja, ya que en este periodo la cosecha desciende, para repuntar en el mes de diciembre. La correlación entre la producción y los precios pagados al productor son del orden del 38.26%, Figura 5 (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010).



Nota: El índice resume el comportamiento estacional durante un periodo determinado y el promedio anual del índice siempre tendrá un valor, por definición igual a 1. Cuando el índice es mayor a 1, indica que la producción y/o el precio aumentan y cuando sucede lo contrario indica que descienden.



Fuente: SAGARPA, Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera.

Figura 5. Descripción de la estacionalidad y producción del Tomate rojo. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SAGARPA, 2010)

2.3.6 Precios al mayoreo y al consumidor

La comercialización en fresco de este producto se realiza bajo el esquema de: productor – comerciante - mayorista que cubre el 70% de la comercialización, un 15% se efectúa a través de los intermediarios regionales y la menor parte 8% está constituida por productor - intermediario local - intermediario regional - mayorista y finalmente el comisionista independiente que participa en un 7% de la comercialización del producto que es enviado a los grandes centros urbanos de consumo en el Distrito Federal, Guadalajara y Monterrey (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010).

En la comercialización del Tomate rojo es de suma importancia el mercado externo, en éste, el productor tiene que utilizar empresas distribuidoras o broker's que son los que se encargan del cumplimiento de las Normas de Calidad que requiere este mercado (Figura 6) (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010).

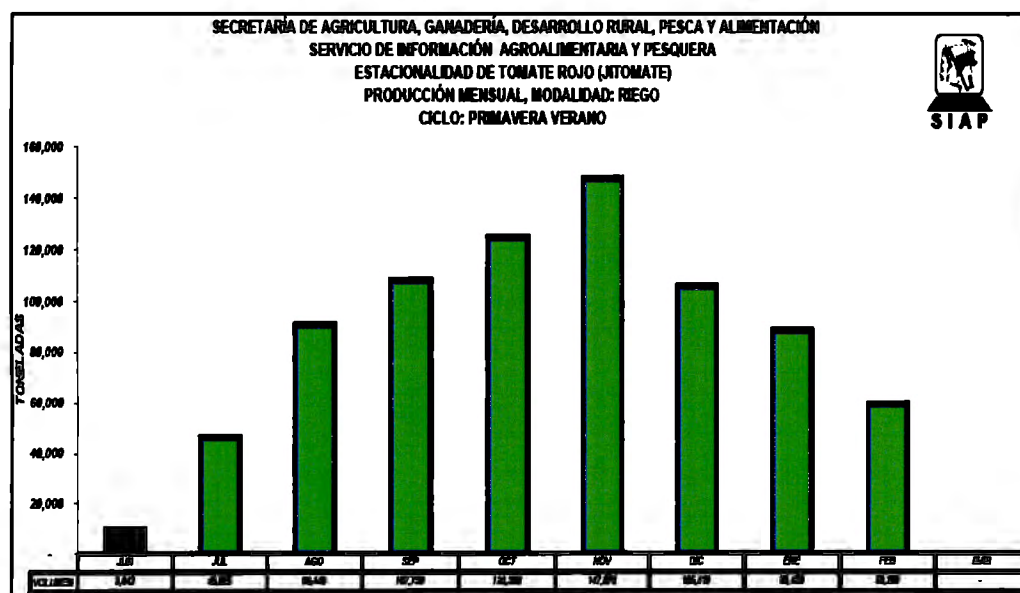


Figura 6. Estacionalidad del Tomate rojo. (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2010)

3. Cultivos hidropónicos

El cultivo en sustrato también conocido como hidropónico se inicia a finales del siglo XIX con fines experimentales y con una aplicación práctica relativamente reciente. Los productores de la zona de norteamericana han utilizado profusamente esta técnica, mientras que en la zona Mediterránea esta menos extendida (Tognoni, 2003).

La palabra hidroponía deriva del griego Hydro (agua) y Ponos (labor o trabajo) lo cual significa literalmente trabajo en agua. La hidroponía es una ciencia que estudia los cultivos sin tierra.

La hidroponía no es una técnica moderna, sino una técnica ancestral. En la antigüedad hubo culturas y civilizaciones que la usaron como medio de subsistencia. Por ejemplo, es poco conocido que los Aztecas, construyeron una ciudad en el lago de Texcoco (la ciudad de México se encuentra ubicada sobre un lago ancestral desecado lo que ocasiona el hundimiento de la misma), y cultivaban su maíz en barcos o barcazas con un entramado de pajas y de ahí se abastecían. Hay muchos ejemplos como este; los Jardines Colgantes de Babilonia eran hidropónicos porque se alimentaban de agua que fluía por unos canales (Arano, 1998).

Esta técnica existía en la antigua China, India, Egipto, también en la cultura Maya la utilizaban, y hoy en día se tiene como referencia a una tribu asentada en el lago Titicaca; es igualmente utilizada comercialmente, desarrollándose a niveles muy elevados, en países con limitaciones serias de suelo y agua. Por ejemplo, es un hecho poco difundido que la hidroponía tuvo un gran auge en la Segunda Guerra Mundial: los ejércitos norteamericanos en el Pacífico se abastecían en forma hidropónica (Arano, 1998).

La NASA la ha utilizado desde hace aproximadamente 30 años para alimentar a los astronautas. Hoy en día las naves espaciales viajan seis meses o un año. Los tripulantes durante ese tiempo comen productos vegetales cultivados en el espacio. La NASA ha producido con esta tecnología (Controlled Ecological Life Support System) desde hace mucho tiempo, desarrollándola incluso para la base proyectada en Marte (Arano, 1998).

En la actualidad, la hidroponía es el término que describe las distintas formas en las que se pueden cultivar plantas sin tierra. Estos métodos, generalmente conocidos como cultivos sin

suelo, incluyen el cultivo de plantas en recipientes llenos de agua y cualquier otro medio distintos al tradicional que utiliza tierra como sustrato, por ejemplo: arena gruesa, vermiculita, grava, arenas, piedra pómez, aserrines, arcillas expansivas, carbones, cascarilla de arroz y otros medios más exóticos, como piedras trituradas o ladrillos, fragmentos de bloques de carbonilla, entre otros. A dichos sustratos se les añade una solución nutritiva que contiene los elementos esenciales necesarios para el crecimiento y desarrollo de la planta. Hay varias razones para reemplazar la tierra por un medio estéril, se eliminan enfermedades contenidas en la tierra, inmediatamente entre otras (Brack, 2000).

3.1 Cultivo Hidropónico del tomate rojo

En el continente Americano, el consumo de Tomates (y de productos derivados de la hidropónia) ha aumentado de forma considerable en los últimos 20 años debido al cambio de mentalidad del consumidor promedio de adquirir productos "más sanos", "más orgánicos", con "menos aditivos" sin embargo, la realidad es que en el cultivo hidropónico también se usan diferentes insecticidas, bactericidas y otros, solo que son más fáciles de controlar sus concentraciones y se usan en menor frecuencia debido al aislamiento relativo que mejora el control de plagas del cultivo hidropónico (ONU, 2003).

Mientras el tomate crece de forma natural en los países con climas tropicales y subtropicales, en países con climas templados, el cultivo se realiza en invernaderos de cultivo hidropónico (Anton, 2004)

Un invernadero es aquella estructura que, además de proteger el cultivo de la lluvia y el viento, permite el paso de la radiación solar dificultando la pérdida de calor, en particular la componente de infrarrojo térmico. El grado de modificación climática va a depender del nivel tecnológico de los materiales empleados en su construcción y de los equipos complementarios de climatización, calefacción, humidificación, ventilación, abonado carbónico, iluminación artificial, etc (Anton, 2004).

Esta modificación climática permite avanzar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar fuera de época. En los últimos años se ha producido una expansión de la superficie protegida, acolchados, túneles, invernaderos, a causa de la demanda por parte del consumidor de los países desarrollados de productos frescos y económicos a lo largo del todo el año (Anton, 2004).

Desde el punto de vista ambiental los invernaderos presentan aspectos negativos como son las necesidades energéticas en climas fríos, la acumulación de residuos de plástico y aspectos paisajísticos. Mateo Box (1996) califica la agricultura con plásticos como un brutal atentado al paisaje además de conllevar graves riesgos de contaminación de tipo residual (plásticos, vegetales, envases, etc) y de los materiales fitosanitarios que consumen, no justificándose según este autor la conveniencia de sustraer la agricultura de la imprevisión inherente a las condiciones climáticas, prolongar el periodo productivo o avanzar la entrada de un producto en el mercado (Anton, 2004).

Los aspectos positivos son la mejor utilización de los recursos naturales sol, suelo y especialmente el agua. El tomate cultivado en invernadero consume 45% menos de agua respecto al cultivado en el exterior. El mismo hecho de poder aislarlo de las condiciones exteriores permite avanzar hacia el invernadero cerrado donde las diferentes emisiones podrán ser controladas, ejemplo, sistemas de recirculación (Anton, 2004).

3.2 Invernaderos Hidropónicos

3.2.1 Recirculación

La mayoría de las técnicas utilizadas en los cultivos sin suelo constituyen sistemas abiertos en que los lixiviados de las soluciones nutritivas se vierten al suelo y lo contaminan. Puesto que difícilmente coincide la dinámica de absorción de nutrientes por parte de las plantas con la aportada por la solución nutritiva, se utilizan fracciones de lavado que pueden oscilar entre el 20 y el 50% de la pérdida de nutrientes y agua. Así los volúmenes de solución lixiviada pueden representar anualmente en condiciones mediterráneas hasta $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (Widden, 1988). De los nutrientes aportados cerca del 50% se pierden por lixiviación. Una fracción que puede reducirse prácticamente a cero con los sistemas de recirculación (Stanghellini et al., 2003).

Actualmente, en España, un 5% de los cultivos hidropónicos se realizan mediante técnicas de recirculación. La recirculación en los cultivos sin suelos consiste en la recogida y reutilización de los lixiviados sobrantes de la fertirrigación de forma que se establezca un circuito cerrado.

En México, el promedio de drenaje es del 20 a 30% en sistemas hidropónicos abiertos, solo cuando el agua es de mala calidad se dan drenajes entre 20 a 50%.

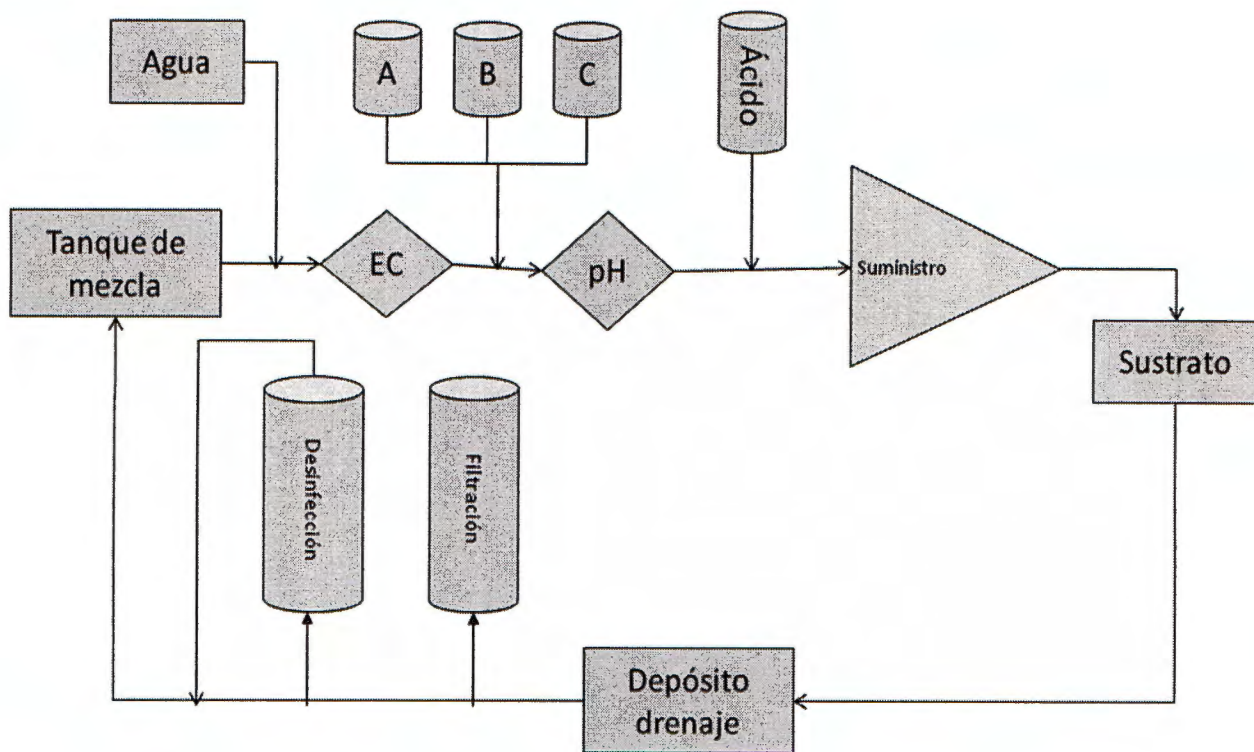


Figura 7. Esquema de un sistema cerrado o de recirculación (Anton, 2004).

Los sacos de sustrato deberán ir colocados sobre bandejas colectoras que conducirán a los drenajes sobrantes hacia depósitos de recolección. A partir de ahí estos deberán ser filtrados, para eliminar sólidos en suspensión procedentes de los sustratos, las propias raíces o microorganismos que pueden resultar patógenos. En algunos equipos después de la filtración se procede a la desinfección. Posteriormente se efectúa la recomposición de la solución nutritiva en función de la conductividad eléctrica (CE), y el pH medido en el lixiviado en relación a los deseados en la solución nutritiva. Desde un punto de vista técnico la operatividad de un sistema de recirculación

esta condicionada por la calidad de agua de riego. Cuando la CE es inferior a 0.6 dS m^{-1} no debe representar ningún problema. Si la CE es superior a 1 dS m^{-1} el agua será un factor más o menos limitante en función de su composición, siendo las concentraciones de cloro y sodio determinantes para el uso de agua en sistemas cerrados (Marfá,2000).

3.2.2 Necesidades de riego

Una buena gestión del agua empieza por la determinación más correcta posible de las necesidades de agua del cultivo. En un sistema hidropónico, el manejo del riego estará controlado por un controlador más o menos complejo el cual puede ser muy simple para ordenar dosis y frecuencia a ordenadores que reciben señales de diferentes sensores. Estos pueden ser climáticos, para el cálculo de la transpiración, tensiómetros, que miden la humedad del suelo o bandejas que informan el volumen del drenaje. En función de los parámetros de consigna se actuará sobre la apertura y cierre de las válvulas de riego (Anton, 2004).

