

65  
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"PLANEACION ENERGETICA ESTRATEGICA Y  
DESARROLLO DE FUENTES RENOVABLES  
DE ENERGIA."

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO  
P R E S E N T A :  
ANDRES MONTEMAYOR VARELA



DIRECTOR DE TESIS: DR. JORGE ANTONIO MONTEMAYOR ALDRETE

MEXICO, D. F.

OCTUBRE DE 1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

278466



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

A mis padres, por todo el amor incondicional que siempre me han dado, gracias por hacer todo lo que se necesitó para que llegara a este punto de mi vida y gracias por permanecer siempre unidos en lo verdaderamente importante.

Gracias, a mi madre por apoyarme en los momentos más duros y nunca perder el optimismo, gracias por enseñarme a valorar la vida y a los menos afortunados.

Gracias, a mi padre por ser siempre mejor y diferente, por ayudarme a hacer de éste sueño una hermosa realidad y por nunca dejar de impulsarme.

Gracias a toda mi familia en general, por todo el apoyo que me han dado desde siempre.

Gracias a Irlanda; porque siempre serás muy importante para mí, y sin ti no hubiera logrado ser tan feliz, por estar conmigo sin importar lo que suceda, por todo lo que hemos pasado juntos y por lo que pueda venir.

Gracias a Claudia Alvarado, por apoyarme siempre que la he necesitado, por ser una maravillosa amiga y por aguantar mi mal genio.

Gracias a Martín A., Anselmo S., René F., Luis O., Gabriel H. y Héctor G., porque construimos una amistad con la que pude tener el optimismo suficiente para hacer lo que deseaba.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la empresa Texas Communications y al Centro Nacional de Comunicación Social, a la Comisión de Energéticos de la Cámara de Diputados (LVII Legislatura) y al Instituto de Física de la U.N.A.M. por su apoyo institucional para la realización de éste trabajo de tesis e investigación.

Así mismo, agradezco el apoyo personal, que en diversas etapas de éste proyecto proporcionaron:

La Comisión de Protección Civil de la Cámara de Diputados (LVII Legislatura), en particular a la Diputada Federal Estrella Vázquez Osorno.

A los Doctores:

Marcos Mazari, Fernando Alba Andrade, Alejandro Mendoza y Fernando Matías Moreno del Instituto de Física de la U.N.A.M.

A los Doctores:

Mariano López de Haro y Antonio del Río y otros entusiastas investigadores del Centro de Investigación de Energía de la U.N.A.M.

A mis sinodales: Ing. Augusto Sánchez Cifuentes, Dr. Federico Méndez Laville, Ing. Adrián Valera Negrete y al M.I. Esteban Barrios Bonilla, por su cuidadosa y atinada labor de revisión del material de la tesis, la cual condujo a mejorar la forma y el contenido de la misma de manera sustancial.

De forma especial, a mi director de tesis el Dr. Jorge Antonio Montemayor Aldrete, por ayudarme de forma tan comprometida en la realización de este trabajo con su continuo apoyo y confianza y por el placer de trabajar con alguien que no cree en tareas imposibles.

# CONTENIDO

Cap.		Pág.
	<b>Prefacio</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introducción Histórica</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Marco teórico (Termodinámica de procesos irreversibles)</b>	<b>19</b>
	Termodinámica de procesos irreversibles	20
	Teoría energética para la planeación energética estratégica	36
	Aplicación del modelo a un caso concreto	51
<b>3</b>	<b>Situación Actual (Combustibles fósiles y biomasa)</b>	<b>63</b>
	Población mundial y diversos Rubros	64
	Producción de energéticos a escala mundial	70
	Consumo de energía en el mundo	76
	Población y diversos Rubros, en E.U.A	80
	Producción de energía en E.U.A.	86
	Consumo de energía en E.U.A.	91
	Población y diversos Rubros, en México	98
	Producción de energía en México	103
	Consumo de energía en México	109
<b>4</b>	<b>Análisis y perspectivas de los energéticos actuales</b>	<b>124</b>
	Aspectos generales	125
	Energéticos y sus usos	126
	Población y energéticos	128
	Alimentos y energéticos	130
	Transporte y energéticos	132
	Medio Ambiente y energéticos	133

<b>5</b>	<b>Valoración de las posibles Alternativas energéticas</b>	<b>136</b>
	Energía eólica	137
	Energía obtenida mediante concentradores solares	140
	Energía solar de tipo fotovoltaica	144
	Energía geotérmica	147
	Energía de biomasa	149
	Energía hidroeléctrica	152
	Energía Nuclear	153
	Comentarios sobre las alternativas energéticas	156
<b>6</b>	<b>Las alternativas energéticas en México</b>	<b>157</b>
	Aspectos generales	158
	Energía eólica	158
	Energía obtenida mediante concentradores solares	161
	Energía de tipo fotovoltaica	164
	Energía geotérmica	165
	Energía proveniente de la biomasa	166
	Energía hidroeléctrica	168
	El transporte y las energías renovables en México	170
	Comentarios generales sobre el desarrollo de las energías renovables en México.	173
<b>7</b>	<b>Sugerencias de acciones a desarrollar</b>	<b>175</b>
<b>8</b>	<b>Discusión y conclusiones</b>	<b>179</b>
<b>9</b>	<b>Referencias</b>	<b>183</b>

## ANEXOS

<b>Anexo I</b>	Ecuaciones teóricas utilizadas en la simulación de Teotihuacán	194
<b>Anexo II</b>	Simulación del crecimiento de Teotihuacán y análisis de resultados	215
<b>Anexo III</b>	Lista de simbologías	233
<b>Anexo IV</b>	Conversión de unidades utilizadas	236

## **PREFACIO**

Los objetivos de este trabajo son:

1. Mostrar la importancia de planear estratégicamente el desarrollo de los principales sectores que se involucran en la obtención, transformación y consumo de energía.
2. Proponer una herramienta teórica que permita la planeación energética a largo plazo y que además muestre la forma en que la energía se relaciona con los diversos rubros.
3. Recomendar acciones para el desarrollo de fuentes de energía renovable, de forma que los recursos invertidos en el desarrollo de las mismas sean aprovechados eficientemente. Esto es debido a que a largo plazo, el agotamiento de los combustibles fósiles provocará que su demanda aumente respecto a su oferta; por ello las energías renovables son un punto crucial en la planeación energética estratégica.

Para lograr los objetivos, la tesis se ha dividido en tres secciones:

- Capítulo 1 y 2- Cumple con el primero y segundo objetivo. Se muestra el modelo propuesto, se mencionan sus alcances, así como desventajas y limitaciones. En los Anexos I y II, se muestra una aplicación concreta del mismo.
- Capítulo 3 al 6- Cumple con el tercer objetivo. En ésta sección se estudia la situación actual de los energéticos. Se indican los retos a vencer en el desarrollo de las fuentes renovables de energía, analizándose sus alcances y limitaciones.
- Capítulos 7 y 8- Se proponen una serie de acciones concretas a desarrollar con el fin de aplicar las sugerencias propuestas y finalmente se concluye sobre los resultados obtenidos.

## PREFACIO

Los objetivos de este trabajo son:

1. Mostrar la importancia de planear estratégicamente el desarrollo de los principales sectores que se involucran en la obtención, transformación y consumo de energía.
2. Proponer una herramienta teórica que permita la planeación energética a largo plazo y que además muestre la forma en que la energía se relaciona con los diversos rubros.
3. Recomendar acciones para el desarrollo de fuentes de energía renovable, de forma que los recursos invertidos en el desarrollo de las mismas sean aprovechados eficientemente. Esto es debido a que a largo plazo, el agotamiento de los combustibles fósiles provocará que su demanda aumente respecto a su oferta; por ello las energías renovables son un punto crucial en la planeación energética estratégica.

Para lograr los objetivos, la tesis se ha dividido en tres secciones:

- Capítulo 1 y 2- Cumple con el primero y segundo objetivo. Se muestra el modelo propuesto, se mencionan sus alcances, así como desventajas y limitaciones. En los Anexos I y II, se muestra una aplicación concreta del mismo.
- Capítulo 3 al 6- Cumple con el tercer objetivo. En ésta sección se estudia la situación actual de los energéticos. Se indican los retos a vencer en el desarrollo de las fuentes renovables de energía, analizándose sus alcances y limitaciones.
- Capítulos 7 y 8- Se proponen una serie de acciones concretas a desarrollar con el fin de aplicar las sugerencias propuestas y finalmente se concluye sobre los resultados obtenidos.

# *Capítulo 1*

## *Introducción Histórica.*

## INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.-

### 1).- Revolución Agrícola.

Hace 500,000 años, el hombre primitivo se limitaba a utilizar la energía bioquímica contenida en los alimentos, los cuales aportaban entre 2000 a 2500 kcal percápita al día [34]. Las necesidades que cubre esta energía son: los básicos a escala biológica para la supervivencia en reposo, más la realización de labores físicas como caminata, cacería y recolección de alimentos, las cuales no consumían mucha energía (véase Fig. 1.1). Posteriormente, hace unos 60,000 años, la especie humana aprendió a utilizar el fuego, con lo cual amplía tanto la disponibilidad de energía, como la de alimentos asimilables por el hombre. Por supuesto, que al principio (en Eurasia) el fuego se utilizaba sólo para mantener alejadas a las bestias durante la noche y calentarse [42].

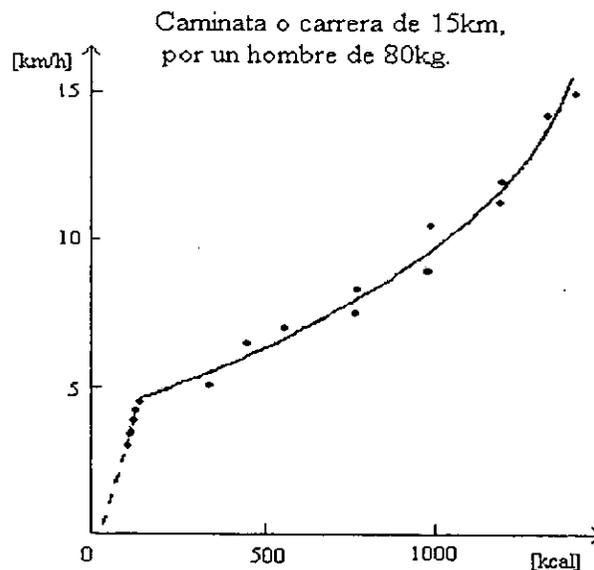


Fig. 1.1 Construida a partir de datos tomados de ref. [59]

Hace 10,000 años, justo antes del invento de la agricultura [61], la humanidad había llegado a una población de 5.3 millones [25.], la cual era la máxima población posible en estado estacionario bajo esas circunstancias de vida basada en caza y recolección sobre el planeta. Durante alrededor de los 7000 años posteriores a ese evento, en Eurasia la única fuerza disponible para la agricultura era la del hombre que para los fines prácticos proporciona una

potencia efectiva aproximada de 70 Watts-h (~57 kcal) [3.]. Hace alrededor de 3000 años, en Eurasia los humanos domesticaron entre otros animales al buey y al caballo, y los utilizaron para arar la tierra con una potencia efectiva de 248 Watts-h (debido a que las limitaciones de los aparejos iniciales sólo permitían aprovechar  $\frac{1}{3}$  de la potencia proporcionada por el animal [42]). Con esta nueva situación se tenían ventajas adicionales a las agrícolas, se podía utilizar el pasto que no era aprovechable directamente por el hombre, obteniéndose carne, leche y derivados así como cuero en cantidades superiores a los que proporcionaba la cacería; pero además el excremento de las bestias de carga contribuía a fertilizar la tierra de cultivo [55].

Paralelamente al uso de la energía propia y de los animales de tiro, se fueron fabricando máquinas, accesorios y herramientas empíricas que facilitaban las labores como: el arado, la rueda, barcos de vela, carretas, palancas, etc. sugeridas todas ellas por algún fenómeno físico. Posteriormente se fueron dando combinaciones entre distintos inventos: viento más rueda más velas; molino de viento. Agua en movimiento más rueda, con remos modificados; molino para granos.

Esta etapa, la cual corresponde a la primera revolución de la humanidad (el invento de la agricultura) se le puede caracterizar como la etapa de la producción agrícola, el uso de los combustibles y energías renovables y del desarrollo empírico de máquinas.

## 2).- Primera Revolución Industrial

La escasez de madera que ya se había puesto de manifiesto en Gran Bretaña durante el gobierno de la reina Isabel, fue un desafío que tuvo que ser aceptado. Desde 1540 a 1640 el precio de la madera se elevó tres veces más que el nivel general de precio [55].

Alrededor de 1500, comienza la utilización de carbón mineral en toda Europa, siendo durante este lapso que Inglaterra se convierte en el primer productor a escala mundial. A la difusión del uso del carbón se oponían la falta de hornos aptos para su combustión y la dificultad para extraerlo del subsuelo en grandes cantidades. El primer reto se venció con el desarrollo de la siderurgia, y el segundo se resolvió mediante el invento y la aplicación de la bomba de vapor por Papin en Francia, para extraer el agua que se filtraba en las minas. En 1705 Newcomb la mejoró y fue hasta 1765 cuando James Watt construyó el antecesor de los modernos motores de combustión externa a vapor. En pocos años se encontraron aplicaciones diversas en la industria para mover telares, laminadoras y todo tipo de maquinaria de manera mucho más eficiente que lo podría hacer la rueda hidráulica; y además permite aumentar mucho la potencia motriz e independizarse del anclaje geográfico de las corrientes de agua [76].

Por otro lado, aún en esta fase de la humanidad en 1850, la productividad del trabajo humano era tan baja que el valor per cápita diario de energía a escala mundial, para usos ajenos a alimentación o cocimiento de los alimentos ascendía a sólo 1875 kcal (véase Fig. 1.2). Si bien a principios de esta etapa la producción de las máquinas de producción ocurre de manera artesanal a prueba y error; con grandes dificultades se lograba el acoplamiento adecuado entre la fuente de fuerza motriz (vapor) y las máquinas. Por ejemplo en telares, el acoplamiento producía resultados tales que, o la maquinaria se movía lentamente o no se movía o lo hacía tan rápido que se destruía, tal fue el caso de los primeros intentos de James Watt. Esta época puede caracterizarse como la segunda revolución de la humanidad (Primera Revolución Industrial), en la cual se inicia la primera fase del uso de combustibles fósiles (carbón), con el desarrollo de máquinas a través del uso de la ingeniería, y el gran desarrollo del comercio a larga distancia a través de los trenes y los barcos de vapor.

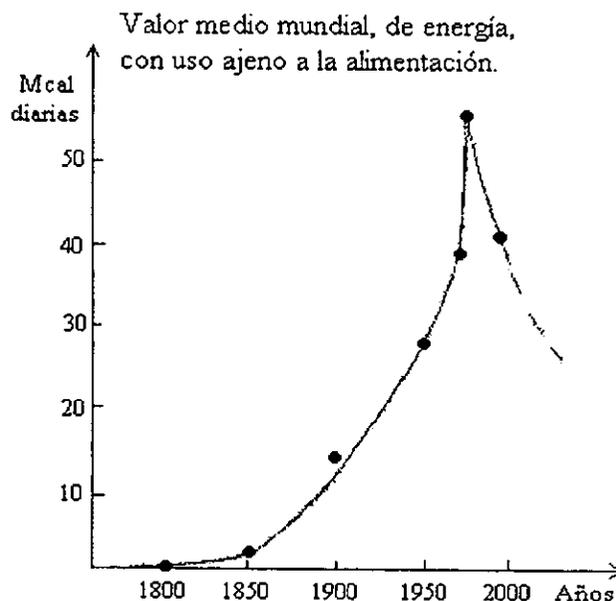


Fig. 1.2 Construida con datos tomados de ref. [10,11]

### 3).- Segunda Revolución Industrial

Hasta fines de 1860 la necesidad de iluminación nocturna, en constante crecimiento, se cubría con aceites de origen animal, por ejemplo de ballena en vías de extinción en aquella época. Alrededor de 1859 se comenzó a explotar sistemáticamente la extracción del petróleo por Edwin Drake en Titusville Pennsylvania USA. El uso inicial del petróleo no sólo fue como medicamento, sino como aceite para iluminación y pronto como combustible, siendo muy barato en comparación con el carbón y gozando de muchas otras ventajas como su limpieza, su homogeneidad, su ausencia de cenizas y residuos sólidos al quemarse y la facilidad de traslado y almacenamiento. Asociado al uso del petróleo como combustible, temporalmente aparecen en un período de 20 años (1867-1887): el motor de combustión interna (Diesel), la energía eléctrica, la lámpara eléctrica, la telegrafía sin hilos, el teléfono, la primera de las fibras sintéticas: la seda artificial y el primero de los plásticos sintéticos como la bakelita [87].

A comienzo de 1900, el futuro del petróleo está ya trazado. Desde entonces la expansión de su consumo es un fenómeno fundamentalmente cuantitativo, si exceptuamos el reciente desarrollo de la petroquímica. Véase Fig. 1.3.

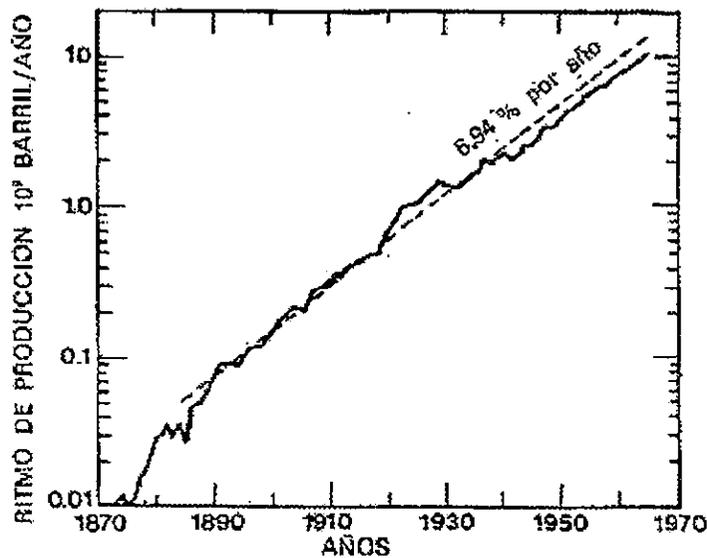


Fig. 1.3 Tomada de ref. [42]

Esta etapa, la cual termina en la Segunda Guerra Mundial la llaman la Segunda Revolución Industrial y se le puede caracterizar, entre otras cosas por un cambio cualitativo respecto a la etapa anterior: Destaca su carácter más científico y su menor dependencia del empirismo, y la creciente primacía de lo científico sobre lo técnico. Mientras que todo el desarrollo del motor de combustión interna y las fibras y plásticos sintéticos se basan en el desarrollo científico previo de la Termodinámica llevada a cabo por Carnot, Joule, Kelvin, Clausius, Helmholtz y Gibbs. El desarrollo de la electricidad, la lámpara eléctrica, el motor eléctrico, la telegrafía sin hilos, el telégrafo, etc. se basan en el desarrollo de la Electrodinámica, realizado por una gran cantidad de investigadores destacándose entre ellos: Maxwell, Faraday y Hertz.

Como un paréntesis, antes de abordar a la Tercera Revolución (Científico-Técnica) Industrial, podemos mencionar que en cada revolución, el avance de la producción, la ciencia y la técnica redundan en múltiples ventajas de diverso tipo para la población originando "revoluciones" dependientes de las industriales en otras áreas de la vida de los seres humanos. Por ejemplo en medicina. En la Primera Revolución Industrial entre 1700 y

1800 se produjeron la vacunación antivariólica (el 30 de junio de 1999 la Organización Mundial para la Salud afirma que se destruyeron todas las cepas de virus de la viruela existente en 2 laboratorios especiales para su estudio en el planeta Tierra después de 10 años de que no existe ningún brote), la pasteurización de alimentos, y la cirugía antiséptica, todo ello por supuesto basado en el descubrimiento previo de los gérmenes patógenos. Por otro lado, entre 1928 y 1940 con los trabajos de Fleming sobre la penicilina surge la “Segunda Revolución de la Medicina”, se desarrollan la insulina, la tiroxina, los marcapasos, y la implantación de órganos. La constelación de mejoras en medicina, higiene y nutrición contribuyen decisivamente al aumento de población en cantidad, mejora su calidad física y aumenta la esperanza de vida media (véase Fig. 1.4) para el mundo y la Fig. 1.5 para México.

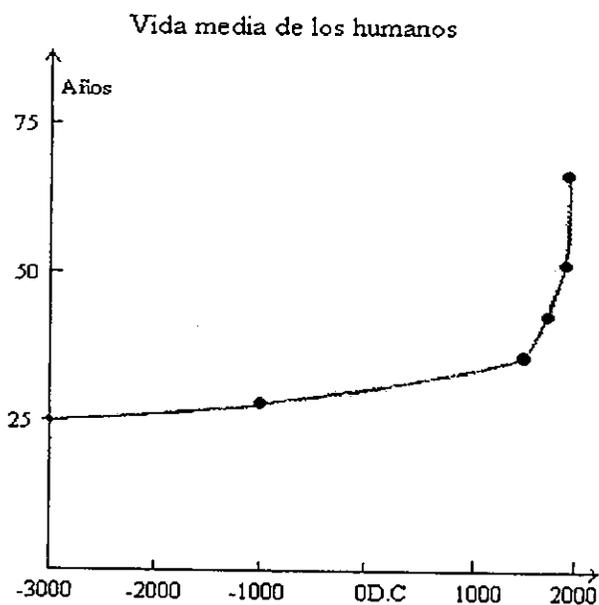


Fig. 1.4 Construida a partir de datos de ref. [25.]

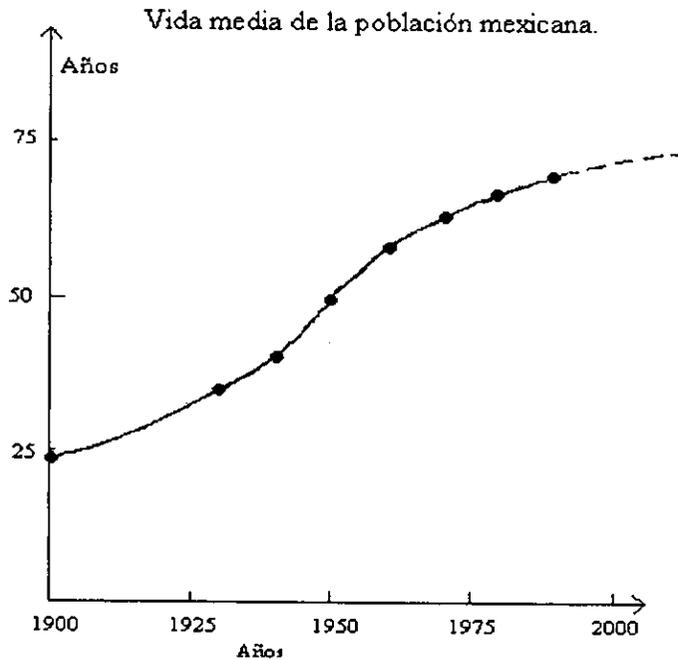


Fig. 1.5 Construida a partir de datos de ref. [4].

#### 4).- Tercera Revolución Industrial (Científico-Técnica)

A partir de la Segunda Guerra Mundial se inicia el gradual surgimiento de la Tercera Revolución Industrial (Primera Revolución Científico-Tecnológica). Se identifica con un ritmo de cambio científico tecnológico sin precedentes: por su amplitud, su intensidad; así como por su profundidad y continuidad. La tasa de cambio científico y tecnológico es proporcional al número de personal activo en las áreas correspondientes. Un 85% de todos los científicos que han existido a lo largo de la historia, están vivos hoy y en plena actividad profesional [94].

Esta etapa, la cual actualmente vivimos, puede esquematizarse de manera tentativa por el tipo de actividades que despuntan como centrales: 1º el desarrollo, perfeccionamiento y extraordinaria difusión y uso de las computadoras para muy diferentes actividades como: informática, comunicación, enseñanza, diversión, etc.; y sobre todo la creciente aplicación de robots a las actividades industriales de tipo productivo, liberando al ser humano de

labores insalubres, agotadoras, repetitivas y monótonas o peligrosas. 2° el desarrollo y búsqueda de aplicaciones ecológicamente seguras de la Biotecnología. 3° el desarrollo y aplicación de nuevos materiales para muy diversos usos. 4° aparición paulatina y creciente de la conciencia de la finitud práctica del planeta Tierra y de los efectos secundarios de la creciente actividad humana adversas a la continuidad de la vida toda. El surgimiento incipiente, de la necesidad de realizar actividades científico-técnicas, de todo tipo, que permitan que las actividades humanas se puedan llevar a cabo de manera tal que se garantice la supervivencia de la especie y de todas las otras especies a muy largo plazo en el planeta. En otras palabras, la conciencia de la creciente necesidad de desarrollar al máximo posible las capacidades científico-técnicas y humanas requeridas para afrontar, con éxito, una gran cadena de diversas crisis, que se deben resolver de manera específica so pena de desaparición de una gran parte, de la especie humana que actualmente habita el planeta. 5° último, pero no menos importante la necesidad creciente de desarrollar nuevos energéticos alternativos a los combustibles fósiles (hidrocarburos), en proceso de agotamiento, véase gráficas para México (Fig. 1.6), Estados Unidos de América (Fig. 1.7) y el Mundo (Fig. 1.8). En particular para México el problema es urgente, por la rapidez de incremento en las exportaciones de petróleo a USA (Fig. 1.9).

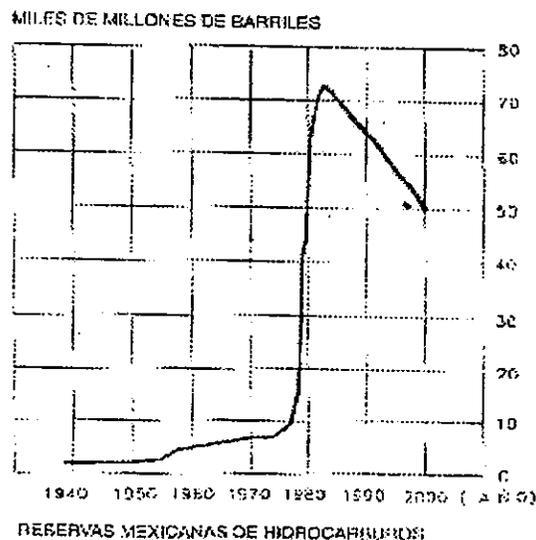


Fig. 1.6 Calculada con datos obtenidos de [6, 9, 70]

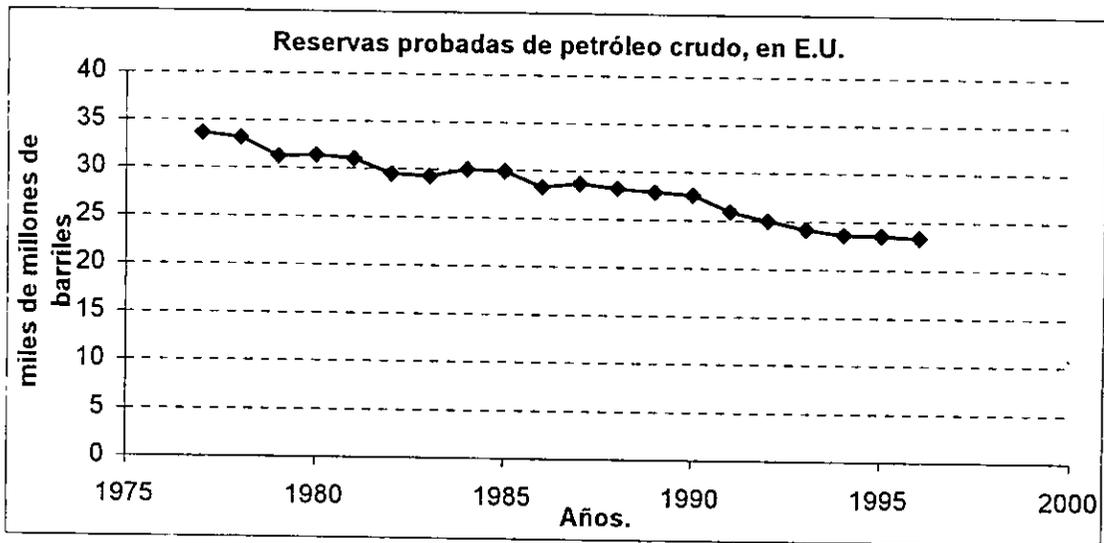


Fig. 1.7 Construida a partir de datos tomados de ref. [6]

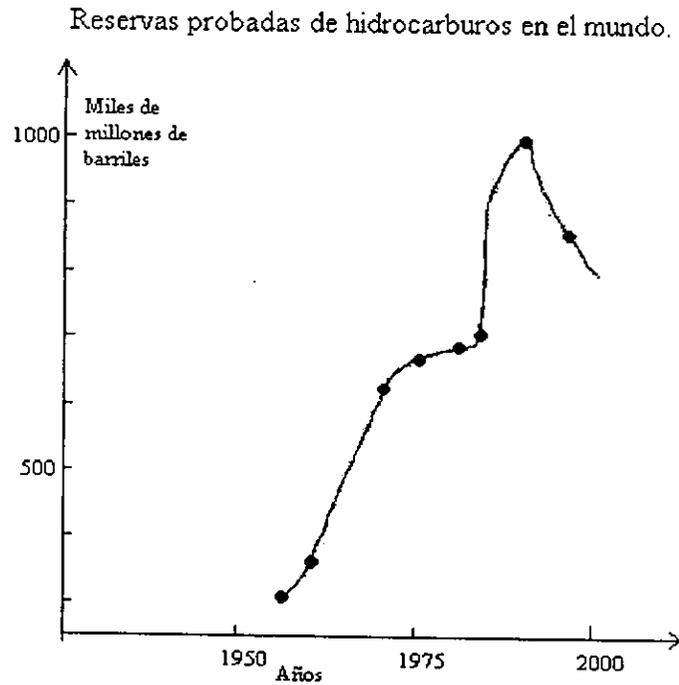


Fig. 1.8 Construida a partir de datos tomados de ref. [6, 4]

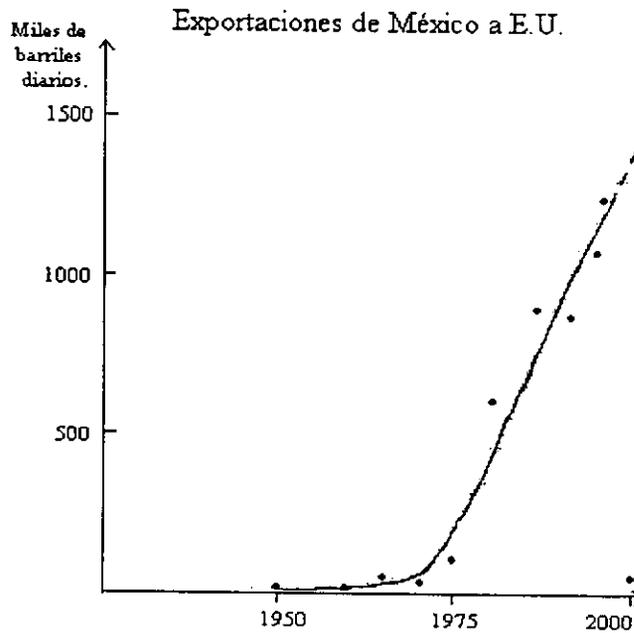


Fig. 1.9 Construida con datos de ref. [89]

Recapitulando, hemos visto que las actividades humanas desde los albores de la civilización han sufrido cuatro revoluciones o transformaciones profundas, en cuyo proceso histórico se advierte una tendencia creciente en la cual se pasa de métodos basados en la imitación de la naturaleza y la fuerza física humana a otros métodos superiores y de complejidad creciente donde se va imponiendo, profundizando y ampliando el conocimiento científico de la naturaleza y la inteligencia humana. El tipo de energía utilizada para la producción de bienes y servicios ha evolucionado de manera acoplada con la producción y los medios existentes para producir a lo largo de la historia.

Dentro de los grandes cambios a que nos referimos, cabe destacar aspectos como los siguientes: Desde el invento de la agricultura se ha venido dando un proceso creciente de formación y expansión de ciudades, las cuales a escala mundial actualmente agrupan alrededor del 50% de la población total (y en México al 77%), véase además el crecimiento en el tiempo del número de ciudades con población mayor a 15,000 habitantes, Fig. 1.11. Con el invento de la agricultura y su desarrollo científico de carácter reciente se ha pasado de una población mundial de 5.3 millones de humanos, a una de 6 mil millones de seres humanos. La esperanza de vida media para la población ha pasado de 20 años a un

promedio de 65 años a nivel mundial. El transporte de carga ha pasado de una velocidad de 3.5km/h por tierra a 150km/h en trenes rápidos. En cuanto a comunicación se parte de una situación en la cual la comunicación tardaba meses o años dentro de un continente; a otra, en la cual hay acceso instantáneo a cualquier parte del mundo a través de la red internacional de computadoras (Internet). El tremendo incremento en el conocimiento humano científico-técnico, el cual actualmente crece a ritmo exponencial. Etcétera.

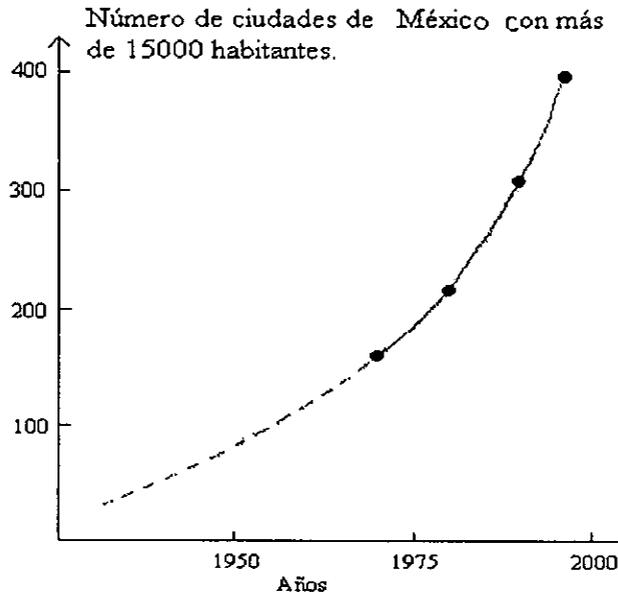


Fig. 1.10 construida con datos de ref. [73]

### 5).- Grandes problemas a resolver

Actualmente existe el creciente temor de que la humanidad esté en peligro de extinción, debido a las consecuencias secundarias no previstas de su “éxito”.

Algunos de los problemas que de no solucionarse adecuadamente a largo plazo pueden poner en riesgo la existencia misma de la humanidad son: Agricultura, ganadería y pesca, Agua dulce suficiente, disminución paulatina de áreas boscosas (véase Fig. 1.11 a escala mundial y Fig. 1.12 para México), agotamiento de combustibles fósiles y necesidad de alternativas, contaminación (del aire, el suelo y el agua, así como de alimentos), disminución creciente en el número de especies vegetales y animales, desarrollo creciente de guerras por recursos escasos (en particular tierras y energéticos), falta de educación

amplia y de calidad en países pobres como México, falta de alimentación y salud adecuadas, crecimiento continuo de la población que demanda satisfactores a sus necesidades, consecuencias varias del efecto invernadero, etc. No sólo cada uno de esos desafíos amenaza la supervivencia de la especie humana y otras especies, sino que además el desarrollo de uno de esos problemas sin resolver, afecta el crecimiento de otros con los cuales tiene relación directa o indirecta.

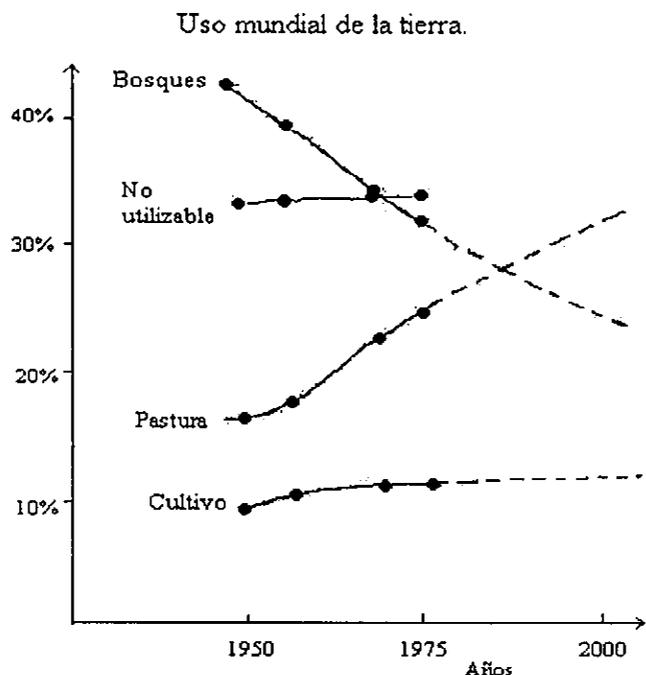


Fig. 1.11 Construida con datos tomados de ref. [65]

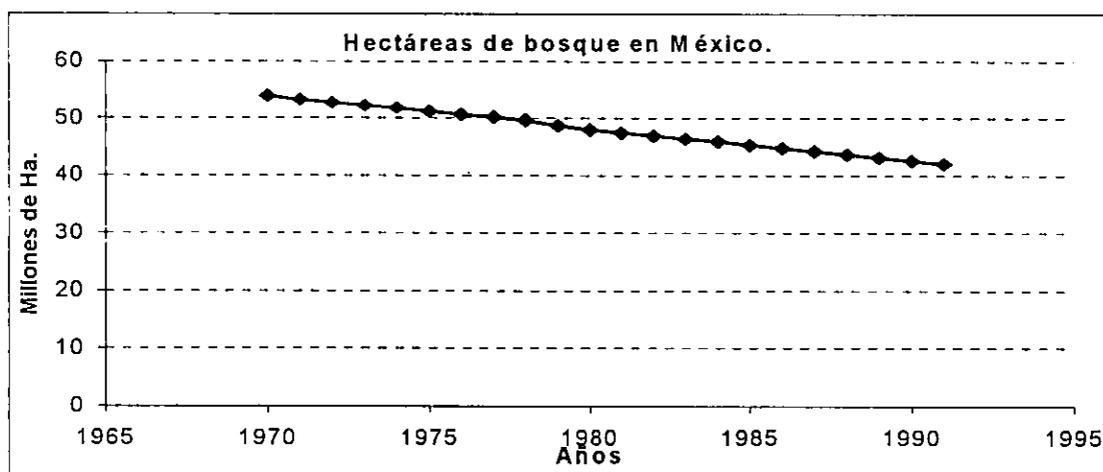


Fig. 1.12 Construida con datos tomados de ref. [72]

De igual manera puede verse que la evolución de otros problemas como el de la contaminación del medio ambiente incide: sobre la calidad de vida a corto plazo a escala planetaria y sobre la vida misma a largo plazo. Hasta hace poco tiempo normalmente un proceso industrial ( $x$ ) se analizaba sólo desde un punto de vista económico como sigue: se preguntaban si de la realización del proyecto se obtenía una ganancia atractiva, ésta se llevaba a cabo; sin averiguar o preocuparse de los costos requeridos para limpiar el patio trasero del vecino. La ecología como ciencia comenzó a destacar el asunto de la contaminación y la realidad de la misma ha venido obligando a los economistas a parchar sus teorías internalizando (como ellos manejan) los costos ambientales de sus proyectos.

Estos problemas pueden verse en otro marco teórico más fundamental que los otros dos ya mencionados: ¿cuánto implica en energía libre haber obtenido los productos industriales ( $x$ ) al ritmo y en la magnitud producidos?, comparado con ¿cuánto implica en energía libre restaurar el medio ambiente a condiciones iniciales tal que el proceso industrial  $x$  pueda realizarse por tiempo indefinido sin afectar las posibilidades de vida animal y vegetal? Si la comparación arroja un saldo negativo a la resta de la segunda con la primera, cabe cuestionarse profundamente la realización de tal proceso en el largo plazo. Por ejemplo, si en el proceso de obtener un nuevo energético a un ritmo y cantidad específica, liberamos al medio ambiente sustancias contaminantes dañinas para la vida en el planeta, en cantidades tales que contener y guardar las sustancias o eliminarlas y lograr que sean inocuas o no tóxicas requiere más energía que la obtenida durante la operación de la fuente energética, estamos envenenando con tendencia irreversible al planeta en su conjunto; y si una gran proporción de nuestros procesos productivos se comportan similarmente, estamos en camino de extinguir una parte importante de la vida en el planeta.

Todos los procesos industriales requieren energéticos de manera directa o indirecta para su realización. Pero fue a partir de la crisis energética de 1974, que la humanidad comenzó a conocer en el ámbito social, lo central y fundamental que eran los energéticos para el sostenimiento y desarrollo de la vida actual de los seres humanos. Esto es, se percataron de algo que los ingenieros y los físicos sabían desde hace más de doscientos años. Lo que ocurría es que la humanidad había dado por sentado que el flujo energético necesario para

su desarrollo estaba garantizado, en cualquier período de tiempo no importaba cuan lejos llegara en el tiempo. La humanidad como conjunto ignoraba lo que, entre otras personas, había dicho Bertrand Russell hace más de 50 años: Que la humanidad no se había dado cuenta que vivía en una orgía de despilfarro, dilapidando en doscientos años recursos energéticos no renovables que le había tomado a la naturaleza más de 100 millones de años almacenar [11] (consumimos a un ritmo 100 mil veces más rápido de lo que se forman los hidrocarburos a partir de desechos grasos de animales que van muriendo a través del tiempo [33]).

El 80% de la energía mundial utilizada cotidianamente es de origen fósil, en México esta proporción es mayor 92% y está en ascenso (véase Fig. 1.13), a diferencia de la mayoría de los países desarrollados, los cuales de manera creciente utilizan combustibles renovables. Además de acuerdo con Campbell y Laherrere [88] el 80% de la producción de hidrocarburos a escala mundial proviene de campos petroleros, encontrados antes de 1973, y no se espera encontrar nuevos campos del tipo gigante, sino más bien pequeños los cuales no van a contribuir sustancialmente a las decrecientes reservas probadas a escala mundial. Si bien el carbón mineral a nivel mundial dista mucho de acabarse, existen a futuro consideraciones muy bien fundadas que permiten suponer que surgirá una fuerte oposición a su uso indiscriminado y menos a un aumento al ritmo de su utilización. Véanse documentos del World Watch Institute (por ejemplo, ref. [62]).

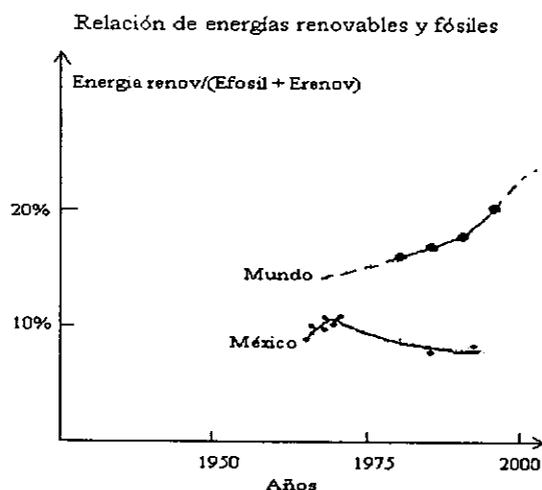


Fig. 1.13 Construida con datos obtenidos de ref. [30]

## 6).- Método sugerido para planeación energética.

Hasta aquí un resumen general de la situación energética de la humanidad a través de la historia. El reto actual es entre otros, desarrollar las fuentes energéticas alternativas que sustituirán a los combustibles fósiles (en proceso acelerado de agotamiento). La literatura científica y tecnológica sobre energéticos alternativos presenta trabajos y contribuciones sólidas y bien fundamentadas. Por otro lado, para la planeación energética para un país, una región o un sector industrial se siguen diversos métodos que no aportan resultados parecidos; y no permiten una planeación a largo plazo por cuanto en general todos los métodos se basan de una manera u otra en análisis económicos, los cuales por sus propias características son limitados y en muchas ocasiones están cargados de ideología, más que de ciencia; y por lo mismo aunque pueden ser utilizados para realizar cálculos matemáticos complejos a través de modelaciones, sus pronósticos sólo tienen algún sentido a corto plazo y en realidad no permiten planeación a largo plazo. Por ejemplo los métodos globales más antiguos aplicados a energéticos son:

- 1). Investigación de Operaciones (método lineal), data de la 2ª Guerra Mundial.
- 2). Cross Impact Matrix Analysis: (Método lineal). [90]

Además, recientemente se han presentados métodos que relacionan diversas áreas de conocimiento:

- 3). Análisis económico-ecológicos para problemas energéticos [7].
- 4). Análisis económicos – no lineales para problemas energéticos y de desarrollo tecnológico [5].
- 5). Análisis técnico-metabólicos para inversión económica en ciencias y desarrollo tecnológico en función de los recursos [3].

Dado que la mayor parte de los métodos mencionados anteriormente, están basados en análisis que contemplan parámetros económicos, tienen la desventaja de que resulta difícil aplicarlos para realizar análisis a largo plazo debido a las relativamente grandes variaciones que se presentan en éste tipo de parámetros. Si por otro lado, se utiliza un marco teórico que se base en leyes físicas fundamentales, tendríamos la ventaja de poder realizar análisis a largo plazo con una mayor facilidad y certeza.

Como la termodinámica de procesos irreversibles, se basa fundamentalmente en el análisis de los flujos de la energía en sistemas abiertos y además puede contemplar con relativa simpleza la existencia de fenómenos no lineales, que son consecuencia de la interacción entre las múltiples variables que los componen; queda claro que el modelo teórico elegido para desarrollar la planeación energética estratégica será la Termodinámica de Procesos Irreversibles.

# *Capítulo 2*

*Marco teórico.  
(termodinámica de  
procesos irreversibles).*

# TERMODINAMICA DE PROCESOS IRREVERSIBLES

## Aspectos generales

La termodinámica de procesos irreversibles, tiene la característica de permitir el estudio de sistemas complejos, que tienen múltiples interacciones entre diferentes fenómenos y al mismo tiempo hacer consideraciones generales sobre su comportamiento en determinadas condiciones; por ejemplo: fenómenos de difusión térmica, que consisten en la formación de un gradiente de concentración debido a un gradiente de temperatura, efecto Peltier, etc. A diferencia de la termodinámica clásica, considera a la formación de entropía como parte importante del comportamiento de los sistemas; la forma en como estos se comportan, se encuentra fuertemente relacionado con ésta variable y con las condiciones a las cuales se encuentra sometido el sistema.

Con lo expuesto anteriormente, queda claro que la termodinámica de procesos irreversibles es una herramienta teórica que permite hacer un estudio general de variables relacionadas entre sí, tales como consumo y producción de energéticos, bienes manufacturados, oferta y demanda de la fuerza de trabajo, etc.

A continuación se presentará una introducción a la termodinámica de procesos irreversibles. Cabe aclarar que aunque varios de los elementos que se describen en ésta introducción, no se abordan posteriormente, tienen el objetivo de que se adquiera un mejor manejo conceptual de ideas que se abordarán más adelante

## Conservación de masa.

### Conservación de masa en sistemas cerrados:

Si se considera un sistema cerrado, en el cual se llevan a cabo ciertas reacciones químicas, el cambio de masa  $m_\gamma$  de un componente  $\gamma$ , durante un intervalo de tiempo dado, es:

$$dm_\gamma = v_\gamma M_\gamma d\xi \quad (2.1)$$

donde  $M_\gamma$  es la masa molar del componente  $\gamma$  y  $v_\gamma$  es el coeficiente estequiométrico de la reacción. El coeficiente se considera positivo si aparece en el lado derecho de la reacción y negativo si aparece en el lado izquierdo;  $\xi$  es el grado de avance de la reacción.

Como el sistema supuesto es cerrado, la masa total del sistema no cambia y se debe cumplir con:

$$\sum_\gamma v_\gamma M_\gamma = 0 \quad (2.2)$$

En ocasiones es más conveniente expresar las ecuaciones en función del número de moles, así grado de avance de reacción, se puede expresar como:

$$dn_\gamma = v_\gamma d\xi \quad (2.3)$$

Cuando se estudian cambios por unidad de tiempo, es recomendable utilizar el grado de reacción por unidad de tiempo:

$$v = d\xi / dt \quad (2.4)$$

Si se tiene un sistema con varias reacciones químicas llevándose a cabo en su interior, entonces el cambio total de la masa del componente  $\gamma$ , es igual a la suma de del total de los cambios producidos por cada una de las reacciones en las cuales interviene dicho componente.

## Conservación de masa en sistemas abiertos:

En el caso de un sistema abierto, se puede dividir el cambio de la masa de un componente  $\gamma$  en dos partes; una parte  $d_e m_\gamma$  que se produce mediante intercambios con el exterior y otra parte  $d_i m_\gamma$  originada mediante cambios ocurridos dentro del sistema, es decir:

$$dm_\gamma = d_e m_\gamma + d_i m_\gamma \quad (2.5)$$

$$dm_\gamma = d_e m_\gamma + M_\gamma \sum_{\rho=1}^{\gamma} v_\gamma d\xi_\rho \quad (2.6)$$

La relación anterior, expresa la conservación de masa en un sistema abierto, en el interior del cual se pueden llevar a cabo reacciones químicas. El proceso de dividir el cambio total de la masa de un componente  $\gamma$ , en una parte externa (debido a intercambios con el exterior) y en una parte interna (como resultado de las reacciones que se llevan a cabo dentro del sistema), puede ser generalizado a cualquier propiedad extensiva.

## Conservación de la energía (Primera ley de la termodinámica).

Cualquier función que pueda ser definida como función de las variables que determinan un estado termodinámico, es llamada función de estado del sistema.

El primer principio de la termodinámica, en su forma general, postula la existencia de una función de estado llamada energía del sistema,  $E$ , cuyo cambio por unidad de tiempo es igual a un flujo con los alrededores. Si se toma la convención de que el calor,  $Q$ , es positivo si éste es recibido por el sistema, considerando que la presión,  $p$ , es normal a la superficie, entonces para un sistema cerrado se cumple que:

$$dE = dQ - p dV \quad (2.7)$$

### Conservación de energía en sistemas cerrados:

Si se considera un sistema cerrado que tiene cambios internos, caracterizados por el parámetro  $\xi$ , tomando en cuenta que la función de estado  $E$ , puede ser expresada mediante variables independientes tal como el volumen  $V$ , la temperatura  $T$  (en unidades absolutas), y el número de moles de los diversos componentes ( $n_1, \dots, n_c$ ); entonces la diferencial total de  $E$ , puede ser expresada de la siguiente manera (de acuerdo a la regla de la cadena):

$$dE = (\partial E / \partial V)_{T\xi} dV + (\partial E / \partial T)_{V\xi} dT + (\partial E / \partial \xi)_{TV} d\xi \quad (2.8)$$

Si a continuación introducimos una nueva variable de estado, llamada entalpía  $H$ , definida por:

$$H = E + pV \quad (2.9)$$

La ecuación de la conservación de la energía, puede quedar definida de la siguiente forma (sustituyendo la ecuación 2.7 en la diferencial de 2.9):

$$dH = dQ + V dP \quad (2.10)$$

Desarrollando la diferencial de  $H$ , en función de las variables  $p$ ,  $T$ ,  $\xi$ , se obtiene:

$$dQ = C_{p\xi} dT + h_{T\xi} dp - r_{Tp} d\xi \quad (2.11)$$

donde:

$$(\partial H / \partial T)_{p\xi} = C_{p\xi}; \quad (\partial H / \partial p)_{T\xi} = h_{T\xi} + V; \quad (\partial H / \partial \xi)_{Tp} = -r_{Tp} \quad (2.12)$$

### Conservación de energía en sistemas abiertos:

Para sistemas abiertos, la ecuación 2.7, debe tomar en cuenta intercambios de masa con el exterior, de forma que queda de la siguiente manera:

$$dE = d\Phi - p dV \quad (2.13)$$

A diferencia de la ecuación 2.7, la cual tiene el término  $dQ$ , se introduce el flujo total de energía  $d\Phi$  que se debe a la transferencia de calor y al intercambio de energía por medio de flujos másicos con el exterior.

Para el caso de la entalpía, en un sistema abierto, queda definida por:

$$dH = d\Phi + V dP \quad (2.14)$$

### Producción de entropía (Segunda ley de la termodinámica). -

Consideremos a la ecuación que define a un proceso que depende del tiempo. Si la ecuación es invariable al signo algebraico que se le asigne a la variable  $t$ , es proceso se conoce como reversible, de otra forma se le conoce como proceso irreversible. La mayor parte de los procesos físico-químicos, tales como la conducción de calor, reacciones químicas, etc. son procesos irreversibles.