Existen varios métodos para el cálculo de la evapotranspiración desde métodos de cálculo directo como la utilización de lisímetros para el cálculo de la pérdida de peso de la planta debido a la transpiración, o los balances de agua en el suelo a métodos indirectos, principalmente ecuaciones empíricas basadas en variables climáticas. De estas últimas las más sencillas son las basadas en la media de la temperatura (Thornthwaite, 1948) y (Blaney et al., 1950). Existen otras ecuaciones, igualmente empíricas, que se basan en la radiación (Priestly-Taylor) o que combina estas dos variables (Jensen-Haise).

Más rigurosas resultan aquellas fórmulas basadas en la combinación del balance energético y el transporte conectivo del vapor de agua (Penman, 1948) adaptada por (Monteith et al.,1990) para estimar la evapotranspiración real de las plantas expresada en unidades de energía.

A partir del cálculo de la evapotranspiración se procederá al cálculo de la dosis de riego. A la cantidad de agua requerida para compensar la absorción radicular hay que añadir una fracción que compense las necesidades de lixiviación o de lavado de las sales disueltas en el agua y que se encuentran en mayor concentración que la absorbida por el cultivo (Medrano, 2002). En cultivo

hidropónico con recirculación, se aconseja un 50% de drenaje para evitar al máximo la excesiva concentración de sales en el sustrato y en el agua de drenaje (Stanghellini et al., 2002) y un 25% en drenaje libre. Las condiciones de transpiración y por tanto de riego para un cultivo de tomate en sustrato hidropónico para las condiciones climáticas de Maresme, España son las representadas en la Tabla 8.

Tabla 8. Necesidades de riego en función de la transpiración (Anton, 2004).

DDT	S₀ MJm⁻²d⁻¹	L	ET Lm⁻²d⁻¹	ET total Lm⁻²
30	6.5	2.3	0.7	20.8
60	9.1	2.8	1.0	30.38
3	12.9	3.1	1.5	44.95
120	14.9	3.3	2.1	63.47
180	16.2	3.6	2.6	156.06
Total			1.7	315.65

DDT: días después del trasplante.

3.2.3 Fertilizantes

A partir de las necesidades conocidas de nutrientes y del análisis de agua se determinan las necesidades de fertilizantes para los diferentes periodos.

En el caso del drenaje libre, a partir del análisis químico semanal de la solución nutritiva y del drenaje se calcula la concentración de la absorción.

3.2.4 Control Fitosanitario

Desde que la agricultura existe, el hombre ha luchado continuamente contra aquellos organismos que pueden afectar a la producción. En la actualidad surge la necesidad de frenar el abuso que se hace del control químico. Se retorna a la fase clásica, pero sin despreciar la lucha química. Dentro de esta fase encontramos el control integrado de plagas y la producción agrícola integrada. Para la protección de los cultivos, la producción integrada combina la utilización de las técnicas basadas en la utilización de agroquímicos (Anton, 2004).

La producción integrada se puede definir como un sistema agrícola de producción de alimentos mediante métodos que respetan la salud humana y el medio ambiente con los objetivos de obtener productos de alta calidad, minimizando el uso de productos agroquímicos, optimizando los métodos de producción, y disminuyendo los residuos. El control integrado de plagas forma parte de la producción agrícola integrada pero ésta se centra únicamente en la sanidad vegetal (Anton, 2004).

La protección integrada de plagas se basa en la vigilancia de los cultivos y estimación de la población de organismos perjudiciales y antagonistas, en la aplicación de un umbral máximo de tolerancia a partir del cual se hace necesaria la intervención utilizándose, preferentemente, el control biológico y los métodos químicos como último recurso (Anton, 2004).

Se entiende por control biológico el que puede ejercer la fauna auxiliar autóctona y los enemigos naturales que podemos incorporar al cultivo. La fauna auxiliar autóctona es la que se encuentra presente en una zona, apareciendo de una forma espontánea, viéndose favorecida por el menor número de tratamiento químicos. La fauna auxiliar o enemigos naturales pueden ser parásitos, depredadores y patógenos de las plantas (Anton, 2004).

Los parásitos son insectos entomófagos que atacan a una sola presa o huésped. Entre los insectos existe un tipo especial de parasitismo que acaban con la muerte del huésped y recibe el nombre particular de parasitoide (Anton, 2004).

Los plaguicidas pueden clasificarse en naturales y sintéticos donde los primeros provienen de una fuente orgánica natural (nicotina, rotenona) y los sintéticos son aquellos elaborados mediante síntesis complejas. Entre los últimos, los insecticidas organofosforados y los insecticidas organoclorados son los más conocidos. Los primeros son ésteres del ácido fosfórico que pueden provocar intoxicaciones agudas en dosis muy bajas. Los insecticidas organoclorados son derivados de hidrocarburos clorados, fueron los primeros plaguicidas sintéticos en comercializarse, son compuestos de estructura química variada que tienen en común la presencia del cloro en su molécula, sus efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud se producen a mediano y largo plazo. Existen sin embargo muchas otras familias de plaguicidas tales como los carbamatos, piretrinas, piretroides, etc. Su toxicidad dependerá de la persistencia que tengan y de las interacciones con las proteínas funcionales del sistema inmune y del individuo (Anton, 2004).

Entre las principales plagas que afectan al cultivo de tomate de invernadero cabe destacar la mosca blanca (especies *Trialeurodes vaporariorum* Westwood y *Bemisia tabaci*). También los minadores de hoja (*Liriomyza sp.*) constituyen una plaga importante, Otras plagas de menor incidencia en los cultivos de tomate son ácaros, trips, pulgones y algunos lepidópteros (Sánchez, 2002).

3.2.5 Materiales de construcción

Un material de cobertura ideal para un invernadero de cultivo hidropónico es aquel que tenga propiedades adecuadas de aislamiento térmico, permita pasar la porción visible de la luz solar, bloquee los rayos infrarrojos que las plantas no aprovechan y los ultravioleta los bloquee o los convierta por fluorescencia en luz visible para aumentar el aprovechamiento de la luz. Además debe ser flexible, resistente y poder ser elaborado en paneles anchos para ahorrar en armazones de metal de sostén, además de que tiene que ser liviano (Anton, 2004).

Hay una gran cantidad de materiales que pueden ser utilizados para el recubrimiento de los invernaderos para cultivo hidropónico, como lo son:

- **Vidrio:** Permite el paso de la luz visible y también la infrarroja y ultravioleta, aísla bien las temperaturas, es pesado e inflexible;
- **PVC:** excelente aislante, no viene en paneles anchos, es flexible y resistente; y,

- **Polietileno:** Usado en dos capas con sistema de inflado que forma un colchón de aire aislante, permite más resistencia al viento, costoso y filtra las bandas de luz que no interesan para el cultivo hidropónico.

3.2.6 La luz y la fotosíntesis

La fotosíntesis es el proceso biológico mediante el cual las plantas sintetizan, a partir de materia inorgánica, materia orgánica como azúcares y proteínas [como su nombre lo dice requiere luz (foto) para poder realizar esas funciones anabólicas]. La porción o banda de la luz visible que genera la fotosíntesis es la comprendida entre 400 y 700 nanómetros (luz visible). El tiempo total de luz que debe recibir una planta es de al menos 6 horas. Esto no es problema en los países tropicales, pero constituye un reto en los países templados. En algunos cultivos de Tomate, los productores han realizado pruebas sombreando las plantas y han mostrado resultados de mejores cultivos. Sin embargo, en estudios controlados, hasta 1% de reducción de luz se ha comprobado que reduce 1% la fotosíntesis y, por ende, reduce 1% la productividad del cultivo hidropónico (ONU, 2003).

3.2.7 Humedad relativa

Para el cultivo del Tomate hidropónico, la humedad relativa ideal debe ser entre 65% a 75% en la noche y de 80% a 90% en el día. La humedad garantiza que las plantas puedan transpirar, refrescar la temperatura, mejora el tamaño de los tomates hidropónicos y además asegura que las hojas no crezcan excesivamente y mejore la floración (Anton, 2004).

Circulación de aire y calidad del aire

Las plantas en un cultivo de Tomate hidropónico, si están en un sistema totalmente cerrado, requieren medios de ventilación y circulación del aire que pueda además tener generadores de CO₂ para aumentar la cantidad de carbono utilizable para la fotosíntesis y generación de azúcares por parte de las frutas del cultivo hidropónico (Anton, 2004).

3.2.8 Semillas

Son costosas pero dan excelentes resultados con producción y germinación que puede ser predecible y plantas que ya se sabe su tamaño y productividad (Anton, 2004).

Algunas personas, debido a los costos, tratan de usar semillas de las frutas maduras para cultivar nuevas generaciones de plantas, pero por ser híbridas, las plantas resultantes pueden no tener las mismas características de la original. Otra forma de saltar el paso de la semilla es el usar brotes de las mismas plantas para generar nuevos cultivos. Esto está bien a pequeña escala pero es impráctico a grandes escalas (Anton, 2004).

3.2.9 Nutrición controlada de las plantas

El control del aporte nutricional a las plantas es una de las principales ventajas de los cultivos hidropónicos. La disolución nutritiva debe "diseñarse a la carta"; la investigación en Química Agrícola ha centrado sus esfuerzos, en los últimos años, en optimizar disoluciones nutritivas ideales para cada tipo de cultivo, sin olvidar que una nutrición ideal debe respetar las necesidades de la planta en cada estadio de su desarrollo, esto es, mantener un balance nutriente evolutivo (Anton, 2004).

De esta forma, se le da a la planta lo que necesita en cada momento, evitando lixiviaciones contaminantes y posibles toxicidades. En los cultivos convencionales resulta mucho más difícil calcular la dosis fertilizante adecuada, dado que se tiene que llegar a un equilibrio entre los nutrientes del suelo y los fertilizantes añadidos, sin olvidar los procesos antagónicos, la fijación a los coloides arcillosos o el mayor o menor grado de disponibilidad de los nutrientes en función de las condiciones físico - químicas y climatológicas del medio en que se desarrolla.

Cabe destacar, asimismo, la uniformidad de los productos obtenidos, mucho mayor en sistemas de hidroponía pura y alta sofisticación, y algo menor cuando se utilizan sistemas de riego más sencillo como el goteo (Anton, 2004).

3.2.10 Germinación

Se puede realizar en bandejas con mezclas sin tierra como arena de río, perlita, cascarilla de arroz que previamente ha sido empapada para asegurar una perfecta distribución de la humedad para germinar las semillas (Anton, 2004).

Una vez que brotan, se dejan en la bandeja hasta que se vea que generan un tallo con brotes laterales y que la raíz va a resistir la manipulación del trasplante (Anton, 2004).

Los semilleros o almácigos deben estar expuestos a la luz solar directa para asegurar que germinen de forma adecuada las semillas de los Tomates hidropónicos. La germinación debe ocurrir dentro de la primera semana de haber sido colocadas las semillas (Anton, 2004).

3.2.11 Tipos de cultivo y medios de cultivo

El cultivo del Tomate hidropónico se puede realizar de muchas maneras (Anton, 2004):

- Como cultivo hidropónico de raíz flotante ya sea con contenedores en los cuales la raíz esté sumergida o en contenedores con flujo continuo de nutrientes que bañen las raíces. Este método requiere bombas para mover el agua y los nutrientes e implica altos costos en energía y en implementos además de mantenimiento.
- Como cultivo en sustrato sólido, el Tomate en general prefiere el cultivo hidropónico en perlita que es un material que permite buena aireación, distribución y crecimiento de las raíces. Además de poder ser esterilizado al vapor para evitar plagas, puede ser lavado y cuando está seco es muy liviano para su transporte.

El cultivo hidropónico de Tomates en sustrato sólido puede hacerse con sistemas de bolsas con tubos de irrigación y ranuras de drenaje o en sistemas cerrados. Los cultivos en sistemas cerrados pueden crear concentraciones tóxicas de sales en el medio de cultivo si se reutiliza sin lavar y no se asegura un buen sistema de drenaje (ONU, 2003).

Los nutrientes para las plantas del Tomate hidropónico son suministrados en forma de soluciones nutritivas que se consiguen en el comercio agrícola. Las soluciones pueden ser preparadas por los mismos cultivadores cuando ya han adquirido experiencia en el manejo de los cultivos o

tienen áreas lo suficientemente grandes como para que se justifique hacer una inversión en materias primas para su preparación. Alternativamente, si las mismas estuvieran disponibles en el comercio, es preferible comprar las soluciones concentradas, ya que en este caso sólo es necesario disolverlas en un poco de agua para aplicarlas al cultivo (ONU, 2003).

Las soluciones nutritivas concentradas contienen todos los elementos que las plantas necesitan para su correcto desarrollo y adecuada producción de raíces, bulbos, tallos, hojas, flores, frutos o semillas. Composición de las soluciones nutritivas además de los elementos que los vegetales extraen del aire y del agua (Carbono, Hidrógeno y Oxígeno) ellos consumen con diferentes grados de intensidad los siguientes elementos:

- Indispensables para la vida de los vegetales: elementos mayores (Nitrógeno, Azufre, Fósforo, Calcio, Manganeso, Potasio, Magnesio) y menores Hierro Cobre, Zinc, Boro y Molibdeno).
- Útiles pero no indispensables para su vida: Cloro, Sodio, Silicio.
- Innecesarios para las plantas, pero necesarios para los animales que las consumen; Cobalto, Yodo.
- Tóxicos para el vegetal: Aluminio.

Es necesario tener en cuenta que cualquiera de los elementos antes mencionados pueden ser tóxico para las plantas si se agregan al medio en proporciones inadecuadas, especialmente aquéllos que se han denominado elementos menores (Anton, 2004).

3.2.12 Funciones de los elementos nutritivos en las plantas

De los 17 elementos químicos considerados necesarios para el crecimiento saludable de las plantas, 14 son nutrientes minerales. Ellos en condiciones naturales de cultivo (suelo) entran a la planta a través de las raíces. El déficit de sólo uno de ellos limita o puede disminuir los rendimientos y, por lo tanto, las utilidades para el cultivador (Anton,2004).

3.2.13 Polinización

Se puede realizar con cepillos vibratorios, agitando de forma manual las plantas o utilizando insectos como abejas o abejorros (se prefieren los abejorros ya que no representan ningún peligro para los trabajadores de los cultivos hidropónicos del tomate). Los abejorros ahorran hasta 15 horas semanales de trabajo por acre de cultivo hidropónico del tomate (Anton, 2004).

3.2.14 Fertilización carbónica

La aportación de CO₂ permite compensar el consumo de las plantas y garantiza el mantenimiento de una concentración superior a la media en la atmósfera del invernadero; así la fotosíntesis se estimula y se acelera el crecimiento de las plantas. Para valorar las necesidades de CO₂ de los cultivos en invernadero se necesita realizar, en los diversos periodos del año, un balance de las pérdidas derivadas de la absorción por parte de las plantas, de las renovaciones de aire hechas en el invernadero y las aportaciones proporcionadas por el suelo a la atmósfera del mismo. Del enriquecimiento en CO₂ del invernadero depende la calidad, la productividad y la precocidad de los cultivos. Hay que tener presente que un exceso de CO₂ produce daños debidos al cierre de los estomas, que cesan la fotosíntesis y pueden originar quemaduras. Los aparatos más utilizados en la fertilización carbónica son los quemadores de gas propano y los de distribución de CO₂ en el cultivo del Tomate, las cantidades óptimas de CO₂ son de 700 - 800 ppm. En cuanto a los rendimientos netos, dan incrementos del 15 al 25% en función del tipo de invernadero, el sistema de control climático, etc (Anton, 2004).

3.2.15 Ventajas de los cultivos hidropónicos

A continuación se describen las ventajas del cultivo hidropónico sobre el cultivo tradicional en suelo (Arano, 1998).

1. Menor espacio y capital para una mayor producción;
2. Mayor calidad del producto;
3. Mejoramiento de las propiedades organolépticas del fruto;
4. Cultivar exitosamente cualquier especie o variedad vegetal;
5. Independencia de los fenómenos meteorológicos;

6. Mayor precocidad en el cultivo;
7. Ahorro de agua que se puede reciclar;
8. Permite producir cosechas contra estación, fuera de estacionalidad; y,
9. Se reduce en gran medida la contaminación del ambiente y los riesgos de erosión; y, cultivos libres de parásitos, bacterias, hongos y contaminantes.

Por otra parte, los beneficios obtenidos al establecer cultivos alternativos son varios, entre ellos: se tiene el beneficio social y el económico. El beneficio social se obtiene como producto del cambio de las condiciones de vida de las familias, considerando una mejor calidad de la alimentación, la protección de la salud y la obtención de ingresos. Los nuevos ingresos permitirían autofinanciar el funcionamiento y la expansión del invernadero, además de cubrir pequeñas necesidades diarias que antes estaban insatisfechas (Cepes, 2010).

El beneficio también se refleja en el cambio de actitud de las familias y de las comunidades, que dejan de ser miembros pasivos para convertirse en miembros activos en el proceso de su propio desarrollo. Es necesario resaltar cómo los niños asumen actitudes muy positivas a través de estas actividades productivas, que aparte de permitirles cosechar productos comestibles, les da la posibilidad de adquirir tempranamente conocimientos prácticos que les hacen menos abstractas algunas áreas del saber, como sucede con la Química, la Biología y otras Ciencias, finalmente el rendimiento en el cultivo hidropónico es mejor que por el método tradicional en relación a su productividad (Tabla 9) (FAOSTAT, 2011).

Tabla 9. Productividad del cultivo hidropónico versus cultivo tradicional en suelo (FAOSTAT, 2011).

Cultivo	Cultivo hidropónico		Cultivo tradicional
	(Ton/año)	número de cosechas al año	(Ton/año)
Tomate	375	2	100
Pepino	750	3	30
Pimiento	96	3	16
Col	172	3	30
Lechuga	313	10	52

3.3 Hidroponia y sostenibilidad

Desde hace tiempo, expertos y científicos de diversas escuelas del pensamiento económico y social, considerando el carácter finito de los recursos, han planteado límites al crecimiento, como vía para mejorar el bienestar de la sociedad. Ya en 1798 Thomas R. Malthus, postulaba que la población y su constante crecimiento ejercían presión sobre los recursos naturales, que éstos no se reproducían ni restituían al mismo ritmo que la población, resultando de ello un desequilibrio que alteraba la relación entre hombre y naturaleza.

Desde entonces han proliferado las teorías sobre desarrollo y bienestar, así como del equilibrio ecológico y humano, que hacen énfasis en la necesidad de poner límites al crecimiento económico y/o al demográfico para incidir en una mayor disponibilidad de los recursos naturales y en una mejor calidad de vida (INEGI, 2000).

Sin embargo, la primera iniciativa global, fue la Declaración de Estocolmo en 1972, donde se manifestaron por primera vez las preocupaciones de la comunidad mundial por los problemas ecológicos y del desarrollo.

Se confirma con mayor frecuencia que, a la par de los grandes avances en los campos científico y tecnológico, determinados patrones de producción, consumo y poblamiento territorial siguen ocasionando degradación y/o agotamiento en los medios del ambiente (aire/clima, agua, tierras/suelos y la biota) dentro de éstos en muchas regiones del planeta. Esta situación está llevando a los países a proponer soluciones no solo nacionales sino también regionales y globales para preservar los recursos naturales y detener el progresivo deterioro ambiental.

Conscientes de todos estos desafíos, los países han adoptado los instrumentos institucionales y legales para orientar sus estrategias hacia el desarrollo sostenible, México no ha sido la excepción: como ejemplo de ello, puede citarse la definición de sostenibilidad, consignada en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de 1996 (Artículo 3º, inciso XI): *“Desarrollo sostenible: El proceso evaluable mediante criterios e indicadores de 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”*.

La definición anterior alcanza una dimensión clara en el Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000, el cual establece los criterios generales de la planeación del desarrollo en México, y que se efectúa a través de los planes sectoriales, los que a su vez plantean sus estrategias, objetivos y metas orientados a frenar el deterioro ambiental y sentar las bases para revertirlo.

En 1999 el Congreso de la Unión incorporó en los Artículos 4º, párrafo 5º, y 25º de la Constitución General de la República el derecho de los ciudadanos a vivir en un medio ambiente sano bajo los principios del desarrollo sostenible: “Artículo 4º, párrafo 5º: Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar.” “Artículo 25º: Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sostenible, que fortalezca la soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante el fomento al crecimiento económico y al empleo y una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales, cuya seguridad protege esta Constitución.”

En el Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000, señala la consecución del desarrollo sostenible como una prioridad nacional: *“(…) la estrategia nacional de desarrollo busca un equilibrio global y regional entre los objetivos económicos sociales y ambientales de forma tal que se logre contener los procesos de deterioro ambiental; inducir un ordenamiento ambiental del territorio nacional, tomando en cuenta que el desarrollo sea compatible con las aptitudes y capacidades ambientales de cada región; aprovechar de manera plena y sostenible los recursos naturales,*

como condición básica para alcanzar la superación de la pobreza; y cuidar el ambiente y los recursos naturales a partir de una reorientación de los patrones de consumo y un cumplimiento efectivo de las leyes”.

Junto con las acciones para frenar las tendencias del deterioro ecológico y transitar hacia un desarrollo sostenible, se realizarán programas específicos para sanear el ambiente en las ciudades más contaminadas, restaurar los sitios más afectados por el inadecuado manejo de residuos peligrosos, sanear las principales cuencas hidrológicas y restaurar áreas críticas para la protección de la biodiversidad.

En materia de regulación ambiental, la estrategia se centrará en consolidar e integrar la normatividad y en garantizar su cumplimiento. En particular, se fortalecerá la aplicación de estudios de evaluación de impacto ambiental (EIA), y se mejorará la normatividad para el manejo de residuos peligrosos.

El factor de promoción en la regulación ambiental estará dado por un sistema de incentivos que, a través de normas e instrumentos económicos, alienten a productores y consumidores a tomar decisiones que apoyen la protección del ambiente y el desarrollo sostenible.

El uso de instrumentos económicos evitará que quienes provoquen costos ambientales los trasladen a los demás productores y a los consumidores, y permitirá que quienes protejan el ambiente y los recursos reciban estímulos permanentes para reducir la generación de contaminantes y residuos. Esta política evitará que los costos se incrementen para no perjudicar a los consumidores, y propiciará que se asuman de manera eficiente los objetivos de calidad ambiental para el desarrollo (INEGI, 2000).

Con fundamento técnico, con respaldo jurídico, económico y fiscal y con los consensos sociales necesarios, se buscará que cada entidad federativa y cada región crítica cuenten con un ordenamiento ecológico del territorio expedido con fuerza de Ley.

Para aprovechar plenamente las ventajas de los acuerdos comerciales de los que se forma parte se impulsará una producción limpia, ya que la calidad ambiental es hoy uno de los requisitos de

la competitividad, sobre todo en los países de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), y del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLC).

Para poder dar cumplimiento con varios de los puntos anteriormente descritos en la legislación, ACESYS (2001), describe que el cultivo hidropónico es una extraordinaria opción de cultivo sostenible ya que permite maximizar la producción de productos alimentarios en menor espacio, genera fuentes de trabajo en las comunidades donde se establece y logra disminuir los impactos ambientales con respecto a otros cultivos tradicionales.

Además Resh (2001), indica que los cultivos hidropónicos en invernaderos irán reemplazando la forma tradicional de cultivar y generará menores impactos negativos, sobre todo en la dimensión social y ambiental. Pueden ser benéficos al aliviar la presión sobre las tierras cultivables, aprovechar las tierras degradadas y generar empleos, entre otros beneficios (Fierros, 1998).

Los cultivos sin suelo presentan características diferenciales importantes en comparación con el cultivo en suelo tradicional, entre ellas cabe citar: a) el control riguroso de los aspectos relacionados con el suministro de agua y nutrientes, especialmente cuando se trabaja en sistemas cerrados; y, b) la capacidad de recuperación de residuos y subproductos para ser utilizados como sustratos de cultivo.

Desde un punto de vista ecocompatible, el sustrato supone evidentes ventajas, precisamente por su condición de aislamiento del suelo o terreno natural, aunque hay que oponer ciertos inconvenientes en cuanto al origen y acopio de los materiales necesarios para su preparación, así como a las características de los residuos que pueden generarse en algunos casos una vez utilizados aquellos (Mateo, 1996).

No obstante, la industria de los cultivos hidropónicos o de sustrato, genera una serie de contaminantes procedentes de: a) la lixiviación de los nutrientes, especialmente en sistemas abiertos, a solución perdida; b) el vertido de materiales de desecho; c) la emisión de productos fitosanitarios y gases; y, d) el consumo extra de energía, consecuencia de los sistemas de

calefacción y mantenimiento del nivel higroscópico adecuado, la desinfección del medio de cultivo (ACESYS, 2001) http://www.tecnociencia.es/especiales/cultivos_hidroponicos/2.htm [consultada el 13 octubre del 2011].

Los problemas más graves, desde el punto de vista ambiental, que produce la práctica agrícola tradicional, atañen a la calidad del suelo, su degradación y posible desertización, especialmente en regiones donde el agua es un recurso limitado, como es el caso de México.

Otro de los problemas graves es la contaminación de las aguas subterráneas, producida por los productos agroquímicos, revistiendo especial importancia en el elevado contenido de nitratos, que en muchas zonas están por encima del nivel de potabilidad.

La contaminación de las aguas subterráneas por plaguicidas ha pasado a ser un tema de gran interés, el concepto de “plaguicida y producto relacionado” debe entenderse, según el Manual de Procedimientos de la Comisión del CODEX Alimentario 2011, como los reguladores del crecimiento, defoliantes y cualquier otra sustancia adicionada a cultivos, pre o post-cosecha para proteger su deterioro durante el almacenamiento y transporté pero en ocasiones puede generar serias afectaciones a los acuíferos y las zonas de recarga (ACESYS, 2001) http://www.tecnociencia.es/especiales/cultivos_hidroponicos/2.htm [consultada el 13 octubre del 2011].

Finalmente para poder garantizar el estar en el camino correcto, es decir, ir hacia la sostenibilidad es necesario poder medir los avances o retrocesos en ese respecto (la actividad se está acercando a la sostenibilidad o se está alejando), y para lograrlo es necesaria la utilización de indicadores para poderlo medir (descrito a partir del siguiente capítulo).

4. Indicadores en la sostenibilidad.

4.1 Indicadores

4.1.1 Definición de indicador

Los indicadores son datos estadísticos o medidas de una cierta condición, cambio de calidad o cambio en estado de algo que está siendo evaluado. Proporcionan información y describen el estado del fenómeno objeto de estudio, pero con un significado que va más allá de aquel que está directamente asociado con un parámetro individual (OECD, 1993). Los indicadores deben ser desarrollados de acuerdo a las aplicaciones ideadas, lo que requiere datos básicos y estadísticos confiables. A causa de los requerimientos y prioridades regionales, será difícil o innecesario llegar a un único conjunto de indicadores para muchos de los puntos en consideración. Sin embargo, un agregado común de indicadores clave podrá ser usado como base para comparaciones internacionales (Dumanski, 1994; Bakkes *et al.*, 1994).

De acuerdo con el Global Urban Observatory del Centro de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (1996), un indicador es una medición que resume información acerca de un tema en particular y puede señalar problemas particulares; provee una respuesta razonable

a necesidades y preguntas específicas requeridas por los tomadores de decisiones. Los indicadores muestran tendencias, proveen información cuantitativa y cualitativa, aunque ellos pueden ser más que piezas de información si están diseñados en respuesta a objetivos de política bien definidas. Los indicadores orientados a políticas ayudan a priorizar y definir las metas.

Los indicadores para sostenibilidad agrícola sirven para evaluar en qué medida un determinado sistema productivo cumple con los requisitos de sostenibilidad, cuáles son sus puntos críticos y cómo evoluciona a lo largo del tiempo.

Las estructuras para evaluar la sostenibilidad y el desarrollo sostenible pueden ser:

- a. el enfoque de agroecosistemas - este enfoque se basa en la evaluación del desempeño de los agroecosistemas de acuerdo a dimensiones ecológicas, económicas y sociales, usando cuatro criterios para la sostenibilidad, a saber: productividad, resiliencia, estabilidad y equidad. Haciendo un control cruzado del flujo de recursos y materiales con las dimensiones y los criterios para sostenibilidad permite evaluar el desempeño y la sostenibilidad de los agroecosistemas.

- b. productividad total (factor) - es la relación entre el valor de toda la producción dividido entre el valor económico de todos los insumos normalizados para eliminar eventuales cambios en los precios (Lynam y Herdt, 1988; Harrington *et. al.*, 1994; Whitaker, 1994). La productividad total es la inversa del costo unitario de producción cuando se incluyen los costos de degradación ambiental. Los sistemas agrícolas se consideran sostenibles cuando la productividad total muestra una tendencia no declinante. Esta estructura ha sido adaptada a los centros del CGIAR para propósitos de investigación.

- c. la Estructura Internacional para Evaluación del Manejo Sostenible de la Tierra - el manejo sostenible de la tierra (MST) describe los objetivos complementarios de mantener y fortalecer la calidad de la tierra y al mismo tiempo proporcionar oportunidades

económicas, sociales y ambientales para el beneficio de la actual y de las futuras generaciones. El manejo sostenible de la tierra puede ser evaluado por medio del desempeño de los cinco pilares del MST, o sea el mantenimiento y el fortalecimiento de la productividad, la reducción de los riesgos, el fortalecimiento de la calidad ambiental (tierra), la viabilidad económica y la aceptabilidad social (Smyth y Dumanski, 1994). El marco de un análisis lógico se usa para ajustar los aspectos imprecisos de la sostenibilidad, por ejemplo, evaluación de la sostenibilidad inferida en grados de probabilidad. Este marco se relaciona estrechamente con la estructura del PER para información ambiental y está siendo evaluado en varios casos de estudio en todo el mundo.