El segundo principio de la termodinámica, postula la existencia de una función de estado, llamada entropía, la cual cumple con las siguientes propiedades:

1. La entropía del sistema es una propiedad extensiva.
2. El cambio de la entropía  $dS$ , puede ser dividido en dos partes:  $d_e S$  debido a interacciones con el exterior y  $d_i S$  debido a cambios ocurridos dentro del sistema.

$$dS = d_e S + d_i S \quad (2.15)$$

El cambio en la entropía, debido a cambios dentro del sistema ( $d_i S$ ), no puede ser negativo, de forma que si vale cero, se trata de un proceso reversible, mientras que si tiene un valor positivo se trata de un proceso irreversible.

Para sistemas aislados, no hay flujo de entropía, de forma que la ecuación 2.15 queda reducida a:

$$dS = d_i S \geq 0 \text{ (para sistemas aislados)} \quad (2.16)$$

Como la energía libre de Helmholtz y la energía libre de Gibbs, sólo existen para un número limitado de transformaciones, el único criterio general de irreversibilidad, está dado por la generación interna de entropía.

Cabe señalar que no es posible que se presenten situaciones de “absorción” de entropía en una parte, compensado con “suficiente” producción de entropía en otra parte del sistema. Esto implica que en toda región macroscópica dentro de un sistema, la producción de entropía debido a irreversibilidades del proceso, siempre es positiva. Dicha formulación, puede ser llamada como formulación “local” del segundo principio de la termodinámica, en contraste con la anterior formulación “global” de la termodinámica clásica.

Generación de entropía en sistemas cerrados de un sólo componente:

Para sistemas cerrados de un sólo componente, la producción de entropía queda definida por:

$$dS = dQ/T \quad (2.17)$$

Donde T es una medida absoluta de la temperatura del sistema.

Para el mismo sistema cerrado de un sólo componente, se puede expresar la formación de entropía como función de variables que se pueden fácilmente relacionar con variables de estado, de forma que si se utiliza la ecuación de conservación de energía (Ec. 2.7), y se sustituye en la ec. 2.17, se obtiene que:

$$dS = \frac{dE + pdV}{T} \quad (2.18)$$

Generación de entropía en sistemas abiertos, sin reacciones químicas entre sus componentes:

Si se considera un sistema en el cual se llevan a cabo cambios en el número de moles de sus componentes (sin reacciones químicas), mediante intercambios de masa con el exterior, entonces la producción de entropía se puede expresar de la siguiente forma:

$$dS = dE/T + p/T dV - \sum_{\gamma} \mu_{\gamma}/T dn_{\gamma} \quad (2.19)$$

Donde  $\mu_{\gamma}$ , es llamado potencial químico y queda definido de las siguientes formas:

$$\mu_{\gamma} = -T (\partial S/\partial n_{\gamma})_{E, V, n'_{\gamma}} = (\partial E/\partial n_{\gamma})_{S, V, n'_{\gamma}} = (\partial G/\partial n_{\gamma})_{T, p, n'_{\gamma}} \quad (2.20)$$

Donde  $n'_{\gamma}$  denota todos los números de moles ( $n_1, \dots, n_c$ ), con excepción de  $n_{\gamma}$ .

Generación de entropía en sistemas cerrados, con reacciones químicas entre sus componentes:

Para sistemas cerrados, dentro de los cuales se llevan a cabo reacciones químicas entre sus componentes, la generación de entropía queda determinada por:

$$dS = dQ/T + Ad\xi/T \quad (2.21)$$

Donde A es la afinidad química de la reacción, la cual queda relacionada con los potenciales químicos que intervienen en la reacción, de la siguiente forma:

$$A = - \sum_{\gamma} \nu_{\gamma} \mu_{\gamma} \quad (2.22)$$

El cambio en la entropía se compone nuevamente de dos términos:

Cambio en la entropía debido a interacciones con el exterior:

$$d_e S = dQ/T \quad (2.23)$$

Para el sistema cerrado supuesto, la producción interna de energía esta dada por:

$$d_i S = A d\xi / T > 0 \quad (2.24)$$

Para el estado de equilibrio, se debe cumplir que:

$$A = - \sum_{\gamma} \nu_{\gamma} \mu_{\gamma} = 0 \quad (2.25)$$

Las ecuaciones anteriores, muestran claramente la relación entre los potenciales químicos; de forma similar, la afinidad está muy relacionada con el grado de avance de la reacción por unidad de tiempo ( $v$ ), de la siguiente forma:

$$d_i S/dt = A v / T \quad (2.26)$$

Si el sistema cerrado supuesto, se generaliza a una serie de reacciones químicas en su interior, entonces la generación interna de entropía queda definida por:

$$d_i S = \frac{1}{T} \sum_{\rho} A_{\rho} d\xi_{\rho} \quad (2.27)$$

Donde  $A_{\rho}$  es la afinidad de la  $\rho$ -ésima reacción, de forma que:

$$A_{\rho} = - \sum_{\gamma} \nu_{\gamma\rho} \mu_{\gamma} \quad (2.28)$$

De forma que la producción de entropía por unidad de tiempo, está dada por:

$$d_i S/T = \frac{1}{T} \sum_{\rho} A_{\rho} V_{\rho} \quad (2.29)$$

De la ecuación anterior, se puede deducir que la producción de entropía por unidad de tiempo, originada dentro del sistema, es igual a la suma de la producción individual de entropía de cada una de las reacciones químicas que se llevan a cabo.

El segundo principio de la termodinámica indica que la producción total de entropía, resultado de todas las reacciones químicas, debe ser positiva. Sin embargo, puede suceder que en un sistema se encuentren dos reacciones simultáneas de forma que:

$$A_1 v_1 < 0, \quad A_2 v_2 > 0 \quad (2.30)$$

De forma que la producción total, está dada por:

$$A_1 v_1 + A_2 v_2 > 0 \quad (2.31)$$

Ambas reacciones se llaman acopladas. El acoplamiento termodinámico, permite que una de las reacciones ocurra en dirección contraria a la que prescribe su propia afinidad.

### **Generación de entropía para sistemas abiertos:**

La producción de entropía para un sistema abierto, dentro del cual se llevan a cabo reacciones químicas, está dada por:

$$dS = \frac{d\phi}{T} - \sum_{\gamma} \frac{1}{T} \mu_{\gamma} d_e n_{\gamma} + \frac{A}{T} d\xi \quad (2.32)$$

Cabe señalar, que existen sistemas en los cuales las variables intensivas, no sólo son función del tiempo, sino también de las coordenadas espaciales. Este tipo de sistemas son conocidos como sistemas continuos. La extensión de la termodinámica de procesos irreversibles no involucra nuevos principios físicos, sin embargo, requiere una mayor cantidad de formalismos matemáticos. Por razón de espacio y del objetivo de esta introducción a la termodinámica de procesos irreversibles, se omiten mayores detalles respecto de éste tema.

Por otra parte, existe otro tipo de sistemas, que involucran procesos en los cuales los grados de libertad de las moléculas  $\gamma$  (tales como deformación por flujo, orientación

respecto de campos eléctricos, etc.), tienen valores continuos en lugar de valores discretos, de forma que la ecuación 2.19 queda, para éste caso, de la siguiente forma:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dE}{dt} + \frac{p}{T} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{T} \int \mu(\gamma) \frac{\partial n(\gamma)}{\partial t} d\gamma \quad (2.33)$$

### Consideraciones generales sobre la producción de entropía y los procesos irreversibles.

La producción de entropía puede ser escrita como la suma de los productos de fuerzas generalizadas (ó afinidades) y los correspondientes flujos generalizados de los procesos irreversibles.

Si se denota a las fuerzas generalizadas por  $X_k$  y los correspondientes flujos generalizados por  $J_k$ , mientras que el símbolo  $A$  se utiliza exclusivamente para la afinidad química (definida en la ecuación 2.22 y 2.28), de acuerdo a la notación adoptada, la generación interna de entropía, está dada por:

$$\frac{diS}{dt} = \sum_k J_k X_k > 0 \quad (2.34)$$

Supongase que la generación de entropía se expresa en función de unas afinidades  $X_k$  y sus correspondientes flujos  $J_k$ , de forma que se pueden introducir un nuevo grupo de afinidades  $X'_k$  que son combinaciones lineales de  $X_k$ , si por otra parte se eligen unos nuevos flujos  $J'_k$ , dado que la producción de entropía es invariable respecto de las variables elegidas, se debe cumplir que:

$$\sum_k J_k X_k = \sum_k X'_k J'_k \quad (2.35)$$

El estudio de las transformaciones de las afinidades y los flujos, es de gran importancia dado que algunas opciones son más convenientes que otras, dependiendo del sistema que se trate.

Cuando un proceso irreversible alcanza el equilibrio, se debe cumplir que:

$$J_k = 0 \quad \text{y} \quad X_k = 0 \quad (2.36)$$

Marca del equilibrio, se puede considerar que existen relaciones lineales entre las fuerzas y los flujos generalizados, por ejemplo se puede citar la ley de flujo de calor de Fourier, la ley de difusión de Fick, etc.; sin embargo hay algunos casos en los cuales dichas relaciones pueden llegar a ser no lineales. Lo anterior se puede expresar de la siguiente forma:

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j \quad (2.37)$$

Los coeficientes  $L_{ij}$  son conocidos como coeficientes fenomenológicos. Los coeficientes  $L_{ii}$ , pueden ser coeficientes tales como conductividad eléctrica, conductividad térmica, etc., por otra parte, los coeficientes  $L_{ij}$  (donde  $i \neq j$ ) describen la interferencia entre los procesos irreversibles  $j$  e  $i$ . Por otra parte, el teorema de Onsager indica que:

$$L_{ij} = L_{ji} \quad (2.38)$$

Esta relación de reciprocidad de Onsager, expresa que el flujo que corresponde al proceso irreversible  $i$ , es influenciado por la afinidad  $X_j$  de proceso irreversible  $j$ , entonces el flujo  $j$  es también influenciado por la afinidad  $X_i$ , a través del mismo coeficiente de interferencia  $L_{ij}$ .

### Estados estacionarios.-

Cuando en un sistema las variables de estado no dependen del tiempo, se dice que el sistema se encuentra en estado estacionario. Se debe hacer énfasis en la diferencia que se tiene respecto a los estados en equilibrio, ya que éstos se caracterizan por una producción cero de entropía. Mientras los sistemas en estado estacionario se caracterizan por tener una mínima producción de entropía, respecto al resto de estados en los cuales se puede encontrar un determinado sistema.

Ya que en estado estacionario la producción de entropía no varía con el tiempo, cambios en las fuerzas generalizadas, no provocan cambios en la producción de entropía; es decir:

$$\frac{\partial}{\partial X_m} \left( \frac{diS}{dt} \right) = 0 \quad \text{ó} \quad J_m = 0 \quad (2.39)$$

De forma que para el estado estacionario se tiene la siguiente condición:

$$J_{k+1} = \dots = J_n = 0 \quad (2.40)$$

### **Flujo de entropía en los estados estacionarios.-**

En los estados estacionarios, las variables son independientes respecto del tiempo, por lo tanto queda claro que la producción de entropía del sistema debe ser compensada mediante un flujo negativo de entropía, de forma que el cambio total de entropía sea cero.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{deS}{dt} + \frac{diS}{dt} = 0 \quad (2.41)$$

Como la producción interna de entropía, por parte del sistema es mayor que cero, necesariamente se debe cumplir que:

$$\frac{deS}{dt} < 0 \quad (2.42)$$

De las ecuaciones anteriores, se deduce que los estados estacionarios no pueden ocurrir en sistemas cerrados, dado que es necesario un flujo neto de entropía hacia el exterior del sistema para así poder mantener el estado estacionario.

Existe una gran variedad de sistemas que se pueden considerar en estado estacionario, desde sistemas complejos tales como reacciones químicas, hasta organismos vivos, ya que éstos cumplen con gran exactitud las características de los sistemas estacionarios.

### Termodinámica de los procesos irreversibles no lineales.-

Si se toma la siguiente convención sobre la generación de entropía dentro de un sistema:

$$\wp = \frac{diS}{dt} = \sum_k J_k X_k \geq 0 \quad (2.43)$$

dado que el cambio en la producción de entropía está afectado tanto por los flujos como por las fuerzas generalizadas, entonces tenemos que:

$$d\wp = d_X \wp + d_J \wp = \sum_k J_k dX_k + \sum_k X_k dJ_k \quad (2.44)$$

Si por otra parte, consideramos que:

$$d_X \wp = \sum_k J_k dX_k = \sum_{kl} L_{kl} X_l dX_k = \sum_{kl} X_l (L_{kl} dX_k) = \sum_l X_l dJ_l = d_J \wp \quad (2.45)$$

Entonces:

$$d_X \wp = d_J \wp = \frac{1}{2} d\wp \quad (2.46)$$

La contribución del cambio en el tiempo de las fuerzas, en la producción de entropía, siempre es negativa ó cero, de forma que:

$$d_X \phi \leq 0 \quad (2.47)$$

La ecuación anterior, es válida, incluso cuando las condiciones de frontera son independientes respecto del tiempo, de forma que la desigualdad (2.47), es el resultado más general sobre la termodinámica de procesos irreversibles.

La ecuación (2.47) se puede ampliar para incluir procesos de flujo, de forma que existe un variable  $d\Phi$ , de forma que:

$$d\Phi = \int dv \sum J_k' dX_k' \leq 0 \quad (2.48)$$

Donde las fuerzas  $X_k'$  y los flujos  $J_k'$ , incluyen procesos mecánicos, tales como términos relacionados con la convección. De forma que se puedan tratar con sistemas no homogéneos, se trató a la ecuación 2.48 como una integral de volumen.

Las ecuaciones anteriores (2.47 y 2.48), son un criterio general de evolución de los sistemas, pero esto no indica que sean potenciales generalizados para todos los sistemas. La existencia de un potencial, implica la posibilidad de que un sistema pueda "olvidar" a sus condiciones iniciales, por ejemplo: un sistema aislado tiende a un nivel máximo de entropía, sin importar sus condiciones iniciales. Sin embargo, existen sistemas que una vez perturbados, no pueden regresar a su estado inicial (ya que ahora es inestable); dichos sistemas no pueden volverse independientes de sus condiciones iniciales y no pueden ser descritos en términos de ningún potencial, a menos que se defina un potencial local, que son de gran importancia para la evolución de sistemas no lineales.

Un sistema puede alcanzar el estado estacionario de múltiples formas, de forma que en algunos casos extremos se pueden llegar a tener oscilaciones alrededor de los mismos. La oscilación es termodinámicamente posible alrededor de un estado estacionario, pero no es posible que se lleven a cabo alrededor de estados de equilibrio. Esto tiene como consecuencia que la producción de entropía, en el primer caso, sea principalmente debido al

estado estacionario, es posible que haya contribuciones negativas en la producción de entropía, conforme se oscila alrededor del estado estacionario, siempre y cuando la producción total permanezca positiva. Las oscilaciones cerca del estado de equilibrio no son posibles, debido a que existen velocidades de potencial, lo cual impide éste hecho.

### Orden y disipación.-

En general se puede decir que procesos de disipación de energía que se llevan a cabo lejos del estado de equilibrio, pueden desarrollar fenómenos de oscilación alrededor del estado estacionario, de forma que pueden crear cierto orden dentro del sistema (un decremento de la entropía), el cual permite realizar la disipación con una mayor eficiencia que al sistema original.

Para ejemplificar lo anteriormente señalado, se puede mostrar el siguiente caso:

Supóngase que se tiene un recipiente con un líquido en su interior, de forma que se calienta en un cierto periodo de tiempo. Si el calor suministrado es relativamente pequeño, la transferencia de calor (disipación) se realiza mediante conducción a través del fluido. Si se incrementa el valor de la disipación de calor, entonces existen efectos de convección dentro del recipiente que organizan el movimiento del fluido en un patrón casi simétrico de celdas convectivas, de forma que la disipación se lleva a cabo de una forma más eficiente.

Como el movimiento organizado del fluido requiere de cierta energía que se manifiesta en energía cinética, el valor de la disipación, teniéndose como consecuencia una disminución en entropía media del fluido de la siguiente forma:

$$\Delta S = -\frac{1}{\bar{T}} E_{\text{cin}} \quad (2.49)$$

Donde  $\bar{T}$  es la temperatura media que caracteriza al sistema, mientras que  $E_{\text{cin}}$  es la energía cinética del líquido debido a los efectos convectivos.

Como comentarios generales respecto a los estados estacionarios se puede decir que:

Si los estados estacionarios ocurren cerca del estado de equilibrio, se encuentran regidos por el teorema de mínima generación de entropía.

Y si los estados estacionarios ocurren lejos del estado de equilibrio, pueden presentarse oscilaciones en las variables importantes alrededor de los valores de estado estacionario, además se presentan fenómenos de reorganización, lo cual tiene como consecuencia una disminución de la entropía, permitiéndose una disipación más eficiente.

## TEORIA PARA LA PLANEACION ENERGÉTICA ESTRATÉGICA.-

La teoría energética aquí propuesta, tiene como objetivo el garantizar las condiciones energéticas mínimas necesarias, para que una población humana pueda lograr un desarrollo sustentable a largo plazo.

En ésta teoría se considera la dependencia que tiene la población humana respecto a la energía que se consume y a la cantidad de bienes producidos. También se estudia la interacción que existe entre la energía consumida, la fabricación de recursos y la productividad de los medios de fabricación. Además se establecen las condiciones que invariablemente se deben cumplir una vez que una población haya llegado a un estado sustentable ó estacionario. El modelo permite determinar diferentes trayectorias de desarrollo sustentable (poblacional, industrial, agropecuario, energético etc.), que vayan encaminadas hacia un estado estacionario; dichas trayectorias pueden elegirse de forma que se realice el mínimo gasto de energía desde la situación actual hasta el estado estacionario.

### Aspecto Poblacional Fenomenológico

Para el caso de la especie humana, históricamente sabemos que la población cambia en función del tiempo aún cuando no existan cambios tecnológicos importantes, simplemente desarrollando población en nuevas regiones del planeta; también sabemos que la población humana cambia, cuando varía la potencia libre per cápita que es consumida directamente por dicha población,  $\dot{e}$ , disponible para realizar trabajo. Por lo tanto, de manera fenomenológica, exenta de modelos específicos, podemos afirmar que la población humana, en un lugar dado, es una función de la energía libre per cápita por unidad de tiempo disponible tecnológicamente y del período de tiempo transcurrido desde el asentamiento. Matemáticamente esto se puede expresar como sigue:

$$P_{ob} = P_{ob} (\dot{e}, t). \quad (2.50)$$

La derivada con respecto al tiempo de  $P_{ob}$  puede escribirse como,

$$\frac{dP_{ob}}{dt} = \frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{e}} \ddot{e} + \frac{\partial P_{ob}}{\partial t} \quad (2.51)$$

donde  $\ddot{e} \equiv \frac{d\dot{e}}{dt}$

Sobre el término  $\frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{e}}$  (Ec. 2.51), se puede decir que representa la sensibilidad de la población ante cambios en la potencia consumida. Este término está fuertemente influenciado por la distribución de edades de la población y por la salud media de la misma; por ejemplo: una población predominantemente anciana y enferma, no responde de igual forma ante aumentos ó disminuciones en la potencia libre consumida, que otra predominantemente juvenil, saludable y educada. Esto indica la importancia de que la planeación demográfica, educativa y alimenticia se realice simultáneamente con la planeación energética estratégica.

Por otra parte se puede decir que el término  $\frac{\partial P_{ob}}{\partial t}$  (Ec. 2.51) puede variar bajo la influencia de decisiones políticas, fenómenos físicos (como guerras, epidemias, etc.), así como debido a cambios tecnológicos:

- 1.- Fenómenos políticos como planeación demográfica, etc. Permiten que la población aumente menos rápido, independientemente de los aumentos que se registren en la potencia consumida. Se puede lograr que: la población aumente suavemente hasta alcanzar el estado estacionario ó que disminuya paulatinamente hasta alcanzar el mismo, sin que se presenten situaciones catastróficas.
- 2.- Fenómenos físicos como disminución forzosa de la población debido a escasez de alimento, guerras, epidemias, etc. Provocan disminuciones en la población, independientemente de las variaciones que se registren en la potencia consumida
- 3.- Un aumento en la eficiencia del uso de la energía ó la tendencia natural de una población a crecer ante condiciones relativamente estables. Puede permitir que la población aumente a pesar de que la potencia per cápita permanezca constante ó disminuya.

Dado que a largo plazo la energía utilizada será de origen renovable, es claro que  $\dot{e}$  tendrá como límite máximo a la generación de energía libre per cápita proveniente de fuentes renovables. Por ello es importante evaluar la potencia de origen renovable que se puede obtener en una región (como México), para que así se sepa qué tanta población es posible sostener, y de esta forma se puedan emprender programas demográficos y alimenticios de tipo estratégico.

### Modelo General

En esta subsección, se aportan ecuaciones que relacionan los recursos no-energéticos (fósiles) y/o productos o servicios requeridos por una población local o mundial. Para estado estacionario se establecen las condiciones de estabilidad a cumplir por las rapidezces de cambio en la producción de bienes.

En la sección anterior, trabajamos un modelo considerando entre otras cosas, que la población humana fenomenológicamente es una función de  $\dot{e}$ , y del tiempo transcurrido desde el asentamiento (véase Ec.(2.50)). Esto es cierto dentro de un enfoque global. Además a nivel mecanístico la población humana es una función que depende de todos los distintos tipos de recursos accesibles al uso o trabajo humano, que la especie se agencia como: alimentos de distinto tipo, agua, materiales de construcción, medios de transporte, máquinas y sistemas transformadores de energía, máquinas y servicios de todo tipo, computadoras, etc. Consideremos que a todos los recursos y servicios per cápita finales (que no se utilicen para la generación de energía), **directamente** utilizados por los humanos, los podemos expresar por un vector,  $\vec{r}_{ec} = (r_{ec1}, r_{ec2}, r_{ec3}, \dots, r_{ecn})$ , que en un espacio n-dimensional representa a recursos per cápita como maíz  $r_{ec1}$ , electricidad  $r_{ec2}$ , transporter  $r_{ec4}$ , etc., así hasta completar la descripción de los recursos utilizados directamente. Como la población humana puede ser considerada como una estructura disipativa de los recursos que utiliza directamente, se puede asegurar la existencia de la siguiente relación funcional:

$$P_{ob} = P_{ob}(\dot{\vec{r}}_{ec}, t) \quad (2.52)$$

Donde  $\dot{\vec{r}}_{ec}$  es el vector rapidez de producción per cápita de recursos.

Evidentemente, la variable población,  $P_{ob}$ , ya sea que se exprese fenomenológicamente en función de la energía libre disponible por año por habitante (Ec. (2.50)) o se exprese como función del vector n-dimensional de rapidez de producción per cápita de recursos utilizados por la humanidad (Ec. (2.52)), deben en principio tener el mismo valor para todo tiempo,

$$P_{ob}(\dot{\vec{r}}_{ec}, t) = P_{ob}(\dot{e}, t) \quad (2.53)$$

A partir de la ecuación 2.53, se puede obtener la siguiente expresión:

$$\frac{dP_{ob}}{dt} = \frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{\vec{r}}_{ec}} \cdot \ddot{\vec{r}}_{ec} + \frac{\partial P_{ob}}{\partial t} \quad (2.54)$$

la ecuación anterior, también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dP_{ob}}{dt} = \sum_j \left( \frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{r}_{ecj}} \ddot{r}_{ecj} \right) + \frac{\partial P_{ob}}{\partial t} \quad (2.55)$$

La ecuación 2.55, indica que la variación de la población está dada en función de las variaciones que se tienen en cada uno de los recursos producidos. Esto indica que ciertos recursos que son un factor muy importante en las variaciones de la población; por ejemplo: si se desploma la producción de maíz, no se induciría la misma repuesta que si se desploma la producción de dulces.

Lo anterior indica que el estudio para la planeación energética estratégica, no debe ser un análisis exhaustivo sobre las producciones de una infinidad de recursos; basta con que se tomen en cuenta sólo a los recursos que representen a los mayores gastos energéticos y aquellos cuyas variaciones necesariamente provoquen cambios en la población (algunos alimentos, algunos parámetros de desarrollo como la producción de libros, antibióticos, etc.).

Por otra parte, de las ecuaciones 2.52 y 2.55, se puede observar que:

$$\frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{e}} \ddot{e} = \sum_j \left( \frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{r}_{ecj}} \ddot{r}_{ecj} \right) \quad (2.56)$$

Una población responde de diferente forma ante la escasez ó exceso de ciertos recursos, dependiendo de la distribución de edades de la misma. La ecuación 2.56 muestra que el término correspondiente a la ecuación 2.51, tiene una total dependencia de los cambios cualitativos que se registren en  $\dot{e}$ .

Similarmente, para toda función  $g$  que dependa de  $\vec{r}$ , tendremos que su cambio en función del tiempo vendrá dado por

$$\frac{dg}{dt} = \sum_{j=1} \frac{\partial g}{\partial \dot{r}_{ecj}} \ddot{r}_{ecj} + \frac{\partial g}{\partial t} \quad (2.57)$$

La cual en notación vectorial aparece así,

$$\frac{dg}{dt} = \frac{\partial g}{\partial \vec{r}_{ec}} \cdot \ddot{\vec{r}}_{ec} + \frac{\partial g}{\partial t} \quad (2.58)$$

Por otra parte, cabe señalar que si se considera a la producción de cada recurso como una estructura disipativa de energía, considerando a  $\dot{e}_i$  como la potencia específica per cápita utilizada en la fabricación del recurso  $i$ , entonces se puede asegurar la existencia de una relación similar a la Ec. 2.50, que queda de la siguiente manera:

$$\dot{r}_{eci} = \dot{r}_{eci}(\dot{e}_i, t) \quad (2.58)$$

$$\frac{d\dot{r}_{eci}}{dt} = \frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial \dot{e}_i} \frac{d\dot{e}_i}{dt} + \frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial t} \quad (2.59)$$

La ecuación 2.59 indica la aceleración de la producción de recursos. El término  $\frac{d\dot{e}_i}{dt}$  representa cambio respecto al tiempo de la potencia per cápita utilizada para la creación de

los recursos. El término  $\frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial \dot{\varepsilon}_i}$  indica la forma en que varía la producción del recurso, respecto a los cambios en la potencia  $\dot{\varepsilon}_i$ . Finalmente, el término  $\frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial t}$  indica las mejoras que se realizan en los medios de producción ó el degrado natural de éstos (si es que no reciben el mantenimiento adecuado).

La ecuación anterior indica que si se desea aumentar la producción de un determinado recurso, se tienen dos opciones que se pueden implementar simultáneamente:

1.- Aumentar la potencia per cápita que se consume en la región de estudio ( $\frac{d\dot{\varepsilon}_i}{dt} > 0$ ).

Simultáneamente aumentar la razón con la que aumenta la producción, respecto a las variaciones en los gastos de energía ( $\frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial \dot{\varepsilon}_i} > 0$ ) (como compra de equipos adicionales para la producción).

2.- Aumentar la eficiencia de los actuales medios de producción ( $\frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial t} > 0$ ).

Si en estado estacionario se requiere aumentar la producción a pesar de que la potencia necesaria para la producción se encuentre constante, de la ecuación 2.59 queda claro que el único camino posible es aumentar la eficiencia de los medios productivos (lo cual va de acuerdo con el sentido común).

Por otra parte, es claro que en la producción de distintos recursos o servicios se emplean cantidades diferentes de energía libre. Es pues pertinente averiguar la energía total,  $E_j$ , utilizada para producir una cantidad de  $R_{ecj}$  (donde  $R_{ecj} = r_{ecj} P_{ob}(r_{ecj}, t)$ ). Así, es fácil calcular que  $E_j$  se puede expresar a través de la siguiente ecuación,

$$E_j = R_{ecj} E_{pj} = \dot{\varepsilon}_j P_{ob}(\dot{r}_{ecj}, t) \quad (2.60)$$

donde  $E_{pj}$  es la cantidad de energía neta requerida para producir una unidad de satisfactor, ya sea material o un servicio. Y donde con el aumento de eficiencia de cada proceso  $E_{pj}$  disminuye a través del tiempo. Cuando los cambios tecnológicos son producto de la acumulación de pequeños avances el cambio de  $E_{pj}$  respecto al tiempo es paulatino y negativo  $\frac{dE_{pj}}{dt} < 0$  (para una producción constante). Cuando la tecnología específica llega al límite de perfección,  $\frac{dE_{pj}}{dt} \approx 0$ , para ese  $j$  en particular, (por ejemplo en el caso de los motores eléctricos). Cuando se presenta un cambio abrupto, una revolución tecnológica local, que permite resolver un problema serio de manera fundamentalmente diferente, tenemos que el cambio en  $E_{pj}$  será negativo, pero discontinuo en el tiempo y se inicia un ciclo de mejoramiento paulatino de la nueva tecnología. En realidad tenemos un desarrollo desigual y combinado entre los avances en distintas ramas de la producción de recursos utilizables y de servicios. De vez en cuando una revolución tecnológica impacta sobre muchas áreas: como es el caso de las computadoras, y los robots industriales que utilizan diversos transductores para su trabajo; y los cuales (ambos) contribuyen en principio a bajar  $E_{pj}$  en muchas actividades humanas.

En cualquier caso para toda sociedad, la suma del total de la potencia libre per cápita utilizada por unidad de tiempo en la producción,  $\dot{E}_j$ , no puede sobrepasar el total disponible ( $\dot{E}_T$ ) por esa sociedad. Tenemos,

$$\dot{E}_T \geq \sum_j \dot{E}_j. \quad (2.61)$$

Por tanto si queremos desarrollar nuevos procesos productivos, sólo tenemos tres caminos: 1° aumentar la cantidad total de energía que utiliza la humanidad, si esto es posible. 2° Disminuir el consumo total de energía en la cantidad requerida para desarrollar los nuevos procesos. 3° Una combinación de ambos procesos. Lo mismo se aplica por supuesto, al desarrollo de nuevas fuentes energéticas ya sean de combustible fósil o no convencionales. Esto concuerda con lo expuesto a partir de la ecuación 2.59.

Podemos también, en principio, calcular la rapidez de generación de entropía, relacionada con el uso de la energía por una población. La disipación de energía puede ocurrir tanto durante la producción del recurso  $\dot{R}_{ecj}$ , como durante el consumo  $\dot{R}_{ecj}^-$ . Posterior a la producción, una parte de la energía permanece almacenada en el producto fabricado ( $E_{ja}$ ), otra parte de la energía se encuentra almacenada antes del proceso productivo en las materias primas ( $E_{ji}$ ); la relación entre éstas energías y la energía disipada ( $E_{jd}$ ) durante la producción del recurso  $j$  es la siguiente

$$E_{jp} = E_{ja} + E_{jd} - E_{ji} \quad (2.62)$$

Dado que  $R_j$  fué definido como un recurso de uso no energético, y como en estado estacionario no se tienen acumulaciones de energía; dado que:

$$\dot{S}_{entropy} \equiv \frac{1}{T} \frac{dQ}{dt}, \quad (2.63)$$

se puede considerar que la producción de entropía en estado estacionario, está dada por:

$$\dot{S}_{entropy} = \frac{1}{T_{amb}} \left( \sum_j \dot{E}_j \right) = \frac{1}{T_{amb}} \left( \sum_j \dot{R}_{ecj} E_{pj} \right) \quad (2.64)$$

Como se obedece el principio de mínima generación de entropía [46], entonces tendremos que con lo anteriormente mencionado, la ecuación 2.64 se transforma en:

$$\frac{d}{dt} \left( \dot{S}_{entropy} \right) = 0 = \frac{d}{dt} \frac{1}{T_{amb}} \sum_j \dot{E}_j = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{T_{amb}} \sum_j \dot{R}_{ecj} E_{pj} \right) = \frac{d}{dt} \frac{1}{T_{amb}} \sum_j \dot{E}_j \quad (2.65)$$

Cabe señalar que la ecuación 2.65 queda expresada de forma similar a la ecuación 2.34, cumpliendo con la forma general de la ecuación de generación de entropía, según la termodinámica de procesos irreversibles. Si consideramos que la temperatura ambiente es relativamente constante, queda claro que en estado estacionario,  $\sum_j \dot{E}_j$  es constante. Si

además desarrollamos la ecuación 2.65, tenemos:

$$\sum_j (\dot{R}_{ecj} \dot{E}_{pj} + \ddot{R}_{ecj} E_{pj}) = 0 \quad (2.66)$$

La ecuación anterior indica que en estado estacionario se pueden tener oscilaciones en las rapidezces de producción de los diferentes recursos, teniéndose a  $\sum_j \ddot{E}_j = 0$  como restricción. Esto indica que se pueden tener aumentos en las rapidezces de producción debido a cambios tecnológicos, a pesar de que la potencia dedicada a la producción de un determinado recurso haya disminuido ó permanecido constante ó hayan aparecido una serie de recursos nuevos.

Resta pues establecer las relaciones que abordan el aspecto ocupacional de la población en conexión con la producción de recursos y servicios; y el aspecto del consumo de los mismos.

Los  $\vec{r}_{ec} = (r_{ec1}, r_{ec2}, \dots, r_{ecn})$  satisfactores o recursos son producidos por una población humana (con un ritmo  $\dot{r}_{ecj}$  para toda j); los cuales son consumidos o utilizados con una rapidez  $\dot{r}_{ecj}$  (para toda j).

La producción de un cierto recurso o servicio en general se lleva a cabo a través de herramientas materiales o conceptuales. Si expresamos productividad media de las personas a través de ellas (para el recurso  $r_{ecj}$ ) como  $\dot{p}_{her}(r_{ecj})$ , entonces podemos expresar  $\dot{r}_{ecj}$  de la siguiente manera,

$$\dot{r}_{ecj} = N(\dot{r}_{ecj}) \dot{p}_{her}(r_{ecj}) \quad (2.67)$$

donde  $N(\dot{r}_{ecj})$  es la fracción de la población total que lleva a cabo dicha labor productiva.

Esto ocurre para toda  $r_{ecj}$ , con variaciones tanto en  $N(r_{ecj})$  y en  $\dot{p}_{her}(r_{ecj})$  dependiendo del recurso  $r_{ecj}$  al que nos refiramos.

Análogamente, podemos abordar el asunto del consumo de bienes y servicios

$$\dot{r}_{ecj} = N(\dot{r}_{ecj}) \dot{r}_{con}(r_{ecj}) \quad (2.68)$$

donde  $N(\dot{r}_{ecj})$  es la fracción de la población total que consume el recurso o utiliza el servicio  $r_{ecj}$ ; y  $\dot{r}_{con}(r_{ecj})$  es la rapidez de consumo promedio del recurso  $r_{ecj}$ , por individuo. Esto ocurre para todo recurso trabajado  $r_j$  por la especie humana, dependiendo los valores de  $N(\dot{r}_{ecj})$  y  $\dot{r}_{con}(r_{ecj})$ . Para ciertos recursos como el agua y cereales el límite en  $N(\dot{r}_{ecj})$  es el 100% de la población humana.

Si obtenemos la variación respecto del tiempo de las ecuaciones 2.67 y 2.68, queda respectivamente:

$$\frac{d(\dot{r}_{ecj})}{dt} = N(\dot{r}_{ecj}) \frac{d \dot{p}_{her}(r_{ecj})}{dt} + \dot{p}_{her}(r_{ecj}) \frac{d N(\dot{r}_{ecj})}{dt} \quad (2.69)$$

y

$$\frac{d(\dot{r}_{ecj})}{dt} = N(\dot{r}_{ecj}) \frac{d \dot{r}_{con}(r_{ecj})}{dt} + \dot{r}_{con}(r_{ecj}) \frac{d N(\dot{r}_{ecj})}{dt} \quad (2.70)$$

Éstas ecuaciones pueden servir para evaluar algunos fenómenos de ciertas épocas de la humanidad. Por ejemplo, en la edad media cuando los cambios eran muy lentos, los incrementos en la productividad de las herramientas eran de escasa cuantía y ocurrían de vez en cuando, también los cambios en la distribución de trabajadores por actividad, por lo cual esas sociedades eran muy estables pues los desajustes eran pequeños en el tiempo y la gente tenía tiempo para adaptarse a ellos. En cambio, al inicio de la revolución industrial en

Inglaterra, en que los cambios en  $\dot{p}_{her}$  eran muy grandes, hubo avances en  $N(\dot{r}_{ecj}^+)$ , y esto dio lugar a grandes problemas sociales, los cuales fueron superados “rápidamente” porque se abrieron a la producción nuevas componentes del vector  $\vec{r}_{ec}$  que absorbieron a los miembros desplazados de componentes que les habían desalojado del trabajo; esto sucedió con velocidades de flujo más o menos empatadas. En México después de vivir en este siglo situaciones de cambio lento, nos encontramos en una situación global de cambios rápidos provocados por el impacto de la revolución tecnológica de las computadoras y robots industriales, así como de la necesidad de desarrollar nuevas fuentes energéticas.

Por otra parte, las Ec. 2.67 y 2.68 pueden expresarse respectivamente, de la siguiente forma:

$$N(\dot{r}_{ecj}) = \frac{\dot{r}_{ecj}}{\dot{p}_{heer}(r_{ecj})} \quad (2.71)$$

$$N(\dot{r}_{ecj}^-) = \frac{\dot{r}_{ecj}}{\dot{r}_{con}(r_{ecj})} \quad (2.72)$$

Si derivamos a la ecuación 2.71 respecto del tiempo, tenemos:

$$\frac{dN(\dot{r}_{ecj})}{dt} = \frac{\dot{p}_{heer}(r_{ecj}) \times \ddot{r}_{ecj} - \dot{r}_{ecj} \times \ddot{p}_{heer}(r_{ecj})}{(\dot{p}_{heer}(r_{ecj}))^2} \quad (2.73)$$

La ecuación anterior indica la variación respecto al tiempo de la población que se encuentra empleada para la producción del recurso  $r_{ecj}$ . Se puede observar que si aumenta productividad de las herramientas de fabricación ( $\ddot{p}_{heer}(r_{ecj}) > 0$ ), se induce una tendencia a que la población empleada en la fabricación de dicho recurso, disminuya. Por otra parte si aumenta la producción del recurso ( $\ddot{r}_{ecj} > 0$ ), se crea una tendencia a contratar personal para la fabricación.

Si se desea que en general no haya efectos de desempleo, se debe cumplir que:

$$\sum_j \frac{dN(\dot{r}_{ej})}{dt} \geq 0 \quad (2.74)$$

Con las ecuaciones 2.50, 2.51, 2.52, 2.55, 2.57, 2.58, 2.59, 2.60, 2.61, 2.65, 2.66, 2.67, 2.68, 2.69, 2.70, 2.73 y 2.74 se puede realizar una planeación simultánea de: producción de recursos, consumo de energía, eficientización de procesos, demografía, aumento de producciones y empleo de personal. Lo anterior tiene la ventaja de poderse aplicar en varias escalas, ya sea a escala nacional, estatal, industrial, agropecuaria, etc. Dada la gran relación que se tiene entre la capacitación y educación de personal con la contratación del mismo, el modelo propuesto provee indirectamente los lineamientos generales que permiten establecer estrategias educativas y de capacitación para una población nacional, estatal, etc.

La planeación simultánea aquí indicada, permite transformar paulatinamente la distribución de actividades de una población determinada, en función de los recursos que deseen producir y de la generación de energía que se vaya a tener en tiempos posteriores. Dado que el modelo propuesto se encuentra íntimamente ligado con la energía, se puede elegir una transformación de en las actividades de la población sobre una trayectoria de mínimo gasto energético para la producción de los recursos.

Cabe señalar que los lineamientos de planeación que ofrece éste modelo, son los mínimos necesarios que se deben cumplir en cualesquiera condiciones para alcanzar un estado sustentable. Esto indica que por otra parte se deben contemplar los retos económicos, políticos y sociales a vencer que se pueden encontrar durante el desarrollo sustentable de un país, industria, estado, etc.

Es necesario reiterar el hecho de que aunque una población está obligada a alcanzar un estado estacionario (si es que se busca un futuro sustentable), ello no significa que no se puedan tener variaciones tanto en la población como en la producción de recursos; siendo estas variaciones determinadas principalmente por los avances tecnológicos ó en su caso por diversos eventos (desastres naturales, guerras, políticas demográficas, etc.).

El modelo tiene la ventaja de poderse aplicar en diferentes escalas; si se desea aplicar a escala estatal ó nacional, requiere de la participación de gran cantidad de técnicos y profesionistas de diferentes áreas, que se encarguen de evaluar diferentes parámetros, así como de identificar formas en las que se puede mejorar la producción de diferentes recursos; requeriría de gran coordinación entre sus integrantes, de forma que se garantice un desarrollo que vaya encaminado hacia un estado sustentable.

En general se puede decir que para realizar una planeación energética estratégica, es requisito necesario que se coordinen: la planeación demográfica, la producción de recursos, las investigaciones tecnológicas y científicas, la producción de energía, la producción de alimentos, etc. Con esto se garantiza la sustentabilidad energética a largo plazo y un adecuado desarrollo regional en múltiples rubros.

#### **Análisis de las ecuaciones para un estado estacionario “extremo”.-**

Como se vio con anterioridad, en estado estacionario se pueden presentar oscilaciones en la población y en las producciones de recursos, siempre y cuando la energía disipada sea constante. Si por otra parte, se analiza un estado estacionario “extremo”, en cual la población prácticamente no varía (y por lo tanto la distribución de edades tampoco lo hace), donde la tecnología a llegado a un límite (en cuanto a aumento de eficiencia energética se refiere), y por lo tanto la producción de recursos no tiene variaciones apreciables, se puede llegar a conocer la situación que tendencialmente la humanidad alcanzará. Por ello a continuación se hace un análisis de éste estado estacionario “extremo”.

De la ecuación 2.50, se puede demostrar matemáticamente que se cumple la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{e}}\right)_t \left(\frac{\partial \dot{e}}{\partial t}\right)_{P_{ob}} \left(\frac{\partial t}{\partial P_{ob}}\right)_{\dot{e}} = -1 \quad (2.75)$$

con lo cual es claro que:

$$\left(\frac{\partial P_{ob}}{\partial t}\right)_{\dot{e}} = -\left(\frac{\partial P_{ob}}{\partial \dot{e}}\right)_t \left(\frac{\partial \dot{e}}{\partial t}\right)_{P_{ob}} \quad (2.76)$$

Sustituyendo la ecuación 2.76 en la ecuación 2.51, se obtiene:

$$\frac{dPob}{dt} = \left( \frac{\partial Pob}{\partial \dot{e}} \right)_t \left( \ddot{e} - \left( \frac{\partial \dot{e}}{\partial t} \right)_{Pob} \right) \quad (2.77)$$

La ecuación 2.77 es válida para cualquier situación, y es equivalente a la ecuación 2.76.

En el estado estacionario "extremo", tenemos que la población no cambia, de forma que:

$$\left( \frac{dPob}{dt} \right)_{EEE} = \left( \frac{\partial Pob}{\partial \dot{e}} \right)_t \left( \ddot{e} - \left( \frac{\partial \dot{e}}{\partial t} \right)_{Pob} \right) \Big|_{EEE} = 0 \quad (2.78)$$

Donde EEE significa Estado Estacionario "Extremo".

Si en la ecuación 2.78 se toma en cuenta que  $\left( \frac{\partial Pob}{\partial \dot{e}} \right)_t \neq 0$ , entonces:

$$(\ddot{e})_{EEE} = \left( \frac{\partial \dot{e}}{\partial t} \right)_{Pob} \quad (2.79)$$

Por otro lado, en EEE, por más que se desarrolle la ciencia, tecnología y nuevas fuentes de energía, tarde o temprano se alcanzará el límite máximo termodinámico de la potencia total  $\dot{E}_{TD}$  que una población puede disipar.

Por lo anterior queda claro que:

$$\dot{E}_{TD} = (Pob)_{EEE} * e_{EE} \quad (2.80)$$

La ecuación 2.80 indica que cuando dado que la población en EEE es constante, entonces  $\dot{e}_{EEE}$  igualmente es un valor constante, por lo cual se puede afirmar que:

$$\ddot{e}_{EE} = \left( \frac{\partial \dot{e}}{\partial t} \right)_{Pob} = 0 \quad (2.81)$$

Por otra parte, queda claro que análogamente a lo realizado a la ecuación 2.51, se obtiene la siguiente ecuación a partir de la ecuación 2.59:

$$\frac{d\dot{r}_{eci}}{dt} = \left( \frac{\partial \dot{r}_{eci}}{\partial \dot{e}_i} \right)_t \left( \ddot{e}_i - \left( \frac{\partial \dot{e}_i}{\partial t} \right)_{reci} \right) \quad (2.82)$$

Dado que la población y la estructura la población permanece relativamente constante, se puede afirmar que las necesidades la población respecto de los recursos, prácticamente no

varía, esto indica que prácticamente  $\left(\frac{d\dot{r}_{eci}}{dt}\right)_{EEE} = 0$ . Dado que por otra parte en EEE, las

eficiencias productivas de los procesos son constantes, tenemos que  $\left(\frac{\partial\dot{r}_{eci}}{\partial\dot{E}_i}\right)_t = cte \neq 0$ .

Todo lo anterior indica que necesariamente se debe cumplir que en EEE,  $\left(\ddot{E}_i = \left(\frac{\partial\dot{E}_i}{\partial t}\right)_{recl}\right)$ .

Si por otro lado, se toma en cuenta que en EEE, la potencia disponible para la producción del total de recursos ( $\dot{E}_T$ ), se encuentra limitada y ésta es constante, queda claro que se puede expresar la siguiente relación:

$$\dot{r}_{eci} = \dot{r}_{eci}(\dot{r}_{ec1}, \dot{r}_{ec2}, \dots, \dot{r}_{ecj}, \dots, \dot{r}_{ecn}, t) \quad (2.83)$$

de donde queda claro que:

$$\frac{d\dot{r}_{eci}}{dt} = \sum_{j \neq i} \left( \frac{\partial\dot{r}_{eci}}{\partial\dot{r}_{ecj}} * \frac{d\dot{r}_{ecj}}{dt} \right) + \frac{\partial\dot{r}_{eci}}{\partial t} \quad (2.84)$$

La ecuación 2.84 indica que si la producción de un recurso varía, se inducen cambios indirectos en la producción de otros.

De todas las ecuaciones anteriores, se puede decir que los tipos de fluctuaciones, en general son:

1. Fluctuaciones directas de la población: Tales como enfermedades, desastres geológicos, climáticos, etc. Este tipo de fluctuaciones provocan variaciones en  $\bar{r}_{ec}$ .
2. Fluctuaciones indirectas en la población: Son causadas por disminuciones en la producción directamente utilizada de recursos per cápita, por planeaciones demográficas, etc.
3. Fluctuaciones directas en la producción de recursos: Se deben a cambios planeados en la producción de determinados recursos, cambios tecnológicos en los medios productivos ó de transporte, etc.
4. Fluctuaciones indirectas en la producción de recursos: Son debidas a fluctuaciones en la población, variaciones de la energía per cápita para la producción, desastres en fábricas, inundaciones, etc.

Todo lo anterior es un ciclo interactuante con fluctuaciones siempre presentes que produce variaciones en la población.

## APLICACIÓN DEL MODELO A UN CASO CONCRETO.-

Debido a que la aplicación del modelo para un caso contemporáneo, queda fuera del alcance de éste trabajo, se realizó el estudio de la sociedad de Teotihuacán antiguo. Se eligió a la población de Teotihuacán, debido a su relativa simplicidad y a que se pretendió explicar la disminución catastrófica que tuvo la población urbana, después de aproximadamente 750 años de existencia. En éste caso se muestra cómo la interacción entre variables puede ser un factor determinante para la sustentabilidad de una región.

Por simplicidad, el estudio energético de la sociedad Teotihuacana (véase Anexos I y II), se supuso que la ciudad se encuentra en el centro de la zona de cultivo, teniendo ambas una forma circular. Los radios más cercanos a la ciudad son los que se comienzan a cultivar primero, de forma que es en las regiones asociadas a éstos donde la erosión del suelo se encuentra más avanzada. En la parte exterior a la zona de cultivo comienza la zona de tala de leña, la cual se utiliza principalmente para cubrir las necesidades para calefacción y cocción de alimentos. Todo lo anterior indica que la población total se encuentra formada por leñadores, agricultores y habitantes urbanos.

En la sociedad estudiada no existían métodos de fertilización, de manera que la erosión que se lleva a cabo en las áreas cultivadas, se consideró fundamentalmente de origen químico (dado que la erosión física del suelo en esa región, es despreciable); esto implica que la productividad inicial de la tierra disminuye de forma exponencial con el tiempo. La erosión ocasiona que el área cultivada aumente debido a: 1) el crecimiento de la población, 2) Y como una forma de compensar la pérdida de productividad de la tierra debido a la erosión química.

Los costos de producción de leña y de alimento, se obtuvieron basándose en la energía requerida para su producción y/o transporte; la energía utilizada quedó expresada en jornadas de trabajo (para más detalle, ver Anexo I)

A continuación se muestra un estudio basado en el modelo propuesto para la planeación energética, que analiza los resultados obtenidos de la simulación numérica de Teotihuacán; esto se hizo con el objetivo de mostrar la forma en que el modelo puede ser utilizado para analizar sociedades más complejas e incluso predecir sus posibles comportamientos, de manera que se puedan tomar decisiones de carácter estratégico. En general el estudio se centró sólo en la población urbana, dado que el objetivo de la simulación fue el estudiar las causas de la disminución repentina de la misma.

### **Población y potencia consumida.-**

De la ecuación 2.51, se puede deducir que la potencia per cápita  $\dot{e}$ , que es directamente consumida por los habitantes, proviene prácticamente sólo del maíz y de la leña. Dado que en general el consumo de maíz y de leña se encuentran directamente relacionados, para éste caso la ecuación 2.51 queda de la siguiente forma:

$$\frac{dPob_{urb}}{dt} = \frac{\partial Pob_{urb}}{\partial (\dot{e}_{leña} + \dot{e}_{maiz})} (\ddot{e}_{leña} + \ddot{e}_{maiz}) + \frac{\partial Pob_{urb}}{\partial t} \quad (2.85)$$

donde  $\dot{e}_{leña}$  es la energía per cápita anual proveniente de la leña y  $\dot{e}_{maiz}$  es la energía per cápita anual proveniente del alimento (ambas en la ciudad).

La derivada total de la población se muestra en la gráfica 2.1, la cual se obtuvo a partir de los datos antropológicos que ayudaron a construir el perfil de población urbana a lo largo del tiempo (Ver Anexo II).

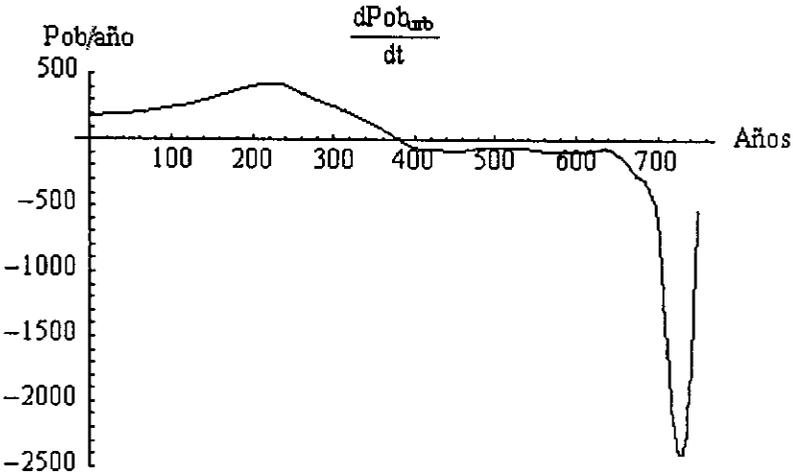


Fig. 2.1 Derivada de la población urbana

El término  $(\ddot{e}_{leña} + \ddot{e}_{maiz})$  (Fig. 2.2) de la ecuación 2.85, se obtuvo derivando la suma de la energía anual per cápita proveniente del maíz (energía alimenticia) y de la leña (energía calórica).