Desde 1992, algunas iniciativas internacionales han buscado métodos que permitan hacer operativo el concepto de sostenibilidad. Entre estos métodos están los principios, criterios e indicadores (PCI), la evaluación de ciclos de vida (LCA por sus siglas en Inglés), el análisis costo - beneficio, el conocimiento basado en el sistema y las evaluaciones de impacto ambiental (Holvoet y Muys, 2004).

Un indicador en relación a esta tesis, es cualquier variable o componente del ecosistema forestal o sistema de manejo, que se utiliza para inferir el estatus de un criterio en particular (Lammerts y Blom, 1996).

Siguiendo la definición de la OCDE, un indicador puede definirse, de manera general, como un parámetro o valor, derivado de parámetros generales, que señala o provee información o describe el estado de un fenómeno dado del ambiente o de una área específica con un significado de trasciende el valor específico del parámetro.

Este indicador es un dato altamente agregado, diseñado para un propósito específico y con un significado sintético, que conlleva, por tanto, dos funciones básicas: a) reducir el número de mediciones y parámetros que normalmente se requieren para reflejar una situación dada; y, b) simplificar el proceso de comunicación con el usuario.

El objetivo de desarrollar indicadores de sostenibilidad, es proporcionar a los expertos, a los tomadores de decisiones y al público en general un conjunto de indicadores que contribuyan tanto al conocimiento de la problemática de sostenibilidad como para apoyar el diseño de las estrategias y políticas de desarrollo sostenible del país.

A partir de 1995 se adopta el modelo propuesto por la OCDE (1994), para construir indicadores de desarrollo sostenible a nivel mundial, sin embargo las respuestas de los países a las especificaciones de categoría de la información no fueron iguales debido a que la mayoría de países organizaba los datos en grandes temas y sub-temas. Ello condujo a la UNCSD a recomendar la recolección de datos con un criterio más sencillo para garantizar que todos los países tuvieran una estructura de organización por temas y sub-temas de interés a escala nacional (UNCSD, 2000 y 2001).

Entonces, enfocar la construcción de indicadores de desarrollo sostenible o ambientales desde temas y sub-temas, y no desde categorías, se hace más operativo allí donde no sean evidentes los eslabones causales entre, por ejemplo, las presiones e impactos dado la dificultad para ser precisada esa relación.

Son varias las iniciativas que a nivel mundial aplican modelos de indicadores basados en temas y sub-temas en lugar de categorías de los mismos. Entre ellas destacan la iniciativa de la UNCSD en la que se definen un conjunto de indicadores de desarrollo sostenible denominados *Metas para el Nuevo Milenio* (UNCSD, 2000 y 2001). También destaca la iniciativa de indicadores del Fondo Mundial para la Naturaleza en su *Informe del Planeta Viviente* (WWF, 2004).

Los indicadores de desarrollo sostenible han sido concebidos de acuerdo a determinados criterios. Se requiere que:

- a) Que sean fáciles de elaborar y fáciles de comprender;
- b) Que contribuyan a inculcar y reforzar la conciencia pública sobre los aspectos de la sostenibilidad y promuevan la acción a nivel local, regional o nacional;
- c) Que sean relevantes para la medición y evaluación del progreso hacia el desarrollo sostenible;
- d) Que sean factibles de elaborarse a nivel nacional u otras escalas geográficas, considerando: la capacidad nacional, la disponibilidad de información básica, el tiempo de elaboración y las prioridades nacionales;
- e) Que estén fundamentados conceptualmente para facilitar comparaciones objetivas en los niveles nacional e internacional;
- f) Que sean susceptibles de adaptarse a desarrollos metodológicos y conceptuales futuros;
- g) Que ayuden a identificar aspectos prioritarios o de emergencia, orientando nuevas investigaciones;
- h) Que cubran la mayoría de los temas de la Agenda 21 y otros aspectos del desarrollo sostenible; y,
- i) Que tengan validez científica (Flores *et al.*, 2003).

Al adherirse al “Programa de Acción para el Desarrollo Sostenible” o *Agenda 21*, suscrito por los Jefes de Estado y representantes de los países asistentes a la *Cumbre de la Tierra* (Río de Janeiro, 1992), México se comprometió a adoptar medidas nacionales y globales en materia de sostenibilidad como también acciones orientadas a la generación de indicadores a través de los cuales se pueda medir y evaluar las políticas y estrategias en materia de desarrollo sostenible.

Un punto de la declaración de la Agenda 21 refleja la trascendencia del largo proceso asumido (párrafo 40.4): “*Los indicadores de desarrollo sostenible necesitan ser desarrollados para proporcionar bases sólidas para la toma de decisiones en todos los niveles y contribuir a autorregular la sostenibilidad de los sistemas integrados del ambiente y el desarrollo*”. Estos indicadores, que expresan en cierto nivel y magnitud las interrelaciones entre el desarrollo socio-económico y los fenómenos ecológico-ambientales, constituyen para los tomadores de decisiones un punto de referencia para la evaluación del bienestar y de la sostenibilidad de un país. Su valor

se magnifica al contrastarse o correlacionarse con las metas que forman parte de las políticas nacionales.

En abril de 1995, la Comisión de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas (CDSNU), aprobó el Programa de Trabajo sobre Indicadores de Desarrollo Sostenible 1995-2000, a instrumentarse en tres fases, no excluyentes, que pueden resumirse así: 1) intercambio de información, desarrollo de las hojas metodológicas y capacitación a nivel nacional y regional (1995-1996); 2) continuar la capacitación y poner a prueba la funcionalidad de las hojas metodológicas entre aquellos países que, de manera voluntaria, desearan elaborar los indicadores de desarrollo sostenible (1996-1997); y, 3) evaluación de los indicadores elaborados en términos de sus interrelaciones y la agregación espacial, así como realizar su refinamiento si fuese necesario (1998-2000).

Como uno de los aspectos medulares de la primera fase, y para facilitar a los países la generación de los indicadores de sostenibilidad, la CDSNU, en colaboración con diversas agencias asociadas a Naciones Unidas, coordinó la elaboración de un conjunto de «hojas metodológicas», las cuales fundamentan y explicitan cada uno de los indicadores propuestos en la Agenda 21. Estas hojas pasaron por un proceso de consulta y afinación con expertos y los propios países hasta su publicación por Naciones Unidas en agosto de 1996, bajo el título *Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies* (y su posterior versión en español: *Indicadores de Desarrollo Sostenible: Marco y Metodologías*), producido por la CDSNU. Si bien México comenzó su participación de manera informal desde el arranque de la convocatoria, fue a partir de marzo de 1997, durante el tercer taller sobre ese tema celebrado en Costa Rica, cuando se sumó formalmente a otros 21 países que, de manera voluntaria, habían decidido participar en la prueba piloto mundial para desarrollar dichos indicadores.

México estuvo representado a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y del Instituto Nacional de Ecología (INE): Nueva York (Estados Unidos, febrero del 1995), en

donde se discutieron las hojas metodológicas entre los expertos y los representantes de los países; Ghent (Bélgica, noviembre 1996), ocasión en la que se dio el lanzamiento de las hojas metodológicas y arrancó formalmente la fase de prueba de tales indicadores mediante el trabajo en pares de países; San José (Costa Rica, marzo 1997), donde se exploraron las posibilidades de desarrollo y uso de los indicadores de sostenibilidad entre los países de la región; y Praga (República Checa, enero 1998), cuando se conjuntó a los 21 países participantes en la prueba para promover el intercambio de experiencias y recomendaciones, acelerar el proceso de prueba y obtener un mayor desarrollo de los indicadores.

En diciembre de 1998, a la luz de los reportes que 11 de los 22 países participantes habían enviado a la CDSNU, el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la División de Desarrollo Sostenible elaboró y remitió a los 22 países el informe provisional «Testing the CSDNU Indicators of Sustainable Development – Testing Process, Indicators and Methodology Sheets», requiriendo a la vez comentarios sobre la aplicabilidad y utilidad de dichos indicadores.

La retroalimentación solicitada a los países serviría para instrumentar, durante 1999, la 3ª fase de revisión y finalización del Programa de Trabajo de la CDSNU. Como parte de la segunda etapa de este Programa, en septiembre de 1999, México envió a la División de Desarrollo Sostenible (DDS), un informe descriptivo del trabajo conjunto realizado entre el INEGI y el INE, informando haber completado inicialmente la elaboración de 104 indicadores de sostenibilidad (de un total de 134) y considerando incrementar esa cifra en el siguiente informe.

En este contexto, en 1987, la Comisión Mundial de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo adoptaron por unanimidad el documento *Nuestro futuro común* o Informe Brundtland, que constituye el acuerdo más amplio entre científicos y políticos del planeta y que sintetiza los desafíos globales en materia ambiental en el concepto de desarrollo sostenible. Éste se definió como “*aquel que satisface las necesidades esenciales de la generación presente sin*

comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades esenciales de las generaciones futuras". Para ello, se plasmó en un esquema panorámico las tres áreas principales involucradas en torno a tal concepto: el bienestar humano, el bienestar ecológico y las interacciones (ver figura 8).

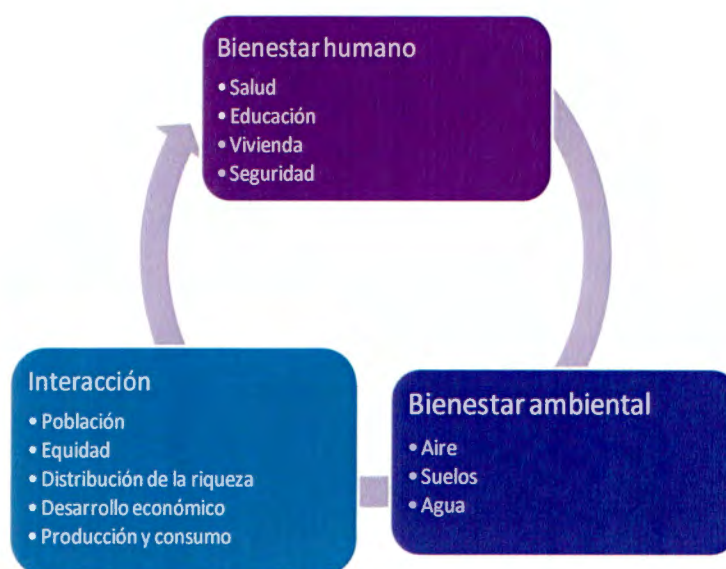


Figura 8. Principales Áreas de la Sostenibilidad. (World Commission on Environment and Development, Our Common Future, Oxford University Press, Nueva York, 1987)

En junio de 1992, durante la *Cumbre de la Tierra* en Río de Janeiro, Brasil, los jefes de Estado presentes en esa reunión ratificaron el Informe Brundtland y además aprobaron el Programa de Acción para el Desarrollo Sostenible, conocido como *Agenda 21*, a través de la cual los países se comprometieron a instrumentar, mediante la generación de indicadores, la gama de aspectos o temas implícitos en la noción de desarrollo sostenible.

Una variante que enriquece la noción original del desarrollo sostenible es aquella que concibe a éste en tres dimensiones: capital social, capital económico y capital ambiental, entendida la palabra capital tanto en términos de existencia como de la calidad de los recursos.

Por otra parte, es en la Conferencia sobre los Principios de Medición del Desempeño del Desarrollo Sostenible (Bellagio, Italia, 1996), donde sus aportes son conocidos como los *Principios de Bellagio* y constituyen estos al marco de lineamientos para la evaluación del proceso de desarrollo sostenible, incluyendo la selección y diseño de los indicadores, su interpretación y difusión de resultados.

También destacan las iniciativas de la OCDE, que desde 1998 viene realizando una serie de talleres con expertos para explorar nuevas metodologías e indicadores para medir el progreso hacia el desarrollo sostenible, Figura 9 (OCDE, 2000).

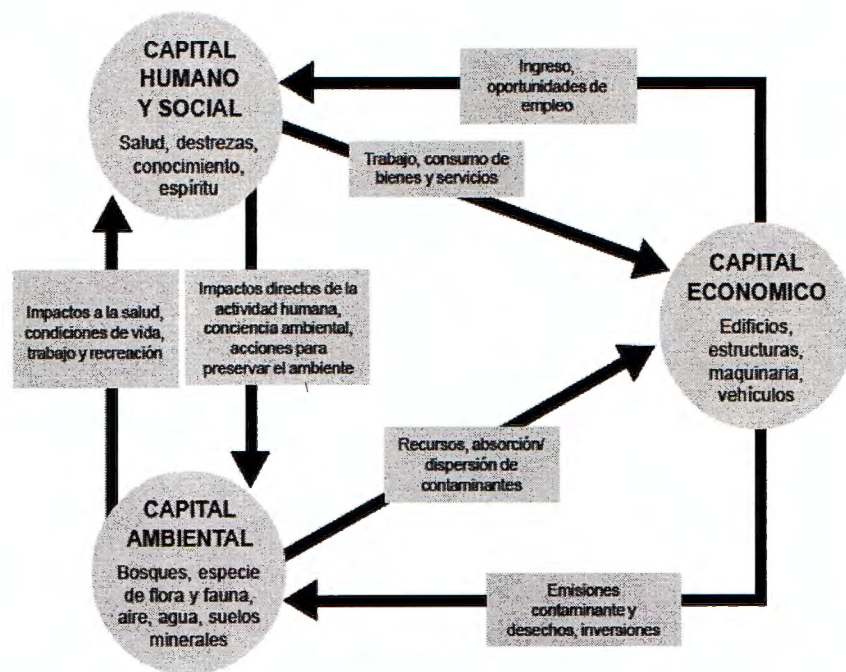


Figura 9. Interacciones entre capital humano, económico y ambiental. (The Government Statistical Service, Quality of life counts, UK, 1999)

Al estructurar el análisis de la sostenibilidad en estos subsistemas separados, se busca identificar no sólo los posibles ámbitos de causa - efecto para un fenómeno ambiental dado sino también los factores o aristas esenciales que pueden orientar las líneas de acción a seguir en torno a dichos fenómenos.

Los indicadores así contruidos tratan de reflejar y medir las interrelaciones entre el desarrollo socioeconómico y los fenómenos ecológico - ambientales, y constituyen un punto de referencia para la evaluación del bienestar y de la sostenibilidad de un país o comunidad.

Las preocupaciones por asegurar una mejor calidad de vida para la población apuntan a convertir el enfoque de la sostenibilidad en el prototipo de desarrollo que deben alcanzar los países, el cual será evaluado a partir de cómo las economías pueden ser capaces de alcanzar el desarrollo ambientalmente sostenible, esto es, una sociedad más incluyente, en la que los beneficios de la prosperidad económica sean ampliamente compartidos, con menos contaminación y menos desperdicio en el uso de los recursos naturales.

La elaboración de indicadores de desarrollo sostenible que actualmente se desarrolla en muchos países no se limita a la elaboración de indicadores macro, sino que también se orienta a medir la sostenibilidad en el ámbito local, en y por las propias comunidades, atendiendo sus problemas y prioridades. El esquema de indicadores macro constituye una herramienta útil hacia tal fin.

5. Metodología

5.1 Definición de sostenibilidad agrícola

A lo largo del desarrollo del proyecto de tesis se revisaron definiciones de sostenibilidad y se mencionaron los puntos que abarca el estudio del mismo.

Para esta investigación de tesis nos enfocaremos y partiremos de la definición establecida por la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1996. (Artículo 3º, inciso XI) definiendo a la sostenibilidad agrícola como “La actividad productiva evaluable mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la vida y productividad de vida de la personas a través de la preservación de los recursos naturales, protegiendo el equilibrio ecológico y el ambiente”:

5.2 Propuesta de indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos de Tomate rojo.

A partir del marco teórico y estado del arte presentado en el capítulo 4, se identifica la necesidad de seleccionar los criterios que permitan determinar los indicadores de sostenibilidad más apropiados para evaluar invernaderos de cultivos hidropónicos de Tomate rojo en México.

En esta investigación, se presenta un estudio teórico, basado en la recopilación de los elementos más relevantes en materia socioeconómica y ambiental de los cultivos hidropónicos del tomate rojo para el desarrollo de una propuesta de indicadores de sostenibilidad en invernaderos para México.

La determinación del método de investigación se establece con base en el hecho de que en México no se han desarrollado ni aplicado en invernaderos hidropónicos de Tomate rojo, indicadores socioeconómicos y ambientales que permitan evaluar el grado de sostenibilidad de los mismos.

La herramienta metodológica debe estar basada en la construcción y selección de indicadores que permitan un análisis permanente de los sistemas productivos. Grenier (1999) plantea la necesidad de identificar indicadores apropiados, pertinentes, verificables y cuantificables; que muestren una jerarquía y reflejen perspectivas, experiencias, procesos y acciones en los agroecosistemas en diferentes niveles.

De acuerdo a De Camino y Müller (1993), los indicadores no necesitan cubrir toda la base de recursos y todos los elementos de operación de un sistema, porque la matriz de indicadores podría hacerse inmanejable física y operativamente. Una estrategia para esa limitación es saber seleccionar los indicadores más importantes de cada componente o variable para una determinada dimensión del análisis.

Para poder determinar el número y tipo de indicadores es necesario primero establecer los criterios generales para la selección, los cuales funcionarán como un filtro que proporcionará una mayor calidad estadística de la información y un método científico para delimitar la frontera del análisis.

Zarzosa (1996), realizó una revisión bibliográfica e identificó el siguiente conjunto de criterios utilizados para la selección de indicadores:

- Deben describir un resultado final que considere la preocupación social;

- Deben de describir situaciones sociales de elección pública, es decir, que sean susceptibles de mejorar mediante la gestión social;
- Deben estar referidos a un campo de aplicación temporal y espacial definido, de tal forma que permitan la comparación ínter temporal e interregional;
- Deben de poder agregarse y desagregarse, lo que plantea un desarrollo que sea independiente de las instituciones que proporcionan la información;
- Deben de estar integrados en sus definiciones, especificaciones, directrices, estadísticas y categorías clasificatorias, con otros sistemas de estadísticas sociales, demográficas y económicas, con las cuales se puedan relacionar;
- Deben estar basados en la validez científica, es decir, que el conocimiento científico de las relaciones de causalidad, sus atributos y su significado deban estar bien fundamentados;
- Deben ser sensibles a cambios, en la medida de que den señales de cambios en las tendencias en las situaciones que representan, preferiblemente a corto plazo;
- Deben ser predictivos, de tal forma que brinden señales de posibles tendencias futuras de lo que miden;
- Deben de tener una cobertura geográfica nacional o basarse en escalas regionales que puedan ser agregadas a ese nivel;
- Deben ser costo-eficientes, ser prácticos y realistas y su costo debe estar considerado en la elección. Esto puede llevar a un trade off entre el volumen de información necesario y el costo de recolección;
- Deben utilizar la existencia de los datos como criterio de selección;
- Deben tener representatividad de las zonas descritas, de tal manera que permita comparar las posiciones relativas;

- La elección de los indicadores no debe subordinar el método empleado;
- Se deben preferir los indicadores directos del fenómeno a explicar, pero en caso de no existir, se recomienda el uso de indicadores indirectos que no generen ambigüedad en la explicación del factor que se pretende medir, y;
- Deben de tener una gran capacidad de discriminación del conjunto de unidades de observación para lo cual fue diseñado (comunidad, región, país, mundial).

Por otra parte Von Schiller et al. (2003), proponen una lista con doce criterios básicos que debe cumplir cualquier indicador:

1. Validez científica, el indicador debe de estar basado en un conocimiento científico consistente del sistema o elementos del sistema descrito, sus atributos, significado y estar bien fundamentados;
2. Representatividad, la información que contiene el indicador debe de ser representativa de la condición del todo;
3. Sensibles a cambios, debe señalar cambios de tendencias en el medio o en actividades humanas relacionadas con éste, preferiblemente en corto plazo;
4. Disponibilidad y fiabilidad de los datos, los datos deben de ser fiables y de buena calidad. La seguridad de los programas de control debe garantizar la futura comparabilidad de los datos;
5. Relevancia y utilidad, el indicador debe proveer información de relevancia para los usuarios y para determinar objetivos y metas en el ámbito de formulación de políticas;
6. Comprensible, el indicador debe ser simple y claro, su significado debe ser cuasi obvio y de fácil comprensión por no especialistas que vayan a hacer uso del mismo;
7. Predictivo, el indicador debe proveer señales de alarma previa de futuras tendencias negativas en términos de la salud humana, la economía y los ecosistemas;

8. Metas, el indicador ideal debe de proponer metas a alcanzar, con las que poder comparar la situación actual;
9. Comparabilidad, el indicador debe de ser presentado de tal forma que permita comparaciones inter territoriales;
10. Cobertura geográfica, el indicador debe de ser nacional o basarse en temas de carácter regional extensibles a escala nacional;
11. Sencillez, los indicadores deben de ser medibles y cuantificables con relativa facilidad. A su vez, tienen que ser claros, simples y específicos, facilitando su comprensión por no especialistas que vayan a hacer uso de los mismos, y;
12. Razonable relación coste-beneficio, el indicador debe de ser eficiente administrativamente en términos de costo de obtención de datos y de uso de la información.

Considerando lo anterior se puede argumentar que no hay un consenso generalizado en la consideración de criterios de selección de indicadores, tal y como lo establece Escobar (1999 y 2004), por ésa razón en esta investigación se propone una metodología para la determinación de criterios estratégicos genéricos, y una vez realizada esta determinación aplicarlos en la selección de indicadores de sostenibilidad.

5.3 Determinación de criterios de selección de indicadores

Para poder determinar los criterios más relevantes para la selección de indicadores que midan la sostenibilidad de los invernaderos de Tomate rojo, se consideraron los siguientes métodos:

1. Comparación de los criterios de selección de indicadores propuestos por:
 - Revista Fitotecnia, Centro Internacional de Investigación Forestal y el Fondo Sectorial (CONAFOR-CONACYT, 2008);

- Un ejercicio de aplicación de indicadores de sostenibilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la laguna Merín, Consejo Internacional para la Gestión y la Investigación, (International Board for Research and Management, ISBRAM, 1993);
- Indicadores de Desarrollo Sostenible en México, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (FAO, INEGI, INE, 1993).
- Norma con Indicadores para Agricultura Sostenible, Red de Agricultura Sostenible, (RAS, 2005).
- Metodología genérica de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), mediante el uso de Indicadores Ambientales (IA), y Análisis Multicriterio (AMC), con aplicación al Plan Director Sectorial Energético de las Islas Baleares (PDSEIB's), (Caballero, 2007).

La Tabla 10, presenta los criterios desarrollados por cada una de las instituciones analizadas.

Tabla 10. Criterios para seleccionar indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos

Revista Fitotecnia, Centro Internacional de Investigación Forestal y el Fondo Sectorial (CONAFOR-CONACYT, 2008).	Un ejercicio de aplicación de indicadores de sustentabilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la laguna Merín, Consejo Internacional para la Gestión y la Investigación, (International Board for Research and Management, ISBRAM, 1993).	Indicadores de Desarrollo Sostenible en México, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO, 1993 e INEGI, INE, 2000).	Norma con Indicadores para Agricultura Sostenible, Red de Agricultura Sostenible. (RAS, 1995).	Metodología genérica de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), mediante el uso de Indicadores Ambientales (IA), y Análisis Multicriterio (AMC), con aplicación al Plan Director Sectorial Energético de las Islas Baleares (PDSEIB's). (Tesis Doctoral, Carlos Caballero, 2007).
Existen los recursos económicos necesarios para el manejo sustentable del invernadero	Productividad (mantener o incrementar la producción /servicios)	Evaluación de la existencia y uso de los indicadores en las distintas instituciones del país vinculadas con la gestión ambiental y el desarrollo sustentable	Un sistema de cadena de custodia es necesario para evitar la mezcla de productos de fincas certificadas con productos de fincas no certificadas.	Ámbito estratégico
Existencia de políticas (subsidios o incentivos) de apoyo para las plantaciones forestales	Seguridad (Reducir el riesgo productivo)	Evaluación de la disponibilidad de información responsables y las fuentes de los datos básica, es decir, una exploración sobre los datos requeridos para la elaboración de los 134 indicadores, las instituciones responsables y las fuentes de los datos	La finca debe tener un programa de conservación de ecosistemas.	Interpretable
La empresa apoya el manejo sustentable de los invernaderos	protección (Proteger la calidad y el potencial de los recursos naturales y prevenir la degradación del suelo y el agua)	Identificación de los objetivos del desarrollo sustentable y de sus áreas prioritarias como también de los objetivos y metas consignados en el Plan Nacional de Desarrollo.	La integridad de ecosistemas naturales debe ser protegida; la alteración o destrucción de ecosistemas es prohibida.	Validez científica
Se mantiene la sanidad y vitalidad del ecosistema	Viabilidad (Ser económicamente viable)	Fácil elaboración y comprensión	No se permiten la cacería, recolección, extracción y el tráfico de animales silvestres.	Disponibilidad de datos
Se conserva y se mantiene el agua y el suelo	Aceptabilidad (Ser socialmente aceptable)	Contribuyan a inculcar y reforzar la conciencia pública sobre los aspectos de la sustentabilidad y promuevan la acción a nivel local, regional o nacional	Descarga de aguas residuales sin tratamiento en cuerpos de agua es prohibida.	
Los habitantes de las comunidades cercanas a la plantación tienen oportunidades de empleo y mejoramiento de su calidad de vida		Sean relevantes para la medición y evaluación del progreso hacia el desarrollo sustentable	El depósito de sustancias sólidas en cauces de agua es prohibido.	
Se favorece la capacitación de todos los participantes		Sean factibles de elaborarse a nivel nacional u otras escalas geográficas, considerando: la capacidad nacional, la disponibilidad de información básica, el tiempo de elaboración y las prioridades nacionales	La finca no debe discriminar en políticas y procedimientos laborales y de contratación.	
Se mantiene la capacidad productiva del invernadero		Estén fundamentados conceptualmente para facilitar comparaciones objetivas en los niveles nacional e internacional;	La finca los salarios en la finca deben ser iguales o mayores que el mínimo legal o regional.	
El proyecto se somete a auditorías independientes		Sean susceptibles de adaptarse a desarrollos metodológicos y conceptuales futuros	La contratación directa o indirecta de menores de 15 años es prohibida.	
Se reconoce la importancia de la salud y la integridad física de los trabajadores		Ayuden a identificar aspectos prioritarios o de emergencia, orientando nuevas investigaciones	No se permite el trabajo forzado.	
		Cubran la mayoría de los temas de la Agenda 21 y otros aspectos del desarrollo sustentable.	Se requiere el uso del equipo de protección personal para la aplicación de agroquímicos.	
			Solo se puede usar los agroquímicos permitidos en fincas certificadas.	
			No se permite el uso de materiales transgénicos.	
			Las nuevas áreas de producción deben estar ubicadas en tierras aptas para el propósito.	

2. Identificación de afinidades. En este paso se analizaron los criterios de acuerdo a su definición y se señalaron, con un mismo color, aquellos que presentaran el mismo significado. En la Figura 5.1 se pueden visualizar, con un mismo patrón de color, los criterios afines.

Tabla 11. Criterios agrupados por afinidad

No.	Criterio de Selección	Número de criterios asignados
1	Manejo sustentable	10
2	Aceptabilidad (social, trabajadores)	8
3	Conservación de agua, suelo y aire	7
4	Auditabile	5
5	Productividad	4
6	Fácil elaboración	4
7	Facilidad de conceptualizar y comparar	4
8	Viabilidad económica	2
9	Validez científica	1

3. Determinación de la relevancia. Tomando en cuenta el número de repeticiones de un mismo criterio (mismo color), se determinó su relevancia, asumiendo que el criterio que más presencia tuvo en todas las instituciones era más importante que aquel que sólo fue considerado por un organismo internacional.

Tabla 12. Resultado de la selección de los criterios con mayor participación en instituciones.

Criterio de selección	Número de indicadores
Aceptabilidad (social, trabajadores)	9
Manejo sustentable	5
Productividad	4
Conservación de agua, suelo y aire	4
Auditabile	3
Fácil elaboración	3
Facilidad de conceptualizar y comparar	3
Viabilidad económica	2
Factibilidad de comprensión	1
Validez científica	1

5.4 Selección de indicadores de sostenibilidad.

De acuerdo con lo establecido en el capítulo 2, se consideró el marco de temas sociales, económicos y ambientales, por ser los tres rubros que cubren la evaluación de la sostenibilidad. En dicho modelo los temas constituyen áreas de interés y se dividen en lo que algunas organizaciones UNCSO (1996) denominan subtemas y otras (OCDE, 1994), indicadores compuestos.

Los indicadores compuestos están conformados a su vez por indicadores simples.

En esta tesis se realizó una selección a nivel de indicadores compuestos, ya que de esta forma se considera un número más manejable de información. El análisis parte de las propuestas publicadas por las siguientes instituciones:

1. Desarrollo de Principios, Criterios e Indicadores de Sustentabilidad para las Plantaciones Forestales Comerciales de Rápido Crecimiento (Programa Forestal y Programa de Desarrollo Social, 2008), basado en las siguientes instituciones:

Centro Internacional de Investigación Forestal (CIFOR, 2008), Proceso de Montreal (Proceso de Montreal, 2007), Organización Internacional de Maderas Tropicales (OIMT, 2005), Organización Internacional del Trabajo (OIT, 1997), Proceso de Tarapoto (Tarapoto Proposal, 1995), Fundación Vida para el Bosque (VIBO A.C., 2002) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (Flores *et al.*, 2003).

2. Aplicación de indicadores de Sustentabilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la laguna de Merín (IWG, 1998).
3. International Board for Research and Management (ISBRAM, 1993).
4. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO, 1993).
5. Red de Agricultura Sostenible (RAS, 2005).

6. Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2001).

La propuesta de indicadores genéricos obtenidos incluyen 23 indicadores compuestos que son presentados en la Tabla 14 y el procedimiento de selección considera los siguientes pasos:

1. Contabilizar la presencia del indicador en los diferentes documentos analizados;
2. Seleccionar aquellos indicadores compuestos relevantes, que para efectos de este estudio son los que están presentes en 2 o más documentos, ya que se considero que un indicador con menos del 51% de presencia debía ser descartado, ya que era poco representativo de las preocupaciones y dirección de los esfuerzos mundiales, y;
3. Los indicadores compuestos seleccionados son evaluados con los criterios estratégicos seleccionados: Aceptabilidad, Manejo Sustentable, Productividad, Conservación del agua, suelo y aire y Auditable (Tabla 14). Dicha evaluación consiste en asignar el valor de 1 si el indicador satisface el criterio establecido y 0 si el indicador no satisface el criterio.

La Tabla 13 presenta la evaluación de los indicadores compuestos que fueron relevantes en el paso número dos.

Tabla 13. Selección de los indicadores compuestos, con base a la presencia en documentos y organizaciones internacionales.

Indicadores Compuestos	Centro Internacional de investigación Forestal (2008).	Aplicación de indicadores de Sustentabilidad Merin (ISBRAM, 1993).	INEGI e INE (2000), ONU Indicadores en México	Red de Agricultura Sostenible (RAS, 2005).	Tesis Doctoral, Carlos Caballero, (2007).	Países y/o organismos que lo consideran
Económico						
Ingreso	0	1	0	0	0	1
Viabilidad económica	0	1	0	0	0	1
Productividad física	1	1	0	1	0	3
Riesgo	0	1	0	0	0	1
Participación de las manufacturas en la exportación total de mercancías			1	0	0	1
Producto Interno Bruto por habitante	0	0	1	0	0	1
Estudios de mercado y comercialización	1	0	0	0	0	1
Recursos económicos para desarrollo científico y tecnológico	1	0	1	0	0	2
Incentivos para el desarrollo de la plantación	1	0	0	0	0	1
Rentabilidad financiera de la inversión	1	0	0	0	0	1
Manejo de plagas y enfermedades	1	0	0	0	0	1
Siembras establecidas en terrenos cuya propiedad se sustente en títulos y documentos legales	1	0	0	0	0	1
Cumplimiento de leyes y regulaciones nacionales y locales aplicables a su actividad	1	0	0	0	0	1
Participación del consumo de recursos energéticos renovables	0	0	1	0	0	1
Social						
Aceptabilidad	0	1	0	0	0	1
Tasa de desempleo	0	1	1	0	0	2
Índice general de pobreza		0	1	0	0	1
Tasa de crecimiento de la población	0	0	1	0	0	1
Densidad de población	0	0	1	0	0	1
Acceso seguro al agua potable	0	0	1	0	0	1
Discriminación en políticas y procedimientos laborales	1	0	0	1	0	2
Remuneración justa (sueldos y salarios)	1	0	0	1	0	2
Seguridad para los trabajadores	1	0	0	1	0	2
Programa de prevención y mitigación de impactos a la salud	1	0	1	0	0	2
Los empleados pertenecen a las comunidades locales	1	1	0	0	0	2
Disponibilidad de la empresa a dialogar con las comunidades	1	0	0	0	0	1
Ambiental						
Extracción del agua subterránea y superficial	1	1	1	0	0	3
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en cuerpos de agua	0	0	1	1	0	2
Tratamiento de aguas residuales	0	0	0	1	0	1
Densidad de las redes hidrológicas	1	1	0	0	0	2
Cambios en el uso del suelo	1	1	1	1	0	4
Uso de pesticidas agrícolas	0	1	1	1	0	3
Uso de fertilizantes	0	0	1	1	0	2
Uso de energía en la agricultura	0	0	1	1	0	2
Tierra de riego como porcentaje de tierras cultivables	0	0	1	0	0	1
Tierra cultivable por habitante	0	0	1	0	0	1
Especies amenazadas respecto al total de especies nativas	0	1	1	1	0	3
Emisiones de gases de efecto invernadero	0	0	1	0	0	1
Emisiones de óxidos de azufre	0	0	1	0	0	1
Emisiones de óxidos de nitrógeno	0	0	1	0	0	1
Consumo de sustancias que agotan la capa de ozono	0	0	1	0	0	1
Reciclado y reutilización de desechos	0	0	1	1	0	2
Generación de desechos peligrosos	0	0	1	1	1	3
Productos Químicos prohibidos o severamente restringidos			1	0	0	1
Gases de efecto invernadero	0	0	0	0	1	1
Calidad del aire	0	1	0	0	1	2
Calidad del suelo	1	1	0	1	1	4
Calidad del agua	1	1	0	1	1	4
Cantidad de agua	1	1	0	0	0	2
Energía	0	0	0	0	1	1
Eutrofización	0	0	0	0	1	1
Acidificación	0	0	0	0	1	1
Protección de los recursos	1	1	0	1	0	3

Tabla 14. Valoración de indicadores compuestos a partir de criterios estratégicos.

Indicadores compuestos/criterios	Aceptabilidad (social, trabajadores)	Manejo sustentable	Productividad	Conservación de agua, suelo y aire	Auditable	Resultado
Productividad física	1	1	1	1	1	5
Tasa de desempleo	1	1	1	1	1	5
Uso de pesticidas agrícolas	1	1	1	1	1	5
Uso de fertilizantes	1	1	1	1	1	5
Calidad del agua	1	1	1	1	1	5
Cantidad de agua	1	1	1	1	1	5
Recursos económicos para desarrollo científico y tecnológico	0	1	1	1	1	4
Remuneración justa (sueldos y salarios)	1	1	1	0	1	4
Seguridad para los trabajadores	1	1	1	0	1	4
Programa de prevención y mitigación de impactos a la salud	1	1	1	0	1	4
Extracción del agua subterránea y superficial	0	1	1	1	1	4
Densidad de las redes hidrológicas	0	1	1	1	1	4
Cambios en el uso del suelo	0	1	1	1	1	4
Uso de energía en la agricultura	0	1	1	1	1	4
Generación de desechos peligrosos	1	1	0	1	1	4
Calidad del aire	1	1	0	1	1	4
Calidad del suelo	1	1	0	1	1	4
Protección de los recursos	1	1	0	1	1	4
Discriminación en políticas y procedimiento laborales	1	1	0	0	1	3
Los empleados pertenecen a las comunidades locales	1	1	0	0	1	3
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en cuerpos de agua	0	1	0	1	1	3
Reciclado y reutilización de desechos	0	1	0	1	1	3
Especies amenazadas respecto al total de especies nativas	0	1	0	0	1	2

Escala (0=No cumple 1=Cumple)

5.5 Criterios de selección de indicadores

De acuerdo a este análisis se determinaron los cinco criterios que se presentan en la Tabla 15 se trata de criterios en los que más del 51% de los organismos internacionales coinciden y debido a esta razón son considerados como criterios de sostenibilidad.

Tabla 15. Propuesta de criterios estratégicos genéricos para selección de indicadores compuestos.

Criterios de selección	Repetición	Descripción
Manejo sustentable	10	El indicador debe medir la productividad agrícola vs la disponibilidad de la ciencia y la tecnología con el fin de conservar los ecosistemas y recursos naturales para así suministrar beneficios a largo plazo para los trabajadores, los productores y las comunidades, respetando las políticas, leyes y reglamentos locales.
Aceptabilidad	8	El indicador debe medir que el cultivo hidropónico debe ser socialmente aceptable, es decir debe satisfacer las necesidades económicas, de seguridad y salud de la población.
Conservación de agua, suelo y aire	7	El indicador debe medir la protección, uso y recuperación racional y renovación de los ecosistemas y recursos naturales de acuerdo con principios que garantizan los máximos beneficios sociales y económicos posibles sin degradar los recursos o ecosistemas involucrados.
Auditable	5	El indicador debe confirmar el cumplimiento a normas políticas y leyes locales e indicar la necesidad de documentar procedimientos, políticas y programas con el propósito de guiar y fomentar la implementación de buenas prácticas de manejo.
Productividad	4	El indicador debe medir el incremento y/o conservación de la producción.

6. Resultados

Los conjuntos de indicadores integrados han sido utilizados en una gran variedad de disciplinas para medir conceptos complejos y multidimensionales que no se pueden observar ni medir directamente. El poder de estos indicadores reside en su habilidad de sintetizar una gran cantidad de información en un formato simple y práctico. La sencillez de estos indicadores integrados facilita el acceso a la información al público en general y a otros usuarios potenciales.

Es necesario destacar que la presente investigación tiene como alcance de aplicación a instituciones que desarrollan conocimientos de temas agrícolas, así como a inversionistas, auditores ambientales, analistas sociales, gobierno y a todos los interesados en asuntos agrícolas de manera que tengan un panorama más completo del desarrollo de programas y toma de decisiones responsables en el sector.

Otra consideración adicional son las preocupaciones para asegurar una mejor calidad de vida para la población el cual será evaluado a partir de cómo las economías pueden ser capaces de alcanzar el desarrollo ambientalmente sustentable, esto es, una sociedad más incluyente, en la que los beneficios de la prosperidad económica sean ampliamente compartidos, con menos contaminación y menos desperdicio en el uso de los recursos naturales.

A continuación se presentan los indicadores finales para la medición de la sostenibilidad de los cultivos hidropónicos (Figura 10).

Indicadores compuestos	Descripción	Propósito
Productividad física	Kilogramos totales de producto por hectárea cultivada.	Determinar si los cultivos se están utilizando dentro de los límites de su producción real. Determinar el rendimiento sostenible del invernadero.
Tasa de desempleo	Es la proporción de personas desempleadas respecto de la fuerza de trabajo o población económicamente activa.	La tasa de desempleo mide la parte de la fuerza de trabajo que, durante el periodo de referencia del estudio, no estaba: i) ocupada ni temporalmente ausente del trabajo (es decir, con trabajo remunerado o autoempleada); ii) disponible para trabajar; o iii) buscando trabajo.
Uso de pesticidas agrícolas	Utilización de pesticidas por unidad de superficie de tierras de cultivo.	Medir el uso de pesticidas en la agricultura, como factor que incide en el ambiente y en la salud de la población.
Uso de fertilizantes	Magnitud de la utilización de abonos en la agricultura por unidad de superficie de tierras cultivables.	Medir la intensidad de utilización de fertilizantes.
Calidad del agua	El programa debe indicar los puntos y la frecuencia de muestreo de aguas y los análisis por realizarse.	Comprobar que las actividades no contribuyen a la degradación de la calidad de agua en el cuerpo receptor.
Cantidad de agua	El indicador evalúa la cantidad de agua disponible y/o necesaria para los individuos de una determinada comunidad, de forma que satisfagan sus necesidades básicas.	También ayuda a identificar las comunidades donde estos requerimientos básicos no están siendo satisfechos, permitiendo la planificación y priorización de acciones para el suministro adecuado de agua.
Recursos económicos para desarrollo científico y tecnológico	Recursos económicos asignados para procedimientos y actividades que utilicen la ciencia y la tecnología.	Conservar los ecosistemas y suministrar beneficios a largo plazo para los trabajadores, comunidades y productores.
Remuneración justa (sueldos y salarios)	Los salarios deben ser iguales o mayores que el mínimo legal o regional y ser equitativos entre hombres y mujeres.	Trato justo y buenas condiciones de trabajo para los trabajadores
Seguridad para los trabajadores	El invernadero puede demostrar que utiliza procedimientos y realiza actividades en forma sistemática para reducir al mínimo o eliminar los riesgos.	Los invernaderos deben presentar un programa de salud y seguridad ocupacional para reducir o prevenir los riesgos de accidente.
Programa de prevención y mitigación de impactos a la salud	Medidas de prevención y mitigación del daño causado por sustancias químicas a la salud y el ambiente (equipo, técnicas, rotulación, exámenes médicos y otros).	Los invernaderos proveen del equipo necesario para proteger a los trabajadores y garantizan que las herramientas, la infraestructura, la maquinaria y todo el equipo utilizado en las fincas se encuentra en buen estado y no representa un peligro para la salud humana o el medio ambiente.
Extracción del agua subterránea y superficial	Volumen bruto anual total de aguas subterráneas y superficiales extraído para usos diversos, incluyendo pérdidas por acarreo, uso consuntivo y flujos de retorno, como porcentaje del volumen disponible de agua dulce.	Mostrar en qué grado se están explotando los recursos hídricos disponibles para atender la demanda de agua de la región. Se trata de una medida importante que puede reflejar tendencias de vulnerabilidad de una región a la escasez de agua.
Densidad de las redes hidrológicas	Superficie promedio de las zonas servidas por una estación hidrológica. Es resultado de dividir el área del territorio por el número de estaciones hidrológicas en funcionamiento.	Evaluar si las redes hidrológicas existentes son adecuadas para facilitar la información necesaria en el contexto de la evaluación de agua dulce. La densidad debe ser suficiente para evitar deficiencias en la evaluación, el desarrollo y el manejo de los recursos hídricos.
Cambios en el uso del suelo	Superficie total afectada en hectáreas como porcentaje de la superficie total de tierras.	Poner de manifiesto los cambios en los usos de producción o protección de los recursos de la tierra a fin de facilitar la planificación y el desarrollo de políticas sostenibles con respecto al uso de la tierra.
Uso de energía en la agricultura	La energía utilizada en la agricultura al año, expresada como una proporción de los insumos de energía respecto a la producción agrícola, o bien, en términos absolutos.	Proveer una medida de la intensidad energética en la agricultura.
Generación de desechos peligrosos	Cantidad total de desechos peligrosos generados al año por las actividades industriales o por otras actividades que generen desechos, según la definición de desechos peligrosos que figura en el Convenio de Basilea y en otros convenios conexos.	Fundamentalmente en el caso de los desechos industriales, el indicador mide el alcance y el tipo de industrialización de un país y, por ende, las actividades industriales que utilizan procesos y tecnologías que generan desechos peligrosos.
Calidad del aire	Concentraciones de contaminantes en el aire ambiente provenientes de ozono (O3), monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión, dióxido de azufre (SO2), dióxido de nitrógeno (NO2) y monóxido de nitrógeno.	El indicador se usa para evaluar el desempeño ambiental de las políticas nacionales y para describir la presión ambiental en relación al abatimiento de las emisiones atmosféricas.
Calidad del suelo	Superficie de suelos y/o sitios contaminados en un país como resultado de la contaminación y/o emisiones o descarga ilegal de desechos peligrosos en sitios/suelos no protegidos ni idóneos, donde no se han tomado medidas adecuadas para impedir daños a la salud y al medio ambiente debido a la exposición a desechos peligrosos.	Este indicador puede utilizarse para evaluar las amenazas existentes a la salud humana y al medio ambiente, detectar tendencias en la contaminación de suelos debido a prácticas no sustentables, así como para evaluar los riesgos derivados en los lugares contaminados y establecer prioridades de descontaminación y/o limpieza.
Protección de los recursos	Daño por degradación del suelo, agua y diversidad biológica por superficie de cultivo con cuatro o más años de producción.	Este indicador permite medir el daño ocasionado por los procesos tecnológicos

Figura 10. Propuesta de indicadores de sostenibilidad de cultivos hidropónicos.