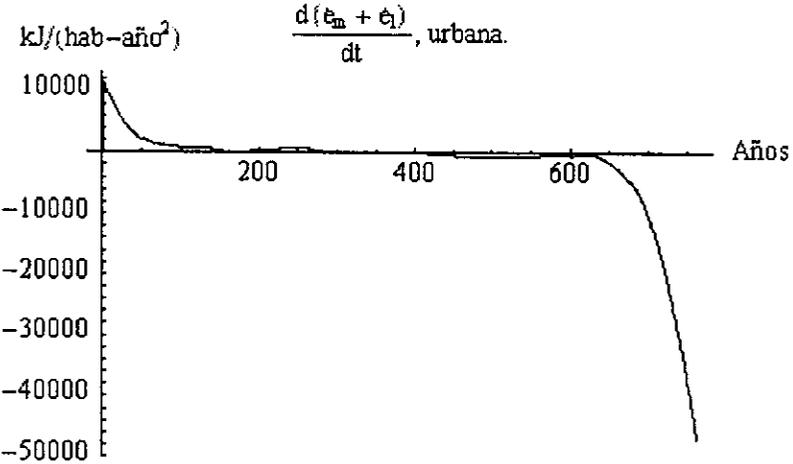


Fig. 2.2 Variación de la potencia percápita consumida en la ciudad.

El término  $\frac{\partial P_{ob_{urb}}}{\partial(\dot{e}_{leña} + \dot{e}_{maiz})}$  indica la variación de la población respecto a la potencia per cápita consumida. Se puede asumir que en una sociedad primitiva la potencia consumida sólo provee las condiciones mínimas necesarias para la supervivencia (alimento y calefacción). Esto indica que una variación en la potencia consumida, generará una variación proporcional en la población, así que de manera aproximada tenemos:

$$\frac{\partial P_{ob_{urb}}}{\partial(\dot{e}_{leña} + \dot{e}_{maiz})} = \frac{P_{ob_{urb}}}{\dot{e}_{MIN}} \quad (2.86)$$

El término anterior se calculó considerando a  $\dot{e}_{MIN}$  como la potencia per cápita alimenticia que proporcionan 328kg de maíz al año y la leña correspondiente para su cocción y demás usos. La población urbana se obtuvo a partir de los datos arqueológicos. El término de la ecuación 2.86, se muestra en la siguiente gráfica:

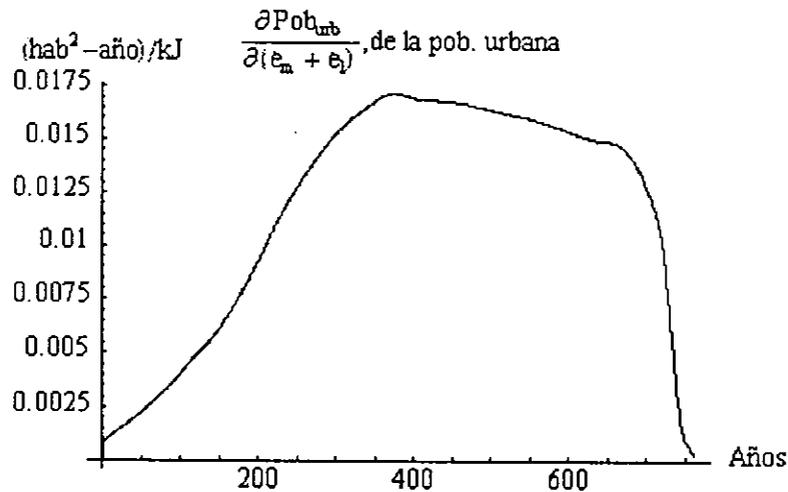


Fig. 2.3 Variación de la población urbana Respecto a la potencia.

La gráfica de  $\frac{\partial P_{urb}}{\partial(\dot{e}_{ieñ} + \dot{e}_{maiz})}(\ddot{e}_{ieñ} + \ddot{e}_{maiz})$ , correspondiente a la ecuación 2.85, se muestra a continuación:

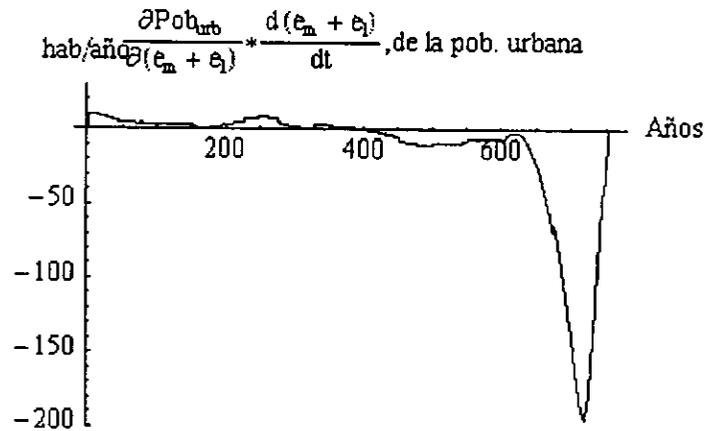


Fig. 2.4 Variación de la población urbana debido a cambios en la potencia consumida

Debido a que de la ecuación 2.85 se conocen todos los miembros de la misma, se puede despejar a  $\frac{\partial P_{urb}}{\partial t}$ , obteniéndose la siguiente gráfica:

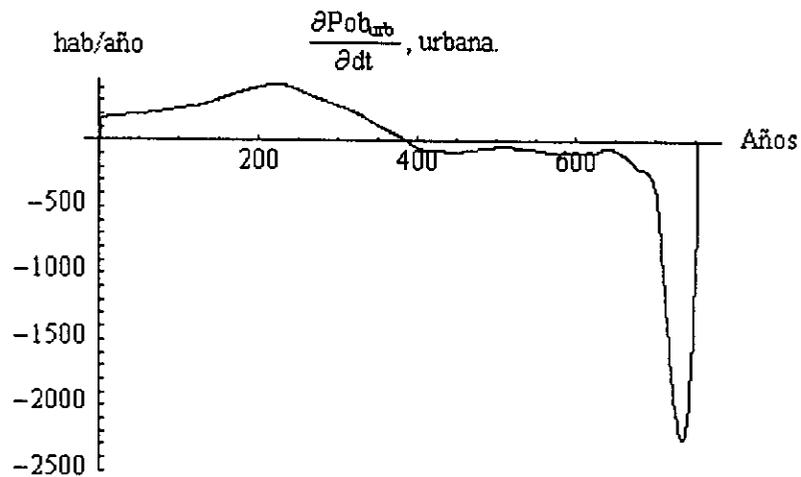


Fig. 2.5 Variación parcial de la población urbana respecto del tiempo

La gráfica 2.5 muestra la tendencia de la población a cambiar a pesar de que no existan cambios en la potencia libre per cápita.

Si se compara la gráfica 2.4 con la gráfica 2.5, queda claro que la disminución de la población (al a partir del año 700 aproximadamente), se debe principalmente a la escasez de alimento y en una menor medida a la rapidez con la que disminuye la disponibilidad de éste.

**Recursos y energía utilizados para la producción de recursos que se consumen en la ciudad.-**

Si se utiliza la ecuación 2.59 para el consumo de maíz (en la ciudad), tenemos que:

$$\frac{dmáiz_{percáp}}{dt} = \frac{\partial máiz}{\partial costo_{maiz}} \frac{d costo_{percapmaiz}}{dt} + \frac{\partial máiz_{percáp}}{\partial t} \quad (2.87)$$

La derivada de la producción per cápita de maíz de la población urbana, se obtuvo a través de los resultados de la simulación, se puede observar en la gráfica 2.5.

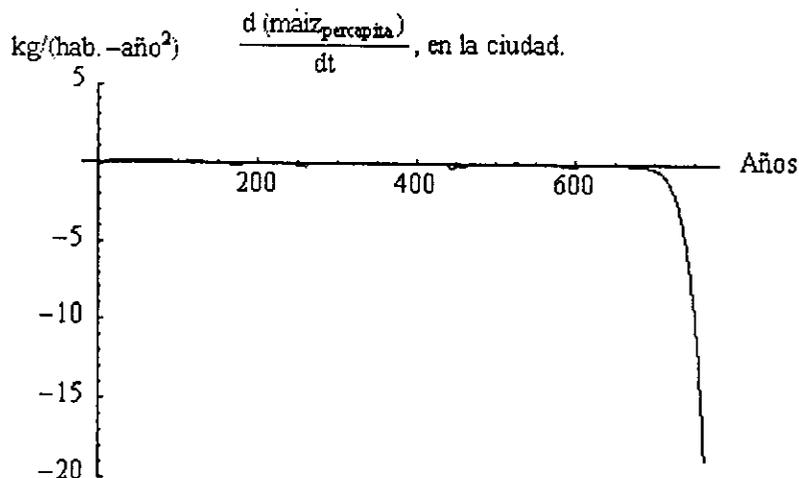


Fig. 2.6 Variación de la producción per cápita de maíz.

El término  $\frac{\partial \text{maiz}}{\partial \text{costo}_{\text{maiz}}}$  de la ecuación 2.87, simplificado previamente, resulta ser el inverso del costo energético por kilogramo de maíz, el cual se obtuvo mediante la simulación, ver gráfica 2.6.

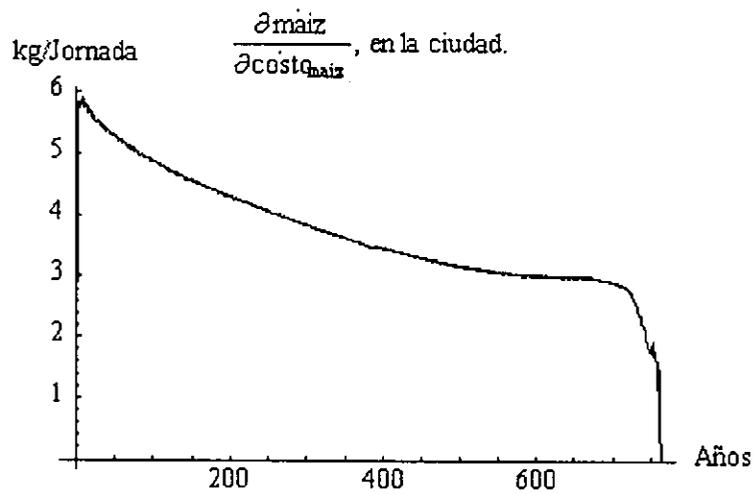


Fig. 2.7 Variación del consumo de maíz respecto al costo energético de producción.

El término  $\frac{d \text{costo}_{\text{percapmaiz}}}{dt}$  de la ecuación 2.87, se muestra en la gráfica 2.8.

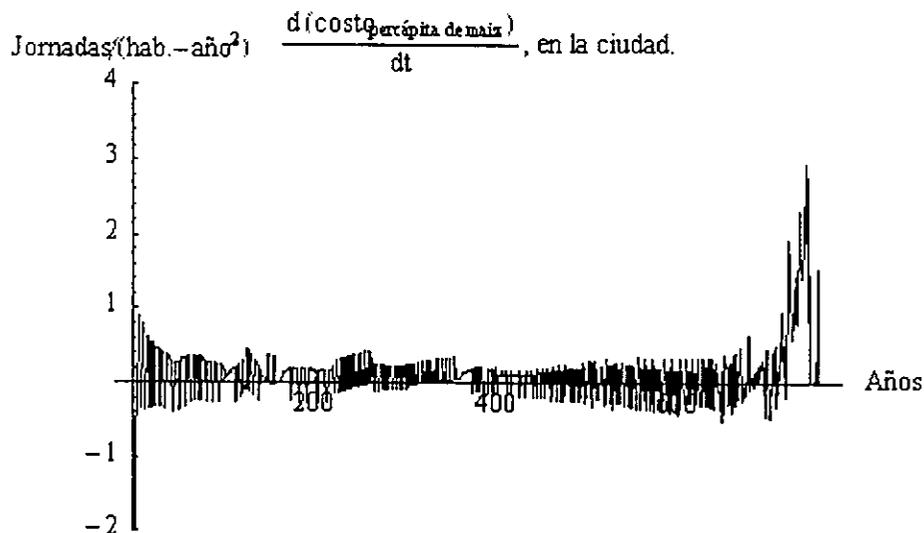


Fig. 2.8 Variación del costo percápita anual.

El término  $\frac{\partial m\grave{a}iz_{perc\acute{a}p}}{\partial t}$  de la ecuación 2.87, se muestra en la figura 2.9.

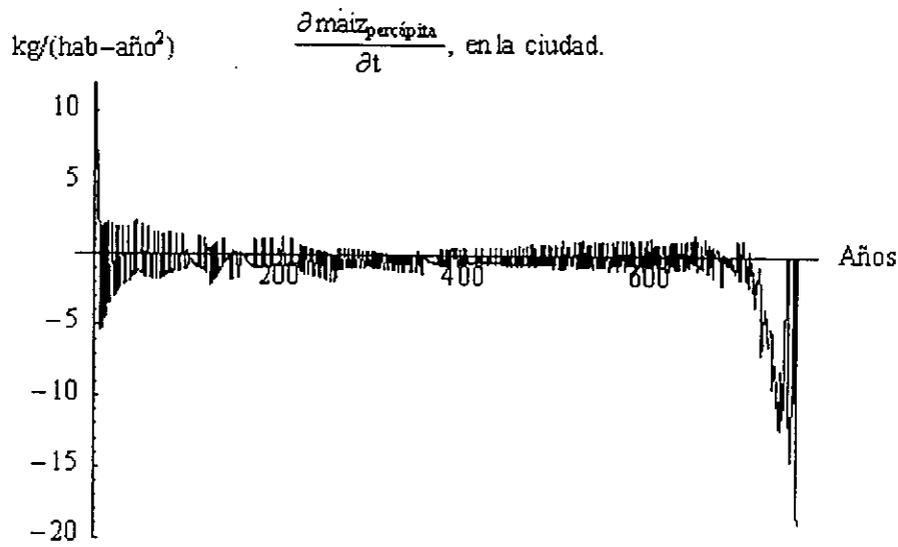


Fig. 2.9 Derivada parcial de la producción de maíz respecto del tiempo.

Si se compara  $\frac{dm\grave{a}iz_{perc\acute{a}p}}{dt}$  con  $\frac{\partial m\grave{a}iz_{perc\acute{a}p}}{\partial t}$ , queda claro que el consumo per cápita (después del año 700) disminuye principalmente por los altos costos energéticos y no tanto debido al ritmo de incremento de los mismos.

Si por otra parte, se aplica la ecuación 2.67 a la producción per cápita del maíz, se obtiene la siguiente ecuación:

$$m\grave{a}iz_{perc\acute{a}p} = \%Agric * Pr od(Agrig) \quad (2.88)$$

el término  $m\grave{a}iz_{perc\acute{a}p}$ , indica la producción anual per cápita de maíz, respecto al total de la población, éste se puede observar en la gráfica 2.9.

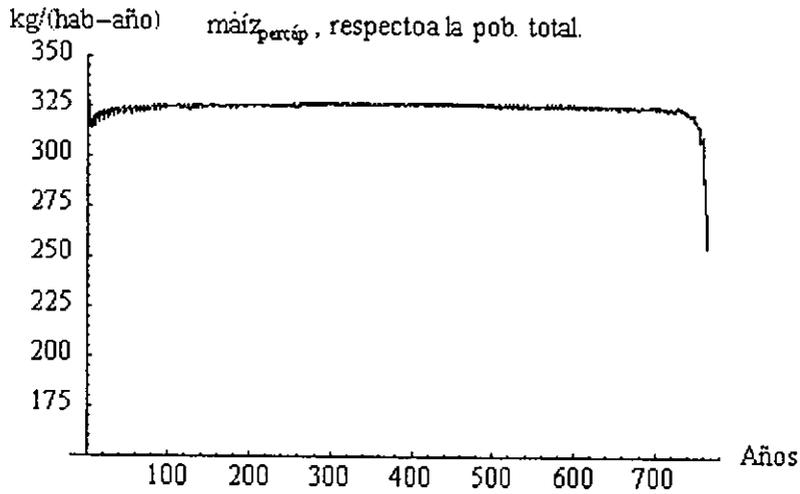


Fig. 2.10 Producción per cápita de maíz, respecto a la población total

Por otro lado, el término %Agric., representa al porcentaje de la población agrícola respecto a la población total y se obtuvo directamente de la simulación numérica.

El término Prod(Agric), representa la productividad media de los agricultores, y se muestra en la gráfica 2.11

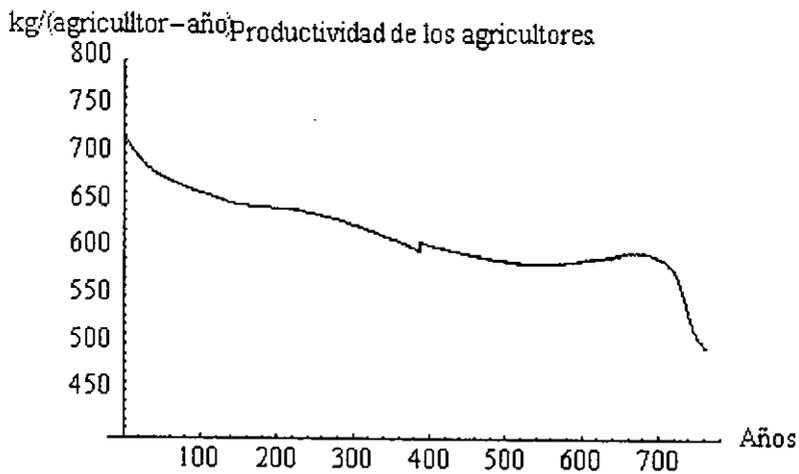


Fig. 2.11 Productividad media de los agricultores.

Finalmente, si se aplica la ecuación 2.59 a la producción de leña, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{d\text{leña}_{\text{percáp}}}{dt} = \frac{\partial \text{leña}}{\partial \text{costo}_{\text{leña}}} \frac{d \text{costo}_{\text{percápleña}}}{dt} + \frac{\partial \text{leña}_{\text{percáp}}}{\partial t} \quad (2.89)$$

La derivada de la producción percápita de leña, se muestra en la figura 2.12

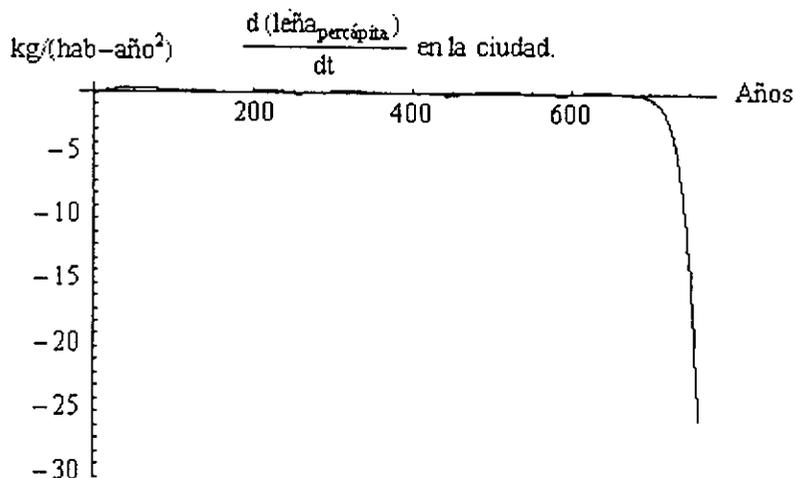


Fig. 2.12 Variación de la producción percápita de leña.

El término  $\frac{\partial \text{leña}}{\partial \text{costo}_{\text{leña}}}$  de la ecuación 2.89, después de ser simplificado, resulta ser el inverso del costo energético de la leña por kilogramo. Dicho término se muestra en la gráfica 2.13.

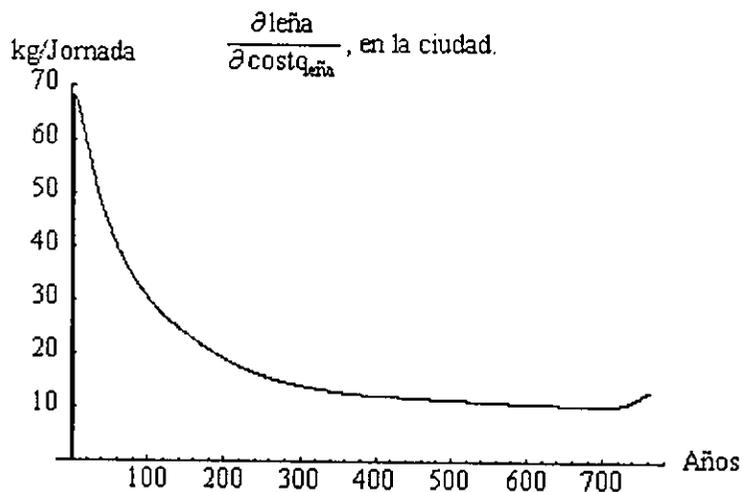


Fig. 2.13 Evolución del inverso del costo de la leña

El término  $\frac{d \text{costo}_{\text{percápita leña}}}{dt}$  de la ecuación 2.89, se muestra en la figura 2.14

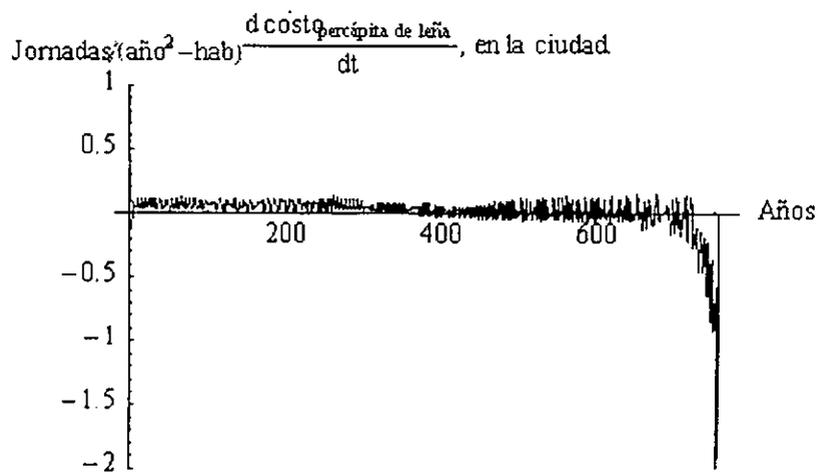


Fig. 2.14 Derivada del costo percápita de producción de leña

El término  $\frac{\partial \text{leña}_{\text{percápita}}}{\partial t}$ , de la ecuación 2.89, se muestra en la figura 2.15

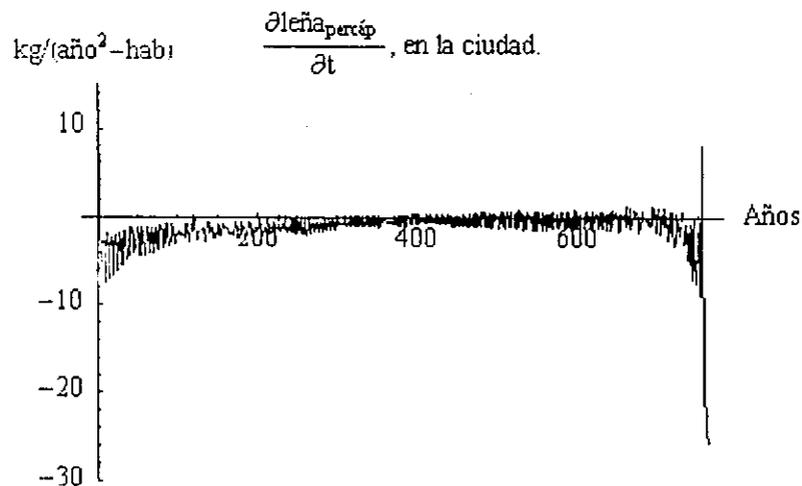


Fig 2.15 Derivada parcial de la producción de la leña percápita

Si se compara la gráfica 2.12 y la 2.15, queda claro que de forma similar a la producción de alimentos, la disminución de la producción percápita de leña es debido al alto nivel de los costos y no tanto al ritmo al que éstos aumentan.

## Analisis y conclusiones.-

Se puede concluir que la gran disminución de la población y de los recursos per cápita al final del periodo estudiado, fueron consecuencia de los altos costos energéticos de los recursos. Por otra parte se puede decir que en una menor medida, la disminución de la población y del consumo de los recursos, se debió a la rapidez con la que aumentaron los costos.

Los costos energéticos de los recursos aumentaron principalmente debido a la erosión de la tierra, la cual forzaba a los agricultores a dedicar una misma cantidad de energía para cultivar un área determinada, y sin embargo obtenían paulatinamente menos producto (ver Fig. 2.11). Esto tuvo la consecuencia de que el costo energético por kilogramo de maíz, aumentara al final del periodo debido a la erosión exponencial de la tierra de cultivo. En menor medida, el aumento de las distancias de transporte, promovieron que el costo de traslado de recursos aumentara simultáneamente a los aumentos provocados por la erosión. Entonces, se puede concluir que el aumento de los costos energéticos provocaron una disminución en la producción per cápita, lo que tuvo como repercusión una consecuente disminución en la población de la zona urbana y de las zonas rurales que interaccionaban con la ciudad.

Un estudio de este tipo, permite distinguir entre las causas y los efectos de las variaciones que tiene una población, de forma que si este modelo se aplica a un caso actual, se pueden encontrar qué variables son las más importantes y de ésta forma se podría llevar a cabo una predicción y control del desarrollo de una población.

En éste caso particular, una de las variables más importantes corresponde a los costos per cápita de producción de recursos, de forma que se puede asegurar que si éstos hubieran sido adecuadamente controlados (mediante el uso de fertilizantes y siembra de recursos forestales), se puede asegurar que se hubieran alcanzado las condiciones mínimas necesarias para el desarrollo sustentable de la población de Teotihuacán. Sin embargo, queda claro que dichas acciones quedaron fuera del alcance científico y técnico de dicha sociedad.

# *Capítulo 3*

*La situación actual  
(Combustibles y biomasa).*

## LA SITUACIÓN ACTUAL

Dado que para realizar un desarrollo adecuado de las fuentes renovables de energía, es necesario saber que cantidad de recursos se tienen en la actualidad, en éste capítulo se estudiará la situación actual de los energéticos en el Mundo, Estados Unidos de América y México; además se estudian ciertos aspectos agropecuarios y poblacionales que pueden llegar a tener una importancia relevante en relación con los energéticos.

### Población mundial y diversos rubros.-

El crecimiento de la población mundial presenta un ligero punto de inflexión en 1980, de forma que su velocidad de crecimiento disminuye a partir de dicho año, ver Fig. 3.1. Paralelo a este crecimiento, ha aumentado la proporción total de habitantes urbanos (cerca del 50%). Esta tendencia continúa de forma que habrá más habitantes urbanos que rurales en no más de 5 años (ver Fig. 3.2), teniendo como consecuencia que cada vez, una mayor parte de la población se encuentre mayormente susceptible a cambios o alteraciones negativas en lo siguiente: la eficiencia de la producción y/o distribución de alimentos, electricidad, servicios de transporte, recolección y tratamiento de desechos, aprovechamiento de energéticos diversos, etc.

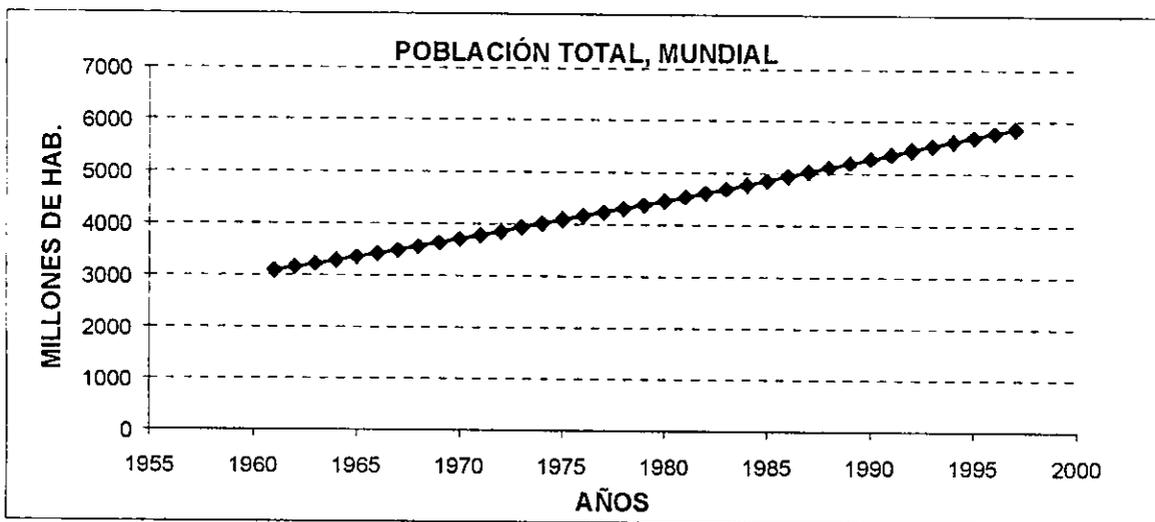


Fig. (3.1) Construida a partir de datos obtenidos de ref. [35].

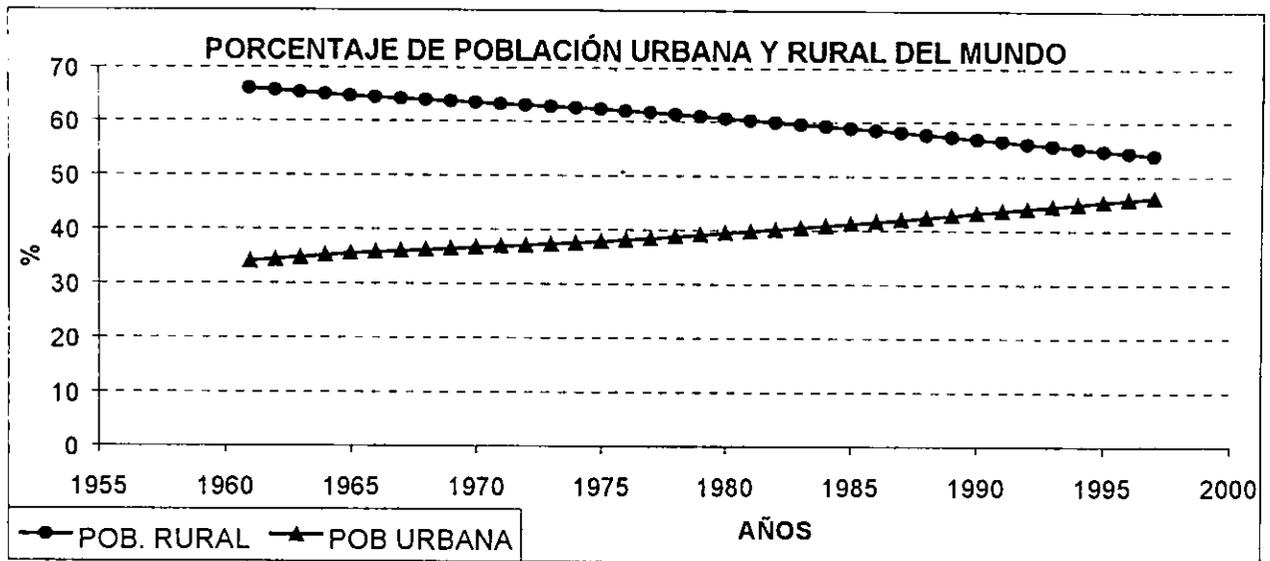


Fig. (3.2) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [35].

### Uso de tierras en el mundo.-

En la Fig. (3.3) se observa que el área mundial de uso agrícola aumentó con cierta linealidad hasta 1984, a partir de dicho año hay una desaceleración en su crecimiento y después de 1989 ha permanecido prácticamente constante; este hecho se debe a que físicamente se han aprovechado todas las tierras propicias para este fin. Como consecuencia se tiene que para satisfacer las demandas alimenticias de una población creciente, se ha recurrido a incrementar la productividad de los cultivos por medio de fertilizantes, plaguicidas, cambios genéticos, buen transporte y manejo de la cosecha, etc.; si estos factores no son suficientes para aumentar la productividad al mismo ritmo que la población, entonces habrá deficiencias cualitativas y cuantitativas en la alimentación humana.

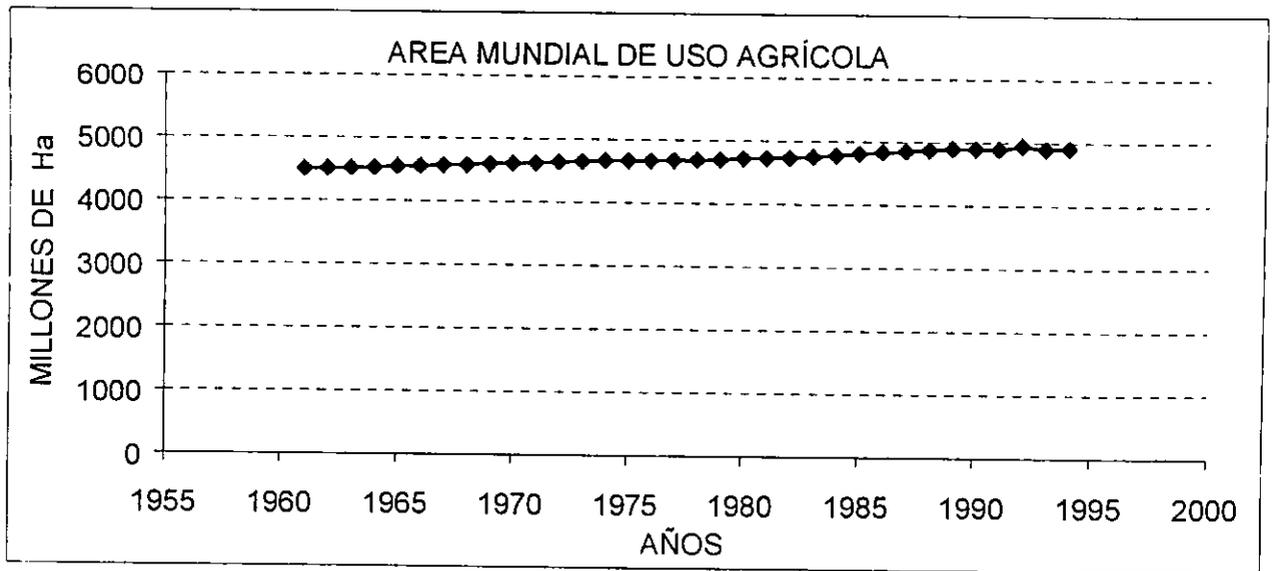


Fig. (3.3) Construida a partir de datos obtenidos de ref. [36].

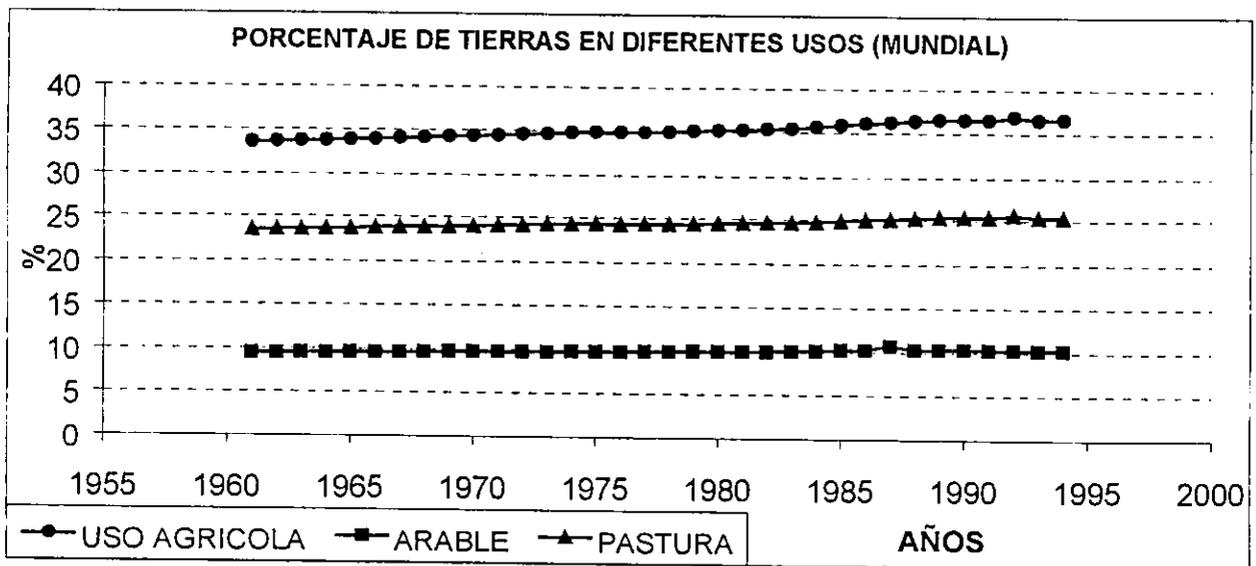


Fig. (3.4) Construida y calculada a partir de datos obtenidos de ref. [36].

Por otra parte, en un periodo de 35 años, tanto el área arable, la tierra para pastura y la tierra de uso agrícola han tenido cambios relativos muy pequeños, ver Fig. 3.4.

### Consumo de fertilizantes en el mundo.-

En la Fig. 3.5, se observa que el consumo mundial per cápita anual de fertilizantes, aumentó prácticamente a ritmo constante hasta 1979, a partir de esa fecha disminuyó su rapidez de crecimiento, alcanzándose un máximo en 1987. Aparentemente, la tendencia es a oscilar alrededor de un valor de 22Kg. per cápita. Lo anterior coincide con el comportamiento de las productividades en la mayoría de los rubros (leguminosas, frutas, tubérculos y raíces, cereales, etc. [38]) ya que disminuye su rapidez de crecimiento, al igual que el consumo de fertilizantes.

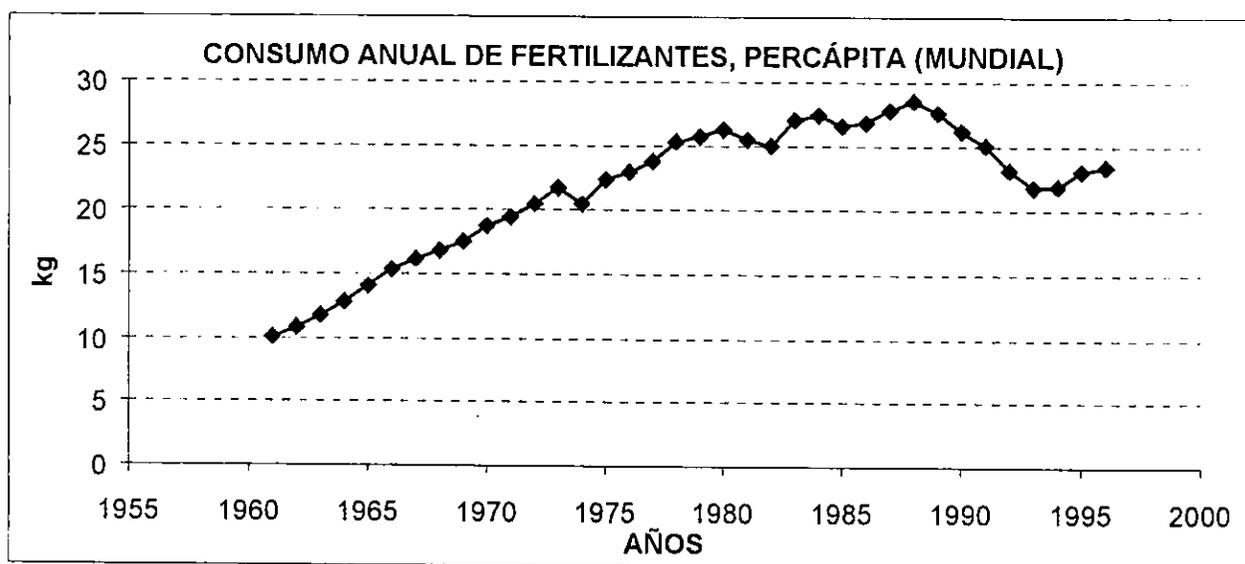


Fig. (3.5) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [38].

Los kilogramos de producción total obtenida por unidad de fertilizante total aplicado, Fig. 3.6, indican que se comenzó a aplicar una mayor cantidad de fertilizante respecto al producto obtenido, tendiéndose a estabilizar (con ciertas oscilaciones) en un valor aproximado de 22Kg/Kg; este valor muestra que la cantidad de fertilizante aplicado no es despreciable, en comparación con los productos agrícolas obtenidos. Además se deduce que ésta tecnología, para aumentar la productividad, ha llegado a un punto óptimo de aplicación de forma que tendencialmente el fertilizante sólo mantendrá el nivel productivo de las tierras (para restaurar la erosión natural).

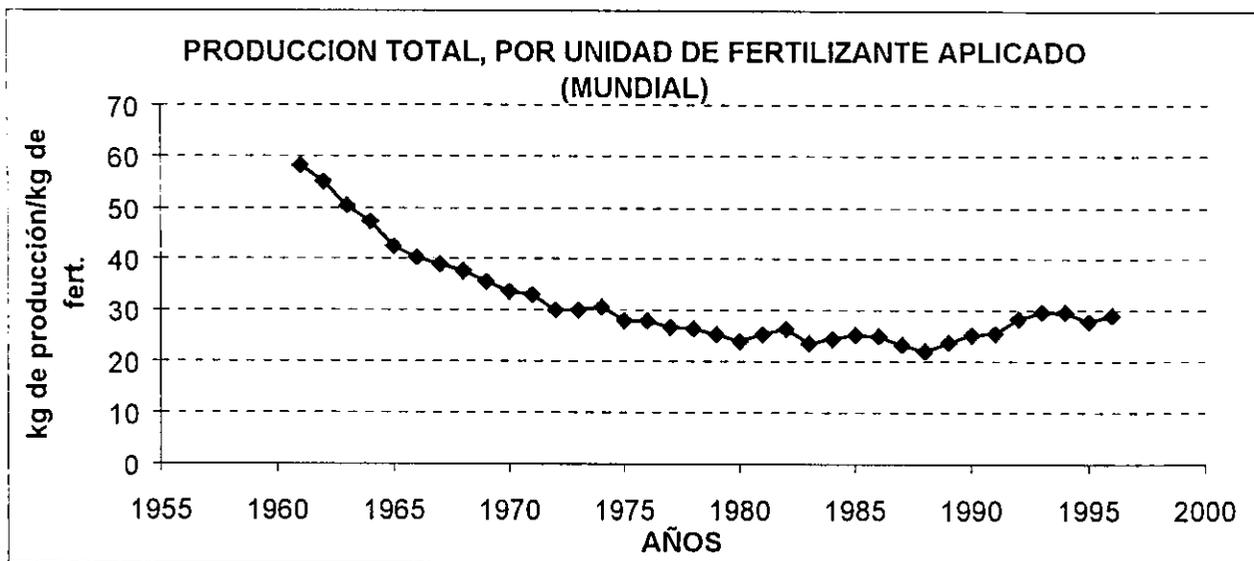


Fig. (3.6) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [38]

### Tractores en el mundo.-

El número de tractores en uso a escala mundial (Fig. 3.7), registró un aumento relativamente uniforme desde 1961 hasta 1985, posteriormente hubo una disminución abrupta en la rapidez de crecimiento, presentándose oscilaciones alrededor de un valor aproximado de 26 millones de unidades a partir de 1989.

En la Fig. 3.7, se presenta la densidad mundial de tractores por área arable, teniendo un crecimiento casi uniforme hasta 1985, a partir de dicho año se presentan oscilaciones alrededor de un valor aproximado de 19 Tractores/miles de Ha.

Los hechos anteriores se deben principalmente a que, dada la capacidad económica y técnica promedio del mundo, sólo se es capaz de sustituir con tractores nuevos a la fracción del total que se salen de uso por uno ú otro motivo.

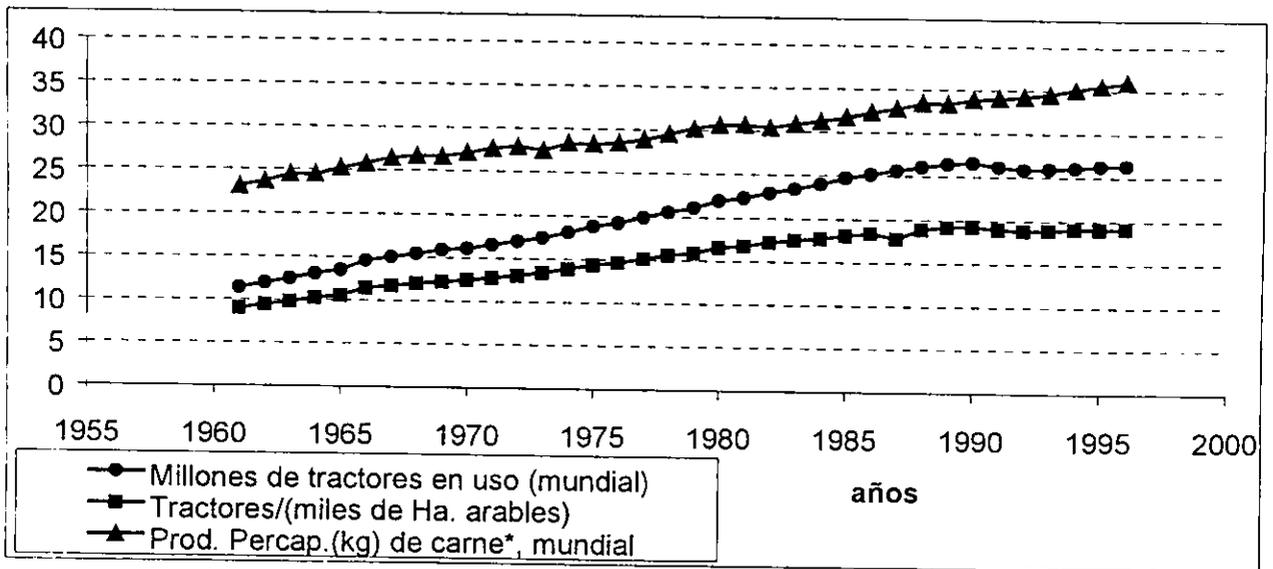


Fig. (3.27) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [38, 41, 42]

\* Incluye todo tipo de carne, de animales terrestres (aves, puercos, conejos, bovinos, etc.).

### Producción de carne a escala mundial.-

La producción per cápita de carne (Fig. 3.7), ha aumentado a pesar de que las cabezas de ganado vacuno se encuentran creciendo a un ritmo cada vez menor [39]. Esto es posible mediante el incremento de la producción de otro tipo de carnes, teniéndose como consecuencia que se sustituyan paulatinamente carnes altas en hierro y proteínas de alta calidad, por otras que son más eficientes termodinámicamente en la transformación de cereales en proteínas animales, mas no contienen la misma cantidad y calidad de nutrientes (Además que con ésta situación, la producción de carne comienza a competir con el consumo de cereales por parte de los humanos).

## PRODUCCIÓN DE ENERGÉTICOS A ESCALA MUNDIAL.-

### Producción total de energía en el mundo.-

La producción diaria de energía (Fig. 3.8), ha presentado un crecimiento relativamente uniforme con ciertas oscilaciones; esto se puede deber a que el consumo de energía crece de forma muy similar a la población, de forma que el consumo per cápita de energía se mantiene relativamente uniforme (Ver. Fig.3.9). Lo anterior es consecuencia de que la energía debe permitir realizar relativamente las mismas labores, independientemente de que la población mundial aumente, ya que de otra forma la calidad de vida de la población se vería mermada en múltiples sentidos.

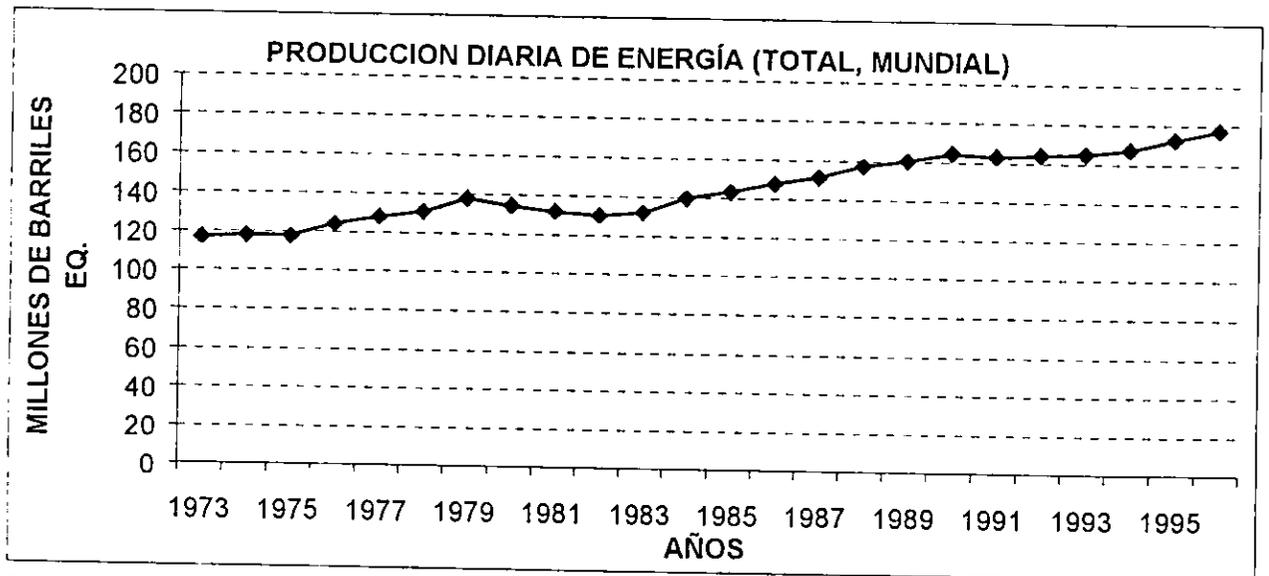


Fig. (3.8) Calculada y construida a partir de datos por obtenidos de ref. [6.].

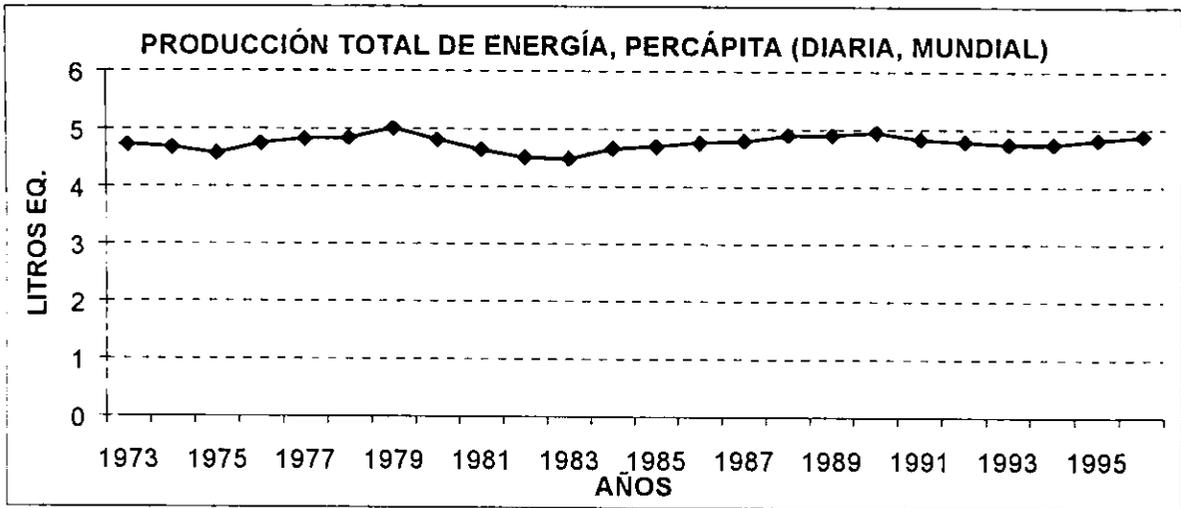


Fig. (3.9) Calculada y construida a partir de datos por obtenidos de ref. [6.] y [35].

La producción per cápita total de energía en el mundo (Fig. 3.9), ha presentado oscilaciones en todo el periodo estudiado, alrededor de un valor cercano a 4.7 lt. eq., teniéndose como valor máximo alcanzado un valor de 5.01 lt. eq. en 1979. Las oscilaciones en la producción per cápita, coinciden con los mínimos y máximos relativos presentadas en la producción absoluta. Todo lo anterior indica que la producción total, actualmente apenas mantiene el mismo nivel per cápita de producción que se tenía hace 30 años, de forma que cualquier disminución abrupta en la producción, provocará que se tengan valores per cápita menores a los que se tenían en 1973; así menores niveles de energía libre por habitante, estarían disponibles para la realización de tareas tales como cultivos, transporte, funcionamiento de industrias, generación de electricidad, educación, investigación, etc.