Después de analizar los 44 criterios iniciales y determinar los documentos base para la realización de las matrices de selección necesarios para evaluar un invernadero de cultivo hidropónico de Tomate rojo, se seleccionaron cinco criterios; manejo sustentable, aceptabilidad, conservación de agua, suelo y aire, auditable y productividad (Tabla 17) para evaluar una serie de indicadores establecidos por autores e instituciones especializadas en desarrollo sostenible.

Tabla 16 Número de criterios revisados bibliográficamente.

Criterios de selección									
Rubro	Revista Fitotecnia, Centro Internacional de Investigación Forestal y el Fondo Sectorial (CONAFOR-CONACYT, 2008).	%	Un ejercicio de aplicación de indicadores de sustentabilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la laguna Merín, Consejo Internacional para la Gestión y la Investigación, (International Board for Research and Management), ISBRAM, 1993).	%	Indicadores de Desarrollo Sostenible en México, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO, 1993 e INEGI, INE, 2000).	%	Norma con Indicadores para Agricultura Sostenible, Red de Agricultura Sostenible. (RAS, 1995).	%	Metodología genérica de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), mediante el uso de Indicadores Ambientales (IA), y Análisis Multicriterio (AMC), con aplicación al Plan Director Sectorial Energético de los Estados de México (PDESEB's). (Tesis Doctoral, Carlos Caballero, 2007).
Social	3	30%	1	20%	0	0%	8	57%	0
Ambiental	4	40%	1	20%	9	82%	6	43%	4
Económico	3	30%	3	60%	2	18%	0	0%	0
Total	10	100%	5	100%	11	100%	14	100%	4

Tabla 17. Criterios de selección de indicadores.

Criterio de selección	Descripción
Manejo sustentable	El indicador debe medir la productividad agrícola vs la disponibilidad de la ciencia y la tecnología con el fin de conservar los ecosistemas y recursos naturales para así suministrar beneficios a largo plazo para los trabajadores, los productores y las comunidades, respetando las políticas, leyes y reglamentos locales.
Aceptabilidad	El indicador debe medir que el cultivo hidropónico debe ser socialmente aceptable, es decir debe satisfacer las necesidades económicas, de seguridad y salud de la población.
Conservación de agua, suelo y aire	El indicador debe medir la protección, uso y recuperación racional y renovación de los ecosistemas y recursos naturales de acuerdo con principios que garantizan los máximos beneficios sociales y económicos posibles sin degradar los recursos o ecosistemas involucrados.
Auditable	El indicador debe confirmar el cumplimiento a normas políticas y leyes locales e indicar la necesidad de documentar procedimientos, políticas y programas con el propósito de guiar y fomentar la implementación de buenas prácticas de manejo.
Productividad	El indicador debe medir el incremento y/o conservación de la producción.

Los criterios seleccionados permitieron que la identificación de indicadores se diera de una forma objetiva y apegada a la operación diaria de un invernadero de cultivo hidropónico, ya que en la mayoría de las evaluaciones de sostenibilidad, la aplicación de estos indicadores resulta complicada y usualmente inoperable.

La Tabla 18 nos muestra la división por cada rubro de la sostenibilidad; social, económico y ambiental de los 615 indicadores de 5 fuentes internacionales que fueron consultados.

Tabla 18. Número de indicadores consultados e

Selección de Indicadores										
Rubro	Revisión Fitotecnia, Centro Internacional de Investigación Forestal y el Fondo Sectorial (CONAFOR-CONACYT, 2006).	%	Un ejercicio de aplicación de indicadores de sostenibilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la laguna Merín, Consejo Internacional para la Gestión y la Investigación, (International Board for Research and Management, ISRRAM, 1993).	%	Indicadores de Desarrollo Sostenible en México, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (FAO, 1993 e IHEG, IHE, 2000).	%	Norma con Indicadores para Agricultura Sostenible, Red de Agricultura Sostenible. (RAS, 1995).	%	Metodología genérica de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), mediante el uso de Indicadores Ambientales (IA), y Análisis Multicriterio (AMC), con aplicación al Plan Director Sectorial Energético de las Islas Baleares (PDEIB '3). (Tesis Doctoral, Carlos Caballero, 2007).	%
Social	23	28%	1	14%	35	36%	200	49%	0	0%
Ambiental	18	22%	2	29%	44	45%	210	51%	18	100%
Económico	41	50%	4	57%	19	19%	0	0%	0	0%
Total	82	100%	7	100%	98	100%	410	100%	18	100%

Con base en estos criterios (Tabla 17), se determinaron 18 indicadores a través de matrices de decisión las cuales fueron comparadas entre sí y con otros autores, cubriendo así los tres fundamentos de la sostenibilidad (social, ambiental y económico).

Es importante recalcar, que no existen criterios ni indicadores en las instituciones gubernamentales y privadas ni en las diferentes investigaciones bibliográficas consultadas que presenten exactamente el mismo nombre pero sí conceptualizan el mismo rubro de sostenibilidad a evaluar.

Los resultados alcanzados dependen totalmente de los criterios elegidos como objetivos de sustentabilidad y particularmente de los criterios usados para medir el cumplimiento de los mismos (indicadores). Parece interesante plantearse cuáles serían los resultados si los criterios hubieran sido otros.

En la Figura 11, se muestra el número de indicadores por componente de sostenibilidad que se determinaron después de la metodología aplicada en esta investigación y que muestra un número mayor en indicadores del tipo ambiental aunque no hay que dejar de considerar que todos los indicadores independientemente de su naturaleza, influyen de manera directa en los otros rubros

de la sostenibilidad, lo cual implica que trabajan entrelazados dando un equilibrio a la evaluación.

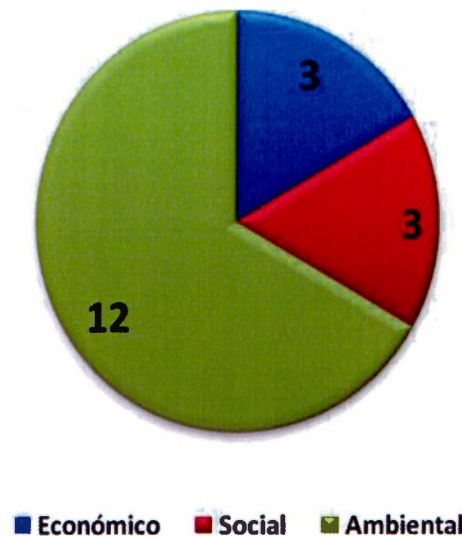


Figura 11. Número de indicadores de sostenibilidad para cultivos hidropónicos.

Por ejemplo, si nos referimos a los indicadores de cantidad o calidad de agua, podemos hablar estrictamente de indicadores de tipo ambiental, aunque estos impacten directamente a los indicadores sociales y económicos donde se ven involucrados tanto incrementos en costos para los inversionistas como la afectación en el abasto de agua de las poblaciones aledañas, poniendo en riesgo el tiempo de vida productiva del cultivo.

Una vez determinados los indicadores, se deben representar de forma estandarizada para su comunicación y aplicación. A continuación se muestra los rubros básicos que debe contener una ficha técnica de un indicador de sostenibilidad.

- Nombre del indicador
- Definición
- Propósito

- Método de cálculo
- Información adicional

A continuación se muestra un ejemplo del contenido de ficha técnica del indicador.

Indicador: USO DE PESTICIDAS AGRÍCOLAS

Definición

Utilización de pesticidas por unidad de superficie de tierras de cultivo.

Propósito

Medir el uso de pesticidas en la agricultura, como factor que incide en el ambiente y en la salud de la población.

Producción¹ de pesticidas agrícolas según tipo de producto, 1992-1998 (Toneladas)

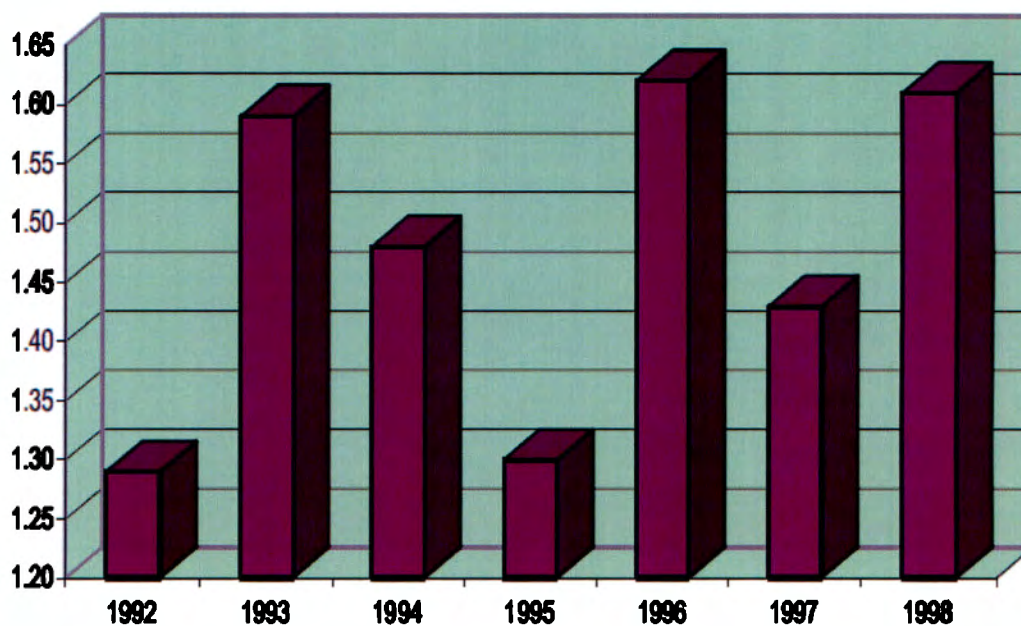
Año	Total Pesticidas	Insecticidas		Herbicidas y defoliantes	Superficie sembrada (miles de ha)	Toneladas /miles de ha	
		Total	Agrícola líquido				Agrícola polvo
1992	25 156	14 471	4 856	9 615	10 685	19 561.8	1.29
1993	30 485	17 809	6 566	11 243	12 676	19 205.9	1.59
1994	31 063	19 986	7 454	12 532	11 077	20 997.3	1.48
1995	27 102	16 378	6 578	9 800	10 724	20 920.0	1.30
1996	34 541	22 033	8 393	13 640	12 508	21 338.9	1.62
1997	31 774	19 453	9 173	10 280	12 321	22 109.6	1.43
1998	35 406	18 852	8 504	10 348	16 554	21 982.3	1.61

¹ Sólo incluye datos de producción, dando una idea preliminar del consumo. (Ver comentario posterior).

Fuente: INEGI, *Encuesta Industrial Mensual*, varios años.

Datos de superficie sembrada: 1992-1993: SARH, *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola* y 1994-1998: SAGAR, *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos*, México, 1998.

Producción¹ de pesticidas agrícolas, 1992-1998
(Toneladas / miles de ha)



¹ Sólo incluye datos de producción. (Ver comentario siguiente).
Fuente: INEGI, *Encuesta Industrial Mensual*, varios años.

Para construir este indicador se requiere información básica de fuentes diferentes. Aquí únicamente se han tomado en cuenta los datos sobre producción de pesticidas proveniente de la *Encuesta Industrial Mensual*. Por tanto, para obtener el consumo se requiere consolidar los registros administrativos sobre exportaciones e importaciones, los cuales son generados por otras instituciones. Este método es una aproximación indirecta al consumo y difiere del obtenido de las ventas de pesticidas como lo establece como lo establece la hoja metodológica. Por tanto, se sugiere incorporar esta alternativa indirecta al método de estimación.

7. Discusión de resultados

7.1 Cultivos hidropónicos y sostenibilidad

Llevar los principios de desarrollo sostenible a la práctica significa cambiar la forma en que se toman decisiones para asignar recursos; la información es esencial y los indicadores juegan un papel fundamental señalando condiciones y tendencias en el desarrollo de una casa, de una comunidad, de un país o de grupos de países.

Los indicadores son medios para llegar a un objetivo y guían a los planificadores para tomar decisiones sobre cómo usar los recursos naturales de un país. Los indicadores económicos tradicionales (consumo, ahorro, inversiones, etc.) no proveen una versión integral del progreso y deben ser complementados por medidas sociales y ambientales.

Aunque hay varios enfoques propuestos para la evaluación de la agricultura a través de indicadores de sostenibilidad como lo plantean la Red de Agricultura Sostenible (1995) y la FAO, INEGI y la INE (2000), en México no se han desarrollado indicadores de sostenibilidad para métodos de cultivos específicos como lo son el sistema hidropónico.

La batería de indicadores de sostenibilidad propuestos permite evaluar las intervenciones ambientales y socioeconómicas de cualquier cultivo hidropónico de tomate rojo en México y con

ello garantizar las tres dimensiones de la sostenibilidad para ser consideradas durante el proceso del desarrollo de leyes, normas y políticas.

En los últimos años se ha puesto de manifiesto una mayor preocupación por supervisar los recursos naturales de los países. Esto es particularmente importante para las economías de países en desarrollo en los que sus ingresos dependen de los recursos naturales. En los países dependientes de la agricultura la degradación del ambiente y la pobreza corren paralelamente, y la necesidad de satisfacer la demanda de alimentos a menudo lleva a la sobreexplotación del ambiente. Como consecuencia, el abastecimiento de bienes agrícolas y de servicios básicos se reduce generando así más pobreza y continuando de este modo con el ciclo.

Por lo tanto, es esencial, que todos los países, pero especialmente aquellos en desarrollo, tomen en consideración el control de sus recursos naturales y los cambios de los mismos por medio del uso de indicadores de la tierra, del agua, de la energía, del aire y otros. En la agricultura sostenible, la integración de la información económica, social y ambiental en la planificación y en la toma de decisiones se traslada de forma estadística integrada.

El problema de cuando agregar o no indicadores es importante para el manejo de la sostenibilidad. Normalmente, los indicadores son considerados parte de una pirámide informativa que va desde una información detallada a nivel local hasta la información reducida a niveles nacionales o globales. La agrupación de los datos afecta la cantidad y la calidad de la información que se transmite a los niveles de toma de decisiones; cuando se analice y utilice esta información será, por lo tanto, importante, determinar si su nivel de agregación tendrá un efecto significativo sobre los resultados de las decisiones que se tomen. Del mismo modo, a nivel nacional, los indicadores pueden indicar líneas políticas erróneas para la solución de los problemas de seguridad alimentaria.