Se puede considerar que se han desarrollados sistemas más eficientes en el uso de la energía, teniendo como consecuencia que a pesar de que la producción per cápita ha permanecido oscilando, ésta se usa de forma más eficiente permitiendo realizar una mayor cantidad de tareas. Si bien esto es cierto, también es un hecho que se han presentado problemas tales como el crecimiento excesivo de las ciudades; teniendo como consecuencia necesaria el crecimiento del consumo de energía fuera de proporción, para la distribución de alimentos y de agua, mayor entorpecimiento del tráfico (y por lo tanto mayor consumo de combustible), mayores pérdidas absolutas en la distribución de electricidad (debido a que la longitud promedio de transmisión necesariamente ha aumentado), mayor costo

energético para la extracción y procesamiento de minerales (debido al empobrecimiento de los yacimientos), etc. Todo lo anterior hace que la eficiencia promedio del uso de energía en el mundo, no haya aumentado al nivel que se podría haber esperado inicialmente.

### Producción diaria de petróleo y carbón mineral en el mundo.-

La producción mundial de petróleo (Fig. 3.10), actualmente aumenta con un ritmo de crecimiento menor, respecto al registrado antes de 1979. El comportamiento de la producción de crudo es muy similar a la producción total de energía, esto se debe a que gran parte de la producción total está compuesta por este combustible (37% en 1996).

Por otra parte, se puede observar que la producción de carbón (Fig. 3.10) aumentó con cierto ritmo hasta antes de 1990, y a partir de dicho año la producción disminuyó. Posteriormente se registró una ligera recuperación de manera que en 1996 se tienen niveles de producción similares a las registradas en 1990; la producción per cápita de carbón comenzó a disminuir como resultado de una política internacional de sustitución del carbón por otros combustibles que contribuyan con menor incremento al efecto invernadero, comparados con el carbón.

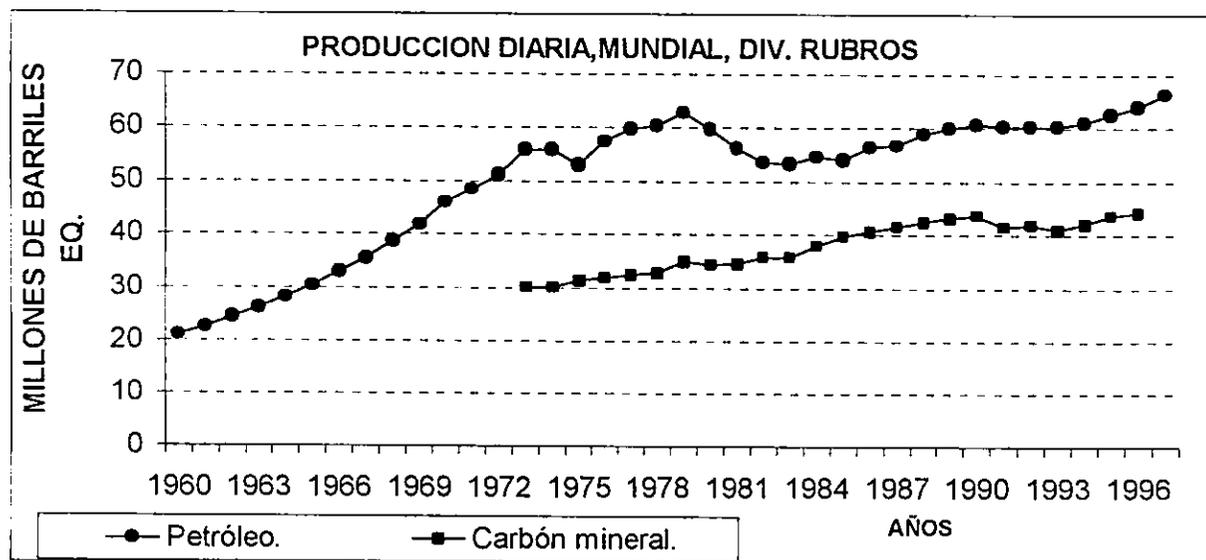


Fig. (3.10) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6].

## **Producción de energía mundial mediante diversas fuentes.-**

La electricidad generada por medio de hidroeléctricas (Fig. 3.11), presentó un aumento relativamente uniforme en el periodo 1973-1983, año a partir del cual la rapidez de crecimiento en la generación comenzó a disminuir paulatinamente; esto se debe a que con el transcurso del tiempo quedan menos lugares disponibles para la instalación de hidroeléctricas; de manera que en el futuro, la capacidad instalada de hidroeléctricas tendrá un valor relativamente constante debido a limitantes físicas existentes en el planeta Tierra.

La generación de electricidad por medio de nucleoeeléctricas (Fig. 3.11), tuvo un punto de inflexión en 1983; debiéndose principalmente a que países como E.U., están presentando disminuciones en sus unidades generadoras [6.], de forma que el ritmo de crecimiento en la generación presenta una desaceleración (esto se abordará con más detalle en secciones posteriores).

La generación de energía por medio de diversas fuentes renovables (Fig. 3.12), presenta una clara discontinuidad entre los años 1989 y 1990, teniendo un aumento del 536.34%, respecto al valor correspondiente de 1989. Esta discontinuidad de gran magnitud relativa, a escala mundial, no se debe a que se hayan implementado sistemas de energía renovable, simultáneamente en todo el mundo; este fenómeno se debe sólo a que E.U.A. expandió el alcance de sus combustibles renovables [6.]. Este hecho muestra un interés por parte de E.U.A., de desarrollar combustibles renovables; de forma que cuando los combustibles fósiles presenten escasez, tengan la infraestructura, organización y conocimientos (interdisciplinarios) necesarios para comenzarlos a sustituir por combustibles renovables.

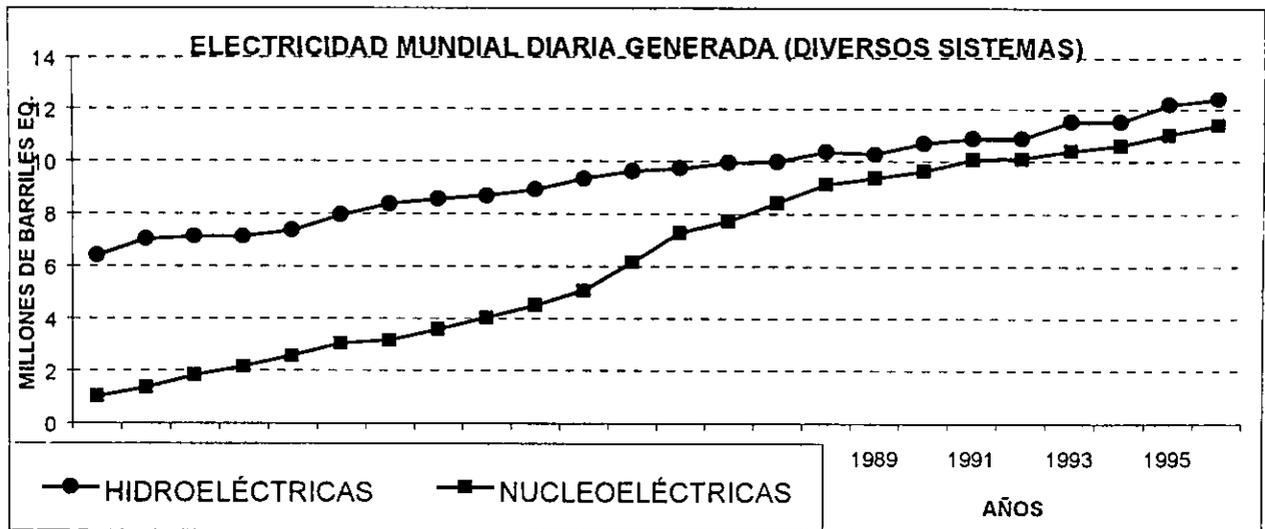


Fig. (3.11) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

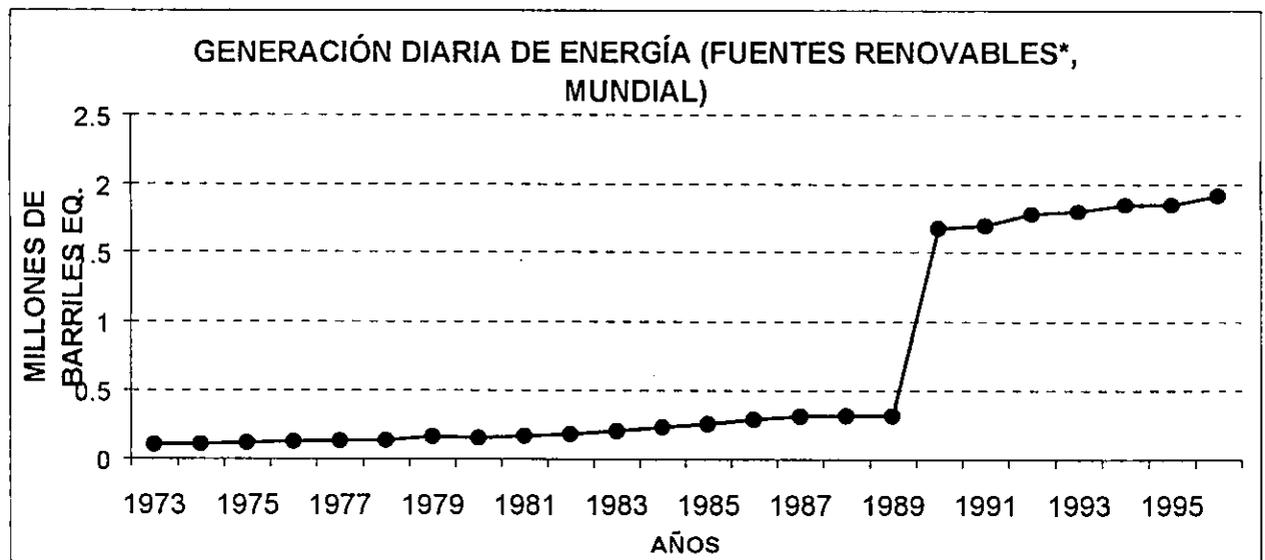


Fig. (3.12) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

\*Incluye: geotermia, leña, basura, eólica y solar (fotovoltaica y térmica)

La eficiencia mundial promedio, de diversos sistemas de generación de electricidad (Fig. 3.13), ha ido evolucionando paulatinamente; observándose las siguientes características:

- 1).- La eficiencia de generación de las plantas termoeléctricas convencionales, llegó a un máximo en 1960 (aproximadamente), año a partir del cual comenzó a disminuir.

Esta situación se debe principalmente a que no se continuaron construyendo grandes cantidades de este tipo de termoeléctricas, debido a que ya comenzaban a surgir las de ciclo combinado que son más eficientes, y el envejecimiento promedio de las plantas termoeléctricas existentes provocó que perdieran eficiencia.

**AUMENTO DE EFICIENCIA EN CONVERSION DE ENERGIA, MEDIANTE NUEVAS TECNOLOGIAS.**

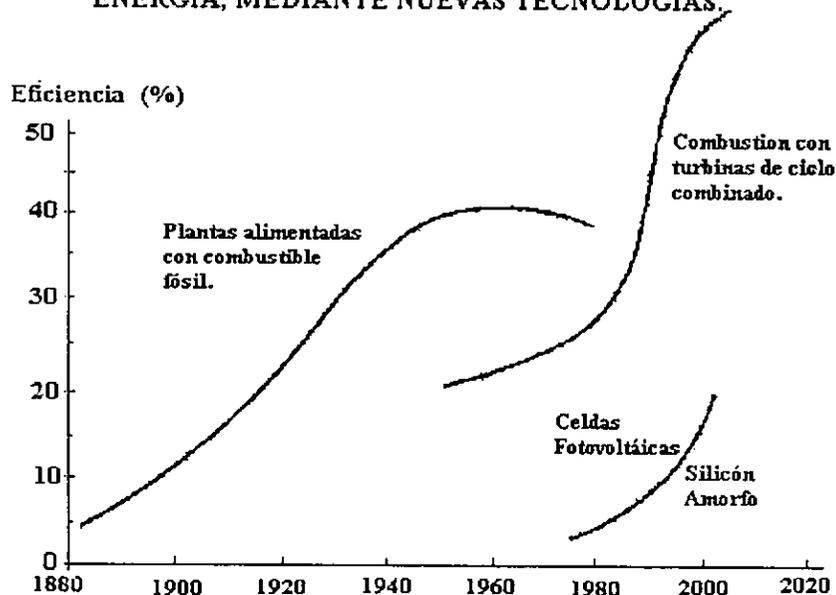


Fig. 3.13 Obtenida de [66].

- 2).- Por otra parte, la eficiencia de los ciclos combinados ha aumentado rápidamente, de forma tal que se llegará a un punto máximo alrededor del año 2020; la eficiencia de éste tipo de tecnología, es considerablemente superior a las plantas convencionales; teniendo como consecuencia que los sistemas de generación convencional sean preferibles económica y energéticamente sólo en casos de cogeneración.
- 3).- En lo que respecta a la generación de electricidad por medio de celdas solares, de silicón amorfo, actualmente su eficiencia se encuentra en la etapa de más rápido crecimiento. En el futuro se presentará un punto de inflexión (similar a las otras tecnologías) por lo que la rapidez de aumento en la eficiencia en función del tiempo comenzará a disminuir. La eficiencia llegará a un máximo que se puede esperar sea menor o similar a la eficiencia máxima alcanzada por los sistemas de generación convencional. Debido a que este tipo de celdas, actualmente no permiten su uso en cogeneración, será más conveniente el uso de energía solar térmica por medio de

captadores que permitan la generación convencional de electricidad (ciclo Rankine) y que cierta cantidad de energía térmica sea utilizada en algún otro proceso; de ésta forma se tendrán como ventajas: a) Se trata de una energía renovable, b) No se tiene la baja eficiencia de un sistema de generación convencional (sin cogeneración). Este tema se tratará con más detalle en capítulos posteriores.

## CONSUMO DE ENERGIA EN EL MUNDO.-

### Consumo diario de petróleo, carbón mineral y gas natural en el mundo.-

Se puede observar que en el periodo 1961-1972, el crecimiento del consumo diario de petróleo fue a ritmo casi uniforme (Fig. 3.14), a partir de dicho año la rapidez de crecimiento disminuyó súbitamente. Se han presentado incrementos de forma oscilatoria, sin embargo, la velocidad de crecimiento promedio tendencialmente es menor.

Esto se debe principalmente a que se comienzan a utilizar con mayor intensidad otros energéticos fósiles tales como el gas natural, teniendo como consecuencia un decremento en la rapidez de crecimiento del consumo de petróleo.

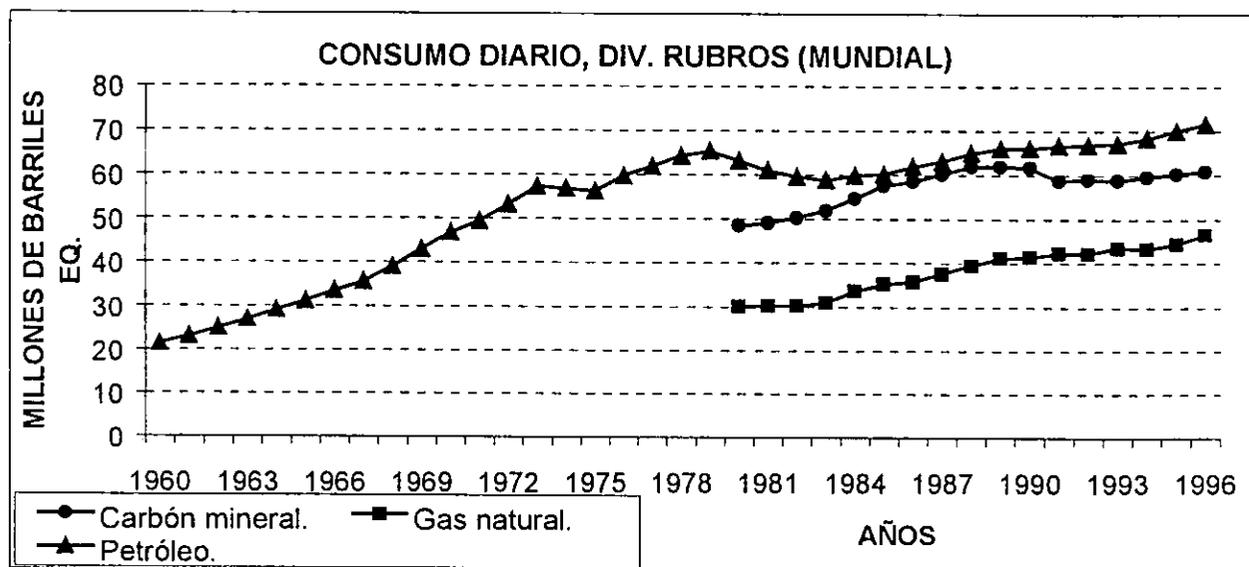


Fig. (3.14) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[6].

El consumo mundial de carbón mineral (Fig. 3.14) emite grandes cantidades de CO<sub>2</sub> respecto a la energía que proporciona. Actualmente es una política energética de la mayoría de los países, el reducir el consumo en éste tipo de combustibles con el fin de evitar el efecto invernadero; esto se observa claramente en la Fig. 3.14, dado que el carbón no ha presentado aumentos considerables a partir de 1991. Se puede observar que el crecimiento en las emisiones (de CO<sub>2</sub>) de los países en vías de desarrollo (Fig. 3.15), es más rápido que en los países desarrollados, ya que éstos comienzan a sustituir con una mayor rapidez las tecnologías para quema de carbón, por quemadores de gas, dado que cuentan con mayores recursos económicos. El comportamiento del consumo del gas natural (Fig. 3.14), es similar al petróleo; se puede observar un incremento en su velocidad de crecimiento a partir de 1989, consecuencia de una política de promoción su uso para que sea sustituto energético de carbón.

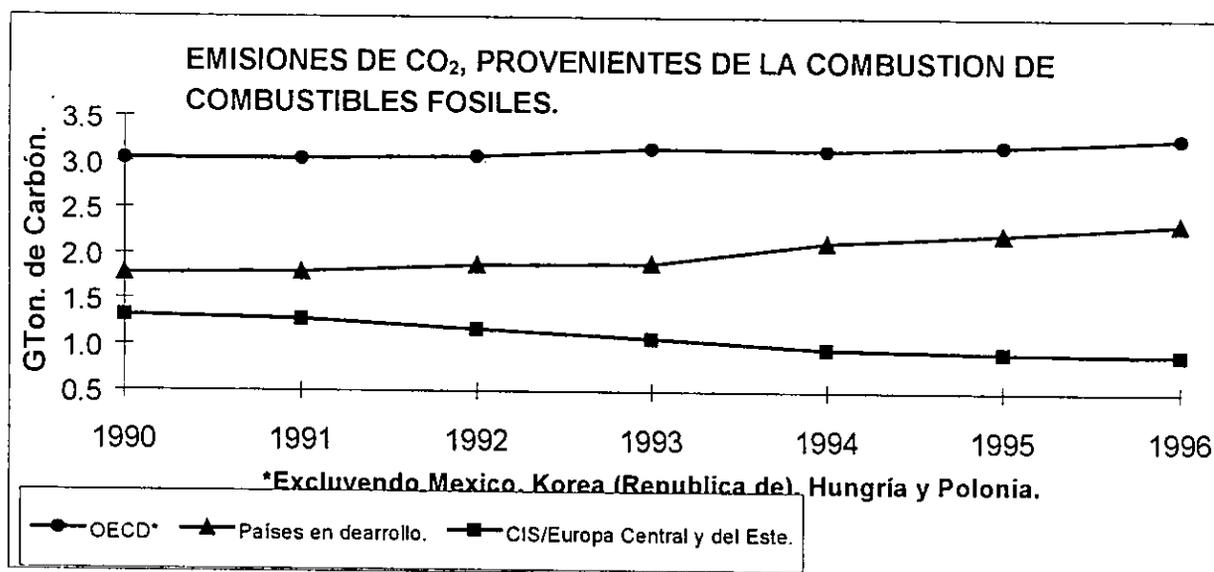


Fig. (3.15) Obtenida de W.M.O.

### Reservas mundiales de gas natural, petróleo y carbón mineral.-

Dado que actualmente el consumo de petróleo, es aproximadamente de 71.52 millones de barriles diarios (Fig. 3.14), y las reservas se estiman en  $1018.5 \times 10^9$  Barr. (al 1 de Enero de 1997) [6.]; si se supone que se conservará el mismo ritmo de consumo que en 1997, quedarían menos de 40 años para que se agoten totalmente las reservas mundiales (en el 2037, aproximadamente). Si se observa el comportamiento del consumo de petróleo (Fig. 3.14), queda claro que éste continuará incrementándose si se considera que el consumo aumentará de forma lineal con el mismo ritmo de crecimiento que se tuvo entre los años 1996 y 1997, se obtiene que en el año 2026 quedarán totalmente agotadas las reservas mundiales de petróleo.

El consumo de gas natural (Fig. 3.15), en 1997 fue de 46.55 millones de barriles equiv. diarios ( $82204 \times 10^9$  pies<sup>3</sup>, anuales), y ya que las reservas mundiales se estiman en  $4946.7 \times 10^{12}$  pies<sup>3</sup> (al 1 de Enero de 1997) [6.] si se mantuviera el mismo ritmo de consumo de 1997, en el año 2057 quedarían agotadas las reservas mundiales de gas natural. Si se supone que el consumo aumentará al ritmo presentado entre los años 1996 y 1997, las reservas de gas natural quedarían agotadas aproximadamente en el año 2030.

El consumo de carbón mineral (Fig. 3.14), en 1997 fue de 60.8 millones de barriles equiv. diarios (5190.11 millones de Ton. cortas anuales), dado que las reservas mundiales de carbón mineral se estiman en 1126630 millones de Ton. cortas (al 1 de Enero de 1997) (calculado con datos obtenidos de ref. [6.]), si se mantuviera constante el ritmo de consumo de 1997, en el año 2214 quedarían agotadas las reservas mundiales de carbón mineral.

Desdichadamente, a pesar de las relativamente grandes reservas de carbón mineral, el uso futuro de este combustible será fuertemente restringido debido a sus efectos ambientales en el calentamiento global de la tierra, efecto de sus altas emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las consecuencias del agotamiento de los combustibles, no sólo serán de índole "ingenieril", ya que tendrá repercusiones a gran escala: alimenticias, poblacionales, económicas, ambientales, político-sociales, etc. Todas éstas interacciones entre fenómenos,

de distinta naturaleza, tienen como consecuencia que los efectos del agotamiento de los combustibles fósiles, se presenten mucho antes que éstos se acaben. Esto hace necesario que, como se verá más adelante, se presenten y desarrollen proyectos interdisciplinarios que permitan prever los efectos negativos para lograr que sean atenuados ó en algunos casos anulados ó superados.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## POBLACIÓN Y DIVERSOS RUBROS EN E.U.A.-

### Población de E.U.A.-

La población en Estados Unidos de América ha crecido, en el pasado, a través de inmigraciones y de crecimiento interno. Entre 1950 y el año 2000 el crecimiento presenta un punto de inflexión en 1979 aproximadamente, ver Fig. 3.16. La población que hace varios siglos era mayoritariamente rural, en este siglo, se ha transformado en mayoritariamente urbana, alcanzando actualmente un 77.7% del total (Fig. 3.17).

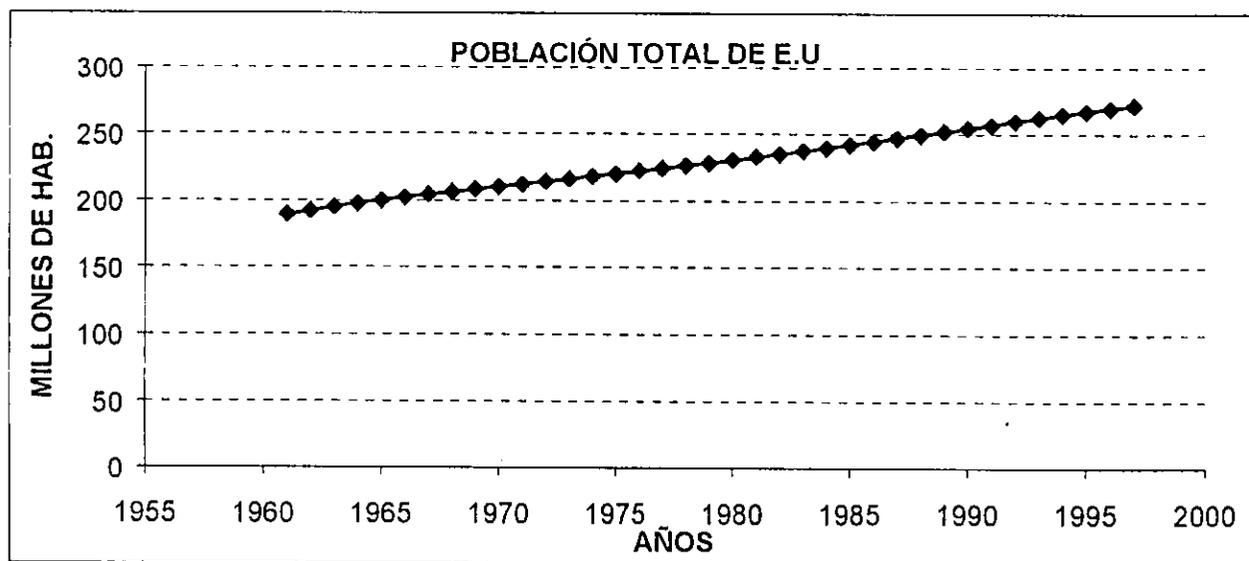


Fig. (3.16) Construida a partir de datos numéricos obtenidos de ref. [35].

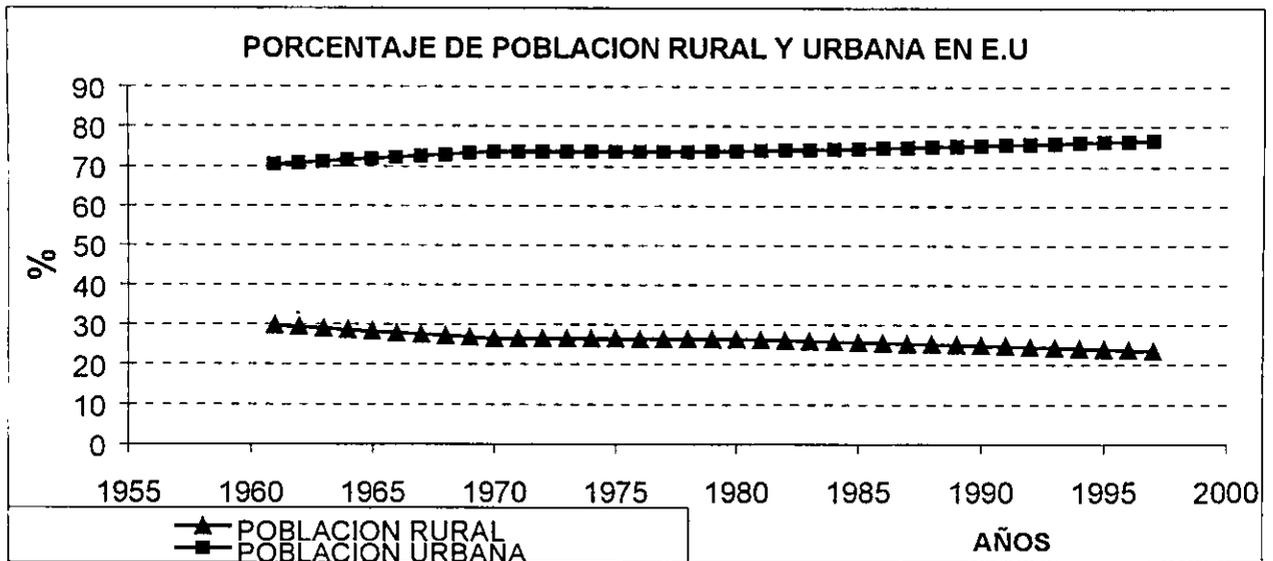


Fig. (3.17). - Calculada y construida a partir de datos numéricos obtenidos de ref. [35]

### Uso de tierras en E.U.A.-

En la Fig.3.18, se aprecia que el porcentaje de tierra arable ha sido casi constante (aproximadamente el 20% del total del territorio) durante los últimos 40 años. Por otra parte se observa una tendencia linealmente decreciente de la tierra de pastura, esto junto con una constancia en las cabezas de ganado [39], indica: a).- Una proporción creciente de alimentación del mismo, a través de cereales, b).- Como sabemos que desde el siglo XIX, y a principios del siglo XX, los terrenos de pastura han crecido en todo el mundo a costa de regiones relativamente planas, este hecho sugiere que existe en Estados Unidos una política de reforestación de bosques.

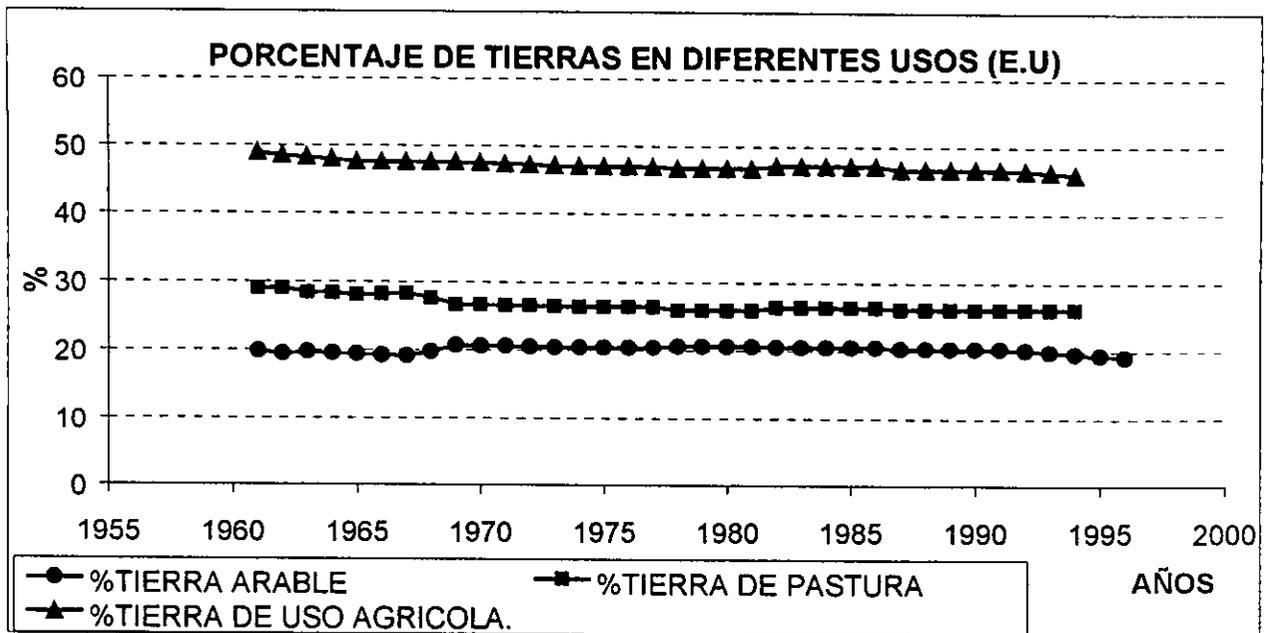


Fig. 3.18 Calculada y construida a partir de datos numéricos obtenidos de ref. [36]

### Consumo de fertilizantes en E.U.A.-

En la Fig. 3.19 se puede observar que el consumo per cápita de fertilizantes en E.U registró un aumento hasta 1981, año en que se tuvo un máximo de 92 Kg, a partir de entonces se presentó una disminución hasta un valor aproximado de 73 Kg, alrededor del cual se encuentra oscilando actualmente. Lo anterior pudiera indicar, que con la tecnología actual, en E.U.A. se ha llegado a un estado estacionario que refleja la optimización en el uso del fertilizante por Kg de producto.

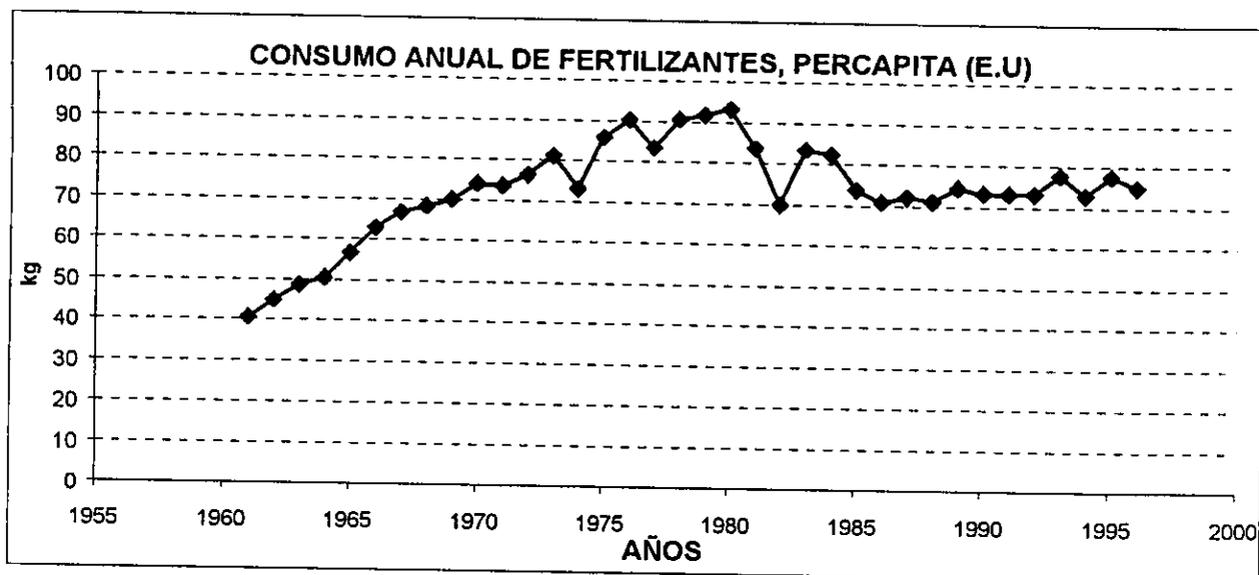


Fig. (3.19) Calculada y construida a partir de datos numéricos obtenidos de ref. [35, 38]

La producción total obtenida por unidad de fertilizante aplicado Fig. 3.20, presentó una disminución a partir de 1961, posteriormente presenta oscilaciones alrededor de 20Kg/Kg. Lo anterior implica que no se pueden esperar grandes aumentos en la aplicación de fertilizantes por unidad de producción. Esta tecnología está llegando a un estado estacionario, de forma que en un futuro cercano, incluso en E.U.A., éste rubro no se utilice para aumentar la productividad, sólo para mantenerla (es decir, para restaurar la productividad natural de la tierra).

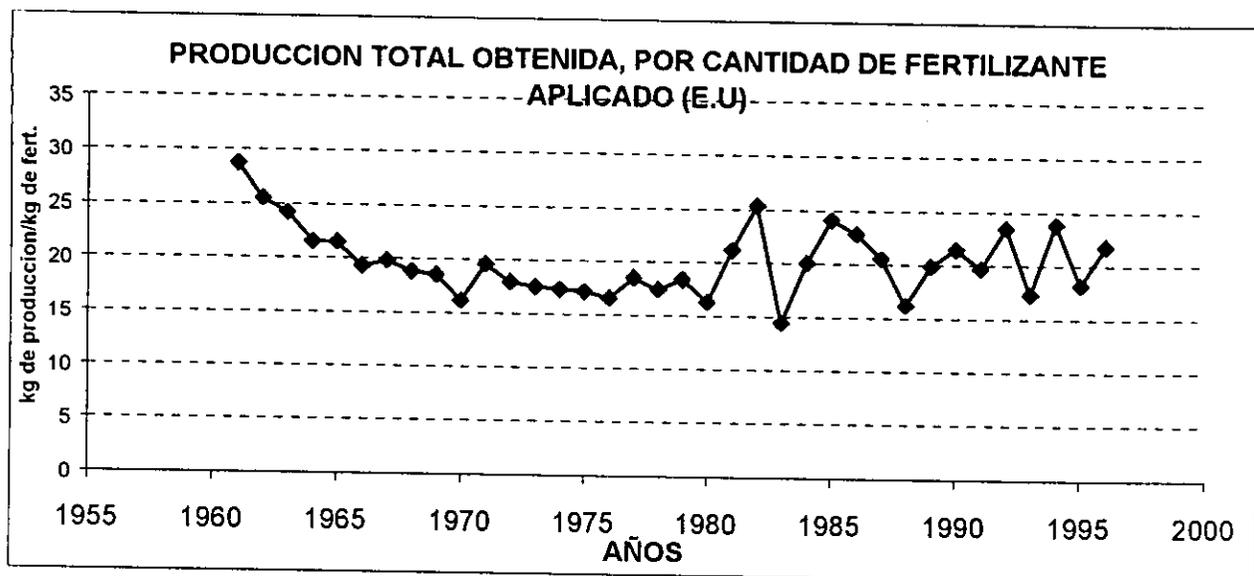


Fig. (3.20) Calculada y construida a partir de datos numéricos obtenidos de ref. [38]

### Tractores en E.U.A.-

Casi toda la tierra arable en E.U.A., se trabaja por medio de tractores, esto ocurre desde 1960. Desde 1965, el tamaño del tractor promedio ha ido en aumento, hasta alcanzar un valor promedio constante desde 1990 a la fecha [3, pág. 341] En la Fig. 3.21, se observa que el número de tractores en uso, asciende actualmente a 4.8 millones de unidades, cada uno de los cuales abarca (en promedio), un área de trabajo de 37 hectáreas, (ver Fig. 3.22).

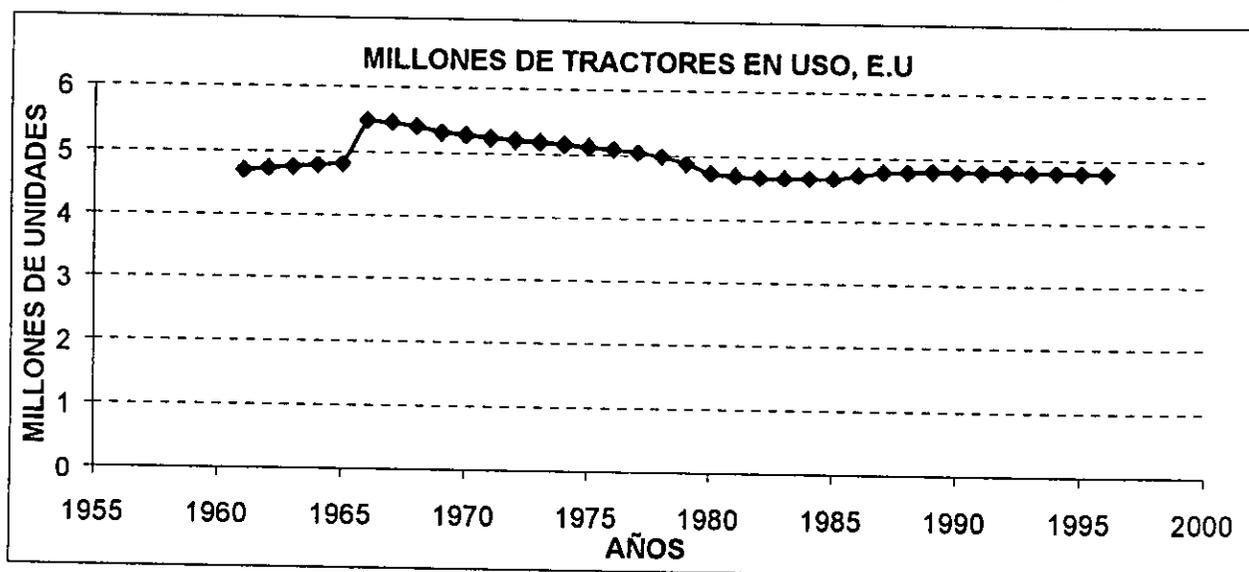


Fig. (3.21) Calculada y construida a partir de datos numéricos obtenidos de ref. [36].

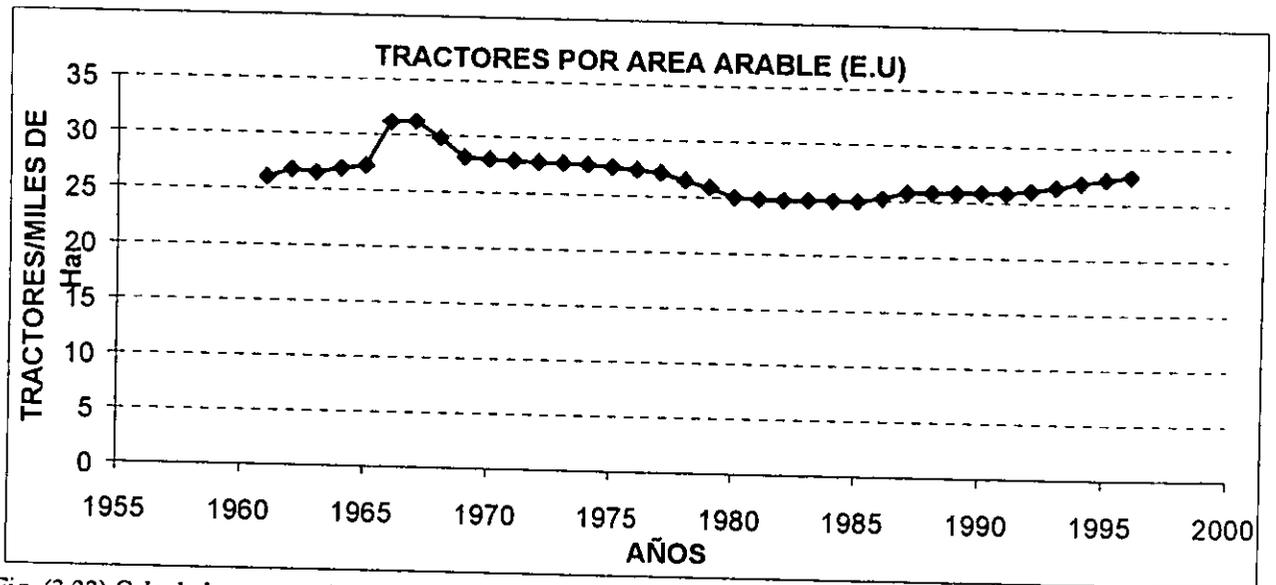


Fig. (3.22) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [36]

### Producción total de energía en E.U.A.-

La producción diaria de energía en E.U.A. (Fig. 3.23), aumentó con relativa rapidez hasta 1970, año a partir del cual registró una disminución abrupta en la velocidad de crecimiento. La producción per cápita total de energía en E.U.A. (Fig. 3.24), presentó un aumento hasta 1970, de manera que a partir de entonces osciló alrededor de un valor aproximado de 20lt eq. per cápita; cabe señalar que el consumo es mayor que la producción (Figs. 3.23 y 3.27), lo cual indica que en general las importaciones de energía son mayores que las exportaciones.

Las importaciones realizadas por los E.U.A. básicamente se encuentran formadas por petróleo; por ejemplo, en 1997 el 85.02% de la energía importada, provino del petróleo [6.]; esto es consecuencia de las relativamente bajas reservas de petróleo con que cuenta E.U.A. (22000 millones de barriles, al 1 de Enero de 1997) [6.].

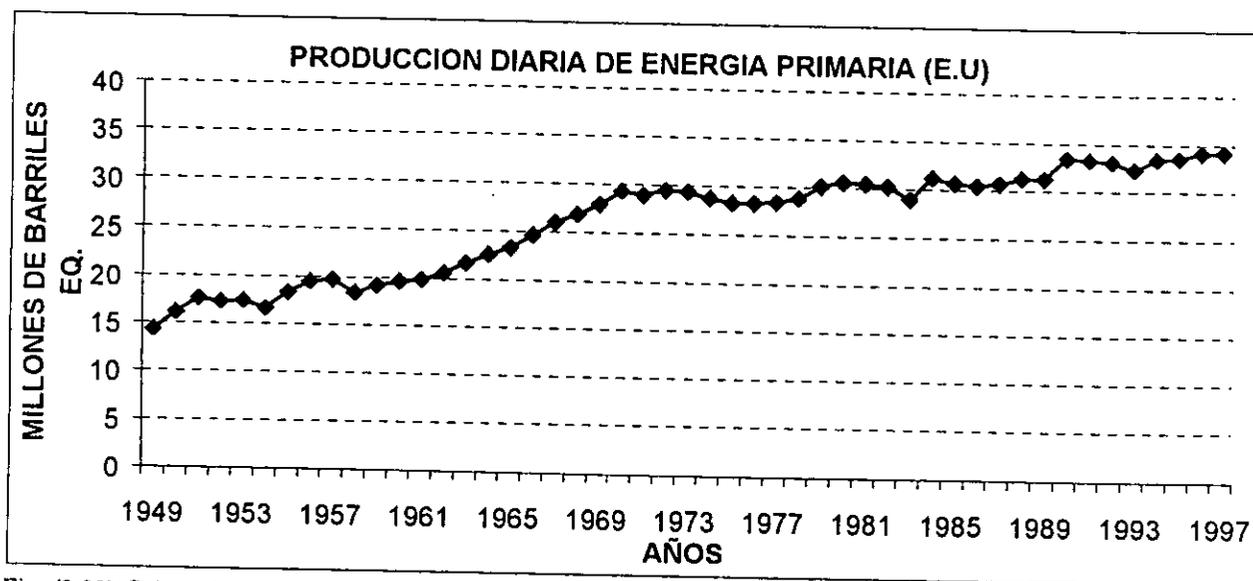


Fig. (3.23) Calculada y construida a partir de datos por obtenidos de ref. [6.].

### Producción de petróleo, gas natural y carbón mineral, en E.U.A.-

La producción de petróleo (Fig. 3.25) presentó un máximo en 1969, a partir de entonces comenzó a disminuir, llegando en 1997 a niveles de producción similares a los que se tenían a inicios de la década de los cincuenta. Considerando que los intercambios netos de crudo desde 1949, siempre han sido hacia el interior de E.U.A. [6.], se puede asumir que casi toda la producción es con fines de autoconsumo. Las importaciones menos las exportaciones (intercambios netos), han sido mayores que la producción interna desde 1993; ésta tendencia continúa hasta la actualidad (en 1997 las importaciones fueron un 8% mayores que la producción).

Si se considera que la producción de petróleo se mantendrá en los mismos niveles que en 1997, dadas las reservas estimadas de 22,000 millones de barriles, al 1 de Enero de 1997, [6.], éstas quedarían agotadas en el año 2006.

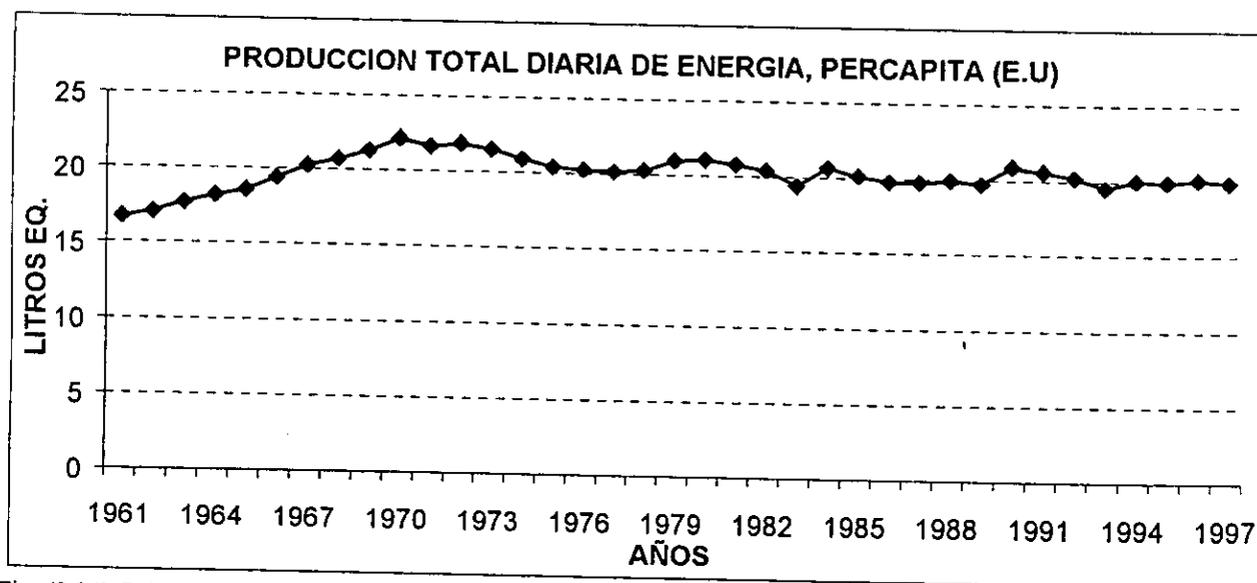


Fig. (3.24) Calculada y construida a partir de datos por obtenidos de ref.[6.].

Evidentemente el consumo de petróleo presenta una tendencia general a disminuir; si se considera que continuará descendiendo con la misma rapidez que se tuvo entre los años 1996 y 1997, entonces las reservas quedarían agotadas en el año 2007.

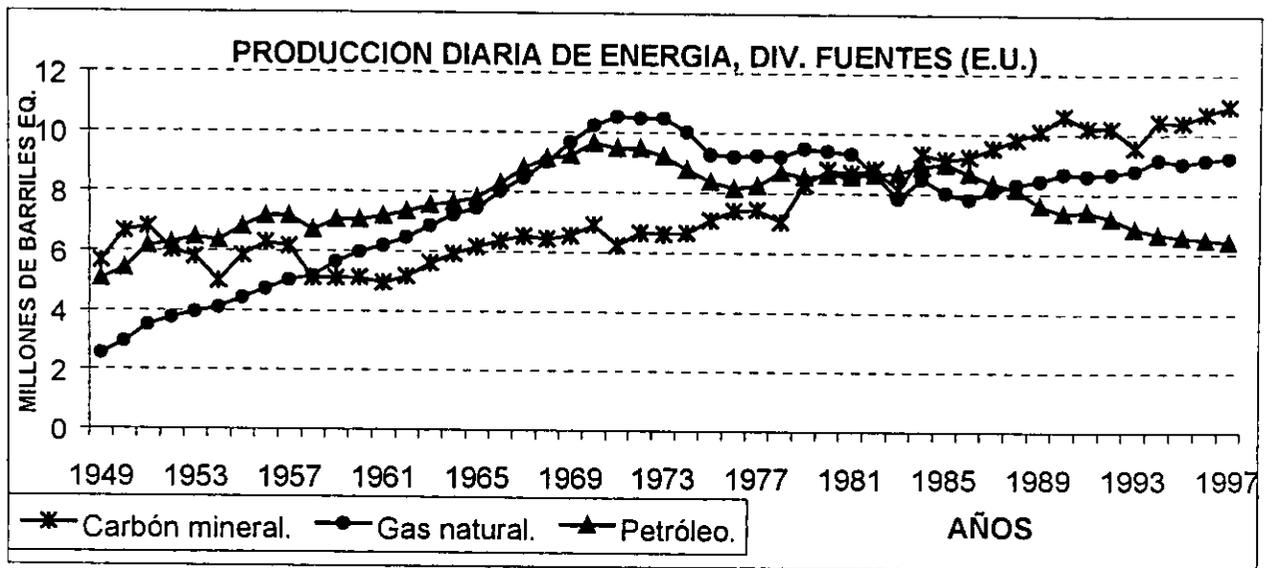


Fig. (3.25) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

La producción de gas natural (Fig. 3.25) presentó un máximo en 1971, año a partir del cual tuvo una disminución, para después de 1982 (aproximadamente) presentar una paulatina recuperación. Los intercambios netos de gas natural, en general han sido hacia el interior de E.U.A., el principal exportador de gas hacia E.U.A. es Canadá. [6.]. En 1997 el consumo fue de 9.2 millones de barriles eq. diarios (18815573.9 millones de pies<sup>3</sup>, anuales), dado que las reservas se estiman en  $166.5 \times 10^{12}$  pies<sup>3</sup> (al 1 de Enero de 1997), si se mantuviera el mismo ritmo de consumo, en el año 2006 (aproximadamente) quedarían agotadas las reservas de gas natural.

Si se considera que la producción continuará aumentando al ritmo presentado entre los años 1996 y 1997, las reservas de gas natural quedarían agotadas (aproximadamente) en el año 2005.

La producción de carbón mineral (Fig. 3.25), ha aumentado prácticamente en todo el periodo estudiado, sin embargo los aumentos cada vez ocurren a menores rapidezces.

En los últimos 10 años, la producción de carbón mineral ha superado a la producción de gas natural y a la de petróleo. Esto se debe a que las reservas de este combustible son considerablemente mayores en relación con otros, provocando que el carbón sea uno de los energéticos más explotados; también se realizan exportaciones importantes de este combustible (por ejemplo, en 1997 el 7.67% de la producción total se exportó) [6.].

Debido a que E.U.A. es uno de los principales consumidores de carbón, también es uno de los principales emisores de CO<sub>2</sub>. En 1996 emitió 208 lb. de CO<sub>2</sub> por Btu. Obtenido de la quema de carbón [6.]. Si se mantuviera el mismo ritmo de consumo que en 1997, el cual fue de 10.94 millones de barriles eq. diarios (1088.6 millones de Ton cortas anuales), dado que las reservas se estiman en 270901 millones de Ton. cortas (al 1 de Enero de 1997) [6.], en el año 2246 quedarían agotadas las reservas de carbón mineral existentes en E.U.

Si se supone que la producción aumentará al mismo ritmo que el presentado en el periodo 1996-1997, en el año 2107 quedarían agotadas las reservas.

En conjunto se puede decir que para E.U.A. la situación del gas natural no es muy diferente a la del petróleo; teniendo como consecuencia que E.U.A. se apoye de forma evidente en el carbón para sustituir a otros combustibles fósiles (teniendo como desventaja que sea uno de los principales emisores de CO<sub>2</sub> en el mundo). Es entendible el que se esté apoyando el desarrollo de energías renovables, dado que gran parte de sus energías fósiles están por agotarse y el uso del carbón, como se mencionó anteriormente, se encuentra restringido debido a políticas internacionales.

### **Producción diaria de energía mediante diversas fuentes.-**

Se puede observar que la electricidad generada por medio de nucleoelectricas (Fig. 3.26), tuvo un máximo en 1995 y posteriormente comenzó a disminuir; esto se debe esencialmente a que el número de unidades generadoras en operación llegó a un máximo en 1990 (de 112 unidades), y luego comenzó a disminuir [6.]. El número acumulativo de unidades clausuradas (124 unidades en 1997) es equiparable con el número de plantas en operación (107 unidades en 1997), cabe señalar que a partir de 1970 no se han construido nuevas unidades generadoras. [6.].

Esto es síntoma de que las reservas de combustible nuclear no son muy abundantes, dado que no se han hecho nuevas inversiones en éste tipo de energía; ésta afirmación se confirma con el hecho de que las importaciones de combustible nuclear han aumentado considerablemente, por ejemplo: en 1997 se produjeron 5.64 millones de libras de  $U_3O_8$ , se importaron 43.0 millones de libras y se exportaron 17.0 millones de libras.

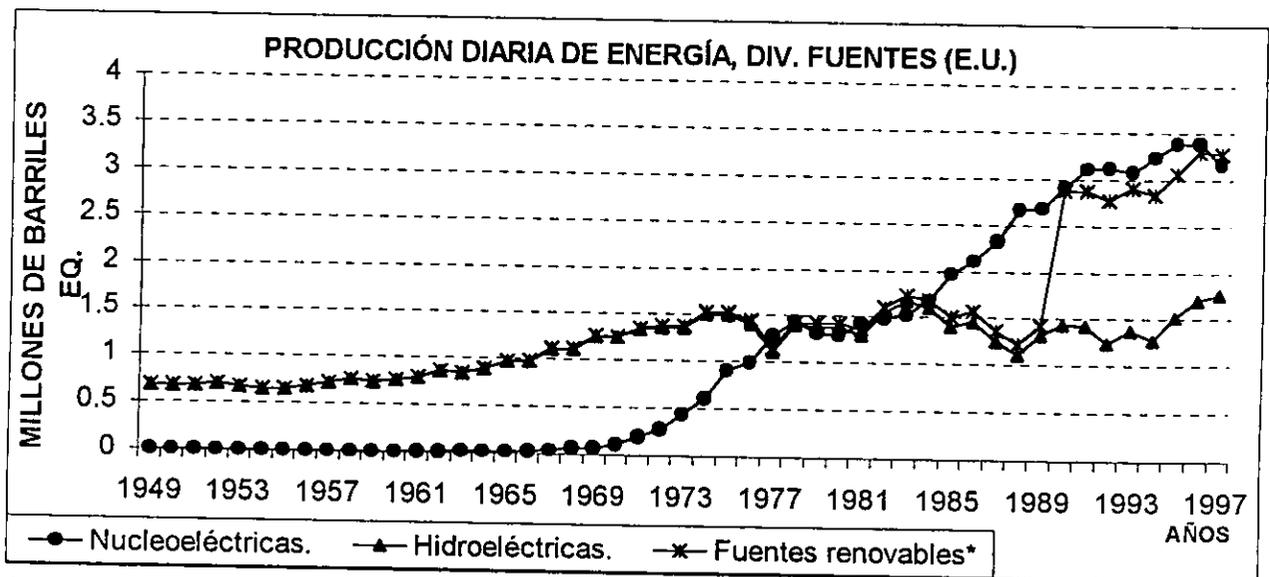


Fig. (3.26) Calculada y construida a partir de datos por obtenidos de ref. [6.].

- Incluye hidroeléctricas, biomasa, solar, viento y geotermia.

En lo que respecta a las fuentes de energía renovables (Fig. 3.26), se puede observar que hasta 1989, la mayoría estaba formada por generación de electricidad proveniente de hidroeléctricas. La discontinuidad que se registró a partir de 1989, se debe principalmente a: a) El aumento de la producción proveniente de biomasa (de 1989 a 1990 aumentó en 130 veces), b) La generación de energía a pequeña escala por medio de sistemas solares, c) La generación de electricidad por medio de geotermia y sistemas eólicos [6.].

El desarrollo de sistemas tan diversos de energía renovable, se debe a que el desarrollo de alternativas energéticas “no es una simple receta” [47], es decir, debe ser coherente con los recursos naturales, tecnológicos y económicos de cada país e incluso de cada región; teniendo como consecuencia que lo más viable sea el desarrollo de diversas tecnologías que

serán aplicadas en una ú otra forma, dependiendo de la región de que se trate, de lo que se pretenda lograr y de los efectos que cause en diferentes aspectos.

## **CONSUMO DE ENERGIA EN E.U.A.-**

### **Consumo de energía primaria en E.U.A.-**

En la Fig. 3.27 se puede observar que el patrón de crecimiento del consumo diario de energía primaria en E.U.A., cambió a partir de 1972 al presentar ciertas oscilaciones y continuar con un crecimiento a ritmo menor.

El consumo per cápita diario de energía primaria (Fig. 3.28), creció de forma relativamente uniforme hasta 1972; a partir de entonces se encuentra oscilando alrededor de un valor aproximado de 24 litros eq. Cabe señalar que el consumo, en general, es mayor que la producción, de forma que en 1997 el 23% del consumo estuvo formado por importaciones de petróleo. Por otra parte los habitantes de E.U.A., en general consumen aproximadamente 5 veces más energía per cápita al día que el promedio mundial; esto se debe a que el gran poder económico se ve reflejado en una mayor cantidad de industrias, mayor necesidad de producción de electricidad, mayor maquinaria en campos de cultivo, etc. En 1997, la población de E.U.A. fue el 4.6% de la población mundial, y sin embargo consumió el 25% de toda la producción mundial de energía de ese año.

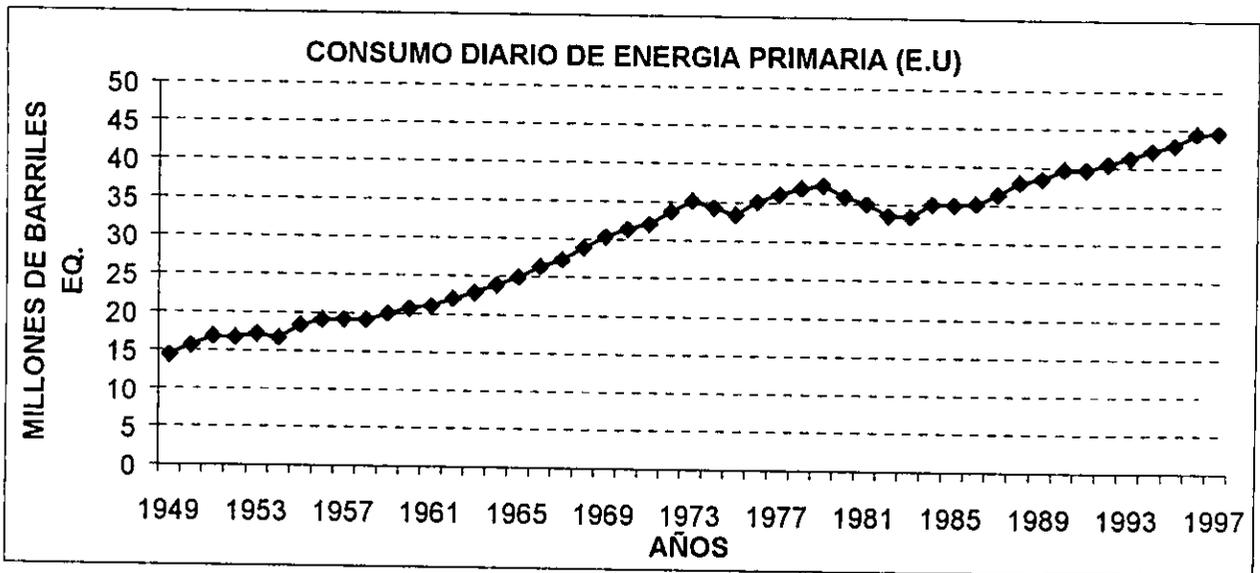


Fig. (3.27) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[6.].

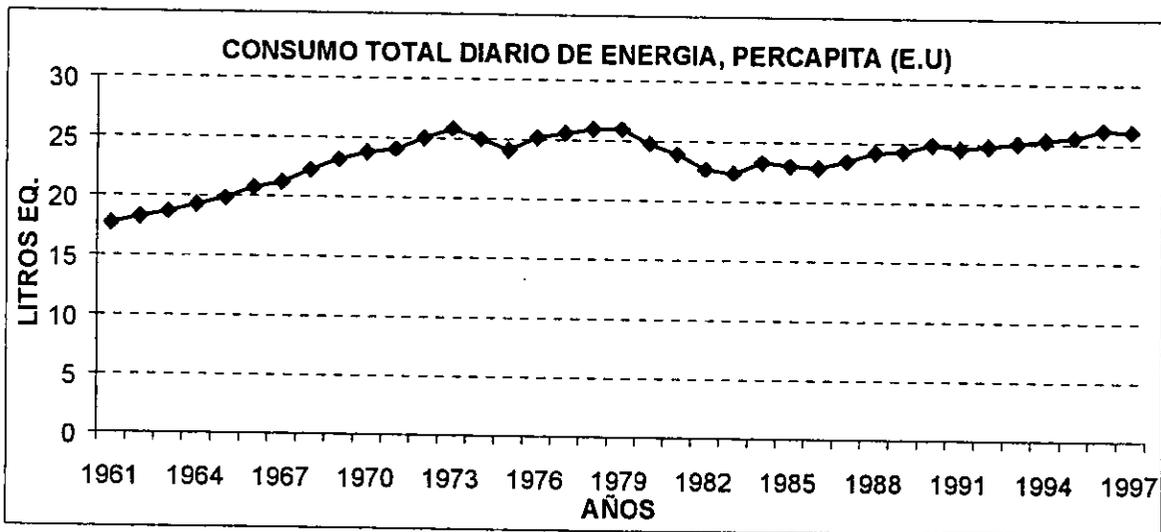


Fig. (3.28) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[6.]

### Consumo de carbón mineral, gas natural y petróleo en E.U.A.-

El consumo de carbón mineral (Fig. 3.29), presentó un aumento a partir de 1960, después de 1970 su rapidez de aumento es relativamente uniforme; esto se debe, como se mencionó anteriormente, a que el carbón ha servido de sustituto energético del petróleo y del gas natural, ya que las reservas de éstos se encuentran por agotarse. Se puede esperar que este

ritmo de aumento disminuya, dado que E.U.A. debe reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub> debido a exigencias internacionales, teniendo como consecuencia que se aumenten las importaciones de energía y que se desarrollen energéticos renovables.

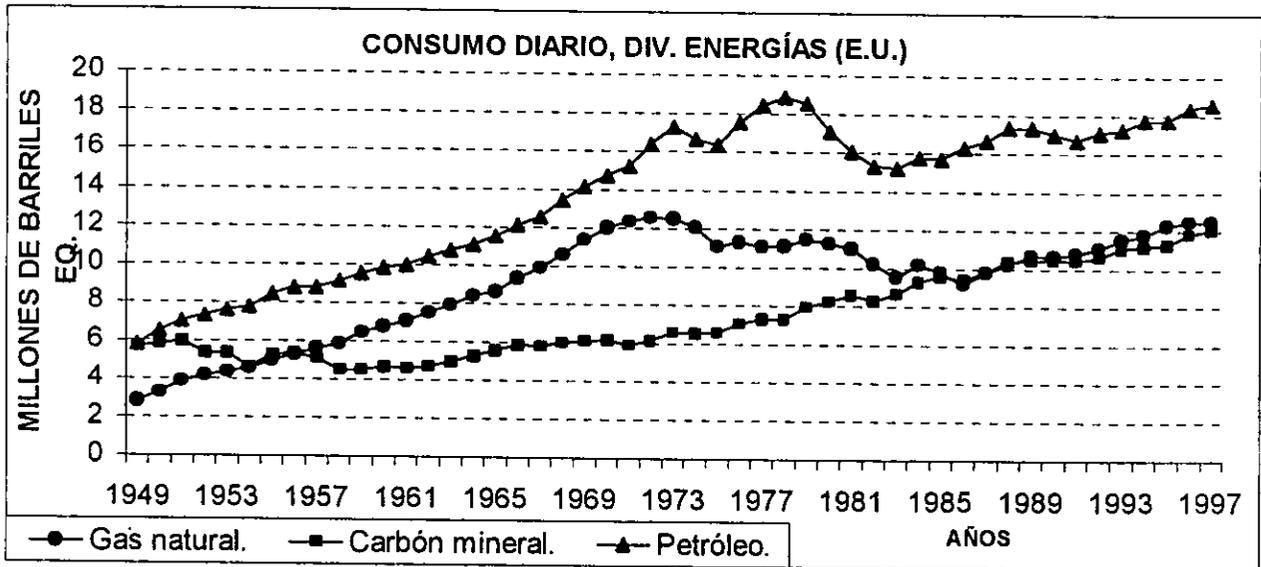


Fig. (3.29) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

El consumo de gas natural (Fig. 3.29), aumentó con cierta uniformidad hasta finales de la década de los sesenta, a partir de entonces tuvo un decremento y a partir de 1985 presentó una recuperación paulatina. Actualmente, se tienen niveles de consumo similares a los que se presentaron en 1970, de manera que el consumo per cápita de gas necesariamente ha disminuido; esto es consecuencia de que las reservas se están agotando.

De forma similar al gas natural, el consumo de petróleo (Fig. 3.29) presentó un crecimiento relativamente rápido hasta comienzos de la década de los setenta, año a partir del cual tuvo una disminución, de manera que en la actualidad se tienen niveles de consumo similares a los presentados en 1970. Al igual que en el caso del gas natural, el consumo per cápita necesariamente ha disminuido, de forma similar esto es consecuencia de las limitadas reservas que se tienen de petróleo. Cabe señalar que gran parte del consumo de petróleo, está formado por importaciones; en 1997 las importaciones netas formaron el 48.6% del consumo total de dicho año (calculado con datos obtenidos de ref. [6.]).

En general se puede decir que el consumo per cápita de gas natural y de petróleo se encuentran en disminución, a pesar de que cada vez se importa una mayor cantidad de éstos. Para compensar dicha disminución se ha recurrido al consumo de carbón, ya que es el único que ha aumentado de forma uniforme desde comienzos de los setenta.

### Consumo de energía por parte del sector industrial en E.U.A.-

El consumo de energía en el sector industrial (Fig. 3.30), tuvo un crecimiento relativamente uniforme hasta comienzos de los setenta, donde a partir de entonces presentó ciertas oscilaciones y hasta 1985 mostró una recuperación paulatina, con una velocidad de crecimiento que disminuye conforme transcurre el tiempo. En 1997, éste sector, consumió el 37.77% de la energía total consumida en E.U.A. La energía consumida por el sector industrial, está formada principalmente por petróleo y gas natural y en menores proporciones por electricidad y carbón (Fig. 3.31). La composición del combustible utilizado por este sector, explica entre otros factores porqué se ha puesto tanto interés en el diseño de procesos industriales que sean más eficientes energéticamente, ya que este sector es muy susceptible a las variaciones en la producción e importación de petróleo y carbón; además como se pudo observar, las reservas de petróleo están por agotarse.

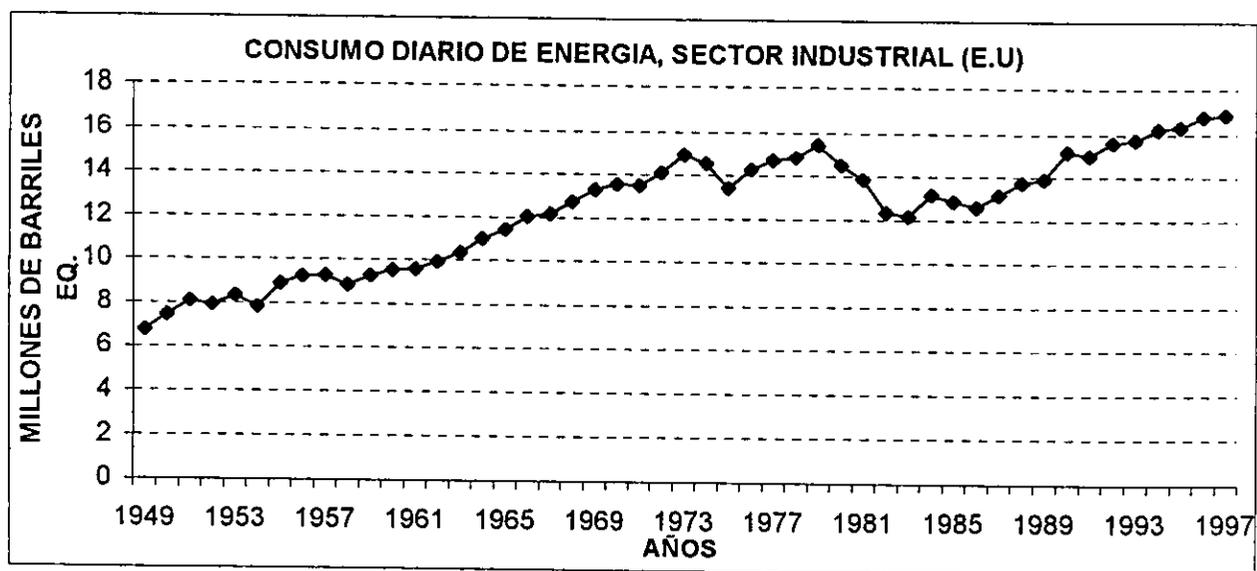


Fig.(3.30) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.]

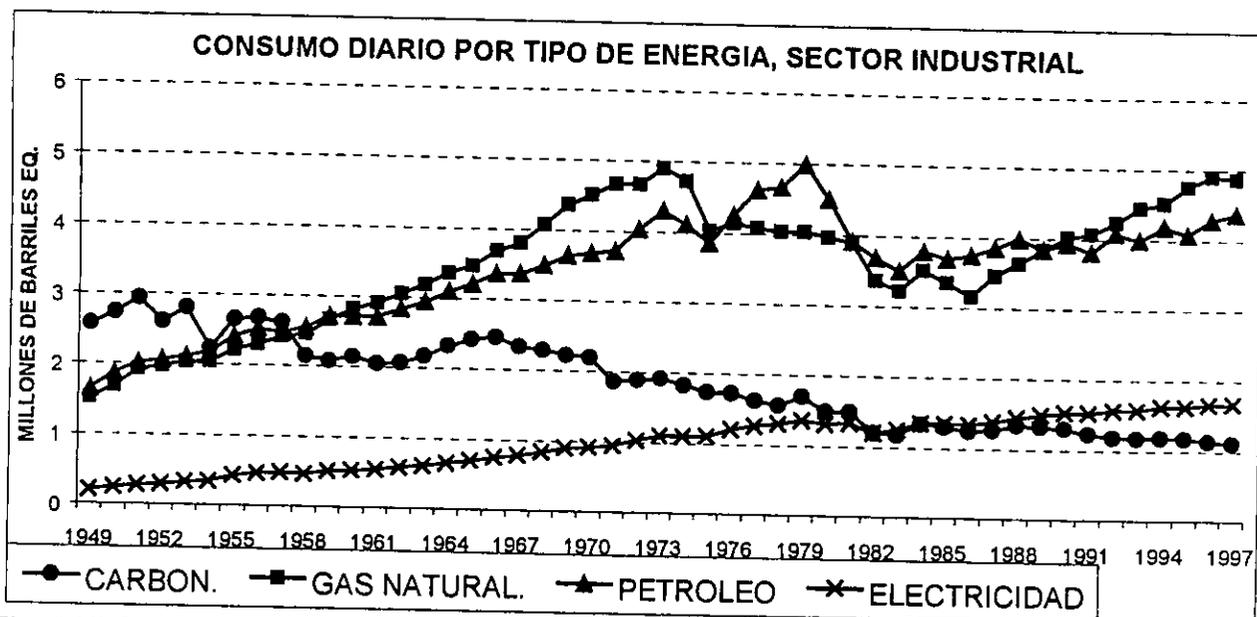


Fig. (3.31) Calculada y construida a partir de datos proporcionado [6.].

### Consumo de energía por parte de los sectores comercial y residencial en E.U.A.-

El consumo total de energía de los sectores comercial y residencial (Fig. 3.32), aumentó con cierta uniformidad hasta comienzos de los setenta. A partir de entonces disminuyó su rapidez de crecimiento de manera abrupta y continuó con un crecimiento uniforme pero a menor velocidad.

El hecho de que el crecimiento tienda a realizarse a ritmo uniforme, es entendible debido a que éste sector está relacionado con la población de forma directa, de manera que generalmente, por lo menos aumenta de una forma casi proporcional a la población.

En 1997, este sector consumió el 35.55% de la energía total consumida en E.U.A. La composición de la energía utilizada por éste sector (Fig. 3.33), se encuentra básicamente constituida por gas natural y electricidad, en una menor proporción se encuentra el consumo de petróleo y carbón. Cabe señalar que aparentemente el consumo de carbón es muy bajo, sin embargo, hay que tomar en cuenta de que gran parte de la electricidad se genera por medio de este combustible (en 1997 el 57% se generó por medio de carboeléctricas) [6.]. En lo que respecta al consumo de gas natural (Fig. 3.33), se puede observar que se mantuvo oscilando alrededor de un valor aproximado de 3.5 millones de barriles eq. diarios entre los años 1970 y 1989 (aproximadamente). A partir de 1989 tuvo un

aumento de 3.5 a 4 millones de barriles eq, lo cual coincide con un aumento en las importaciones, ya que se pasaron de  $0.99 \times 10^{12}$  pies<sup>3</sup> anuales en 1987, a  $1.38 \times 10^{12}$  pies<sup>3</sup> anuales en 1989 y para 1997 ya eran  $3.97 \times 10^{12}$  pies<sup>3</sup> anuales. [6.].

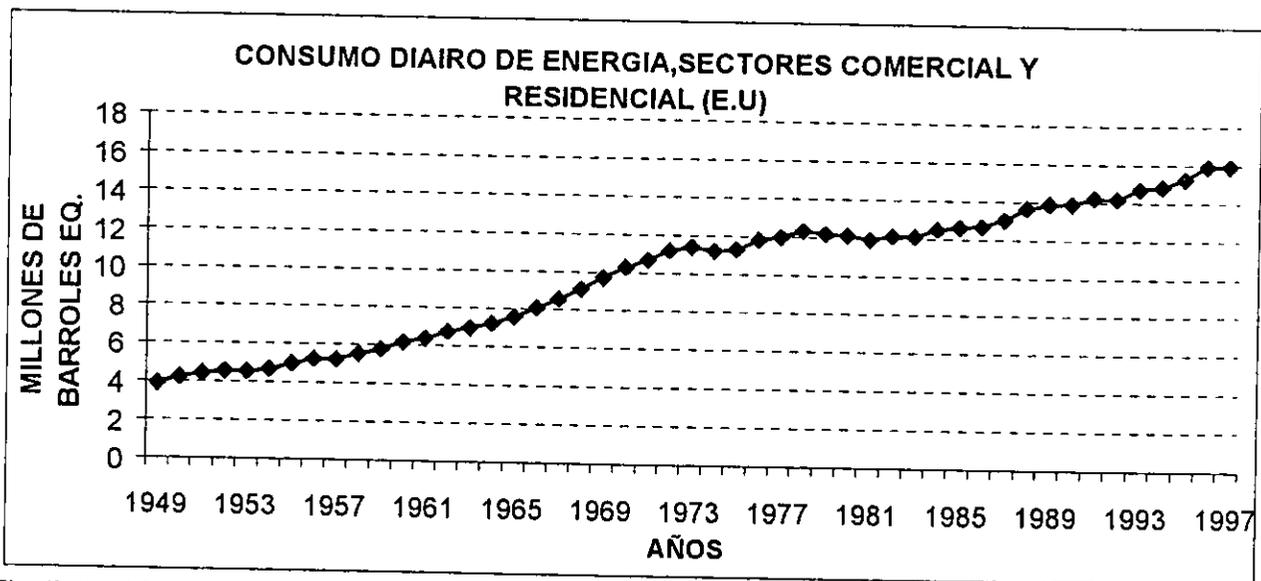


Fig. (3.32) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

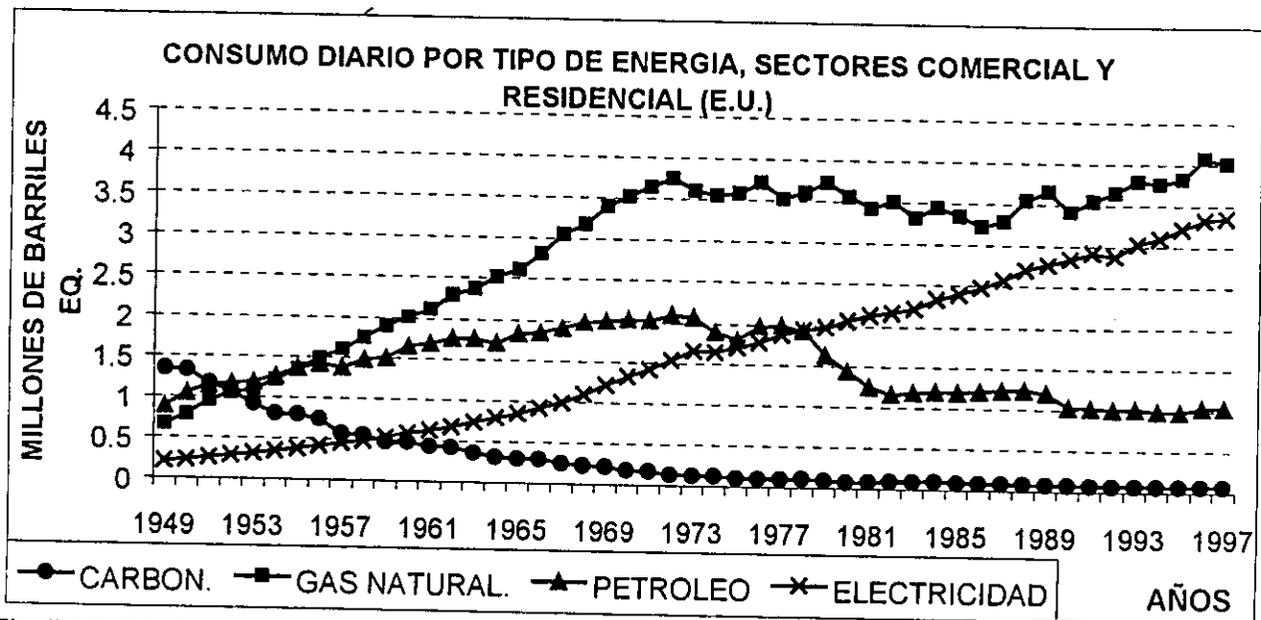


Fig. (3.33) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

### Consumo de energía del sector transporte, en E.U.A.

El consumo de energía en el sector transporte (Fig. 3.34), aumentó con cierta uniformidad hasta 1973, a partir de dicho año el ritmo de crecimiento disminuyó, presentando oscilaciones que siguieron una trayectoria media de crecimiento uniforme, la cual creció más lentamente comparada con el periodo anterior a 1973.

En 1997, este sector consumió el 26.66% de la energía total consumida en E.U.A. La mayor parte del combustible utilizado proviene del petróleo, esto es entendible dado que la mayoría de los automotores, tractores, aviones, etc., utilizan combustibles derivados del petróleo, tales como gasolina, diesel, turbosina, etc.

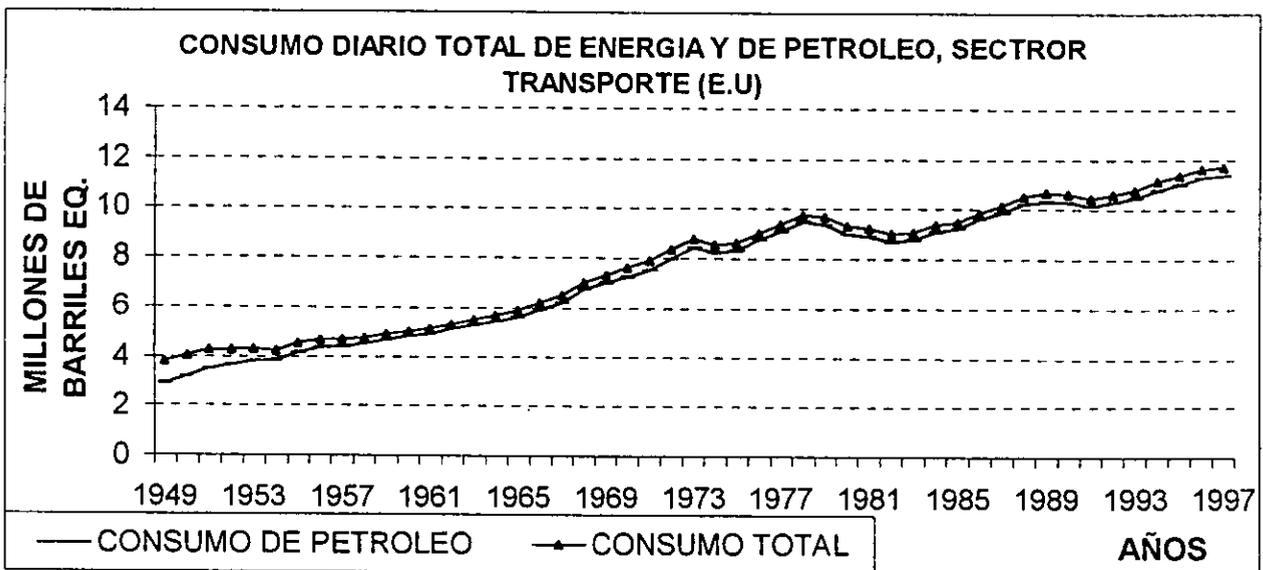


Fig. (3.34) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

El papel del transporte en la distribución de alimentos, es de vital importancia; por ejemplo: la distancia media que debe recorrer un alimento en E.U.A., de la granja al lugar de consumo, es de aproximadamente 1250 millas ([www.OneEarth.org](http://www.OneEarth.org), enero 1999), esto sería imposible sin un adecuado sistema de transporte de alimentos.

## POBLACIÓN Y DIVERSOS RUBROS EN MEXICO.-

### Población en México.-

La población de México (Fig. 3.35), desde 1961 hasta 1997, registró un crecimiento prácticamente a ritmo uniforme, teniendo una ligera disminución en la rapidez de crecimiento a partir de 1981.

En la Fig. 3.36 se observa que la proporción de la población urbana aumentó casi linealmente hasta 1980, año a partir del cual creció más lentamente, habiéndose alcanzado un 73% del total. Lo anterior se debe a que elementos tales como fertilizantes, mecanización del campo, etc.; se encuentran casi totalmente desarrollados, teniendo como consecuencia que no se pueda liberar una mayor parte de la población de las labores agrícolas.

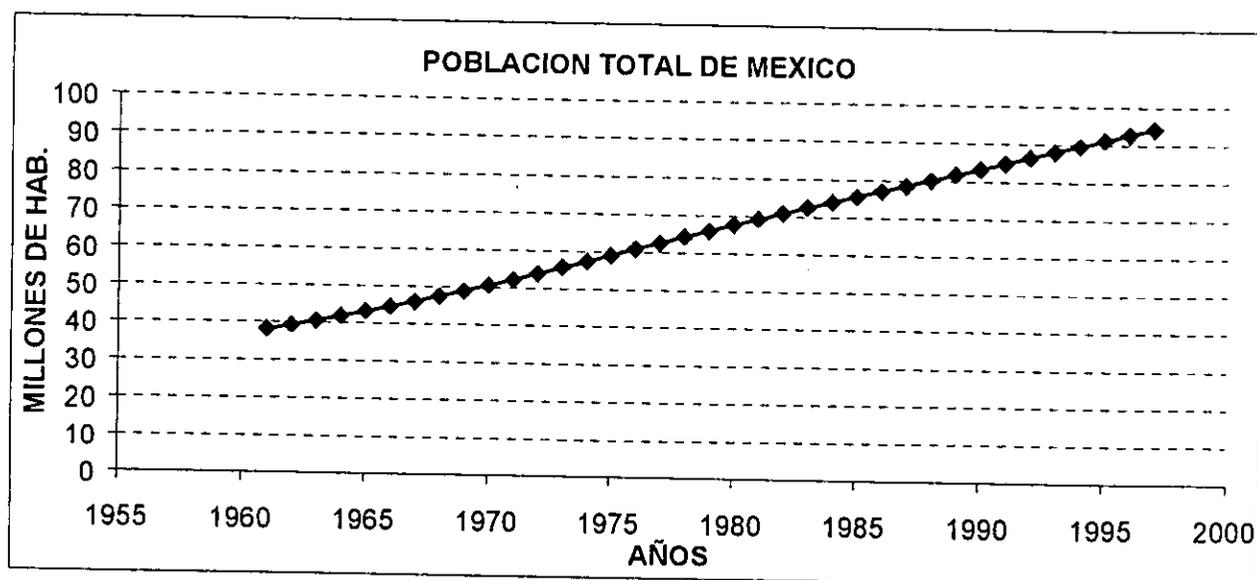


Fig. (3.35) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [35]

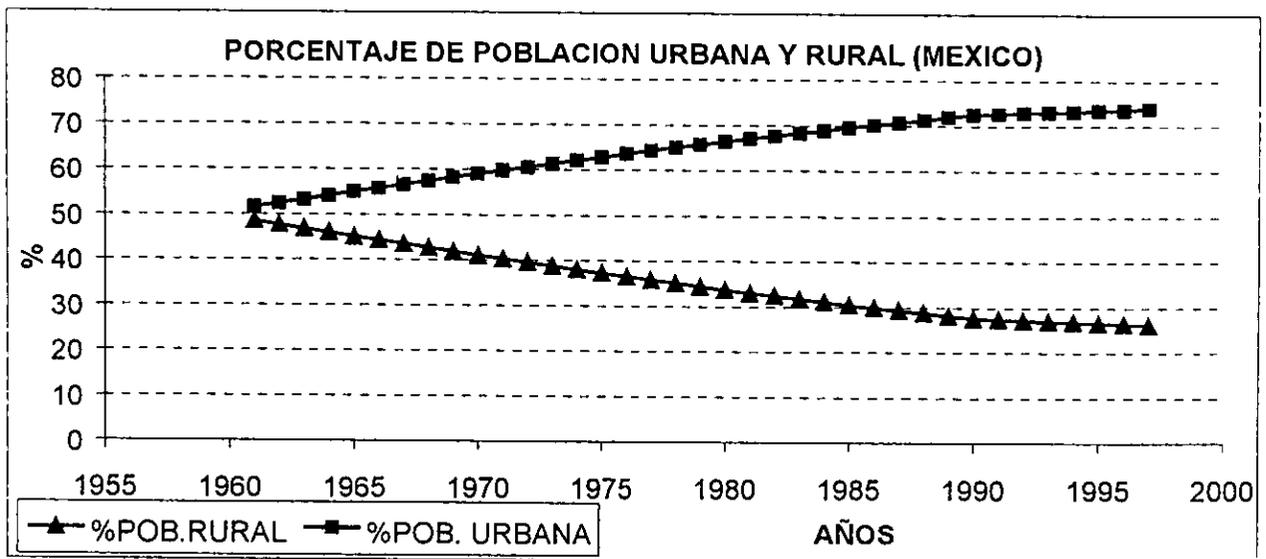


Fig. (3.36) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [35]

### Uso de tierras en México.-

En la Fig. 3.37 se puede observar que la tierra de uso agrícola en México, no ha tenido cambios relativos que sean significativos en los últimos 35 años; sin embargo cabe señalar que a partir de 1984 se comenzó a registrar un aumento. Este crecimiento sólo es posible a través del uso de tierras a las cuales anteriormente no se les utilizaba en alguna labor, tales como bosques y zonas selváticas (ya que también la tierra de pastura se incrementó en dicho periodo).

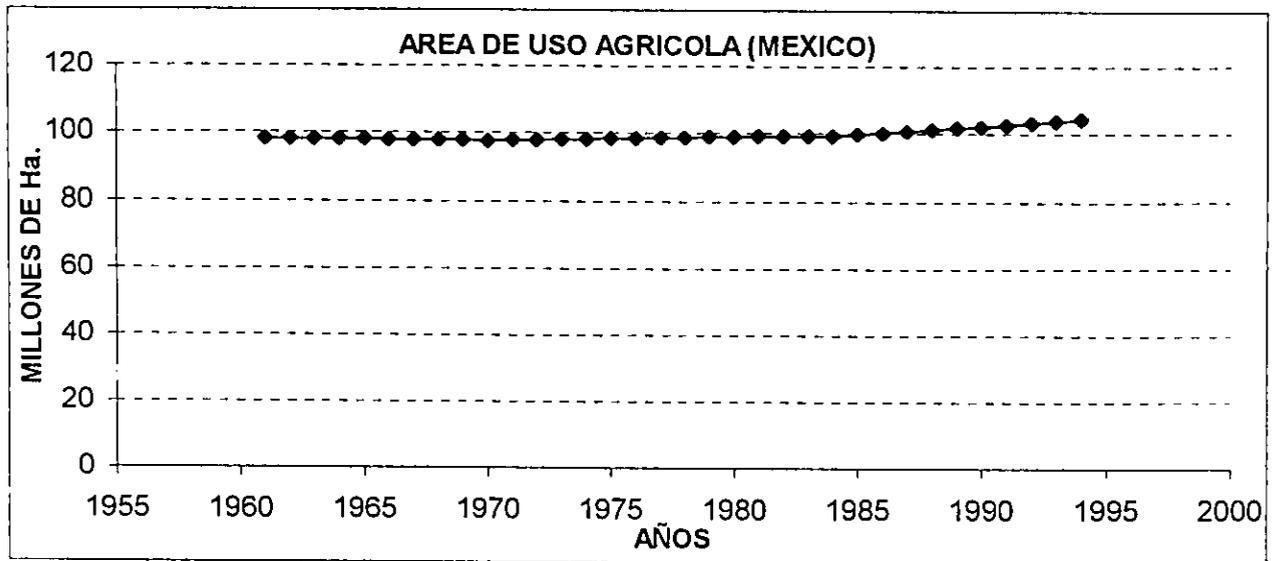


Fig. (3.37) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [36].

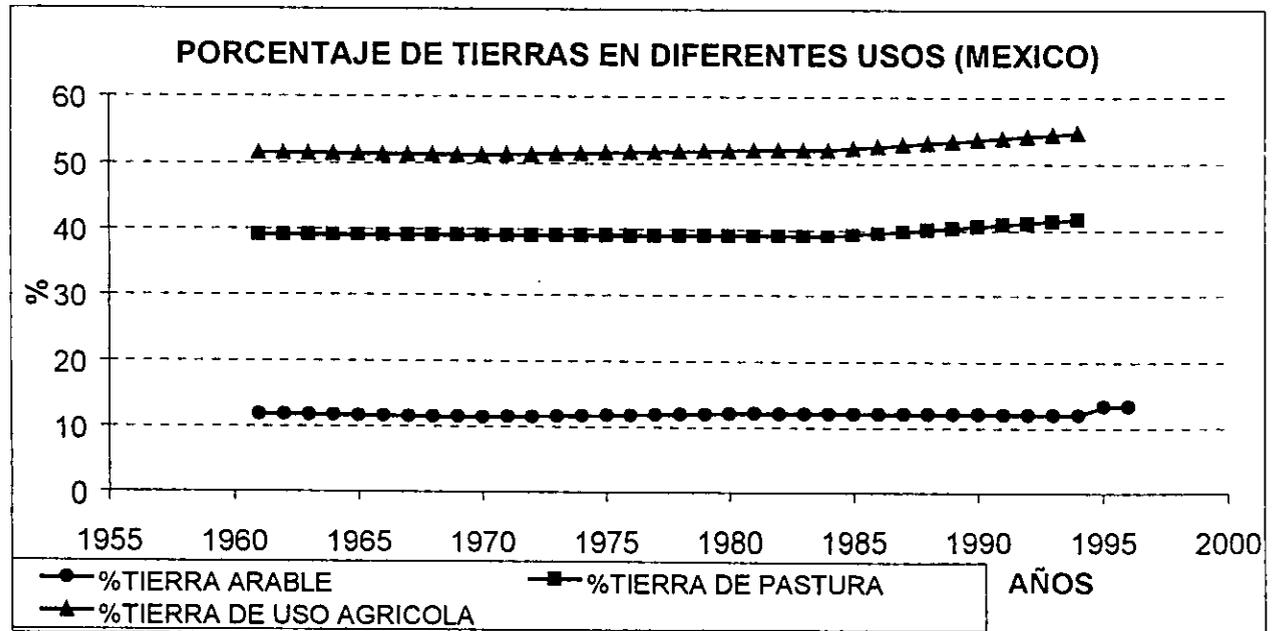


Fig. (3.38) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [36].

### Consumo de fertilizantes en México.-

En la Fig. 3.39, se observa que el consumo percápita anual de fertilizantes alcanzó su máximo en 1982, año a partir del cual comenzó a disminuir; en 1996 se tienen niveles de consumo percápita, similares a los que se tenían en 1974. Dado que las áreas percápita cultivadas, en general, se encuentran en disminución ú oscilando, se puede esperar que las producciones percápita comiencen a disminuir en los próximos años (tras un periodo de estabilización temporal).

### Tractores en uso, en México.-

En la Fig. 3.40, se muestra el número de tractores en operación; a partir de 1981 su rapidez de crecimiento comenzó a disminuir, de forma que a partir de 1991 la cantidad de tractores en operación permanece casi constante, en 175,000 unidades. En la Fig. 3.41, se muestra la densidad de tractores por área arable, el comportamiento es similar al número de tractores; excepto que a partir de 1994 se registro un aumento en la cantidad de tierra arable, de forma que la densidad de tractores disminuyó ligeramente.

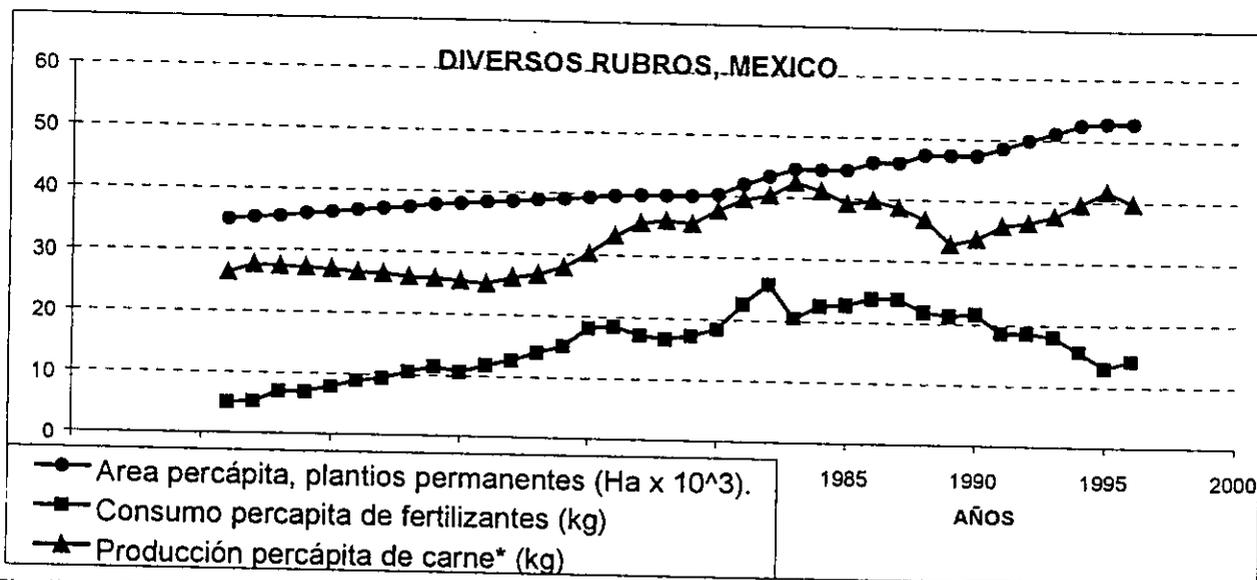


Fig. (3.39) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [35, 36, 38, 39]

Incluye todo tipo de carne, de animales terrestres (aves, porcinos, conejos, bovinos, etc.).

La cantidad de tractores en operación, permanece casi constante, de manera que al igual que a escala mundial, los tractores nuevos solamente alcanzan a sustituir a los que salen de operación por uno ú otro motivo.

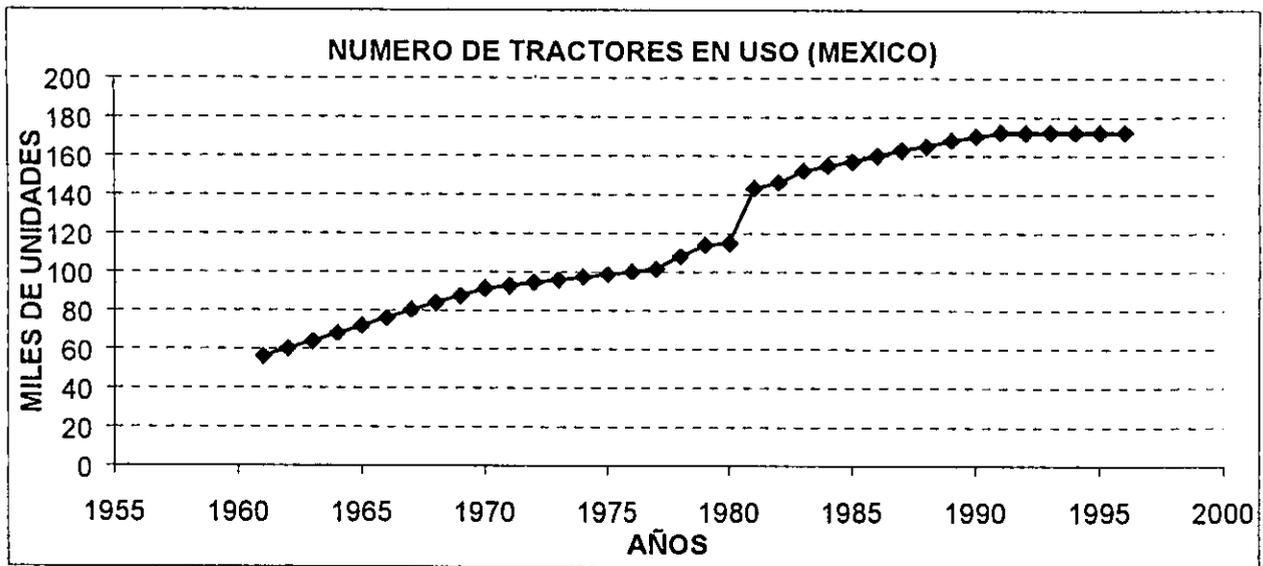


Fig. (3.40) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [38]

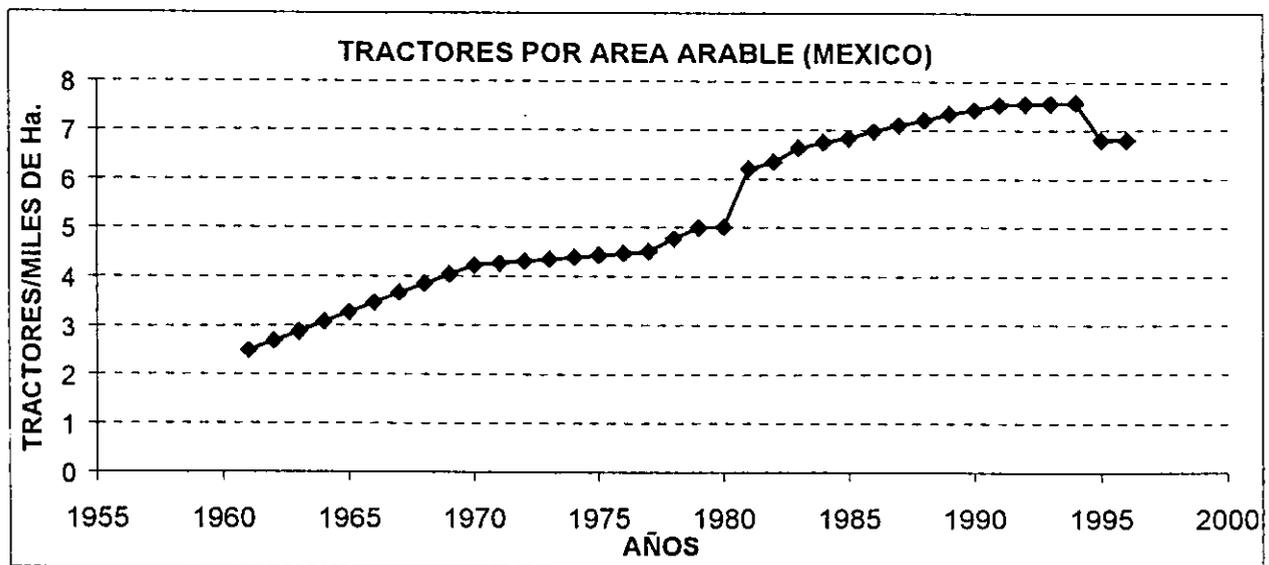


Fig. (3.41) Calculada y construida con datos obtenidos de ref. [36, 38]

## PRODUCCION DE ENERGIA EN MEXICO.-

### Producción total de energía primaria en México.-

La producción total de energía en México (Fig. 3.42), presentó un aumento acelerado hasta 1982, año a partir del cual se presentaron ciertas oscilaciones irregulares entre 3.4 y 4 millones de barriles equivalentes diarios; esto tiene como consecuencia que en promedio la producción per cápita haya disminuido a partir de 1983.

La producción diaria de crudo (Fig. 3.43), presentó de forma similar a la producción total de energía primaria, presentó un crecimiento acelerado hasta 1982, año a partir del cual tuvo oscilaciones irregulares entre 3.1 y 3.4 millones de barriles diarios.

Gran parte de la producción total de energía primaria, está formada por petróleo (en 1997 aproximadamente el 75% de la producción total, estuvo constituida por petróleo), además se exporta una parte apreciable de la producción de crudo (en 1997, el 36.66% de la producción fue exportada).