Los indicadores de sostenibilidad, son necesarios para tratar de solucionar numerosos problemas relacionados con la tierra, de importancia nacional y global, tales como la presión sobre el uso de la tierra, la degradación y la conservación de suelos y aguas, así como también problemas relacionados con las políticas sobre manejo sostenible de la agricultura.

Los marcos metodológicos propuestos para la evaluación de la sostenibilidad se basan en el enfoque sistémico de las unidades o procesos a evaluar y atienden el concepto de agricultura sostenible como referente. Para dicho enfoque es necesaria la desagregación del sistema en sus componentes, el análisis de su estructura y función, la identificación de interacciones relevantes y la determinación de una jerarquía para entender los vínculos e interacciones con otros niveles del sistema.

Una vez que los indicadores se han desarrollado, estandarizado y aplicados en protocolos científicos nacionales e internacionales, podrán ser utilizados para la formulación de políticas y programas para la evaluación distrital, nacional y global, para la supervisión del impacto ambiental y para promover tecnologías, políticas y programas que puedan asegurar el mejor uso de los recursos naturales y el manejo sostenible de la tierra, el agua, el aire, los trabajadores, los propietarios y la salud de la comunidad en general.

La herramienta metodológica debe estar basada en la construcción y selección de indicadores que permitan un análisis permanente de los sistemas productivos. Es necesario sobrepasar el mero ejercicio académico a partir de marcos rigurosos, generales, a escalas más grandes, que solo pueden encontrarse bajo el criterio del evaluador externo y que hacen que esos ejercicios sean meramente calificadores y poco operativos. De allí que para evaluar la sustentabilidad se requieren procesos de participación y autogestión realizadas por los propios participantes e involucrados de los cultivos.

La información originada a partir de los procesos de planificación tiene por objetivo fundamental servir de apoyo para la toma de decisiones por los diferentes actores involucrados en el uso de tierras a nivel regional. Esto facilitará la búsqueda de alternativas para el uso productivo o ambiental de tierras, para evaluar su factibilidad técnica, viabilidad económica, aceptabilidad social y naturaleza no degradante del medio ambiente. Los principales instrumentos utilizados en la planificación son el metodológico (procedimientos que permiten transformar información física, económica y social en alternativas para el uso sostenible de la tierra) y el organizacional que se refiere a las estructuras organizacionales y capacidades requeridas para aplicar la metodología.

Con esta propuesta la modelación de indicadores sostenibles y el requerimiento de datos, se pueden evaluar en invernaderos específicos hidropónicos, lo cual representa otra fortaleza pues la mayoría de los indicadores de sostenibilidad solamente evalúan la agricultura a un nivel general.

Otra de las ventajas es que todos los indicadores sostenibles propuestos tienen validez científica y pueden desarrollarse con información estratégica y no de datos aislados a nivel de proyectos.

8. Conclusiones y trabajos futuros

Se logró definir los indicadores de sostenibilidad para invernaderos de cultivos hidropónicos de Tomate rojo en México, encontrando que la medición de la sostenibilidad de estos sistemas, está definida por la interrelación de los factores sociales, ambientales y económicos donde todos ellos se ven afectados de una manera directa o indirecta cuando el resto de las variables cambia.

Después de finalizar con el presente proyecto, podemos concluir que todo sistema de medición debe partir de un objetivo específico que permita definir los criterios de trabajo dependiendo de la naturaleza de la investigación, así como las fortalezas y debilidades de los sistemas a estudiar.

El desarrollo de las metodologías para la generación de indicadores de sostenibilidad, debe elaborarse, a través de la experiencia y conocimiento de los trabajadores y personal conocedor del proceso en estudio para no dejar de lado ningún concepto ni detalle que pueda poner en riesgo la evaluación de la sostenibilidad.

Este estudio, se desarrolló para un cultivo hidropónico específico (Tomate rojo) en México, debido a ser el primer producto de exportación del país ya que en los últimos años ha mantenido su crecimiento tanto en producción en el país como en demanda de consumo en el extranjero.

El desarrollo de los indicadores, permite a la sociedad y las instituciones gubernamentales, evaluar la viabilidad de los cultivos y permite de manera objetiva determinar los cuatro factores

más importantes en los invernaderos hidropónicos como es el consumo de agua, fertilizantes, consumo de energía y manejo de residuos.

Es así, que el desarrollo de los indicadores de sostenibilidad, representa la base documental de medición con los cuales se crean manuales, guías y normas para evaluar de forma sistemática y detallada los invernaderos hidropónicos, y a partir de ello, implementar auditorías que permitan competir a los productos mexicanos en el extranjero.

Finalmente, cabe reflexionar sobre la importancia del uso de estas u otras metodologías, para permitir hacer operativo el concepto de desarrollo sostenible, articulando las políticas de conservación con las de producción. Es imprescindible que cuando nos refiramos a la sostenibilidad de tal o cual actividad, proyecto o política de desarrollo, sepamos a que nos referimos con ello, y podamos así cuantificar y evaluar en qué medida los resultados de nuestras acciones están contribuyendo o no al objetivo perseguido. Por lo tanto para que esas discusiones se muevan más allá de las meras opiniones son indispensables los aportes de los indicadores.

8.1 Futuras líneas de investigación

En la actualidad, existen indicadores y normas que evalúan la sostenibilidad de la agricultura tradicional organizada en predios o fincas que emiten a nivel auditoría una calificación que nos permite comparar los diferentes inmuebles y cultivos en sus tres ámbitos (social, ambiental y económico). Este desarrollo nos permite visualizar de manera positiva la implementación de la evaluación de la sostenibilidad en la agricultura alternativa en México y con ello establecer esta investigación como base de futuras alternativas en el cultivo de alimentos.

Por lo anterior es importante considerar futuras líneas de investigación:

- Implementar los indicadores de sostenibilidad desarrollados para invernaderos de cultivos hidropónicos de tomate rojo en México.

- **Desarrollar indicadores de sostenibilidad para la evaluación de invernaderos de otros cultivos alternativos en México.**
- **Estudio comparativo entre los sistemas de cultivo tradicional y los sistemas de cultivos hidropónicos a través de la evaluación con los indicadores de sostenibilidad desarrollados en esta investigación.**

9. Bibliografía

1. Antón A. (2006). Utilización del Análisis de Ciclo de Vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
2. Arano, C. R. (1998). *El ABC de la lechuga hidropónica*. Buenos Aires, Argentina: Publicaciones Valtierra.
3. Asociación Biotecnológica Vegetal Agrícola, A.-B. (2010). *Impacto ambiental de los cultivos GM*. Recuperado el 10 de noviembre de 2010, de <http://www.agrobio.org/index>
4. Blaney, H.F., Criddle, W.D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data.
5. Brack, A (2000). Enciclopedia virtual “Ecología del Perú”, capítulo 25. La contaminación del suelo y los alimentos. Obtenida el 5 de octubre de 2009. www.solorecursos.com.
6. Caballero, C.A. (2007). Metodología genérica de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), mediante la utilización de Indicadores Ambientales (IA's), y Análisis Multicriterio (AMC), con aplicación al Plan Director Sectorial Energético de las Islas Baleares (PDSEIB's). Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Barcelona España.
7. Caballero, C.A., Gasso, S., Baldasano, J.M. y Güereca, L.P. (2006). Una propuesta de indicadores genéricos para la Evaluación Ambiental Estratégica. Memorias del X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. 13-15 Septiembre. Valencia, España.
8. Cárdenas, G; Giraldo, H; Idárraga, A; Vásquez, N. (2000). Desarrollo y Validación de Metodología para Evaluar con Indicadores la Sustentabilidad de Sistemas Productivos Campesinos de la Asociación de Caficultores Orgánicos de Colombia. Universidad Rural y Agropecuaria de Colombia, UNISARC. Colombia.
9. CEPES. (2010). Llevando bienestar al campo, programas que si funcionan. *La revista agraria*, 15.

10. Crespo, S. N. (1997). *Estudios de la Naturaleza*. Caracas, Venezuela: Santillana.
11. Chaiz, C (nd). Inocuidad de frutas y hortalizas frescas; efectos del agua contaminada. Obtenida el 5 de octubre de 2009, www.agualatinoamericana.com.
12. De Camino, R. Y Müller, s. (1993). Esquema para la definición de indicadores. *Agroecología y Desarrollo* No. 4.
13. Escobar, A. (1999). *El desarrollo sostenible: diálogo de discursos*. En Escobar, A., *El final del salvaje*, Cerec / Instituto Colombiano de Antropología. Bogotá.
14. Escobar, L. (2004). Construcción de Índice de Calidad Ambiental Urbana: Un Modelo General y aplicación para Cali-Colombia. Universidad de Alcalá. Facultad de Fundamentos e Historia Económica.
15. Evia, G., (2000). Un ejercicio de aplicación de indicadores de sustentabilidad de diferentes alternativas productivas en los humedales de la laguna Merín. Centro Latino Americano de Ecología Social. Uruguay.
16. Flores, G; Moreno, G; Quiñones, C. (2003). Selección de criterios e indicadores para evaluar el manejo forestal sustentable. CIR Pacífico Centro, INIFAP. Publicación Esp. No 2. 72 p.
17. Guimerà, J., Marfà, O., Candela, L., Serrano, L. (1995). Nitrate leaching and strawberry production under. *Agriculture Ecosystems and Environment*.
18. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática., (2000). *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI e INE). Aguascalientes, México.
19. Isidro, A. S. (sd de sd de 2005). *Participación de las mujeres en los Consejos Municipales de Desarrollo*. México D.F., México.
20. Marfà, P. i., & Oriol. (2000). La recirculación en los cultivos sin suelo. 111-118.
21. Mateo Box, J.M. (1996). *Manual de Prácticas y actuaciones agroambientales*. Editorial Agrícola Española, S.A. y Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

22. Medrano, Cortés, E., (2002). Técnicas de gestión de riego en cultivo sin suelo. En Tecnología de invernaderos, Cámara Zapata, J. y Rocamora Osorio, M. eds. Alicante.
23. Mendoza, G.A; Macoun, P; Prabhu, R; Sukadri, D; Purnomo, H; Hartanto, H. (1999). Guidelines for Applying Multi-criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators. CIFOR, Jakarta, Indonesia. Toolbox Series No. 9. 81 p.
24. Muhtaman, D; Siregar, C; Hopmans, P. (2000). Criteria and Indicators for Sustainable Plantation Forestry in Indonesia. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia. 72 p.
25. Muñoz, C. (08 de 05 de 2007). Comunidades agrícolas e Indap serán socios estratégicos de empresa productora de cochinilla. Santiago de Chile, Chile , Chile.
26. Muñoz, C. (s.f.). Comunidades agrícolas e Indap serán socios estratégicos de empresa productora de cochinilla.
27. OCDE (1994). *Environmental Indicators*. Organization for Economic Co-operation and Development. *Core Set*. Paris.
28. ONU (2001). Organización de las Naciones Unidas. Departamento de Economía y Asuntos Sociales de la ONU. División de Desarrollo Sostenible. http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/isdms2001/table_4.htm [Consultada: 5/3/2012].
29. Organización Internacional de Maderas Tropicales, OIMT. (2005). Criterios e Indicadores Revisados de la OIMT para la Ordenación Sostenible de los Bosques Tropicales con Inclusión de un Formato de Informes. Serie OIMT de Políticas Forestales. No. 15. Yokohama, Japón. 40 p.
30. Organización Internacional del Trabajo, OIT. (1997) Repertorio de Recomendaciones Prácticas sobre Seguridad y Salud en el Trabajo Forestal. Organización Internacional del Trabajo. Ginebra. 85 p.
31. Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Royal Society London Proceedings.

32. Piñeiro Martín, M. R. (1999). *La institucionalidad en el sector agropecuario de America Latina*. Washington, DC: Banco Interamericano.
33. Proceso Montreal. (2007). Criterios e Indicadores para la Conservación y el Manejo Sustentable de los Bosques Templados y Boreales. Disponible en: http://www.rinya.maff.go.jp/mpci/reppub/1995/santiago_s.
34. Red de Agricultura Sostenible.,(2005). Norma con Indicadores para Agricultura Sostenible. Rainforest Alliance. San José, Costa Rica.
35. Resh, H. M. (2001). *Cultivos Hidropónicos, Nuevas técnicas de Producción*. Vancouver: Mundi Prensa.
36. Rivera, C., Fierros, A., Vázquez, V., Gómez, A., Velázquez, A. (2008). Principios, Criterios e Indicadores de Sustentabilidad para Plantaciones Forestales Comerciales de Rápido Crecimiento. Revista Fitotecnia Mexicana. No. 4.
37. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, S. (2010). *SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Recuperado el 20 de septiembre de 2011, de <http://www.siap.gob.mx>
38. Stanghellini, C. (2002). Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. PhD. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
39. Tarapoto Proposal. (1995). Proposal of Criteria and Indicators for Sustainability of the Amazon Forests. Tarapoto, Peru, 23-25 feb.1995. Pro Tempore Secretariat, Amazon Cooperation Treaty, Lima, Peru. 149 p.
40. Thornthwaite, C.W. (1948). An Approach toward a rational classification of climate. Geographical Review.
41. Tierney, J.T., R. Sullivan y E. P. Larkin (2006). Persistence of polivirus 1 in soil and on vegetables grown in soil previously flooded with inoculated sewage of effluent. Applied and Environmental Microbiology. Londres.

42. Tognoni, F. (2003). El desarrollo de los sistemas de cultivo en horticultura protegida. Ed. Fernández, M.L., P. Cuadro, I. DGIFA, HORTIMED, FIAPA & CAJAMAR, Almería, España.
43. UNCSO (1996). *Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies*. United Nations Commission on Sustainable Development. New York.
44. VIBO A.C. (2002). Estándar Genérico de Manejo Forestal de la Fundación VIBO, A.C. Programa de Certificación Forestal. Durango, México. 21 p.
45. Voces.indígenas. (08 de septiembre de 2001). Bosque conservado por los Wichi, destruido por empresas agrícolas. Montevideo, Uruguay.
46. Von Schiller, D., Soler, E., Martínez, J., Delgado, A., Vivas, M.L. y Fernández, S. (2003). Indicadores Ambientales en el Contexto Europeo. Portal de Biología y Ciencias de la Salud. No. 12 <http://www.biologia.org/revista/pdfs/70.pdf>
47. Widen, V. (1988). Soilles culture technique and its relation to the greenhouse climate. Acta Horticulturae.
48. Woodley, S; Iglesias, G; Hoekstra, T; Holt, B; Livingston, L; Loo, J; Skibicki, A; Clinton, W; Wright (2000). North American Test of Criteria and Indicators of Sustainable Forestry. IMI Report 3, USDA Forest Service, Inventory and Monitoring Institute. Fort Collins, Co, USA.
49. Zarzosa, P. (1996). Aproximación a la medición del Bienestar Social. Universidad de Valladolid, Valladolid España.
50. GRENIER L. (1999). Conocimiento Indígena: guía para el investigador. Tecnológica de Costa Rica. Costa Rica.