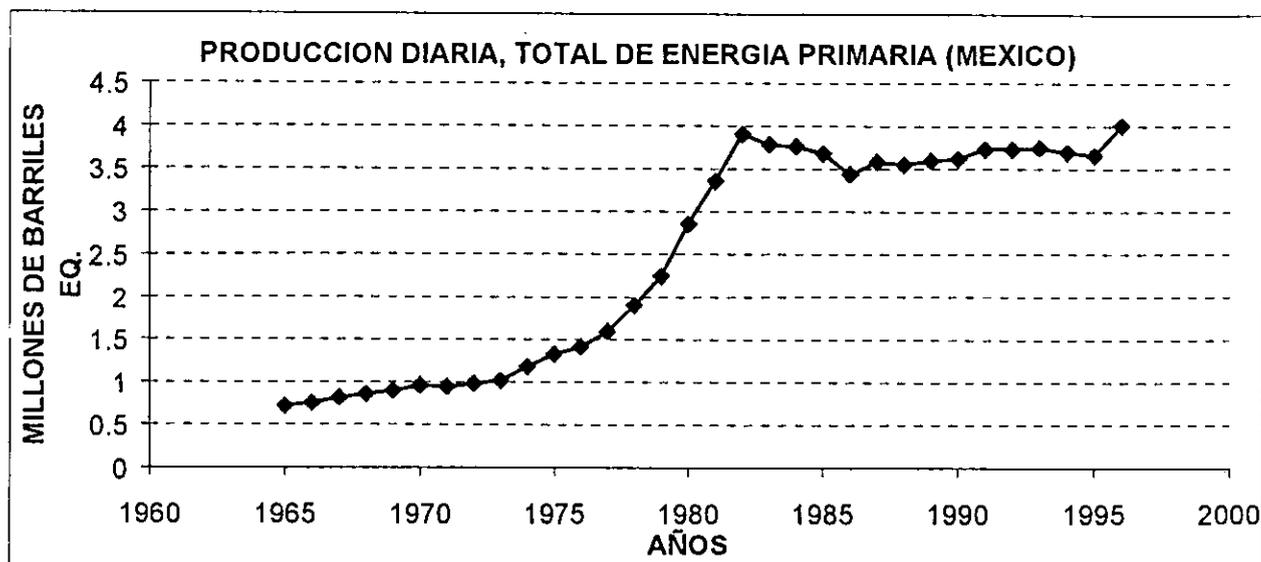


Fig. (3.42) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [9.]

Si se mantuviera constante la producción de petróleo de 1997 (3.03 millones de barriles por día) y dado que las reservas de petróleo se estiman en  $48.8 \times 10^9$  barriles [6.], en el año 2040 quedarían agotadas las reservas de petróleo. Si se considera que el consumo aumentará al mismo ritmo que el registrado entre los años 1996 y 1997, las reservas nacionales de petróleo quedarían agotadas aproximadamente en el 2023.

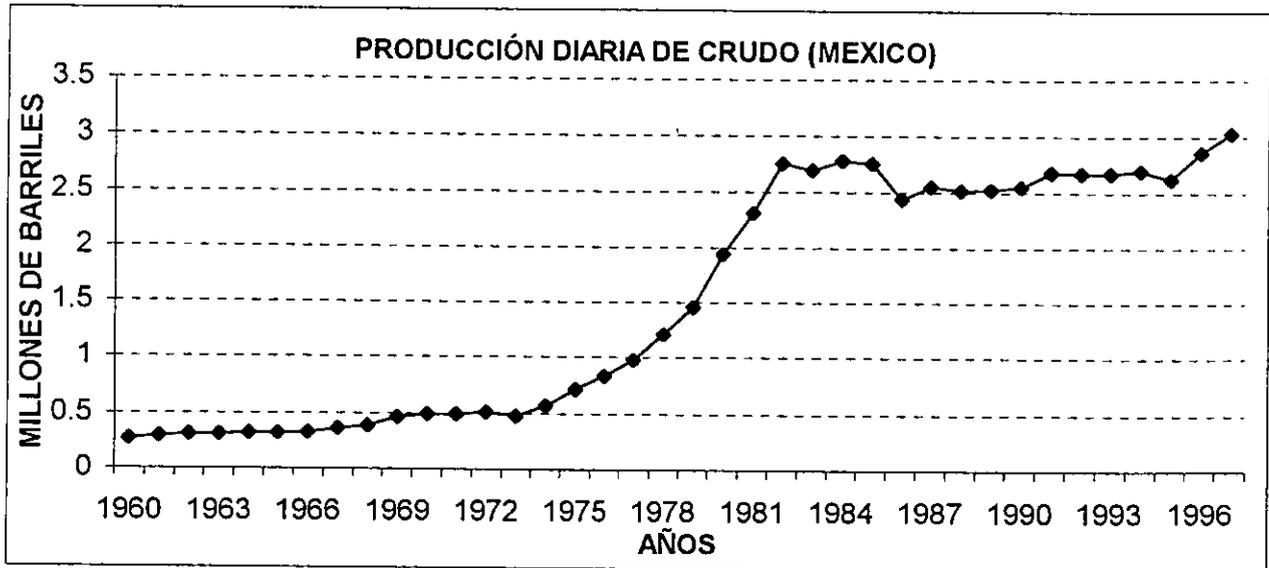


Fig. (3.43) Construida a partir de datos obtenidos de ref. [6.].

### Producción diaria de carbón mineral.-

La producción de carbón mineral en México (Fig. 3.44), ha crecido presentando oscilaciones alrededor de una trayectoria de crecimiento uniforme. En 1995 la contribución de la oferta de carbón, respecto a la oferta total de energía, era del 3.2%.

Si se considera que la producción de carbón se mantendrá al mismo ritmo que en el año 1997 (85.9 millones de barriles eq. diarios ó 10 millones de Ton. Cortas anuales) y que las reservas de carbón mineral son de 1335 millones de Ton. cortas (al Dic. 31 de 1993) [6.], aproximadamente en el 2128 quedarían agotadas las reservas de carbón mineral.

La gran duración de las reservas, no se debe a que el carbón mineral sea muy abundante, sino a la baja explotación que tienen los yacimientos; por ejemplo: en el caso ficticio de que la producción de carbón, a partir de 1996 hubiera aumentado repentinamente hasta ser

un 22% de la producción total de energía, manteniéndose constante éste ritmo de explotación, en el año 2009 quedarían agotadas las reservas de carbón.

Con todo lo anterior, se deduce que no se puede esperar un aumento considerable de la contribución de éste energético a la oferta total de energía. Más aún, la oferta diaria de leña sobrepasa a la de carbón mineral en el periodo 1965-1996, véanse Figs. 3.44 y 3.46. Y el riesgo real en México es la deforestación.

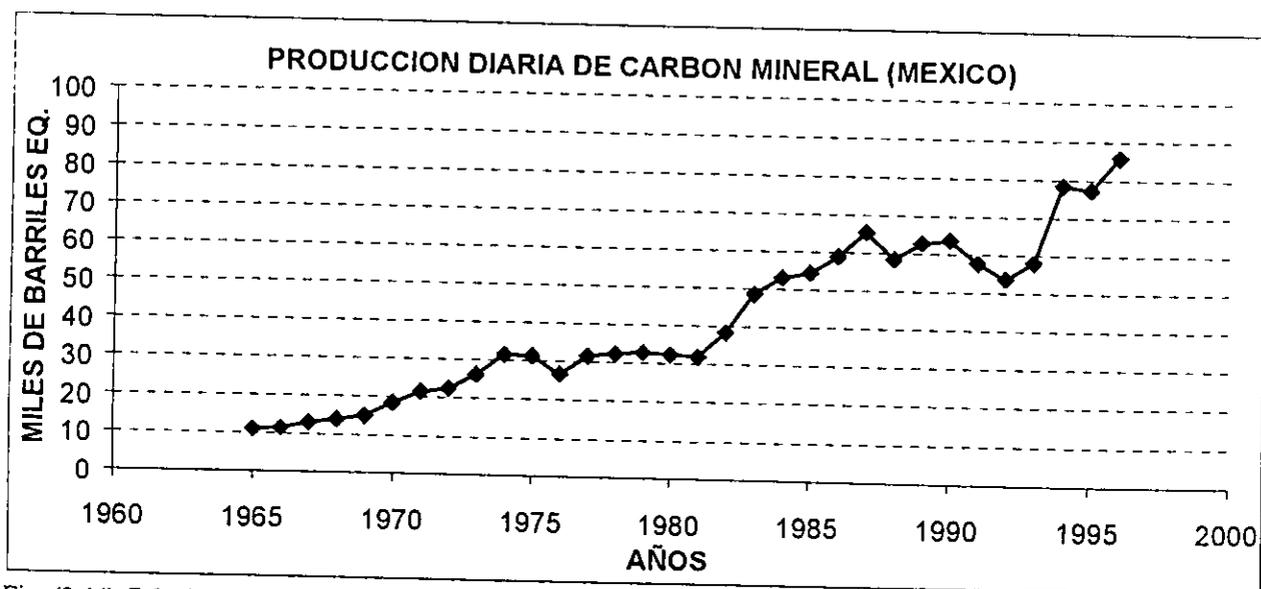


Fig. (3.44) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [9.]

### Producción diaria de gas natural en México.-

En la Fig. 3.45, se puede observar la producción de gas asociado y no asociado a la extracción de petróleo; gran parte del gas proviene de la explotación de pozos secos, su producción ha tenido un comportamiento muy similar a la total de energía, ya que a partir de 1982 se registraron ciertas oscilaciones y se muestra una disminución de la producción per cápita.

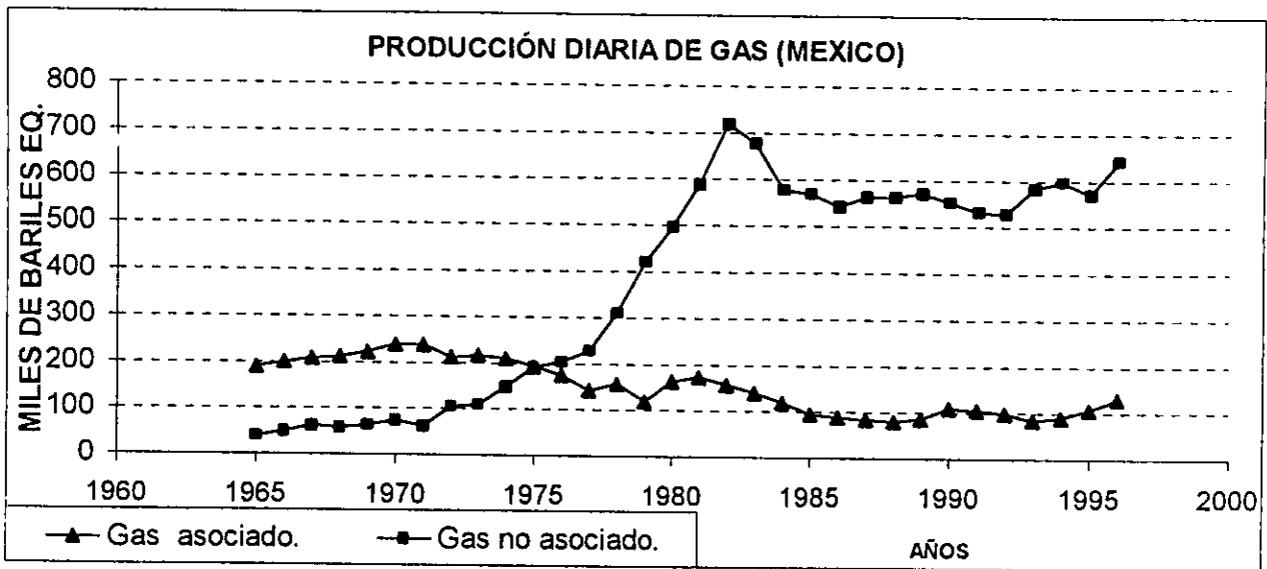


Fig. (3.45) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [9.]

La producción total de gas en 1996, fue el 19.24% de la producción total de energía. Si se mantuviera constante el ritmo de consumo que se tuvo en 1996 (769.58 miles de barriles eq. diarios ó  $1357 \times 10^9$  pies<sup>3</sup> anuales), las reservas totales de gas natural ( $63.9 \times 10^{12}$  pies<sup>3</sup>, al 1 de Enero de 1997) [6.], quedarían agotadas en el año 2044. Si se considera que la producción total de gas natural, seguirá aumentando al ritmo presentado entre los años 1994 y 1996, entonces en el 2020 quedarían agotadas las reservas de gas natural.

### Producción de energía renovable en México.-

La generación de electricidad por medio de hidroeléctricas (Fig. 3.46), ha presentado oscilaciones en todo el periodo estudiado, las cuales se encuentran sobre una tendencia media que aumenta cada vez a un ritmo menor. Lo anterior indica: a) las oscilaciones principalmente son consecuencia de las variaciones naturales en las lluvias y en la explotación del recurso, b) La tendencia media es consecuencia de las limitaciones físicas existentes para la construcción de nuevas plantas de generación. Todo esto en conjunto indica que en un futuro cercano, se tendrá una generación de electricidad por medio de hidroeléctricas relativamente constante, con oscilaciones que dependerán básicamente de situaciones climáticas.

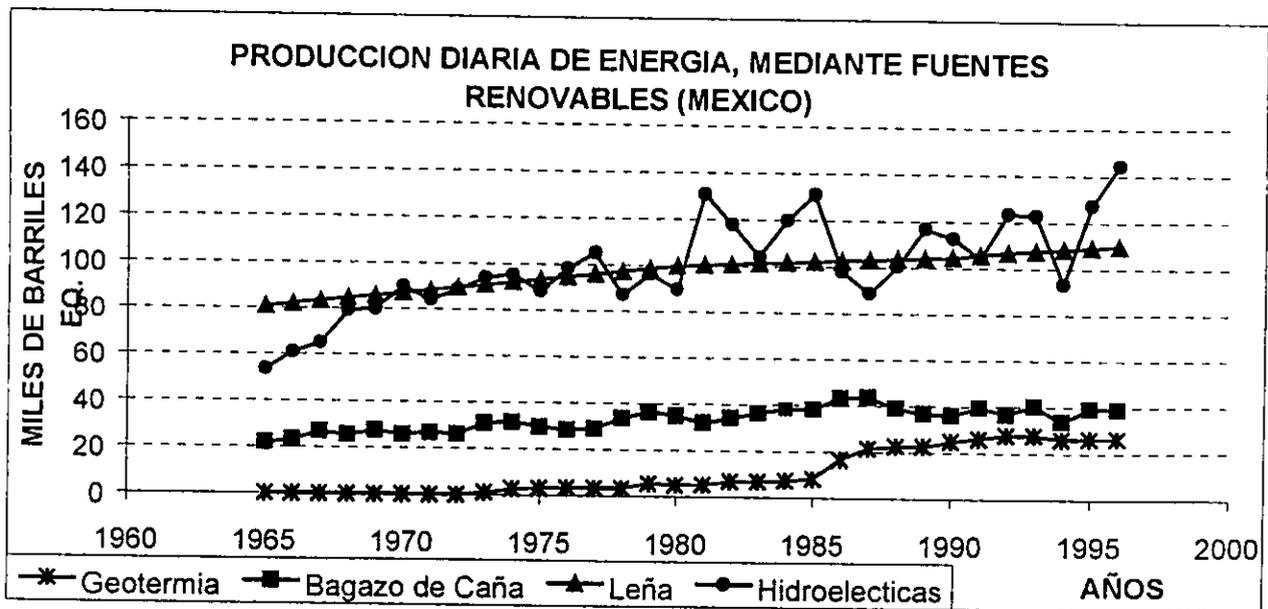


Fig. (3.46) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [9.]

La generación de electricidad por medio de geotermia (Fig. 3.46), muestra una clara estabilización a partir de 1987, presentando ciertas oscilaciones de menor magnitud relativa que las presentadas en el caso de las hidroeléctricas. Lo anterior se debe a que la capacidad instalada de las plantas geotérmicas es prácticamente constante a partir de 1987, de manera que las oscilaciones son sólo el resultado de paros por mantenimiento, fallas repentinas, etc.

El bagazo de caña (Fig. 3.46) muestra cierta estabilización a partir de 1983 al presentar oscilaciones alrededor de un valor fijo. Como se ha visto anteriormente, las producciones agrícolas en México en general se encuentran oscilando ó disminuyendo; esto concuerda con el hecho de que el aporte de energía por parte del bagazo de caña es relativamente constante desde 1983.

El aporte de energía por medio de leña (Fig. 3.46), ha presentado un crecimiento en todo el periodo estudiado, sin embargo lo hace a ritmos cada vez menores. Esto es consecuencia de las limitaciones en la disponibilidad de éste recurso; dado que su naturaleza es forestal, su comportamiento es muy parecido a los productos del campo, por ello presenta un crecimiento con síntomas de saturación del sistema.

La producción de leña es comparable e incluso superior en todo el periodo estudiado, a la producción de carbón mineral; esto tiene como consecuencia que sea muy importante el manejo adecuado de este recurso renovable, ya que es parte importante del consumo energético de comunidades rurales y del consumo no energético de industrias, pudiéndose llegar a alteraciones ecológicas no reversibles si no se maneja de forma adecuada cuando los combustibles fósiles comiencen a agotarse.

## CONSUMO DE ENERGÍA EN MÉXICO.-

### Consumo total y final de energía en México.-

El consumo total diario de energía en México (Fig. 3.47), muestra un crecimiento acelerado en el periodo 1965-1982, a partir del cual osciló sobre una trayectoria de crecimiento uniforme. El consumo total per cápita de energía (Fig. 3.48), tuvo un crecimiento acelerado en el mismo periodo, a partir del cual ha oscilado alrededor de un valor cercano a 4.5 lts, equivalentes de petróleo per cápita diarios. La estabilización del consumo per cápita coincide con la crisis económica en México de 1982; esto puede interpretarse de la siguiente manera: A partir de 1982 se han presentado una serie de devaluaciones y crisis económicas que han limitado el crecimiento del país en diversos aspectos, tales como industria, agricultura, educación, etc.; esto se ve reflejado en una estabilización per cápita del consumo de energía, al no poder crecer en relación con la población la cantidad de industrias, maquinaria para el campo, etc., Todo esto en conjunto indica que los recursos energéticos para la realización de inversiones en diferentes rubros, se encuentra limitados ya que sólo se mantienen constantes por unidad de habitantes.

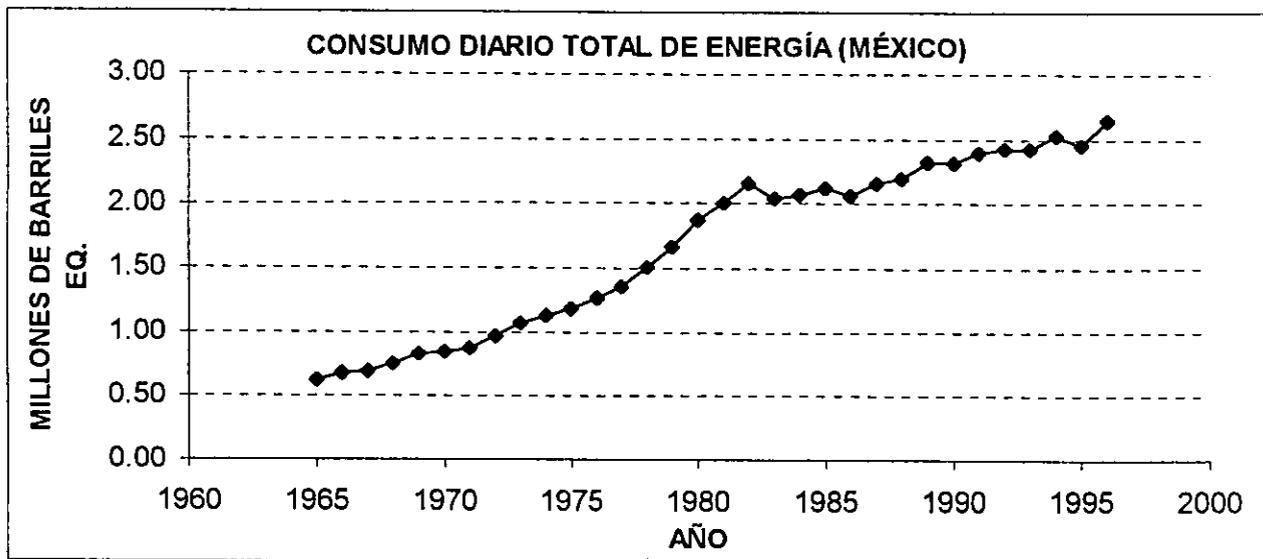


Fig. (3.47) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9.]

El consumo final de energía en México (Fig. 3.49), osciló alrededor de una trayectoria de crecimiento uniforme durante el periodo 1965-1996; sin embargo se pueden observar dos periodos diferentes: el primero de 1965 a 1982, caracterizado por un crecimiento acelerado; el segundo de 1983 a 1996, caracterizado por una ligera desaceleración en el crecimiento; los dos periodos se pueden ajustar con ciertas oscilaciones, a un crecimiento casi uniforme. De forma similar al consumo total de energía, se observa una disminución en la disponibilidad de los recursos energéticos, a partir de 1983.

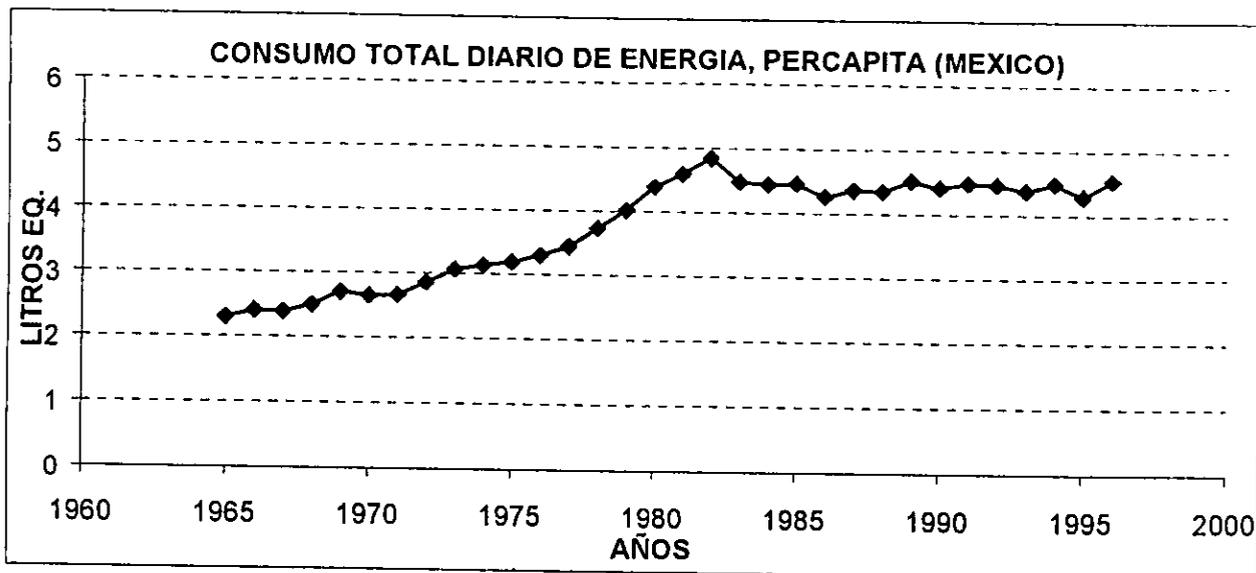


Fig. (3.48) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

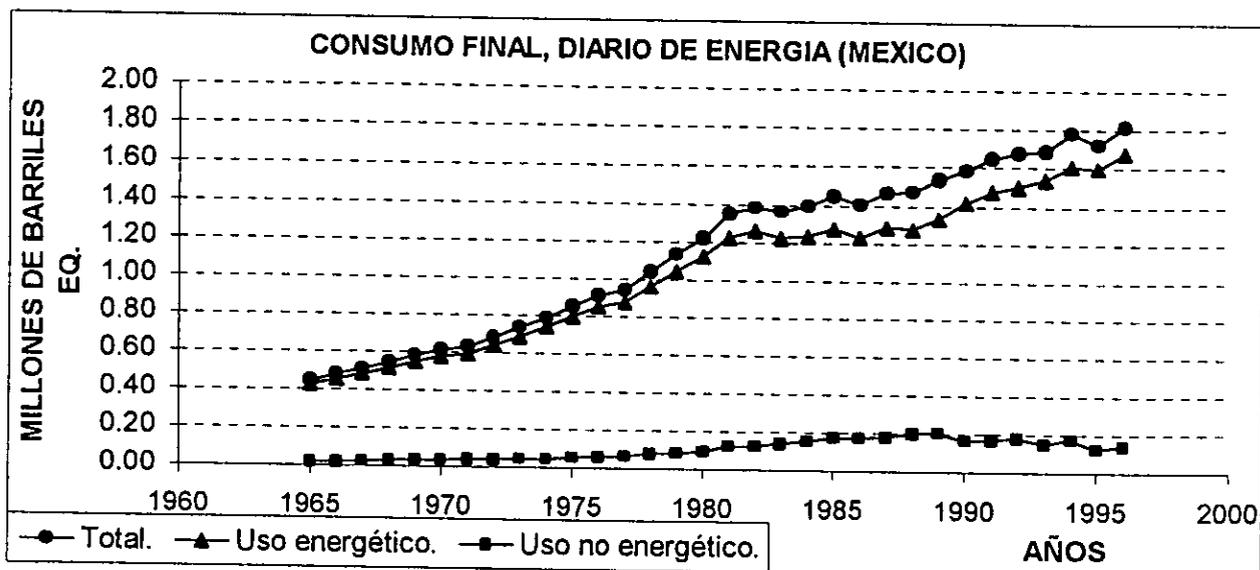


Fig. (3.49) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

Gran parte del consumo final de energía (Fig. 3.49) es para uso energético (en 1996, el 92% se utilizó para éste fin), de forma que el resto se utiliza para la producción de diversos materiales, tales como cauchos, poliéster, etc.; sin embargo esto muestra que aunque la fracción de uso no energético es relativamente pequeña, también será afectada en el momento en que los energéticos se agoten, al tenerse un aumento de precios por la escasez de materia prima para su fabricación. El consumo no energético, llegó a un máximo en 1989 y a partir entonces se encuentra en disminución, pudiéndose interpretar como una reducción de la fabricación de productos derivados del petróleo, tales como polímeros y fibras sintéticas, aceites, etc.

### Consumo de petróleo en México.-

El consumo de petróleo en México (Fig. 3.50), forma una parte importante del consumo total de energía (en 1996 el 71.97% del consumo total, estuvo formado por petróleo). Esto muestra que el petróleo tiene un papel muy importante, al permitir realizar la mayoría de las labores energéticas del país. Es de vital importancia el manejo de forma adecuada del consumo interior y de las exportaciones de petróleo, ya que cuando las reservas nacionales se encuentren casi agotadas, se debe contar con una infraestructura que permita la generación de energía renovable, de forma sustentable e independiente, que asegure el futuro del país.

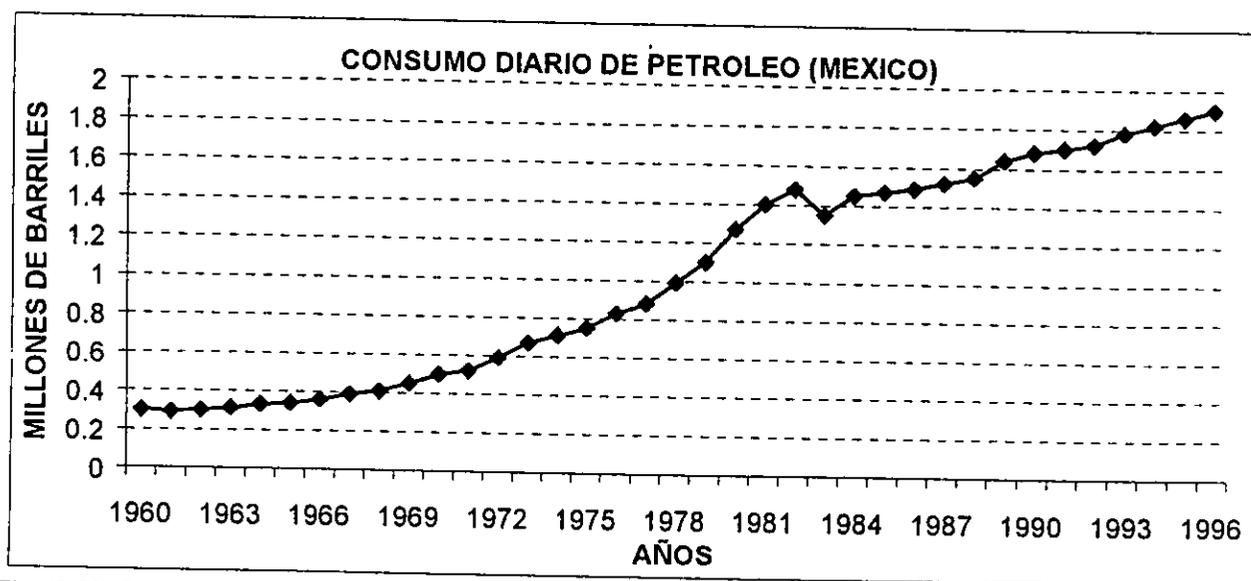


Fig. (3.50) Calculada y construida a partir de datos proporcionado [6.].

### Consumo de energía del sector transporte, en México.-

El consumo de energía del sector transporte en México (Fig. 3.51), tuvo un crecimiento acelerado durante el periodo 1965-1981, a partir del cual presentó estabilizaciones y crecimientos con desaceleración; en conjunto los dos periodos de crecimiento, oscilan alrededor de una trayectoria de crecimiento uniforme. La mayoría de la energía utilizada en este sector proviene de derivados del petróleo, tales como la gasolina y el diesel (Fig. 3.51), mientras que una parte menor proviene de otro tipo de combustibles tales como gas y electricidad (Fig. 3.52). En 1996 éste sector consumió el 24.34% del total nacional.

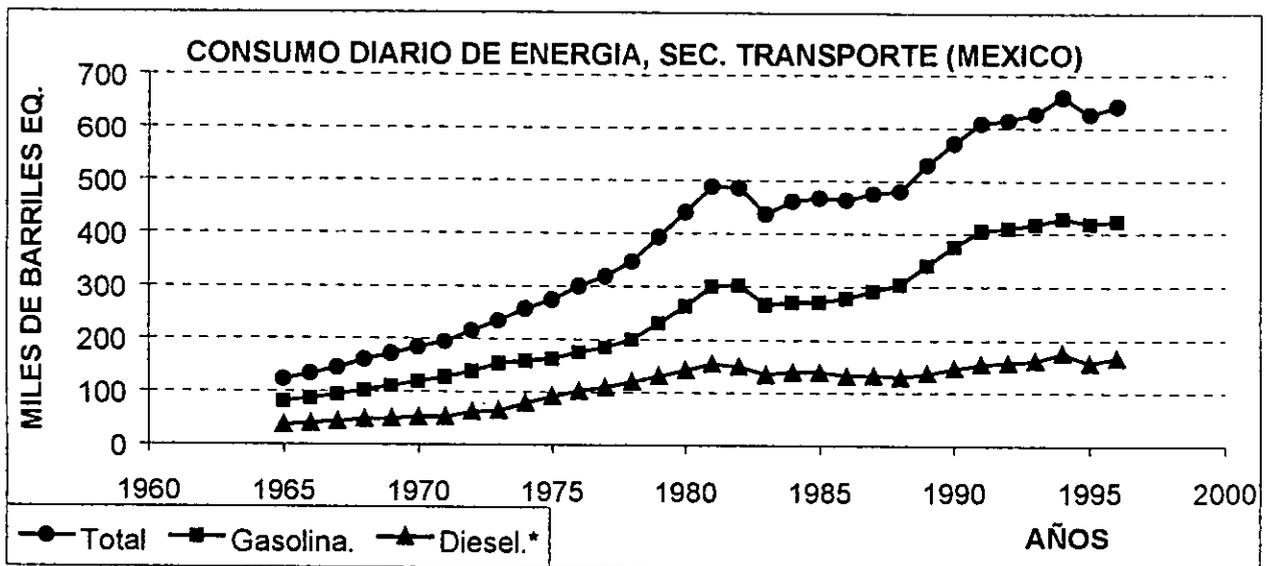


Fig. (3.51) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9.]

\* A partir de 1991 incluye gasóleo industrial.

Gran parte del consumo de éste sector se debe al autotransporte (en 1996 el 89.82% corresponde a éste, calculado con datos obtenidos de ref. [9.]), por lo cual será más susceptible a la escasez de energéticos, además es en él donde se pueden implementar sistemas de ahorro de energía, alternativas energéticas y/o cambios en el sistema de transporte. Dado que gran parte de los alimentos, mercancías y personas, se transportan en el interior del país por medio del mismo, es esencial que se estudie este aspecto detalladamente para encontrar alternativas de transporte más eficientes y sustentables a largo plazo. Por otra parte, se puede observar que el consumo de gasolina y diesel se

encuentra relativamente estable a partir de 1991, esto podría indicar que el parque vehicular no ha aumentado considerablemente a partir de dicha fecha, siendo algo similar a lo que sucede con el número de tractores en uso en el país.

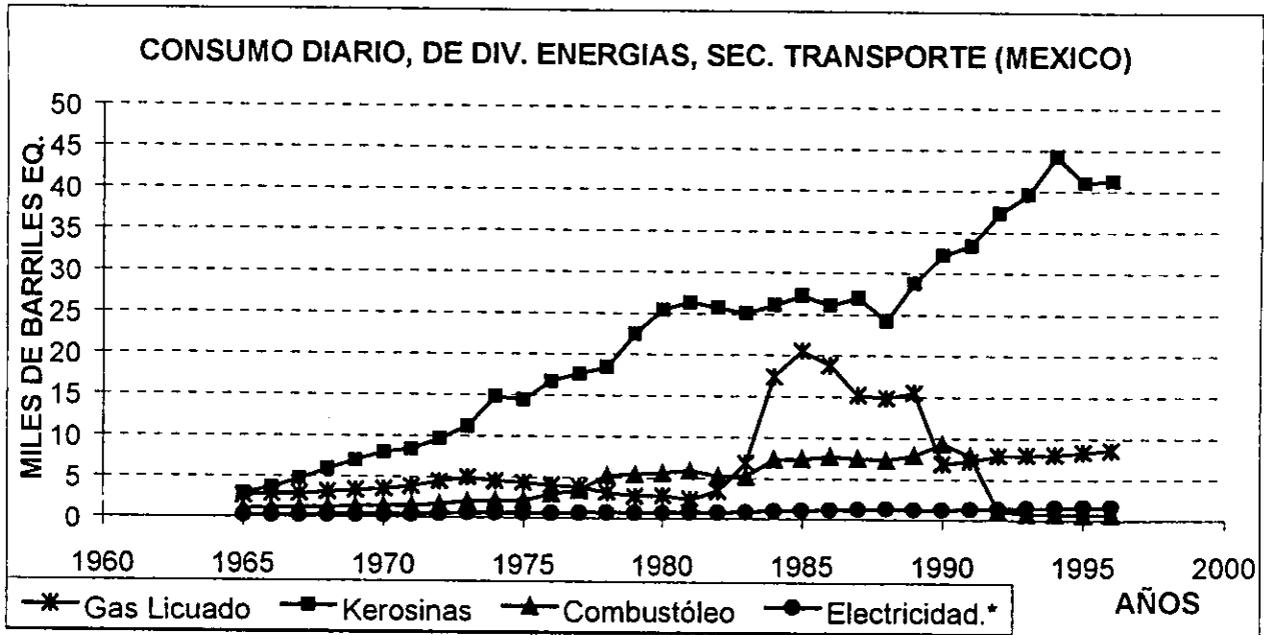


Fig. (3.52) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref. [9].

\* No incluye la autogeneración de electricidad.

### Consumo de energía del sector residencial, en México.-

El consumo de energía del sector residencial (Fig. 3.53), ha aumentado de forma relativamente uniforme durante el período 1965-1996 (en 1996, este sector consumió el 13.03% del total nacional); sin embargo se puede observar que a pesar de este aumento, el consumo per cápita (Fig. 3.54) se ha incrementado a ritmo muy lento (20% en 30 años). Lo anterior implica que a pesar del desarrollo de sistemas de distribución de electricidad, gas natural y licuado, etc., la energía disponible para uso doméstico sigue teniendo niveles muy similares a los presentados hace 30 años.

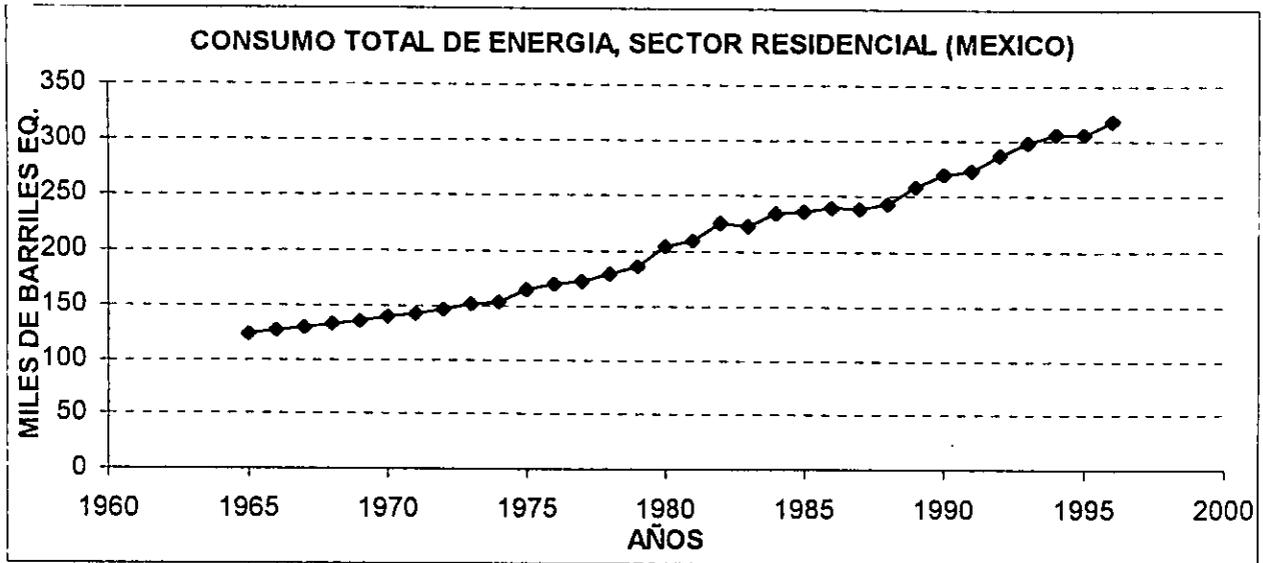


Fig. (3.53) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9.].

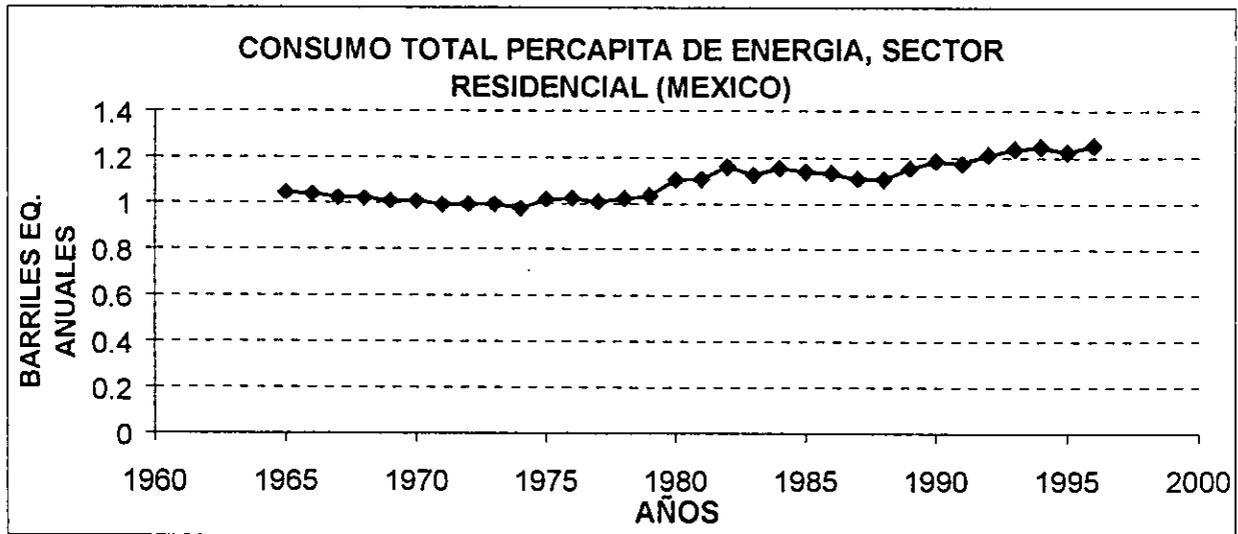


Fig. (3.54) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9., 35].

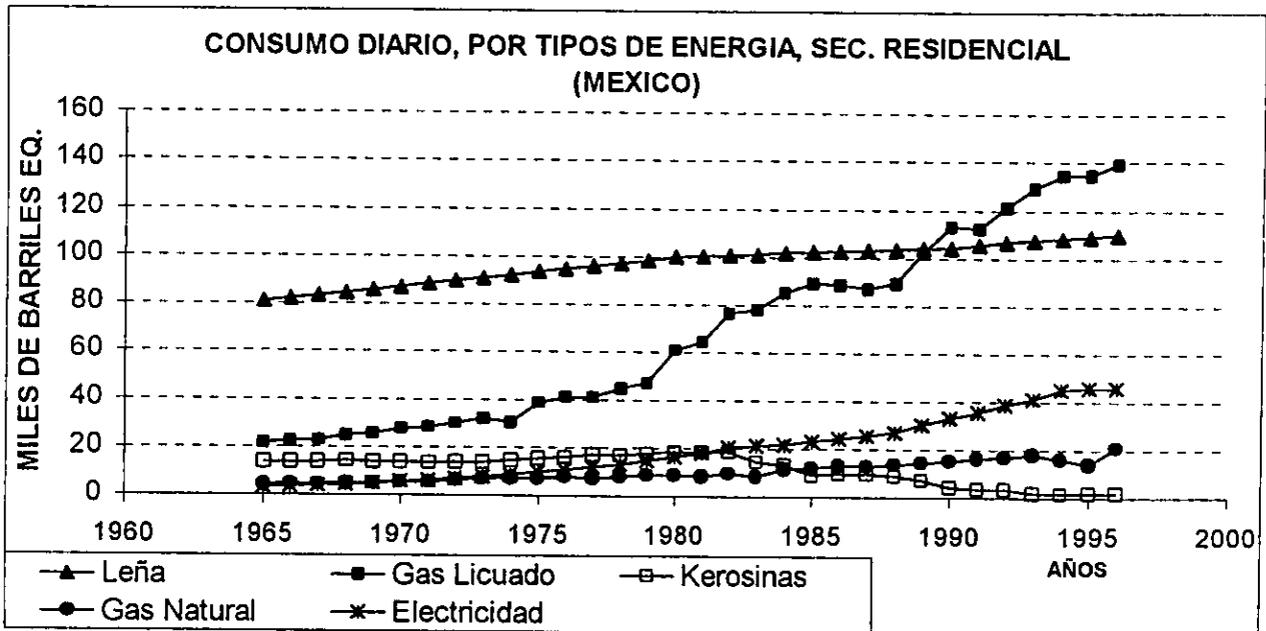


Fig. (3.55) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9.].

En lo que respecta al tipo de combustible utilizado por el sector residencial (Fig. 3.55), tanto el gas licuado, como la leña constituyen una parte importante del total. La leña es una fracción apreciable del consumo de las comunidades rurales, esto se debe a la propia naturaleza de la disponibilidad de este recurso, prácticamente la totalidad de la producción de leña se utiliza en este sector (ver Fig. 3.55 y 3.46). El gas licuado presenta un incremento con desaceleración, de forma que se puede esperar se estabilice en un valor cercano a 170,000 barriles eq. diarios. El consumo de gas natural y de Kerosinas, es muy pequeño en comparación con el resto de los combustibles. Por otra parte se puede observar un aumento apreciable en el consumo de electricidad, sin embargo a partir de 1994 ha permanecido prácticamente constante.

### Consumo de energía del sector comercial, en México.-

El consumo de energía del sector comercial (Fig. 3.56), osciló alrededor de una trayectoria de crecimiento uniforme durante el periodo 1965-1987. El consumo de gas licuado (Fig. 3.57) aumentó considerablemente en el periodo 1989-1994, a partir del cual su ritmo de crecimiento disminuyó, de manera que se puede esperar que en el futuro aumente a un ritmo menor. El consumo de electricidad (Fig. 3.57) creció hasta 1994, año en el cual comenzó a disminuir; cabe señalar que en todo el periodo estudiado no se habían registrado disminuciones en dos años simultáneos, excepto a partir de 1994, esto puede indicar una dificultad del sistema para continuar aumentando al mismo ritmo que en periodos anteriores, de manera que se puede esperar que el crecimiento en el futuro sea menor. El consumo de diesel disminuyó súbitamente a la par que el combustóleo aumentó en 1984, posteriormente éste disminuyó cuando el consumo de gas licuado registró un aumento (Fig. 3.57); esto indica que el diesel fue sustituido inicialmente por el combustóleo y posteriormente por el gas natural.

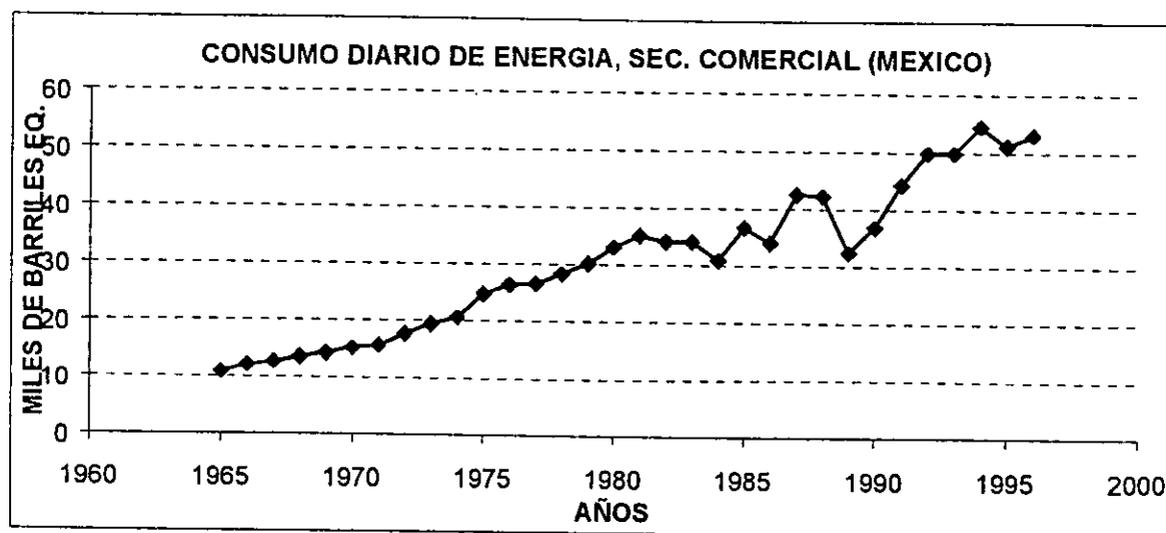


Fig. (3.56) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

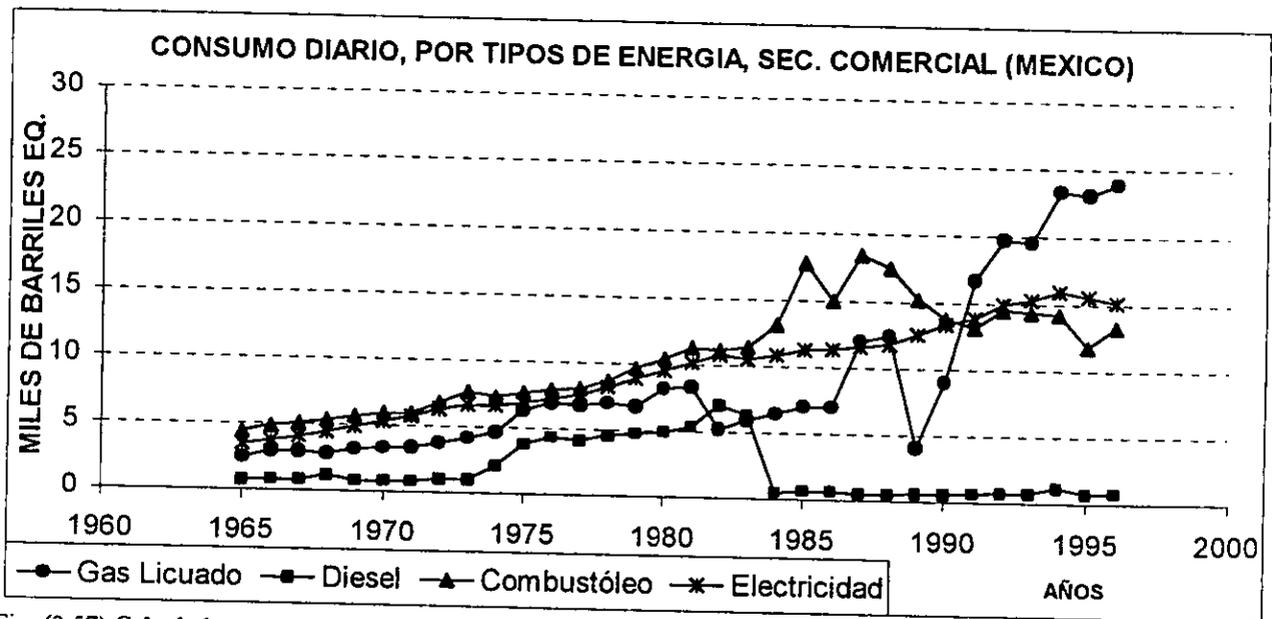


Fig. (3.57) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

### Consumo de energía de sector industrial en México.-

El consumo del sector industrial en México (Fig. 3.58), tuvo un crecimiento con cierta aceleración durante el periodo 1965-1983, a partir del cual hubo un periodo de estabilización con ciertas oscilaciones hasta 1993, posteriormente se han registrado crecimientos con aceleración. El crecimiento registrado en las últimas fechas comenzó en 1994, lo cual coincide con una devaluación registrada en dicha fecha; esto indica que muy probablemente este crecimiento en el consumo se debió principalmente a industrias extranjeras, ya que son las que han tenido una mayor capacidad para realizar inversiones a pesar de la crisis económica presentada.

El consumo de gas natural (Fig. 3.59), tuvo un aumento importante desde 1965 hasta 1983, posteriormente presentó ciertas oscilaciones, de manera que en 1996 se tienen niveles de consumo similares a los presentados en 1983. El consumo de combustóleo (Fig. 3.59), aumentó en el periodo 1965-1985, a partir del cual presenta ciertas oscilaciones alrededor de un valor cercano a 100,000 barriles equivalentes diarios. El consumo de gas seco, no asociado a la extracción de petróleo (Fig. 3.59), ha oscilado de manera irregular entre 55,000 y 10,000 barriles eq. diarios durante todo el periodo estudiado. El consumo de

electricidad (Fig. 3.59), ha aumentado su ritmo de crecimiento durante el periodo 1965-1996, se puede esperar que esta tendencia continúe ya que además de contarse con el suministro de C.F.E, también se están promoviendo sistemas de cogeneración, porteo de energía, etc.; sin embargo necesariamente esta tendencia en el futuro deberá disminuir, debido a las limitaciones naturales en la disponibilidad de éste recurso.

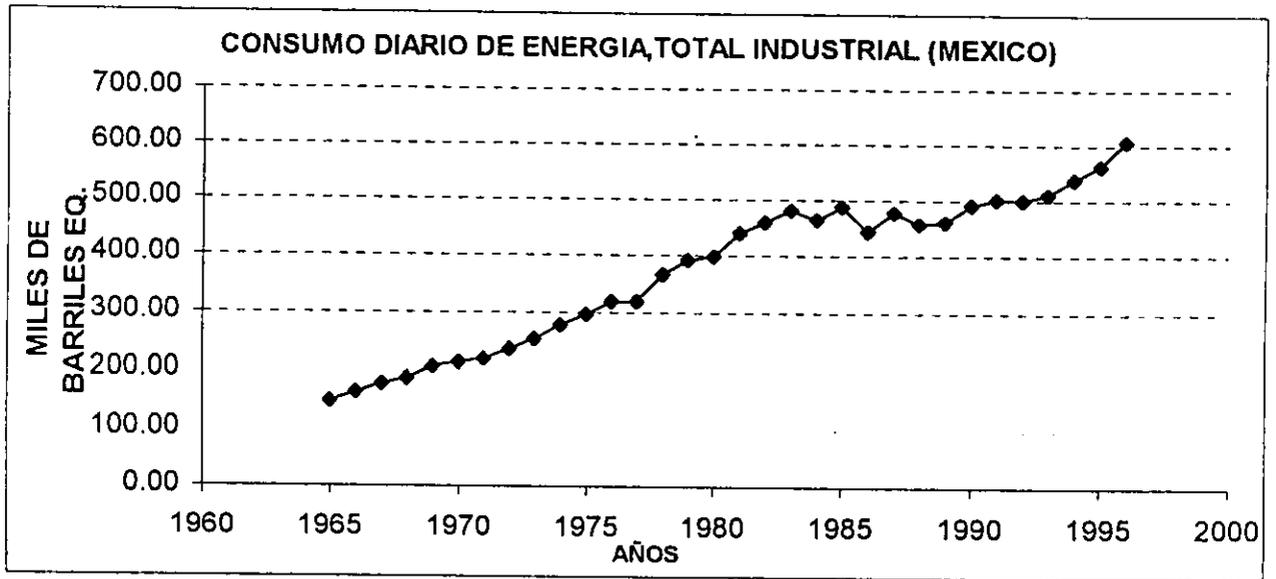


Fig. (3.58) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9.].

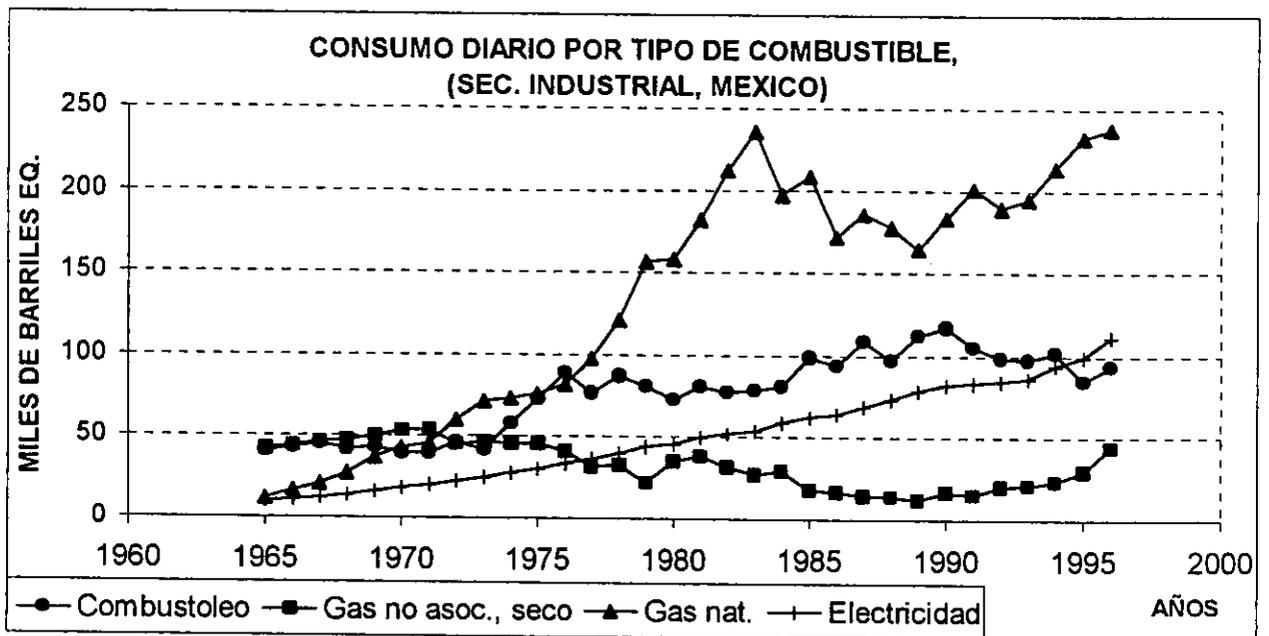


Fig. (3.59) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9.].

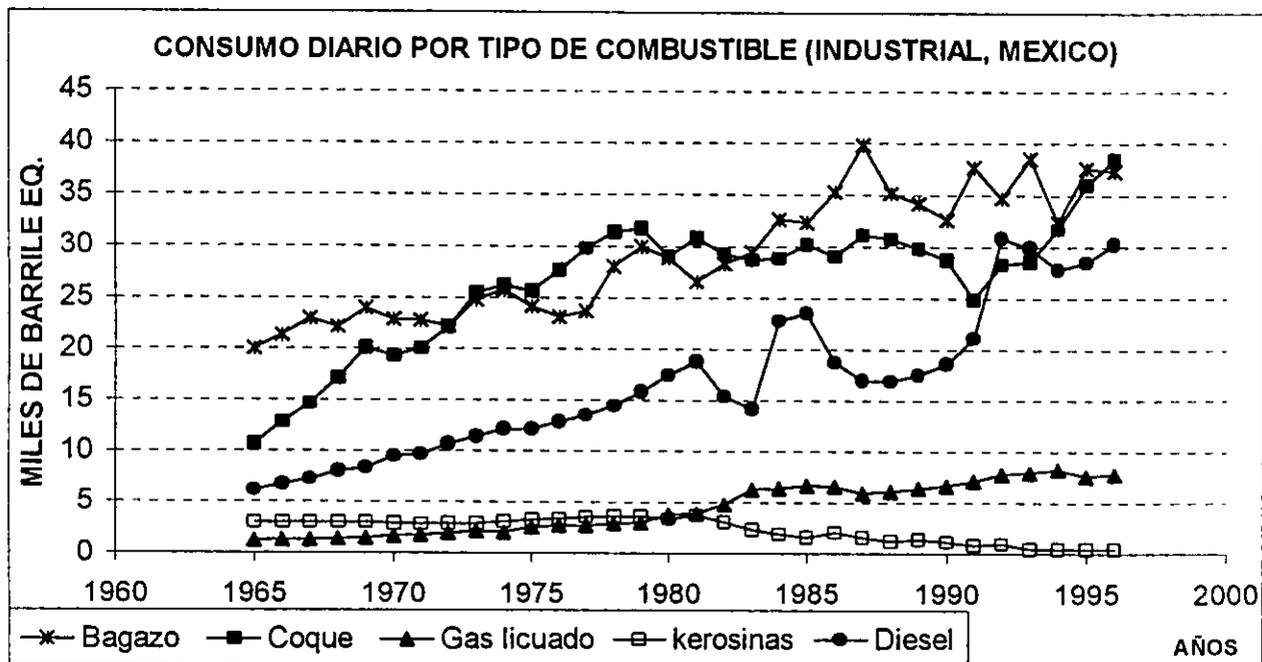


Fig. (3.60) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

El bagazo de caña (Fig. 3.60), es utilizado prácticamente en su totalidad por la industria azucarera, de forma que el uso de éste recurso para otros fines, queda totalmente descartado ya que se está utilizando para la fabricación de azúcar. El consumo de coque (Fig. 3.60), aumentó de 1965 a 1977, año a partir del cual se registró un periodo de oscilaciones alrededor de un valor aproximado de 30,000 barriles equivalentes diarios, a partir de 1991 se ha registrado un aumento en su consumo; la mayor parte del coque de éste sector, es utilizado en la industria siderúrgica (en 1996 cerca del 95% se usó en la siderurgia, calculado con datos obtenidos de [9.]); el consumo de coque (Fig. 3.60), ha crecido siguiendo una trayectoria de crecimiento uniforme, sin embargo lo hace con oscilaciones amplias e irregulares. El consumo de diesel (Fig. 3.60), ha presentado aumentos en todo el periodo estudiado, sin embargo su aportación a este sector es muy pequeña en comparación con otros combustibles; por otra parte el consumo de kerosinas (Fig. 3.60), se mantuvo relativamente estable en el periodo 1965-1981, a partir del cual comenzó a disminuir de forma que para 1993 el consumo es prácticamente nulo; ya que la disminución del consumo de kerosinas coincide con el aumento en el consumo de diesel, esto pudiera indicar que las kerosinas fueron sustituidas principalmente por el diesel.

### Consumo del sector agropecuario en México.-

El consumo total del sector agropecuario (Fig. 3.61), tuvo un crecimiento con cierta aceleración en el periodo 1965-1982, a partir de entonces presenta oscilaciones irregulares alrededor de un valor aproximado de 43,000 barriles equivalentes diarios. La saturación del consumo de energía de este sector, confirma el hecho de que el campo se ha tecnificado a la máxima capacidad posible (dadas las características técnicas, económicas y naturales de México); esto se comprueba al observar que la cantidad de productos obtenidos por unidad de energía utilizada en el sector agrícola, prácticamente no ha cambiado desde 1965 a la fecha (Fig. 3.62).

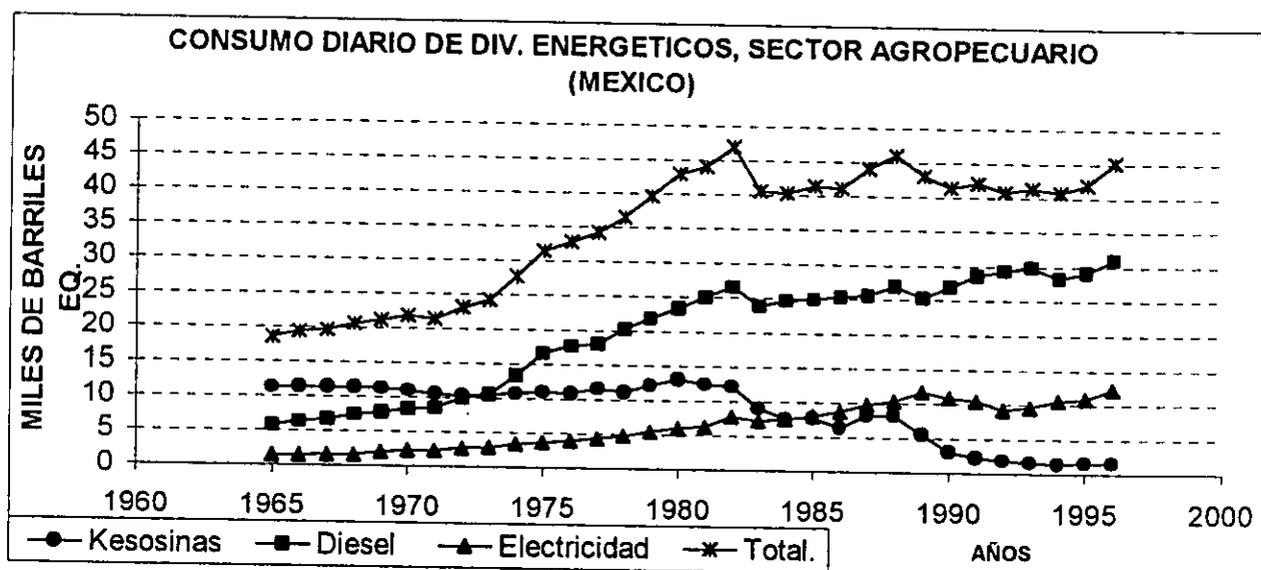


Fig. (3.61) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

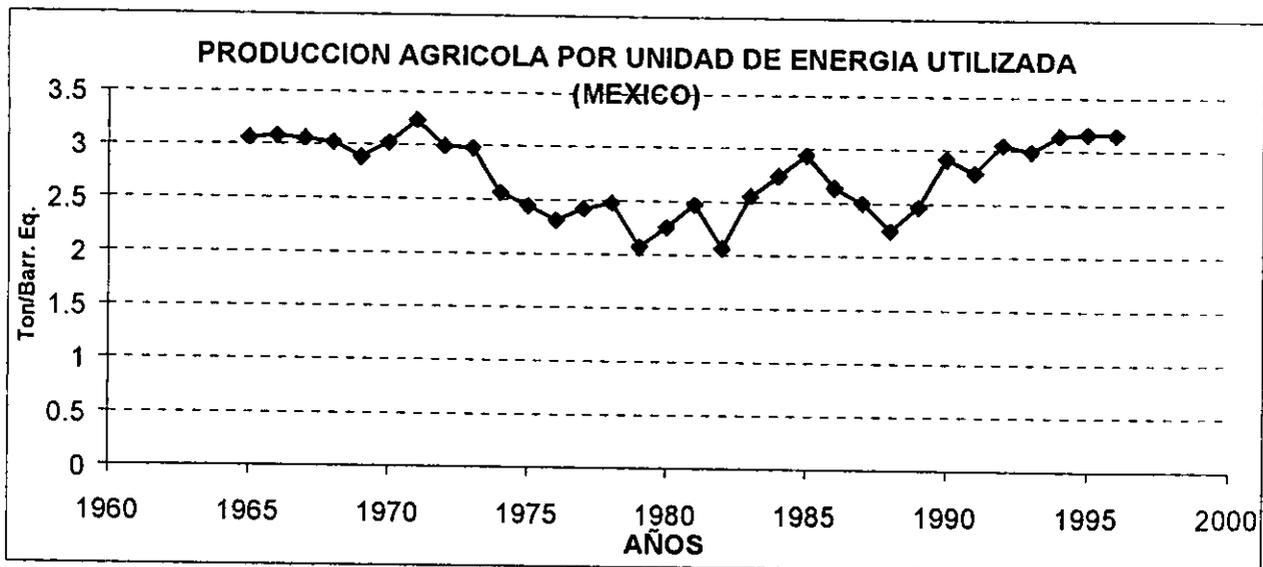


Fig. (3.62) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9., 38]

El diesel consumido en éste sector (Fig. 3.61), principalmente se destina al funcionamiento de tractores para realizar tareas de arado y de cosecha. De forma similar al sector industrial, se presenta una sustitución de kerosinas por diesel. El consumo de electricidad aumentó hasta 1980, año a partir del cual se presentaron oscilaciones alrededor de un valor cercano a 10,000 barriles equivalentes diarios; cabe señalar que para el bombeo de agua se utilizan bombas activadas por motores eléctricos, ya que gran parte del agua utilizada para riego proviene de almacenamientos subterráneos (el 72% del total). [29, pág.111]. El consumo de combustóleo es relativamente pequeño comparado con los combustibles anteriormente mencionados, éste tuvo una disminución súbita a partir de 1990; por otra parte el consumo de gasolina y gas licuado ha sido muy pequeño y ha disminuido a un valor tal que se pueden considerar casi nulos.

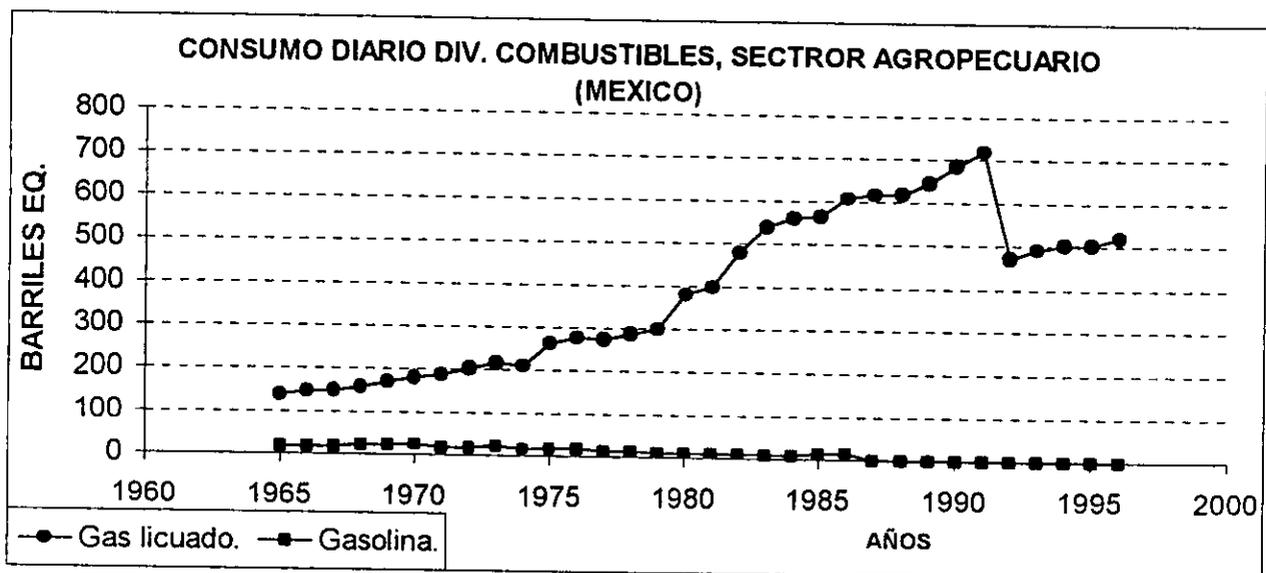


Fig. (3.63) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

### Consumo de energía del sector público y minero.-

El consumo total de energía del sector público (Fig. 3.64), osciló alrededor de una trayectoria de crecimiento uniforme en el periodo 1965-1996, sin embargo esto se debe a un primer periodo de crecimiento con aceleración que queda comprendido entre los años 1965-1982 y a un segundo periodo de crecimiento con desaceleración comprendido en el periodo 1983-1996. A partir de 1993 se registró una estabilización con una reciente tendencia a disminuir ú oscilar. En 1996 éste sector consumió poco más del 0.3% del total nacional.

El consumo total de energía por parte del sector minero (Fig. 3.65), de forma similar al sector público, muestra dos periodos de crecimiento: el primero queda comprendido entre los años 1965-1983 y muestra un aumento con aceleración, el segundo periodo queda comprendido en el periodo 1984-1996 mostrando cierta estabilidad hasta 1994. A partir de dicho año ha aumentado considerablemente su velocidad de crecimiento; de forma similar al caso del consumo en el sector industrial, éste crecimiento se puede deber principalmente a inversiones extranjeras, ya que comenzaron al inicio de la crisis económica y son éstas las que se encontraban con mayores posibilidades de realizar inversiones en el interior del país. En 1996 éste sector consumió el 2.31% del consumo total nacional de dicho año.

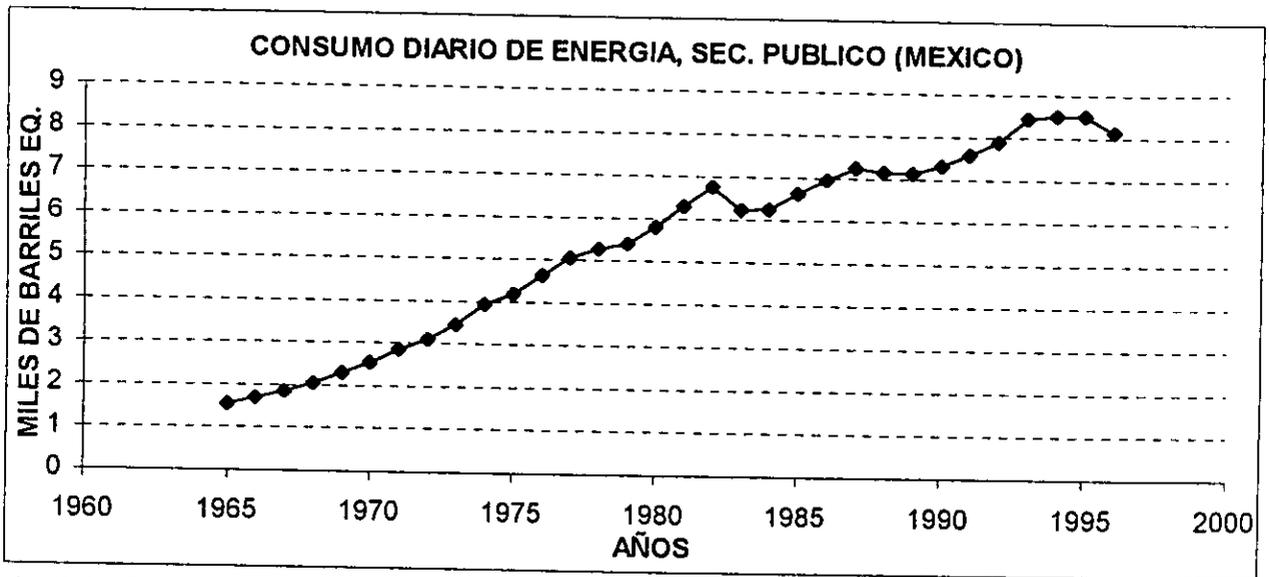


Fig. (3.64) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

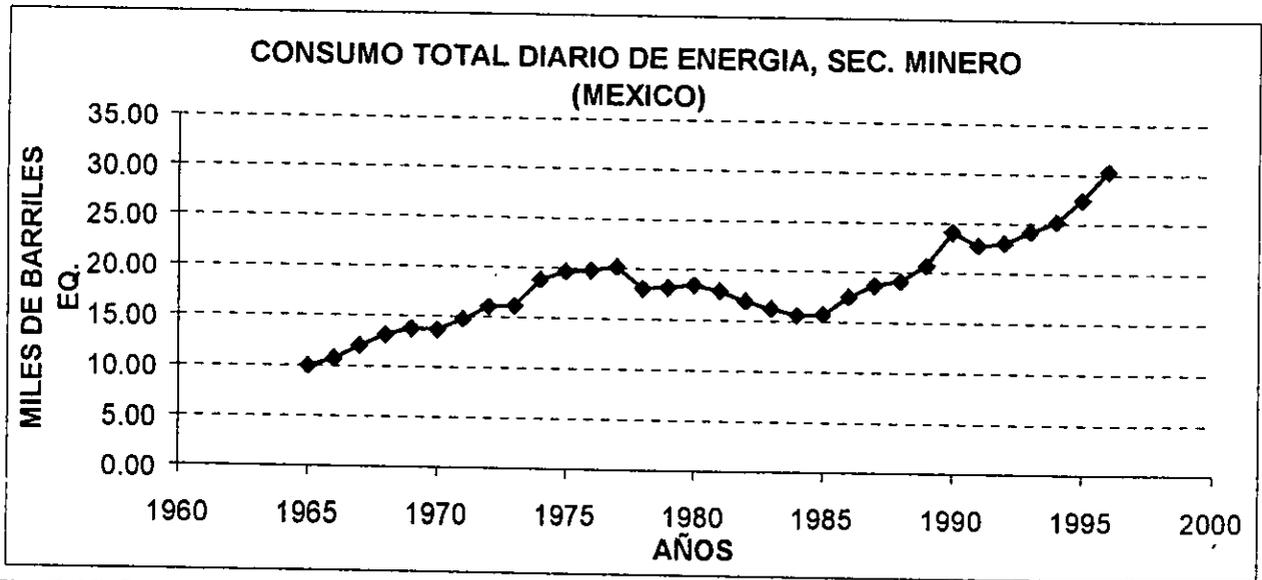


Fig. (3.65) Calculada y construida a partir de datos obtenidos de ref.[9].

# *Capítulo 4.*

*Análisis y Perspectivas con los  
Energéticos actuales (Fósiles).*

## ANALISIS DE LA SITUACION ACTUAL. -

### Aspectos generales. -

Como se observó en el capítulo 2, existen múltiples efectos cruzados entre fenómenos de distinta naturaleza (recursos, energéticos, poblacionales, alimentarios, etc.).

Los efectos cruzados entre distintos fenómenos, pueden llegar a tener una gran importancia en la evolución de sistemas complejos, proyectos, etc.; por ejemplo: si se supone un proyecto en el cual se construirá un puente, pero solamente se realiza el cálculo del mismo, considerándolo aislado del lugar donde se colocará (sin considerar características del viento, precipitaciones, sismos, fenómenos de corrosión, etc.), seguramente se obtendrá una solución no sustentable, ya que se tendrán efectos negativos no considerados entre la lluvia, viento, el tipo de suelo, etc. Sobre el ejemplo anterior, se puede comentar que actualmente se consideran dichas interacciones al diseñar un puente; sin embargo existen ramas de investigación en distintas disciplinas, que no consideran sus efectos sobre otras áreas que aparentemente no tienen conexión directa con el fenómeno estudiado y que pueden llegar a ser determinantes para que la aplicación sustentable a largo plazo de dicha investigación sea posible.

Por lo anteriormente expuesto, se hace necesario que el análisis de la planeación energética, contemple principalmente las relaciones que existen entre aspectos alimenticios, energéticos, poblacionales y ambientales, de forma que se obtengan lineamientos generales que permitan aclarar las características generales de las alternativas energéticas que sustituirán a los combustibles fósiles.

A continuación se llevarán algunos análisis para ejemplificar las diferentes interacciones entre diferentes áreas de estudio.

## Energéticos y sus usos. –

En la Fig. 4.1, se puede observar el uso relativo de los energéticos en los diferentes sectores de E.U., de forma que el porcentaje de energía dedicado a la industria, ha disminuido desde 46.817% en 1949, hasta 37.86% en 1997, mientras que el dedicado al comercio y residencia ha aumentado de 26.95% en 1949, hasta 35.79% en 1997 y el dedicado al transporte ha oscilado alrededor de un valor aproximado al 25%. Esto indica que relativamente se ha dedicado una mayor cantidad de energía a sectores que tiene una relación más cercana con la población (comercio y residencia), mientras que el consumo de los demás sectores a disminuido.

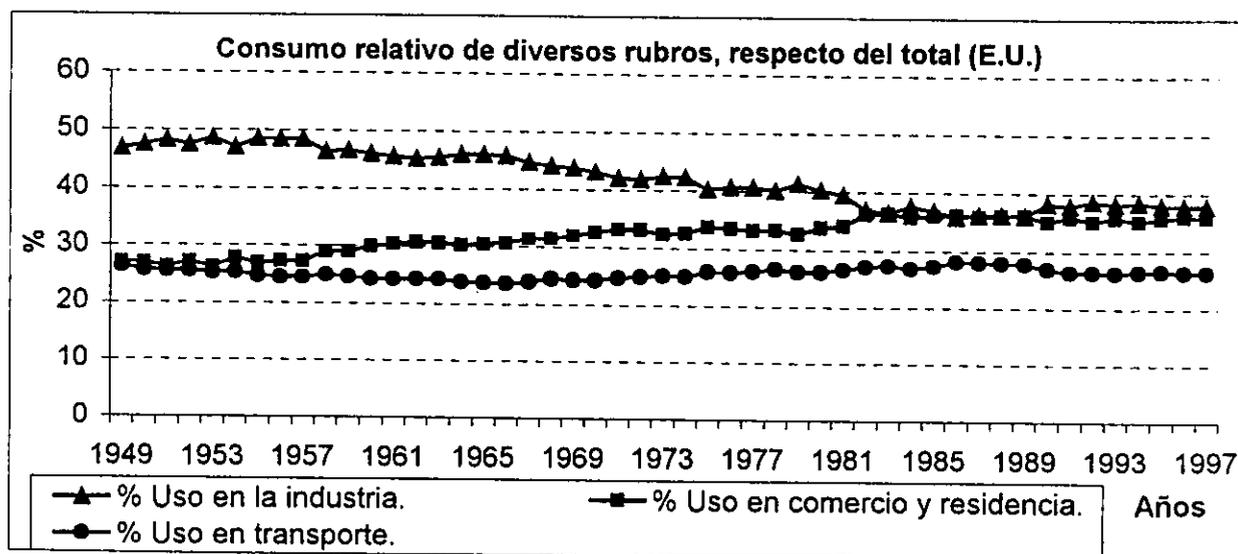


Fig. (4.1) Calculada y construida a partir de ref. [6]

En la Fig. 4.2, se observa el uso relativo de los energéticos en diferentes sectores de México, de forma que el consumo relativo por parte del sector industrial, se encuentra oscilando desde 1965, entre 20% y 25% respecto al consumo total, mientras que el sector transporte ha oscilado entre 20% y 26% desde 1965; el sector comercial y residencial disminuyó de 1965 a 1982, año a partir del cual presenta una paulatina recuperación. Lo anterior indica que proporcionalmente: a diferencia de E.U., el crecimiento en la población

de México no ha provocado un aumento relativo en el consumo energético del sector residencial y comercial respecto del industrial y el transporte, esto podría ser consecuencia de que las principales industrias que utilizan energéticos del país son de tipo manufactureras, las cuales consumen relativamente una mayor cantidad de energía y este aumento absoluto impide que el consumo de éstas disminuya en porcentaje.

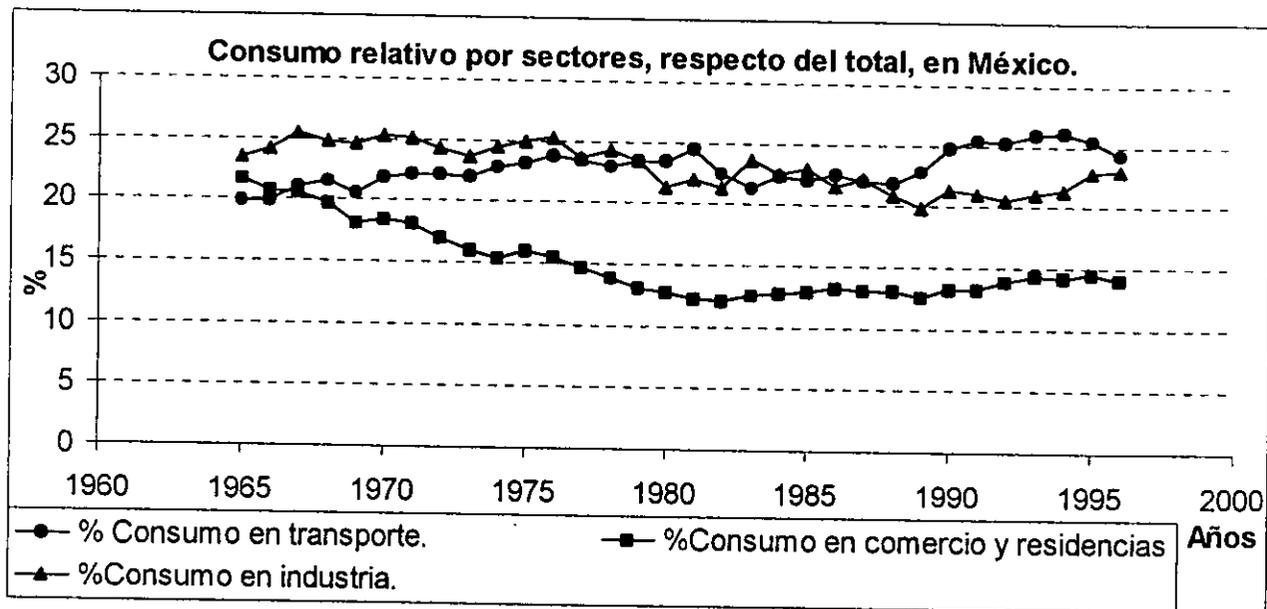


Fig. (4.2) Calculada y construida a partir de datos tomados de ref. [9]

## Población y energéticos.-

A escala mundial, se puede observar que una gran parte de la población (casi el 50%), habita en centros urbanos, siendo ésta una tendencia creciente que continuará en el futuro (ver Fig. 3.2); véase lo que ocurre con las poblaciones de E.U. y México (Figs. 3.17 y 3.36, respectivamente) las cuales están formadas mayoritariamente por población urbana. Lo anterior indica que una parte importante de las alternativas energéticas que sustituirán a los combustibles fósiles, deben enfocarse para satisfacer las necesidades de la alta densidad de población que existe en las ciudades; queda claro que la mayor parte de la energía que reciban sus pobladores, debe ser generada fuera de éstas debido a falta de espacio que existe dentro de las mismas. Una alta densidad de población, promueve que la mayoría de los sistemas de generación de energía sean de alta potencia, esto exige que tanto la transmisión de energía como la generación sean más eficientes.

Por otra parte, se puede observar que el consumo total per cápita de energía en E.U. y México (Figs. 3.28 y 3.48, respectivamente), se encuentra oscilando alrededor de un valor relativamente constante, indicando que la energía por unidad de habitante para realizar labores tales como: producción industrial, agricultura, realización de servicios, etc., se encuentra limitada; esto muestra que es energéticamente imposible que la calidad de vida (promedio) de los ciudadanos se eleve, a menos que haya cambios tecnológicos que aumenten la eficiencia energética del país. Para el caso de México se puede decir que la eficiencia promedio de las industrias, métodos agrícolas, medios de transporte, etc., no ha aumentado considerablemente desde 1982, pudiéndose asegurar (por las razones energéticas expuestas anteriormente) que el país se encuentra en una crisis en la cual apenas puede mantener el nivel de vida de sus habitantes con respecto a 1982 (con ciertas oscilaciones).

Debido a que el consumo de energía generalmente crece de forma que su valor per cápita permanece relativamente constante, un factor muy importante en la planeación energética es tener una adecuada política demográfica en la cual se establezcan objetivos en diferentes periodos de tiempo, de forma que la producción de energía se pueda planear sobre la base de un consumo relativamente conocido y proyectado.

Por otra parte, el consumo de energía del sector residencial de México (Fig. 3.96), está formado en gran medida por leña (en 1997 fue el 34.5% del total del consumo residencial), dado que este combustible se utiliza principalmente para la cocción de alimentos y para la calefacción en comunidades rurales ó de bajos ingresos [100]; se puede decir que en un futuro, cuando otros tipos de combustibles sean más escasos ó más caros (tales como gas natural, gas licuado (ver fig. 3.97), etc.), una mayor parte de la población recurrirá a este tipo de combustible para satisfacer sus necesidades de alimentación y calefacción, de forma que si no se utiliza de forma adecuada, puede llegar a causarse una deforestación fuera de proporción en los bosques y selvas de México, afectando de forma grave a diversos ecosistemas. Este hecho también se puede presentar en el resto del mundo, principalmente en países del tercer mundo de Africa, Asia y América Latina.

## Alimentos y energéticos.-

Los alimentos dependen de los energéticos de diversas formas; algunas de las principales son las siguientes:

- **Sistemas de cultivo y cosecha-** La mecanización del campo, requiere actualmente los energéticos en forma de combustibles líquidos tales como diesel, son esenciales para el funcionamiento de diferentes tipos de tractores.
- **Sistemas de cuidado del cultivo-** Como se vio en el capítulo 2, la productividad del campo debe ir en aumento debido al crecimiento de la población; para ello se recurre a la aplicación de fertilizantes, fungicidas, herbicidas, plaguicidas, etc., necesitándose tanto combustible para su aplicación (por medio de avionetas, tractores, aspersores, etc.), como para su producción.
- **Sistemas de riego-** Como que parte de los cultivos necesitan de riego, es necesario contar con el combustible para bombear el agua hasta las tierras de cultivo, ya sea desde tierras más bajas o desde pozos. En México principalmente se utiliza electricidad para realizar el bombeo de agua y en otros caso se utiliza diesel tanto para bombeo como para tractores.
- **Procesamiento-** Algunos tipos de alimentos (sean animales ó vegetales), requieren de cierto tipo de procesamiento (tal como secado de semillas, lavado, cocciones, enlatados, etc.), es necesario asegurar el suministro de energía necesaria para realizar todos estos procesos, de los cuales algunos o varios de ellos son llevados a cabo por uno o más tipos de industrias.
- **Transporte-** Debido a que la mayoría de los alimentos son producidos en zonas lejanas a las ciudades, los sistemas de transporte juegan un papel muy importante en la distribución y buena conservación de alimentos, de forma que en el futuro se debe desarrollar un sistema de transporte eficiente que garantice una buena distribución de alimentos a los diferentes centros de procesamiento y consumo.

Todos los puntos señalados anteriormente son importantes para el desarrollo sustentable de cualquier país, de forma que las alternativas energéticas que se desarrollen en el futuro, deben contemplar cada uno de los problemas que puedan llegar a surgir con relación a los alimentos. Basándose en esto, dentro del esquema teórico de los modelos basados en la termodinámica de los procesos irreversibles que relacionan a la población humana con la energía y los recursos, como un ejemplo se puede plantear la siguiente situación:

Supóngase la posibilidad de cultivar oleaginosas, de forma que el combustible obtenido de dicho cultivo sea utilizado para el sistema de transporte del país.

Si se observa la productividad actual de las oleaginosas en México [calculado con datos de: 38], en 1996 fue de 482.99 kg/Ha; suponiendo el caso de que el contenido energético de las oleaginosas es de 1lt equivalente de petróleo por cada kilogramo de oleaginosas (lo cual es una suposición que le da ventajas a las oleaginosas más allá de las reales), dado que el consumo del sector transporte en México (Fig. 3.51) en 1996 fue de 642,582.8 barriles equivalentes diarios, sería necesario dedicar anualmente un área de 77211314.51 Ha. al cultivo de oleaginosas para este fin. Como dichas hectáreas deben tener características propicias para el cultivo y actualmente éstas se utilizan en la producción de alimentos, dado que se requieren 0.8388 Ha per cápita [calculado con datos de: 38, 35]; se requeriría desplazar el alimento de aproximadamente 92 millones de habitantes.

El ejemplo anterior muestra que la implementación del uso de oleaginosas para el funcionamiento del transporte, no es una solución realista, ya que se puede observar con claridad que desplazaría el alimento de casi la totalidad de la población de México, mostrando que la aplicación de esta alternativa es sólo viable en pequeña escala y para casos muy específicos, de forma que el país no debe dedicar grandes cantidades de recursos ni de tiempo en investigaciones que vayan en éste sentido.

## Transporte y energéticos.-

Los sistemas de transporte tienen una gran importancia, debido a su participación en el traslado de alimentos, materias primas, maquinaria, personas, etc.; debido a esto, es de vital importancia que se desarrollen sistemas alternos de energía y de transporte, que permitan desarrollar las actividades que actualmente se llevan a cabo gracias al transporte.

En lo que respecta a E.U., su producción de petróleo es menor que el consumo de energía por parte del sector transporte [92, pág. 4] y dado que, como se vio anteriormente, las reservas de petróleo son relativamente pequeñas, el gobierno de E.U. se ha propuesto que para el año 2000 se reemplace el 10% de los combustibles convencionales de este sector y para el año 2010 se alcance el 30% [92, pág. 20]. Esta meta se alcanzará con el uso de vehículos híbridos, nuevas formas de almacenamiento de energía, etc. [92, pág. 10]. Dado que E.U. es uno de los países que tiene mayores reservas de carbón mineral (el 24.04% del carbón mundial al 1 de Enero de 1997), se puede esperar que inicialmente gran parte de los combustibles alternativos que se desarrollen, sean obtenidos a través del carbón mineral mediante diferentes métodos de transformación, de forma que las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyan considerablemente respecto al carbón mineral utilizado directamente.

Para el caso de México, las reservas de carbón mineral son relativamente pequeñas (0.118 % de las reservas mundiales al 1 de Enero de 1997) y como se vio anteriormente, el uso de la biomasa de cultivos no es viable, de forma que no es conveniente realizar inversiones en el desarrollo de energéticos alternativos obtenidos a partir del carbón mineral, ni de la biomasa agrícola. Sin embargo, las reservas de petróleo y gas natural para México, estarán disponibles para no más allá de los años 2040 y 2044 respectivamente, permitiendo que el cambio a un sistema de transporte alternativo sea gradual, de forma que las inversiones requeridas para realizar las transformaciones necesarias, pueden quedar distribuidas en un periodo de tiempo tal, que dicha conversión tecnológica sea posible y sustentable, esto se abordará con más detalle en el capítulo 6.

## Medio ambiente y energéticos.-

Las emisiones de CO<sub>2</sub> provocan unos de los principales impactos ambientales globales que se producen con el uso de combustibles fósiles. En la Fig. 4.3, se muestra la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, pudiéndose observar que en últimas fechas se registran niveles altos de concentración de CO<sub>2</sub> y además se presentan ritmos de crecimiento mucho mayores que los registrados en el pasado. Se puede observar que existe una relación entre el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> y el aumento de la temperatura media terrestre, de forma que el aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> que se ha producido mediante el uso de los diversos combustibles fósiles, no se presentará consecuencias de forma instantánea, sino que lo hará con cierto retraso.

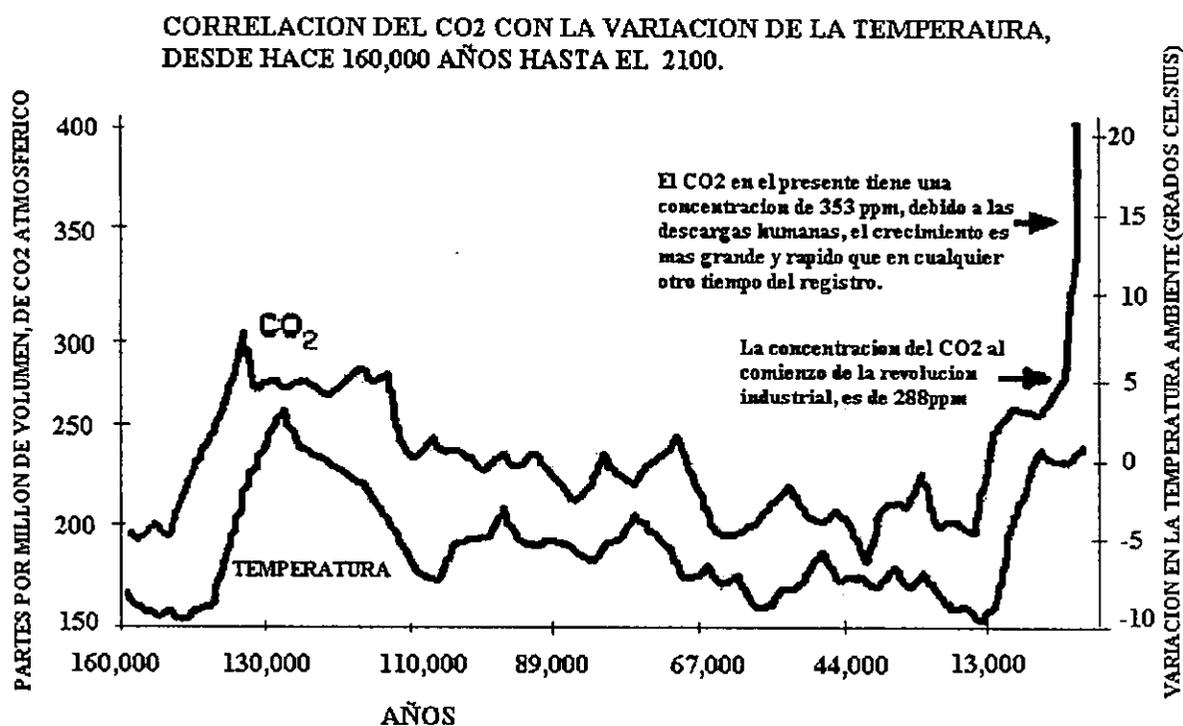


Fig. 4.3 Obtenida a partir de [66]

El Panel Intergubernamental del Cambio de Clima (IPCC), proyecta que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, se duplicará en la mitad del próximo siglo [14]. Con el fin de controlar el nivel al que aumentan los niveles de CO<sub>2</sub>, existe la posibilidad de retirar carbono de la atmósfera, capturándolo y almacenamiento en un lugar seguro; el carbono almacenado de otra forma sería emitido ó permanecería en la atmósfera. Los objetivos generales del secuestro de carbono, son [14]:

1. Evitar que las emisiones de bióxido de carbono originadas por diversas actividades humanas alcancen la atmósfera, capturándolo de alguna forma y almacenándolo en un lugar seguro.
2. Remover el bióxido de carbono que ya se encuentra en la atmósfera y almacenarlo en algún medio.

Algunos de los principales métodos de secuestro de CO<sub>2</sub>, son los siguientes [14]:

- Fijación de CO<sub>2</sub> en océanos.- El océano representa potencialmente un sumidero para el CO<sub>2</sub> atmosférico. Existen dos métodos ello: 1).- Vapores relativamente puros de CO<sub>2</sub> que son producto de diversas actividades humanas, son inyectados directamente en el océano (ya sea en sedimentos oceánicos o en sólidos similares al hielo llamados hidratos) 2).- El secuestro neto por parte del océano, puede ser incrementado por diversos métodos, tales como fertilizaciones que permitan que los ecosistemas marinos se encarguen de asimilar y almacenar de forma adecuada al carbón del CO<sub>2</sub>, en diversas estructuras.
- Fijación de CO<sub>2</sub> en ecosistemas terrestres.- Los ecosistemas terrestres que están formados de vegetación y de tierras que contienen comunidades microscópicas e invertebradas, los cuales retiran y fijan el CO<sub>2</sub> directamente de la atmósfera. Los ecosistemas terrestres son esencialmente un sumidero enorme de CO<sub>2</sub>; modelos computacionales indican que por parte de los recursos forestales, vegetaciones, tierras, pasturas, etc. anualmente se fijan de 1.5 a 2 Gton de carbón de las 7.4 Gton que se generan anualmente.

- Fijación de CO<sub>2</sub> en formaciones geológicas.- Existen principalmente tres tipos de formaciones geológicas, en las cuales potencialmente se pueden realizar almacenamientos de CO<sub>2</sub>. Estas son reservas de petróleo y gas que no son viables económicamente, formaciones acuosas y profundas reservas de carbón mineral que resultan inexplotables.
- Fijación de CO<sub>2</sub> mediante procesos biológicos avanzados.- Bacterias y otros organismos pueden ser utilizados para remover carbón de ciertos combustibles y reciclar parte del carbón que producen las emisiones humanas. Se pueden desarrollar especies de cultivos, que sean diseñadas para tomar CO<sub>2</sub> de la atmósfera a partir de la biomasa terrestre y acuática y disminuir las emisiones de bióxido de carbono mediante el uso de ésta.
- Alternativas químicas.- Desarrollar métodos de separación, transporte y almacenamiento de bióxido de carbono, sería beneficioso para las opciones de almacenamiento de carbono. Cualquier técnica de secuestro de carbono, debe almacenar grandes cantidades de materiales ricos en carbón, de forma que la evaluación química del medio ambiente será importante para evaluar si los materiales utilizados serán estables a lo largo del tiempo, para su uso en el retiro de carbón atmosférico.

# *Capítulo 5.*

*Posibles Alternativas Energéticas.*

## POSIBLES ALTERNATIVAS ENERGETICAS.-

En este capítulo, se indican gran parte de los retos a vencer en el desarrollo de las alternativas energéticas de alta potencia. En general se han omitido descripciones detalladas de las tecnologías ó de proyectos desarrollados, excepto en los casos en donde éstos puedan proveer información valiosa para el desarrollo de las tecnologías involucradas.

### Energía eólica.-

#### **Retos técnicos.-**

- Como el flujo del viento no es uniforme durante todas las épocas del año, es necesario realizar mediciones específicas a largo plazo para entender dichas variaciones y poder determinar los problemas locales que se puedan presentar en ciertas regiones, tales como: fatigas adicionales en las estructuras de soporte y en los álabes debido a periodos de vientos con rachas, desgaste de elementos debido a gran cantidad de polvo, etc.
- El flujo de viento que se tiene en una región donde se han colocado una gran cantidad de turbinas, tiene una mayor turbulencia que aquél que se tenía antes de la colocación de las mismas (en el terreno abierto) [74], de forma que se puede tener una mayor fatiga en los componentes, limitando la vida de los mismos y haciendo necesario un mayor tiempo de mantenimiento. Para resolver este tipo de problema es necesario realizar estudios sobre variaciones tridimensionales en el flujo, aunadas con las tradicionales pruebas en el túnel de viento [74], así como desarrollar técnicas que permitan disminuir la turbulencia generada entre las turbinas y el terreno.
- Dado que la vida útil de una turbina con adecuado mantenimiento es de aproximadamente 30 años, y la vida estimada de los álabes es de aproximadamente 15 años [74], una meta debe ser que la vida útil de los álabes sea equivalente a la del resto del equipo.

- Un factor muy importante en la vida útil de una turbina, es el efecto de fatiga que sufren los diferentes componentes [74], de forma que se deben desarrollar mejores diseños y materiales que permitan que los requerimientos de mantenimiento sean menores, así como aumentar la vida útil del equipo.
- En ciertos lugares se han encontrado correlaciones entre las condiciones de viento entre una región y otra [74], de forma que se puede lograr que cuando la generación de una planta comience a disminuir durante ciertas horas del día ó épocas del año, ésta sea compensada de forma natural por el aumento en la generación de otra planta; esto indica que se deben realizar estudios de integración entre plantas.
- La mayoría de las turbinas generan electricidad a velocidad de rotor constante (cuando la velocidad del rotor se encuentra entre 40 a 60 RPM). De forma que mediante una caja de engranes, se logra que el generador tenga una frecuencia de 60Hz [74]. Si se permitiera que la turbina generara electricidad a velocidad variable del rotor, la generación de energía se incrementaría en un 15% [74]; para que esto sea posible se hace necesario el desarrollo de sistemas electrónicos de potencia, de forma que la frecuencia de la electricidad generada permanezca invariable; otro punto a desarrollar son los generadores que operen a bajas revoluciones, de forma que la caja de engranes no sea necesaria y consecuentemente la eficiencia del equipo aumente.
- Evaluar el posible uso de turbinas autorreguladas, en lugar de las convencionales, esto con el fin de disminuir el costo del equipo [1].
- El desarrollo de técnicas de almacenamiento de energía, es un factor importante que determina el alcance de este tipo de energía. Entre los principales métodos de almacenamiento se encuentran las baterías (las cuales son económicamente viables sólo para pequeñas aplicaciones [74]), aire comprimido, energía hidráulica almacenada (siendo ésta una de las opciones más económicas para aplicaciones a gran escala y magnetos superconductores (en etapa de investigación) [74]). Los lugares más viables para almacenar el aire comprimido son:  
Cavidades ó minas de sal, se tiene como experiencia el almacenamiento de aire en Alemania y E.U. [27.].

Espacios minados, consisten en almacenar el aire comprimido en cavidades formadas por roca maciza, estudios recientes muestran que incluso a gran escala es una de las opciones más costosas [79].

Medios porosos, consiste en almacenar el aire en acuíferos o pozos de gas agotados. Dado que éste medio no se encuentra minado, es preferible utilizarlo para almacenamientos por largo tiempo si las condiciones geológicas son las adecuadas [79].

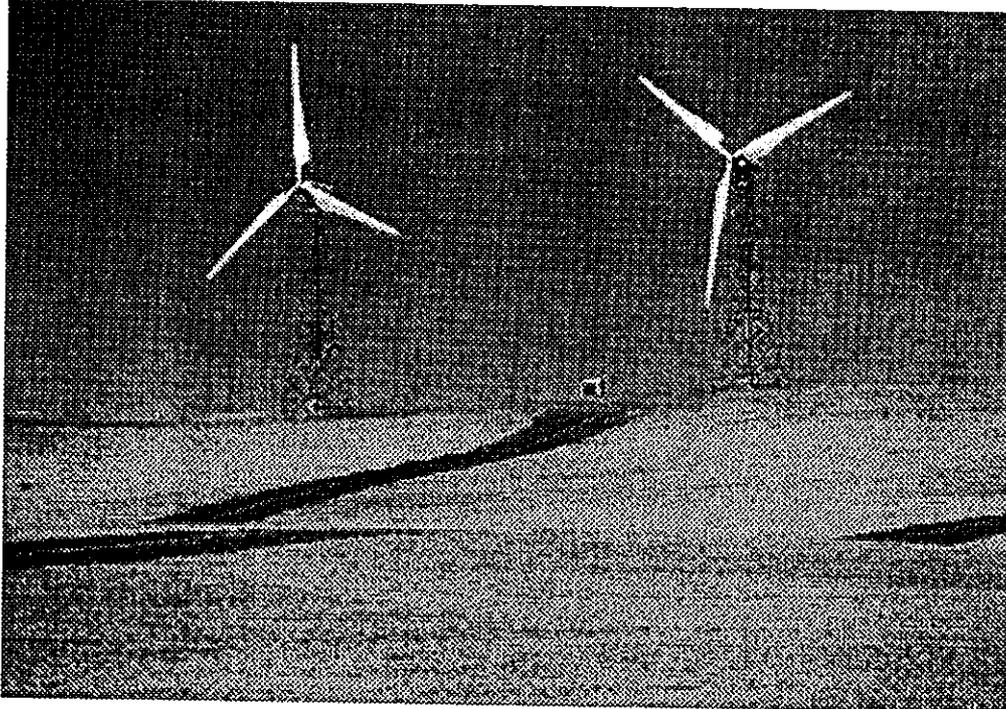


Fig. 5.1 Turbinas de eje horizontal en California E.U.

(Obtenida a partir de NREL)

## Energía solar obtenida mediante concentradores solares. -

### Descripción.-

La generación de energía eléctrica por medio de concentradores solares se basa en el uso de superficies reflectoras, las cuales concentran la radiación solar en cerca de 10,000 veces en diferentes artefactos que llevan la energía a sistemas convencionales de generación de electricidad por medio de turbinas [23]. Tienen la ventaja de no producir emisiones hacia el medio ambiente y además usan gran parte de componentes que se utilizan actualmente, como: turbinas de vapor, sistemas de enfriamiento, etc.

Existen diferentes sistemas para concentrar la energía solar y para llevarla hasta los sistemas convencionales de generación, los cuales se describen a continuación:

- Torres de potencia.- Este sistema consiste en una configuración de espejos móviles que dirigen la luz solar a la parte superior de una torre, en donde un fluido recibe la energía térmica, la cual es posteriormente transferida al fluido de trabajo, la temperatura alcanzada en el receptor puede llegar a ser aproximadamente de  $565^{\circ}\text{C}$  [23] (Ver Fig. 5.2).
- Platos reflectores- Se utiliza un arreglo de espejos que forman una superficie similar a un plato, los cuales enfocan los rayos del sol en un receptor fijo al plato, el cual transmite la energía térmica al sistema generador de electricidad [92]. Debido al gran grado de concentración que se alcanza y al pequeño tamaño del receptor, se pueden alcanzar altas eficiencias (hasta 30%) y altas temperaturas (aproximadamente  $800^{\circ}\text{C}$  en el receptor [23]) (Ver Fig. 5.3).
- Plantas de tipo parabólico.- Consisten un reflector de tipo parabólico, el cual concentra la luz solar en 30 a 60 veces sobre el foco de la parábola, donde se encuentra un tubo colector, por el cual circula aceite sintético que captura la energía térmica (alcanzando hasta  $400^{\circ}\text{C}$  [6]) y posteriormente la transfiere al fluido de trabajo de la planta generadora de electricidad (Ver Fig. 5.4). Este tipo de plantas solares es una de las más utilizadas comercialmente en la actualidad. Se puede mencionar que las plantas de tipo parabólico tienen la desventaja de tener mayores pérdidas debido a efectos convectivos

respecto a los otros tipos de plantas [45], esto se debe a que el fluido colector de energía debe recorrer relativamente grandes distancias a lo largo del reflector solar.

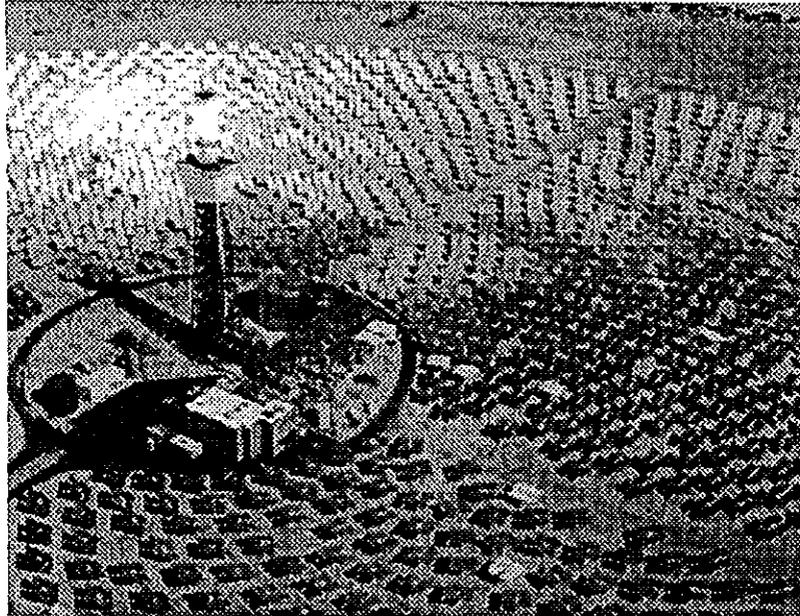


Fig. 5.2 Planta de Torre (Solar Two en E.U.)  
(Obtenida a partir de NREL)

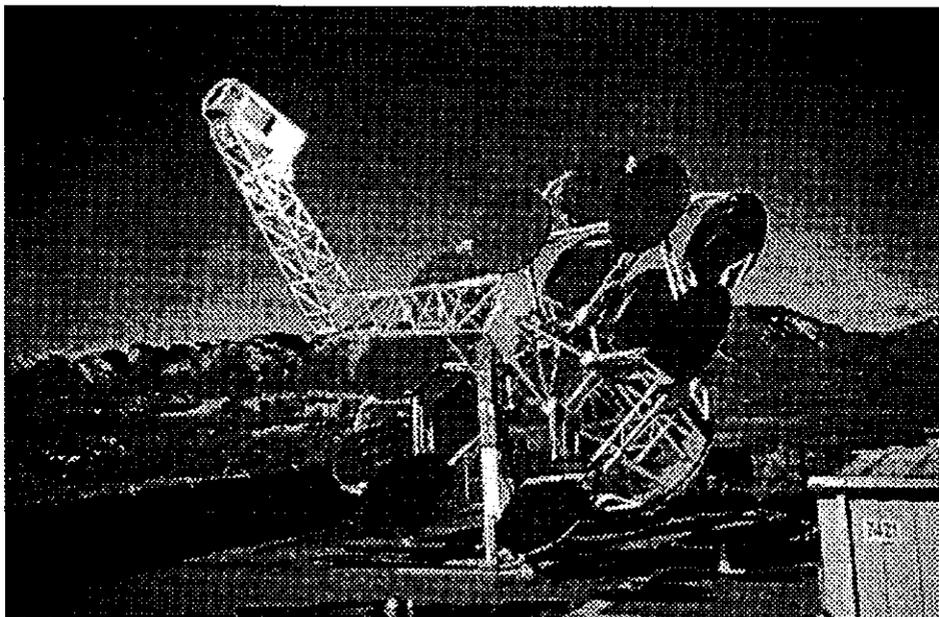


Fig. 5.3 Colector de plato de espejos múltiples.  
(Obtenida a partir de NREL)

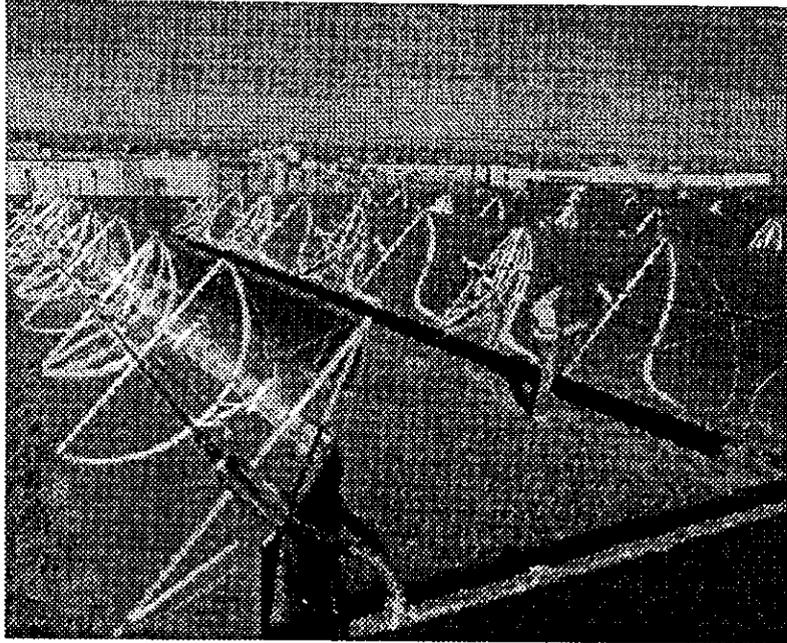


Fig. 5.4 Colector de tipo parabólico.  
(Obtenida a partir de NREL)

#### Retos técnicos.-

- Debido a que la generación de energía por medio de esta tecnología sólo se encuentra disponible durante el día, mientras haya relativamente pocas nubes, es necesario desarrollar sistemas de almacenamiento ó de generación alterna de energía que garanticen el suministro de energía durante la noche y/o durante épocas del año donde haya gran formación de nubes.
- Dado que la eficiencia de los sistemas solares de concentradores, está muy relacionada con la efectividad de los reflectores y los receptores, es necesario desarrollar materiales ó recubrimientos que permitan que la reflexión y la absorción de energía se lleve a cabo de formas más eficientes.
- Los reflectores térmicos, requieren de estructuras de soporte que afronten adecuadamente los efectos de fatiga provocados por el viento, efectos de corrosión, es necesario que requieran bajo mantenimiento, que su instalación sea relativamente simple, etc.; debido a esto, es necesario desarrollar nuevos materiales y diseños estructurales que permitan que los costos de las estructuras sean bajos y que sean durables.

- Dado que el diseño de las estructuras mencionadas anteriormente, se encuentra fuertemente relacionado con el peso de los reflectores, es necesario el desarrollo de materiales más ligeros que tengan las mismas ó mejores propiedades reflectoras, mecánicas y químicas (respecto a efectos corrosivos a largo plazo) que los sistemas actuales.
- En el caso específico de los reflectores parabólicos, ya que éstos utilizan aceite como fluido receptor de energía, se pueden realizar estudios sobre los efectos del uso de vapor que circule a través del tubo receptor, sin necesidad de utilizar un fluido intermedio. Por otra parte, el tubo receptor posee un tubo de vacío (el cual crucial para la eficiencia del mismo) [45], de forma que es muy importante desarrollar sistemas más eficientes que mantengan este vacío durante la vida útil de la planta.
- Para que este tipo de tecnología pueda comenzar a competir con los energéticos fósiles, se deben reducir los costos, de forma que es necesario minimizar el número de partes integrantes, componentes especiales, y número de pasos necesarios para su fabricación, con ello se logra uniformidad en el tipo de piezas y en los procedimientos de ensamblado, mantenimiento y operación.

Se puede decir que E.U. tiene formalmente un plan nacional que permite el desarrollo sustentable de ésta tecnología, de forma que inicialmente se comenzará su aplicación semi-experimental en mercados donde la competencia con los combustibles fósiles es relativamente pequeña; esto se hace para realizar mejoras en los sistemas y realizar alianzas con industrias, instituciones financiera, etc., de forma que paulatinamente se logrará una disminución en los precios de la energía solar y comenzará a ser introducida en el mercado de los combustibles fósiles [23].

## Energía solar de tipo fotovoltaica.-

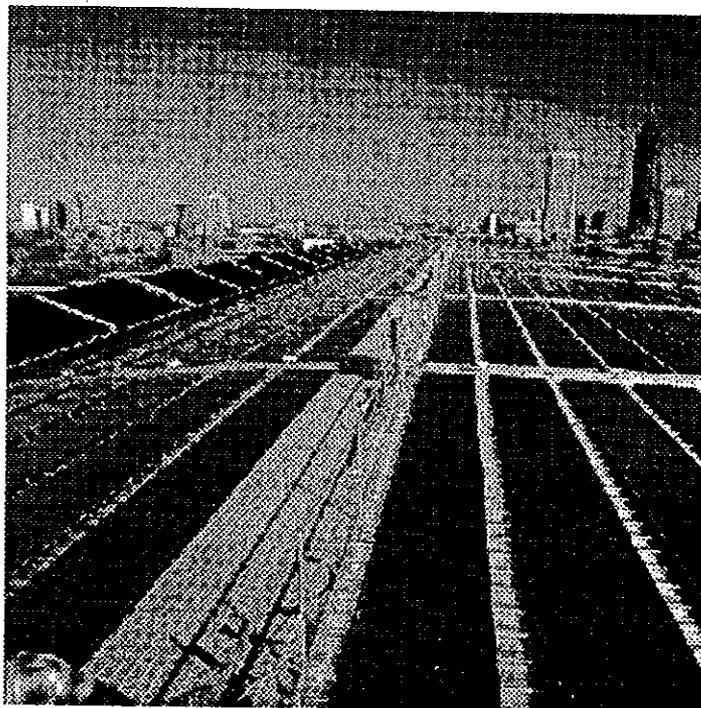


Fig. 5.5 Módulo de celdas fotovoltaicas.  
(Obtenida a partir de NREL)

### **Retos técnicos.-**

- El material de silicón, debe estar encapsulado entre materiales transparentes que permitan el paso de la luz y a su vez brinden protección a las estructuras cristalinas. Estos materiales son hechos comúnmente de materiales orgánicos (elastómeros y plásticos) ó inorgánicos (vidrios) [84, pág. 5]. En el caso de materiales orgánicos se tienen problemas de degradación solar que limitan la vida útil de los paneles [84, pág. 19], si por otra parte si se utiliza cristal se tiene un peso mayor que hace necesario un estudio de las estructuras de soporte similares al caso de los reflectores. Lo anterior hace indispensable que si se desean aplicar a gran escala, se deban desarrollar nuevos materiales encapsulantes que sean ligeros y estables a través del tiempo de uso.
- El componente de mayor costo para la fabricación de las celdas es la materia prima para producir los bancos de silicón, esto se debe a que la disponibilidad de este material es limitada y no se encuentra en cantidad para satisfacer las necesidades de una industria de celdas fotovoltaicas a gran escala [84, pág. 6]. Lo anterior indica que se deben

desarrollar nuevos materiales y/o procesos de fabricación que permita que el costo de los materiales esenciales sea menor.

- Se debe inducir una estandarización de las partes utilizadas para el ensamble de las plantas generadoras, de forma que la producción en masa permita que su costo, mantenimiento y operación sean baratos.
- De forma similar a los concentradores solares, se deben desarrollar sistemas de almacenamiento de energía para la generación de electricidad durante la noche ó días nublados. Una de las formas más comunes es el almacenamiento en baterías, las cuales actualmente son caras y se encuentran en variedades limitadas y sus características generalmente añaden inconvenientes y problemas a los diferentes proyectos [84, pág. 10]. Por lo tanto, para garantizar un buen funcionamiento de las celdas, se deben desarrollar mejores tipos de baterías. Por otra parte, queda claro que si se trata de aplicar ésta tecnología en generación de alta potencia, es especialmente difícil desarrollar baterías para este uso, de forma que los almacenamientos de alta potencia más económicos y eficientes son el almacenamiento térmico ó el hidráulico, de manera que se requeriría gran parte del equipo y requerimientos que utilizan los sistemas de reflectores solares.
- Dado que la corriente que produce el arreglo de celdas fotovoltaicas es directa, se necesita que los centros de consumo se encuentren cerca de las mismas, ya que si la energía se transporta por una distancia relativamente grande, se tendrían pérdidas de potencia relativamente grandes en las líneas de transmisión. Por otra parte si se utilizan sistemas electrónicos de potencia que transformen la corriente directa en alterna, el costo de la planta se eleva considerablemente. Lo anterior muestra que si se desea utilizar este tipo de equipo para transmisiones de larga distancia, se deben desarrollar sistemas electrónicos de alta potencia que tengan un costo que permita que su uso sea económicamente viable.

En forma general, las características de esta tecnología indican que:

1. Su uso debe realizarse en lugares cercanos a donde se espera que se consuma la energía.
2. La generación de alta potencia en general no es viable económicamente.
3. Para que la energía producida sea más barata, los centros de consumo deben aceptar ciertas interrupciones en el servicio.

## **Energía geotérmica.-**

### **Retos técnicos.-**

- Dado que la red de transporte de fluido, asociado con proyectos geotérmicos, representa cerca del 70% de inversión inicial [54]; es necesario mantener la red de distribución en las mejores condiciones económicas posibles, sin comprometer el diseño ni la seguridad del sistema.
- En ciertos yacimientos geotérmicos se tienen problemas de corrosión en tuberías, debido a distintos componentes que se encuentran en el vapor y el agua, tales como los sulfatos [54]; para resolver el problema de efectos corrosivos, se deben desarrollar sistemas preventivos y correctivos de corrosión en las líneas de transmisión de vapor.
- Con el fin de garantizar un adecuado uso de los pozos geotérmicos, que permita su explotación durante el mayor periodo de tiempo posible, es necesario que se entienda el comportamiento dinámico del sistema, es decir: 1).- Es necesario conocer las causas que producen variaciones en el flujo, entender fenómenos de interferencia respecto a otros yacimientos cercanos; se deben realizar actualizaciones periódicas en los modelos predictivos del comportamiento del yacimiento [54] 2).- Dado que cuando se realizan reinyecciones al yacimiento, el ritmo de generación de energía generalmente disminuye, se debe conocer detalladamente el comportamiento de este fenómeno sobre la heterogeneidad del yacimiento y su comportamiento cuando se realizan explotaciones en niveles de producción variables [54].

### **Algunos desarrollos y proyectos actuales.-**

En la explotación de pozos geotérmicos para la producción de electricidad, generalmente se utilizan separadores de vapor que permiten que éste se expanda dentro de una turbina sin que los álabes reciban daños debido a las posibles partículas de agua que se puedan encontrar en el fluido [78, pág. 62], esto hace que una menor cantidad de fluido entre a la turbina y por consiguiente se obtenga una menor cantidad de trabajo debido a la expansión.

Una turbina de reacción bifásica opera en la planta geotérmica de Cerro Prieto, la cual posee 0.76m de diámetro y recibe el fluido a 52 bar, expulsándolo a 29 bar, teniéndose un flujo de 1400,000 kg/h con una fracción de vapor del 45% [2]. En conjunto con otras turbinas convencionales se generan 10.8MW, teniéndose un aumento del 45.9% respecto a la generación que se tenía anteriormente (7.4MW) [2]. La compañía que realizó el diseño (Douglas Energy), ha considerado la instalación de más plantas, operando bajo el mismo concepto en: México, E.U, y Filipinas [2], las cuales pueden ser utilizadas en un solo yacimiento ó en un grupo de ellos. Un análisis de corto plazo realizado en México, indica que se pueden producir 100MW en un total de 40 yacimientos, siendo comercialmente viables si se realiza la venta de energía a un precio de 0.037 \$/kWh (dólares) y cerca de la mitad de éstas, se beneficiarían del uso de una turbina bifásica similar a la utilizada en Cerro Prieto [2].

Por otra parte, en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, se han utilizado sistemas de fracturamiento hidráulico, monitoreo sísmico y pruebas de flujo, para evaluar reservas de roca seca caliente (RSC); se tiene considerado que la energía obtenida a partir de RSC es una de las fuentes más abundantes y prometedoras de energía renovable [86]. Una aplicación actual de fracturamiento hidráulico se lleva a cabo en el flujo de vapor para la explotación de petróleo y gas. La reserva estudiada, fue creada a 3.7km bajo la superficie, donde la temperatura alcanzada fue de 240°C, con un gradiente térmico en la roca de alrededor de 65°C/km; se realizaron estudios de flujo durante diversos periodos en los años 1992, 1993 y 1995 [86]. Los datos obtenidos, mostraron que la operación de un yacimiento de RCS, es totalmente viable [86].

El Instituto de Massachusetts de Tecnología, ha estimado que para grandes gradientes de temperatura y pequeñas pérdidas en la circulación de agua en una planta de 50MW, se requerían precios de venta de la energía entre 0.055-0.061\$/kWh (en dólares de 1998, considerando 20 años de vida útil de la planta) [86]. Si se considera la misma planta con un gradiente menor de temperatura, el costo de la energía sería entre 0.086-0.17\$/kWh [86].

## Energía de biomasa.-

### **Descripción.-**

La energía de la biomasa es aquella que se obtiene de diversos residuos provenientes de vegetación, cultivos acuáticos, forestales, agrícolas, urbanos, etc. [21]. Las diferentes formas de biomasa se pueden clasificar en dos tipos, las primarias (recursos forestales y agrícolas) y las secundarias (son residuos que se obtiene a partir de alguna actividad, como aserrín, hojas de árboles, etc.) [21].

La biomasa almacena energía captada del sol a través de la fotosíntesis realizada por las plantas, la cual es transformada en estructuras tales como bagazos, papel, etc., muchas de las cuales pueden ser consumidas por diferentes organismos, cuyos deshechos a su vez pueden formar parte de la biomasa. Las principales formas de aprovechar la biomasa como energético, pueden ser a través de la combustión directa ó mediante la conversión de ésta a diferentes hidrocarburos (sólidos, líquidos ó gaseosos) a través de diferentes tecnologías [21].

Como se vio en el capítulo 4, la obtención de biomasa en tierras que se dedican a fines alimenticios, es una opción poco sustentable para los países que tengan casi saturadas sus tierras de cultivo. A partir de esto, se puede determinar que la biomasa utilizable a gran escala, está formada sólo por recursos forestales, residuos municipales y ciertos residuos derivados de la actividad agropecuaria.

Respecto a los recursos forestales y el consumo de leña, se puede mencionar lo siguiente:

La leña es uno de los mayores proveedores de energía de los países subdesarrollados, ya que ésta proporciona cerca del 38% de la energía total consumida en dichos países [96, pag.3] y un 14% a escala mundial [96, pag.7]; a pesar de que este consumo se detuviera drásticamente, la deforestación mundial continuaría debido a que las necesidades de alimentación y de espacio de una población creciente promueven cambios en los usos de la tierra, los cuales son la mayor causa de la deforestación [96, pag.6]. Una gran parte de la leña utilizada para energía es obtenida de zonas no forestales (cerca de 50% del consumo) [99, pag.6]; es decir, se obtiene de árboles y arbustos que crecen alrededor de tierras de cultivo, a lo largo de caminos, canales, desperdicios de madera, etc. [100, pag.3]. Dado que

dicha leña se obtiene de forma continua en los mismos terrenos, queda claro que la leña obtenida se debe al crecimiento natural de los recursos forestales; indicando que si se maneja de forma adecuada, se puede llegar a aprovechar en mayor escala a este recurso.

Sobre residuos municipales, se puede mencionar que la energía obtenida de éstos proviene de los residuos orgánicos, tales como papel, cartón, diversos polímeros, etc. Dado que en el futuro serán más escasos tanto la energía y materiales obtenidos ó procesados a través del petróleo y diversos hidrocarburos (tales como hules, plásticos, etc.), el precio de éstos se elevará, de forma que medidas de reciclaje serán más comunes en diversos materiales tales como vidrio, papel, polímeros, etc. De lo anterior se deduce que el poder calorífico de los residuos municipales puede verse disminuido en la medida que ciertos materiales disminuyan en composición dentro de los residuos; por ello es necesario que los proyectos de utilización de basura a largo plazo como energético, deban ser evaluados de forma global, tomando en cuenta interacciones con industrias de diversos tipos.

En el caso de los residuos que se originan debido a actividades agropecuarias, se puede mencionar que no es posible la utilización total de éstos, ya que:

1. Una remoción excesiva de residuos, puede retirar de la tierra gran parte de las necesidades de materia orgánica que se requieren para que la siguiente siembra crezca adecuadamente [96, pag.4].
2. En ocasiones, los residuos deben ser quemados en el sitio de siembra obligatoriamente para evitar la transmisión de ciertas enfermedades de una época de siembra a otra [96, pag.10].
3. Como se mencionó anteriormente, parte de las necesidades energéticas de las poblaciones rurales son cubiertas con residuos de diversos tipos, entre ellos los agrícolas, de forma que habrá casos en que la cantidad disponible de residuos no sea la esperada inicialmente.

## Retos técnicos.-

- Un proyecto bien administrado, que se base en la obtención de biomasa a partir de la leña, ofrece la posibilidad de tener en el estado estacionario de este ciclo, aproximadamente cero emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a que los árboles crecerían con la misma velocidad que se consumen. Dada la gran interacción entre población, medio ambiente, energía y economía que se tiene en un proyecto de éstas características, es necesario que cada país cuente con un grupo de profesionales que entiendan los elementos que garanticen la sustentabilidad de la biomasa, medio ambiente, población y que aunado a ello conozcan la situación particular de dicho país en relación con los recursos forestales [96, pag1]).
- Aún en el caso que no se decida utilizar a gran escala la biomasa forestal, se requiere una planeación de este energético, ya que es muy común que se realicen extracciones a ritmos no sustentables, generándose un anillo de deforestación alrededor de las ciudades [100, pag9], de forma similar a lo sucedido en Teotihuacán (Anexo I).
- Debido a que los árboles sembrados en un programa de explotación, retiran de forma continua nutrientes del suelo, producen un efecto de erosión química (similar a lo sucedido en Teotihuacán). Esto indica que se deben realizar estudios para hallar formas de mantener a largo plazo la productividad del suelo, reincorporando cualitativa y cuantitativamente los nutrientes retirados por el crecimiento de los árboles cultivados.
- El uso metódico de los recursos forestales como energético, en general requiere de tierra que actualmente posee recursos forestales; por ello es necesario realizar un estudio detallado sobre el impacto ecológico que se tendría al desalojar ciertos terrenos silvestres con el fin de utilizarlos para la siembra de biomasa forestal.
- Otra necesidad creciente de madera, proveniente de biomasa forestal, será la sustitución de muebles de plástico y metal por los de madera. Esto permitirá retirar de forma permanente CO<sub>2</sub> de la atmósfera y liberará la presión sobre los hidrocarburos y sobre los minerales metálicos que tiene cada vez concentraciones más bajas.

## Energía hidroeléctrica.-

### **Retos técnicos.-**

- Dado que en el futuro se requerirá aumentar la producción de energías renovables, es necesario comparar, antes de la construcción de una represa, qué beneficio energético se obtendrá con la construcción de la misma y compararlo de forma global con otras posibles aplicaciones que se le podría dar una determinada región, incluyendo por supuesto los respectivos impactos ecológicos.
- Debido a que la energía hidroeléctrica es una forma relativamente conocida y eficiente de almacenar energía, es necesario que se estudien los usos híbridos que puede tener con diferentes fuentes de energía renovable, tales como la solar de concentradores solares y la eólica.
- Por otra parte es necesario conocer si mediante la construcción de una planta hidroeléctrica (de gran escala) se desplazan ó no, terrenos que pueden ser necesarios para la sustentabilidad energética, ecológica, poblacional, alimenticia, de una región.
- Dado que en ciertas regiones, los mayores potenciales hidroeléctricos se encuentran ya en explotación; se deben realizar estudios para valorar explotaciones de este recurso a menor escala (minihidroeléctricas).

## Energía nuclear.-

La energía nuclear proporciona en promedio, la cuarta parte del total de la energía eléctrica que se consume en los países industrializados [91], 19% en E.U. y 16% en Canadá en 1988. En ese mismo año existen plantas energéticas en 27 países [10]. En número de plantas operables en E.U. en 1996 era de 110 y la contribución total de producción eléctrica era de alrededor del 21.9% desde 1990 y se espera que la proporción disminuya durante el siglo XXI, véase ref. [89]. Cada reactor de 1,000Mwe, requiere, 11,400 toneladas de óxido de uranio para funcionar durante 40 años a un factor de capacidad normal de 70%, los geólogos estadounidenses, junto con el Departamento de Energía del mismo país, estimaban en 1978 que las reservas comprobadas ascienden a 780,000 toneladas exportables comercialmente a precios competitivos con otras fuentes energéticas [71]. Esto demuestra que en E.U., escasamente hay uranio para los 110 reactores nucleoelectrónicos que se encuentran en operación, durante su vida útil. Esto sobre la base de minerales de ley de 0.5kg de  $U_{235}$  en 35 toneladas de mineral de alta pureza. De agotarse estos minerales, se deberá depender de reservas de mucho menor rendimiento y mayor costo energético y económico para su extracción.

Una posibilidad para alargar las reservas radioactivas, es producir reactores de cría, los cuales aumentan la cantidad de elementos fisionables (en particular del plutonio) durante su operación, permitiendo extender en centenares de veces (al menos en principio), la duración de la operación de este tipo de reactores, como en el caso de Francia con sus reactores tipo Fénix. Sin embargo en América Latina y otros países del tercer mundo, a este tipo de desarrollos se oponen tanto consideraciones de tipo estratégico de política de no-proliferación de armas nucleares [10], como consideraciones de tipo ecológico [71]. Dado que México se encuentra muy relacionado con la economía de E.U., debemos considerar que la posibilidad de reactores de cría (producción de plutonio), está descartada, más aún, cuando aún sin el apoyo de este tipo de reactores tanto India como Pakistán recientemente (mayo de 1998) han hecho detonar diversos artefactos nucleares de tipo sofisticado; armas desarrolladas en el primer caso a partir de Candu y en el segundo, de reactores experimentales de tipo militar (tipo Chernobyl). Las escaramuzas militares mayo-julio de 1999 en ambos países, son la primera guerra directa entre dos países con poderío nuclear.

Por otro lado, en el caso de México, se tienen dos unidades en laguna verde, que suman 1,300Mwe [57]. Las reservas probadas de uranio de México ascienden a 10,600 Toneladas [57, 41], las cuales apenas alcanzan para el consumo esperado durante la vida útil de las dos unidades ya mencionadas.

Si bien recientemente se ha destacado el hecho de que la energía eléctrica de origen nuclear, no aumenta al efecto invernadero, no se hace mención a diversos efectos negativos de su utilización, como las siguientes:

- El primero es el de la seguridad técnica de las instalaciones, Si bien existe un trabajo realizado bajo criterios muy estrictos, y se habla de la gran seguridad de las mismas; el caso es que ninguna compañía acepta responsabilidad total por los posibles daños de un accidente grave.

Esto, pone en seria duda las afirmaciones respecto a la supuesta gran seguridad técnica, puesto que las industrias no están dispuestas a respaldar el 100% de los posibles daños. En E.U., se tiene la ley Price-Anderson, la cual limita la indemnización que pueden recibir los ciudadanos norteamericanos en caso de un accidente nuclear grave, estableciendo como límite total de 560 millones de dólares, cuando en 1974 se calculaba que los daños totales para este tipo de evento ascenderían a 17,000 millones de dólares.

- El segundo problema técnico, con profundas implicaciones ecológicas y sociales es el manejo de los desechos radioactivos (ya que no pueden generar potencia). Este problema, está actualmente bajo profundos y amplios estudios y se estima que han de pasar varios decenios de trabajo de investigación y desarrollos, antes de conseguir métodos de tratamiento nuclear que aporte isótopos radiactivos de vida media corta, mediante rutas que sean viables energética y económicamente [69].
- El tercer problema es de tipo económico y está asociado no sólo al problema anterior, sino al costo de la construcción de centrales nucleoelectricas, véase Fig. 5.7, la cual describe la evolución del costo mundial medio de instalación de una planta de

1000MWe. Para México el costo de instalación de las dos plantas que conforman la unidad de Laguna Verde (de 1300MWe) ascendió a 4000 millones de dólares [57]; lo cual implica un costo de 3,100 dólares por kWe, este valor es mayor al promedio mundial de 2,350 dólares por kWe de origen nuclear. De acuerdo con Cohen [10] el costo de instalación de los reactores de nueva generación estará alrededor de los 2,000 dólares por kWe (en 1990).

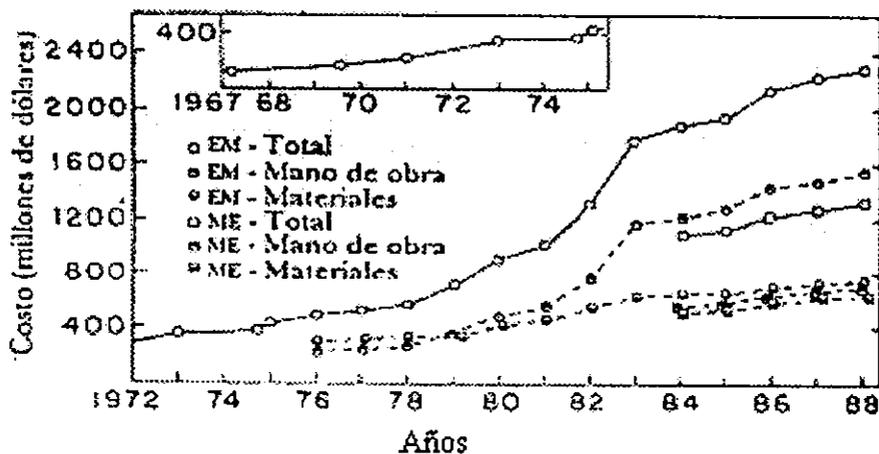


Fig. 5.7 Tomada de la ref. [89]

- El cuarto problema, es el relativo a la contaminación térmica del medio ambiente; en particular la contaminación térmica de grandes cuerpos de agua, con las consabidas consecuencias ecológicas. Este problema es el compartido por toda fuente energética basada en combustible que no proviene del sol de manera directa, sin almacenaje a largo plazo.

Debe tomarse muy en cuenta que las afirmaciones previas al respecto de la núcleo electricidad para E.U.A. y México, se han llevado a cabo tomando en cuenta información publicada por especialistas en el área. Sin embargo, estando sujeta ésta fuente energética a decisiones políticas de muy alto nivel en E.U.A., la situación de posible utilización de reactores de cría a gran escala para generar electricidad en América, permanece potencialmente como una fuente mayor de electricidad en el futuro.

### **Comentarios generales sobre las alternativas energéticas.-**

Las ventajas y desventajas que tienen las alternativas energéticas se originan en dos formas diferentes, éstas son:

- Las que surgen de las características inherentes de las alternativas, tales como potencias de generación, eficiencias de los equipos, cantidad de espacio requerido, etc.
- Las que surgen debido a la interacción entre características inherentes, con los posibles lugares de aplicación. Esto se debe a que dados los recursos humanos, económicos, tecnológicos, naturales, estrategias políticas, etc., que posee una región, quedan determinadas las ventajas y/o desventajas adicionales que pueden llegar a ser determinantes para que un proyecto se lleve a cabo ó no.

De lo anterior se puede deducir que las alternativas energéticas que cada país implemente, serán diferentes; de forma se puede dar el caso de que regiones con recursos naturales similares implementen alternativas energéticas de forma diferente.

# *Capítulo 6.*

*Valoración de las posibles  
alternativas energéticas.*

## VALORACIÓN DE LAS POSIBLES ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS.-

### Aspectos generales.-

Como se mencionó en el capítulo 5, las principales ventajas ó inconvenientes de una ú otra alternativa energética, quedan determinados por la ó las regiones donde se desee aplicar. Lo anterior indica que realizar un estudio sobre las aplicaciones de las energías renovables alrededor de todo el mundo, queda fuera del alcance de este trabajo; por tal motivo sólo se abordará el caso de México y en ciertos casos se incluirá a Estados Unidos para poder realizar estudios comparativos.

### Energía eólica.-

En México, el Instituto de Geografía, en colaboración con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), elaboró una carta de uso potencial de la energía del viento; los datos de velocidad fueron proporcionados en por el Sistema Meteorológico Nacional para el periodo 1971-1979. Como resultado de este trabajo, se identificaron las zonas con mayor capacidad de generación eólica (con niveles de potencia mayores ó iguales a los  $100\text{W}/\text{m}^2$ , entre las que destacan: el Istmo de Tehuantepec, noroeste de Quintana Roo, centro-sur del estado de Zacatecas y límite noroeste del valle de México [19.].

El potencial eólico total de la república se estima en 5000 MW (equivalente a 70,600 barriles equivalentes diarios), dicha cifra se basa en las expectativas de asimilación tecnológica de la industria nacional más que en una verdadera potencialidad de las principales zonas del país [19.]; de esto se puede deducir que si las condiciones técnicas y económicas del país son favorables, esta cifra se puede ver incrementada en cierta medida.

Las regiones eoleoenergéticas que requieren un mayor trabajo exploratorio para identificar las áreas de mayor explotación son. [19.]:

1. Sur del Istmo de Tehuantepec.
2. Península de baja California.
3. Costa oriental de la península de Yucatán.
4. Altiplano norte.
5. Región central.

6. Vertiente del Golfo de México.

7. Costa del Pacífico.

### **Comentarios y sugerencias.-**

Se puede observar que en general los proyectos que involucran a la energía eólica en México [19], son diseñados para alimentar sólo a redes locales de consumo, de forma que en general su potencia de generación es relativamente pequeña en comparación con los sistemas convencionales de alta potencia. Debido a la gran diversidad de: equipos utilizados, objetivos, participantes e instituciones ejecutoras; resulta complicado realizar una integración entre los diferentes proyectos, lo que impide que se exploren eficientemente los posibles alcances de ésta tecnología en México.

Existen sistemas como el X-Calak, que representa la mayor instalación que se ha realizado en México bajo la concepción híbrido eólico-fotovoltaico. Dado que los sistemas híbridos son centralizados por definición, es decir, proporcionan la energía al usuario por medio de una red de distribución [19.]; se presentan las desventajas mencionadas en el capítulo 5 sobre el uso de celdas fotovoltaicas para generaciones de alta potencia. De lo anterior se puede deducir que una investigación a gran escala en este sentido no resulta ser lo más propicio para desarrollar una alternativa energética sustentable que tenga gran alcance sobre la población; dado que la fabricación de los módulos fotovoltaicos requiere de tecnología sofisticada que solamente está disponible en algunos países como Estados Unidos, Alemania, Japón y España, entre otros [18.], no es conveniente para México realizar grandes inversiones en investigaciones que requieran a largo plazo de componentes extranjeras de gran precio, en sus componentes esenciales.

Dadas las características de los proyectos desarrollados en la actualidad, queda claro que en general no se están realizando importantes investigaciones ni desarrollos que permitan explorar las posibilidades de la generación eólica a gran escala. Para que los recursos sean

eficientemente invertidos, a su vez que se garantice un desarrollo sustentable, los pasos a seguir son:

1. Realizar un estudio detallado y sobre los recursos eólicos en México, que permita conocer con exactitud el alcance de ésta tecnología, contemplando integraciones entre posibles plantas, tal como se indicó en el capítulo 5.
2. Una vez que se determinen con exactitud los recursos eólicos de México, se debe formar un detallado plan nacional estratégico de desarrollo de energía eólica, en el cual se deben indicar las características preferentes que deben tener las investigaciones futuras (tales como potencia de los equipos, tipo de turbinas, etc.), metas a lograr en diferentes periodos de tiempo, así como indicar que partes de los equipos deben ser fabricados dentro del país para que sea económica, técnica y políticamente viable y sustentable el desarrollo de ésta tecnología.
3. Simultáneamente se deben realizar estudios sobre posibles: fuentes de capital, apoyos financieros, deducciones de impuestos a los participantes, etc.
4. Se debe investigar sobre integraciones híbridas con diferentes tecnologías tales como concentradores térmicos solares, combustibles fósiles convencionales, almacenamientos en hidroeléctricas, etc.

## Energía solar obtenida mediante concentradores solares.-

En 1975 el Instituto de Ingeniería de la UNAM, generó la primera versión de los mapas de irradiación global diaria promedio mensual para México, utilizando datos de insolación de 54 estaciones del Sistema Meteorológico Nacional [17.]. La irradiación media anual del país es del orden de los  $5\text{kWh/m}^2\text{-día}$  [17.].

En la Fig. 6.1 se muestra la irradiación media anual en México y E.U, pudiéndose observar que se tienen partes del territorio expuestas a radiaciones muy similares a las zonas donde E.U. realiza las investigaciones y desarrollos de las diversas tecnologías de concentradores solares por medio de concentradores. En México, se puede observar que las zonas con mayor irradiación son: la península de Baja California, Sonora, Chihuahua y parte de Coahuila Durango, Zacatecas y San Luis Potosí.

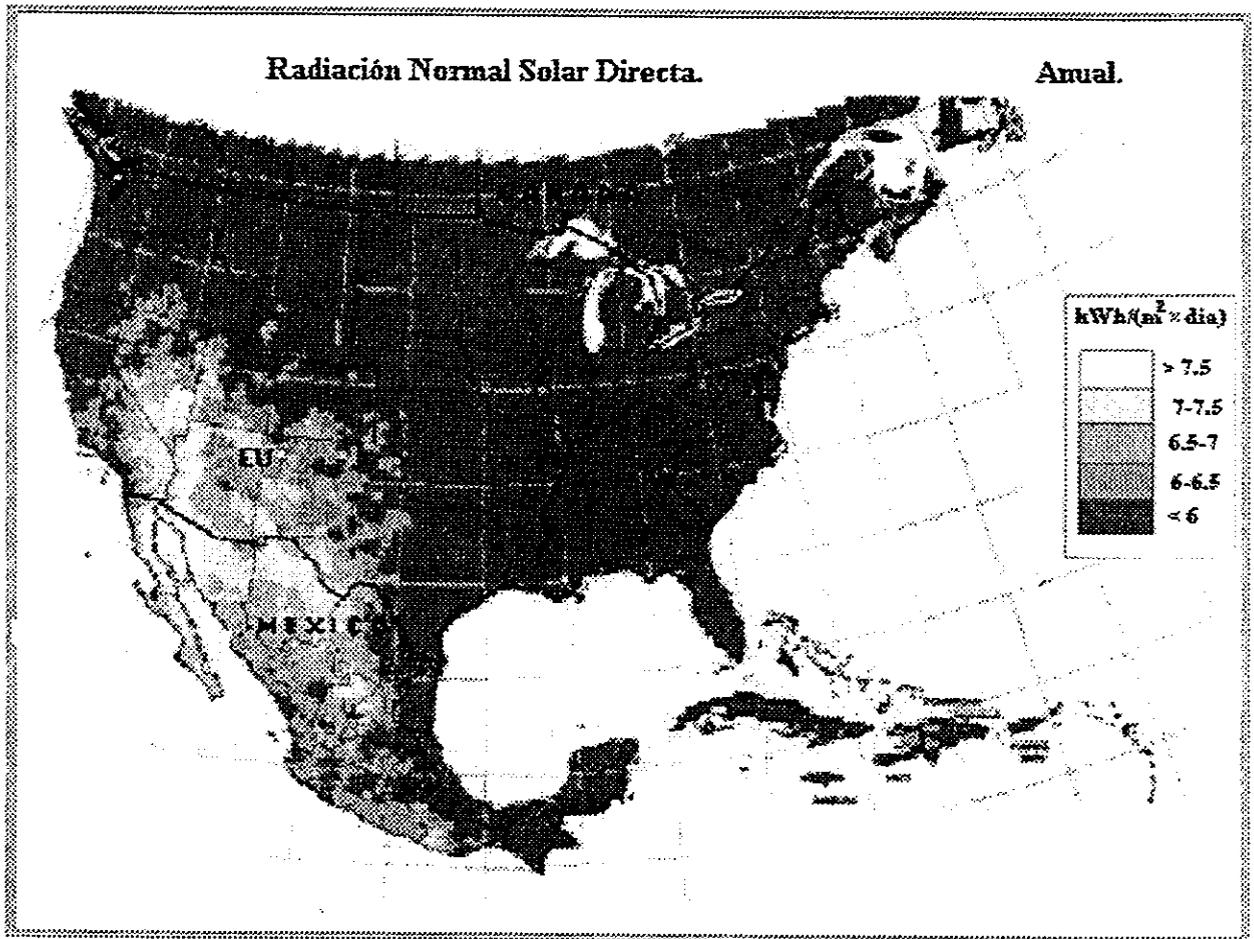


Fig. 6.1 Irradiación media anual obtenida de [23].

Por otra parte, la información proporcionada por los satélites permite realizar estudios detallados sobre el comportamiento de la irradiación solar, así como obtener información en tiempo real, que puede ser utilizada para el funcionamiento de las plantas termosolares [17].

#### **Comentarios y sugerencias.-**

La mayoría de los proyectos nacionales [17], son aplicaciones de colectores de baja temperatura (los que proveen temperaturas de alrededor de 65°C [19.]), teniéndose como consecuencia que se enfoquen a satisfacer necesidades específicas de calor, sin embargo no contemplan la generación de electricidad a pesar de los apreciables recursos de irradiación solar directa con los que cuenta el país. Dado que el uso de concentradores solares de baja temperatura, puede permitir la sustitución paulatina de gas natural, diesel, leña y otros combustibles, resulta conveniente realizar un estudio detallado sobre las posibles aplicaciones y alcances de los concentradores de baja temperatura; de forma que paulatinamente se estimule el mercado de los mismos.

Una de las pocas plantas de concentradores solares por medio de reflectores, corresponde a la que se encuentra manejada por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de forma que los avances que se pueden lograr en un solo centro de investigación son casi despreciables en comparación con los retos a vencer a escala nacional.

De acuerdo con los proyectos llevados a cabo queda claro que para la generación de alta potencia por medio de reflectores solares se requiere:

1. Debido a que los niveles de irradiación solar en parte del territorio nacional, permiten la obtención de energía eléctrica a partir de concentradores solares de alta temperatura; es necesario que se comience a dar mayor importancia a las investigaciones relacionadas con ésta tecnología, de forma que se obtenga experiencia en este sentido que haga posible una aplicación a gran escala, de forma sustentable tanto técnica como económicamente.

2. Se debe estudiar la viabilidad y la importancia del desarrollo de tecnologías de generación de alta potencia que aún no son comerciales, tales como los sistemas de Torres, en coordinación con instituciones extranjeras.
3. Se deben realizar estudios para encontrar lugares concretos donde se pueden colocar tanto plantas experimentales, como definitivas (de concentradores solares), realizando estudios que contemplen la forma que se afectarán los ecosistemas donde se colocarán las plantas generadoras de energía.
4. Es necesario desarrollar e implementar sistemas de almacenamiento de energía, ya sea en hidroeléctricas, cavidades con aire comprimido, etc. En este sentido se puede mencionar que se tiene la desventaja de la poca disponibilidad de agua dulce en las zonas de gran irradiación solar, las cuales por definición tienen altas temperaturas, poca nubosidad y humedad relativa. En lo que se refiere a los métodos de almacenamiento, se sugiere como alternativa potencial, el uso de agua salada de mar que puede ser bombeada desde ciertas regiones del Océano Pacífico o del Mar de Cortés hacia represas construidas en zonas de la Península de Baja California, Sonora y Sinaloa. Para la implementación de esta alternativa, se deben realizar estudios detallados en las regiones antes mencionadas sobre orografía, tipos de suelo, impactos ecológicos, poblacionales y agropecuarios. Por otra parte resulta conveniente estudiar posibles usos paralelos de esta forma de almacenamiento, tales como piscicultura, producción de sal, turismo, etc.; los cuales podrían proporcionar fuentes alternas de capital.

Para coordinar todas las acciones anteriormente señaladas, resulta conveniente el planteamiento de un plan estratégico nacional de desarrollo de la energía solar por medio de colectores térmicos, en el cual se deben especificar investigaciones estratégicas, ventajas otorgadas a los participantes en los proyectos, metas a lograr en diferentes periodos de tiempo, etc.

### **Energía solar de tipo fotovoltaica.-**

En México, el Centro de Investigaciones Avanzadas del IPN ha sido pionero del desarrollo fotovoltaico desde hace más de 25 años, período en el que se han fabricado tanto celdas de silicio cristalino como módulos fotovoltaicos al nivel de planta piloto [18.]. No obstante, no se ha llegado a la fabricación en serie, el objetivo ha sido demostrar la disponibilidad tecnológica para la producción de celdas con vistas a su industrialización; sin embargo, la tecnología utilizada es prácticamente artesanal y los elementos de producción limitados, aún cuando varios módulos han sido instalados, principalmente por dependencias gubernamentales [18.]. Otras Instituciones como el Centro de Investigación en Energía y el Instituto de Física, ambas de la UNAM, han desarrollado cierta actividad, principalmente en la tecnología de películas delgadas, probando diferentes técnicas de deposición y analizando varios compuestos [18.]. A la fecha no han logrado obtener prototipos, motivo por el que se puede aseverar que el desarrollo fotovoltaico en México es realmente incipiente [18.].

### **Comentarios y sugerencias.-**

Como anteriormente se mencionó, la eficiencia actual de las celdas solares, es mínima comparada con una termoeléctrica de ciclo combinado, esto unido a su alto costo unitario, hace que las aplicaciones de las celdas fotovoltaicas sólo sean viables a pequeña y mediana escala, teniéndose a los centros de consumo relativamente cerca de los lugares de generación, de forma que en México es necesario que se evalúe:

- Su uso en zonas rurales en las que no sea viable la conexión a una red de electricidad, así como el posible uso futuro de sistemas híbridos que incluyan tanto alimentación por medio de una red como por medio de celdas fotovoltaicas.
- Su posible uso en sistemas de riego en los cuales actualmente se utilice diesel, debido a que no es viable la conexión con la red de electricidad. Conforme la demanda de los combustibles fósiles, sea mayor respecto a la oferta; los precios de éstos aumentarán, y resultará viable la introducción de las celdas, en sistemas híbridos con diesel ó incluso con electricidad proveniente de la red.

## Energía geotérmica.-

La energía geotérmica, potencialmente representa para México una fuente de energía renovable que puede ser utilizada tanto para la generación de electricidad de alta potencia como para implementar sistemas de cogeneración a mediana y gran escala. Esto tiene como consecuencia que resulte conveniente explorar a detalle las posibilidades de esta fuente renovable, y evaluar en conjunto con diversos grupos industriales, la posible implementación de sistemas de cogeneración.

Sobre geotermia se puede mencionar que adicionalmente al desarrollo de las plantas geotérmicas convencionales operadas por CFE, tales como Cerro Prieto y los Azufres, se recomienda llevar a cabo las siguientes acciones:

1. Se debe realizar una caracterización detallada del gradiente térmico de la superficie del territorio nacional.
2. En las zonas con gradientes térmicos que permitan una explotación de los yacimientos de roca caliente seca, es necesario realizar estudios geológicos y geofísicos que en conjunto, permitan ubicar posibles lugares para la explotación de yacimientos geotérmicos de roca caliente seca.
3. Por otra parte, en la medida de los recursos de los yacimientos geotérmicos de roca caliente seca, se deben realizar investigaciones y desarrollos de los diferentes métodos de facturación de roca, aprovechando las experiencias adquiridas por la industria petrolera.
4. Se debe promover todo tipo de investigaciones que se encuentren encaminadas al desarrollo métodos de explotación de yacimientos de roca seca caliente.
5. Es conveniente utilizar la experiencia adquirida durante la operación de plantas geotérmicas convencionales, con el fin de ubicar posibles problemas en las plantas de roca caliente seca (tales como corrosión en tubos, control del ritmo de explotación, etc.) y llevar a cabo las acciones preventivas y/o correctivas correspondientes.
6. Con el fin de aprovechar al máximo la energía disponible en los yacimientos geotérmicos y de hacer económicamente viable a los proyectos, se debe estudiar la viabilidad de posibles integraciones con industrias (a largo plazo), de forma que se

promuevan sistemas de cogeneración. Por otra parte es posible realizar integraciones adicionales con actividades agropecuarias y turísticas, entre otras.

7. De forma similar a otras energías renovables, con el fin de coordinar las acciones anteriormente mencionadas, resulta conveniente la formación de un programa nacional estratégico de desarrollo de la energía geotérmica.

### **Energía proveniente de la biomasa.-**

La cuantificación del recurso de la biomasa es una tarea complicada y no existen en México datos precisos, salvo las estadísticas que presenta anualmente el balance nacional de energía en el que se consignan las cantidades consumidas de leña y bagazo de caña [20.].

Como se mostró con anterioridad, la biomasa que se encuentra disponible para uso energético está formada principalmente por recursos forestales y por residuos municipales. Para ejemplificar la disponibilidad de éste recurso, se mostrará el caso de la ciudad de México y los residuos municipales que ésta genera:

En la ciudad de México, durante 1998, se estima que la generación per cápita diaria de basura fue de 1.204kg/día, siendo gran parte de ésta: generada por el sector residencial (46% del total) y formada por un 80% de materia orgánica, de la cual un 40% corresponde a residuos alimenticios [40]. El poder calorífico de la basura en la ciudad de México, es de aproximadamente 10,260kJ/kg, de forma que se encuentran disponibles 12,353.04kJ (0.32 lts. equivalentes de petróleo) per cápita diarios provenientes de los residuos municipales [40]. Como el consumo promedio per cápita de energía en el sector residencial es aproximadamente de 20960.55kJ, se tiene como límite actual máximo una satisfacción del 58.9% de las necesidades energéticas residenciales respecto del promedio nacional, con la comparación actual de la basura en el D.F.

Como se mencionó en el capítulo 5, el poder calorífico de los residuos sólidos municipales, se puede ver disminuido en la medida que se implementen sistemas más eficientes y estrictos de reciclaje, a continuación se ejemplificará con el caso de la ciudad de México:

Anteriormente se señaló que el 46% de los residuos generados en la ciudad de México, son de origen residencial, que es el sector donde se originan la mayoría de los residuos de origen alimenticio. Dado que la basura está formada por 80% de residuos orgánicos y el 40% de éstos proviene en su mayoría del sector residencial, entonces el 60% restante necesariamente proviene de otros sectores como el industrial, servicios, comercial, etc.; esto tiene como consecuencia que el 60% del material combustible es altamente susceptible a programas de reciclaje por parte de las industrias, comercio, etc. Por lo anterior es necesario que al implementar programas a largo plazo de uso de residuos sólidos municipales como energético, sea conveniente tomar en cuenta éstas importantes interacciones con las industrias, comercios, etc. y el encarecimiento creciente de los hidrocarburos y energía, debido a la escasez tendencial de los hidrocarburos.

#### **Comentarios y sugerencias.-**

Adicionalmente, en el caso de la biomasa proveniente de zonas forestales y de residuos de actividades agropecuarias, es necesario realizar un estudio a escala nacional, que involucre los puntos mencionados en el capítulo 5. Una vez que se conozca la capacidad nacional de producción de energía a partir de la biomasa, en la misma medida se deben dirigir recursos hacia programas concretos que investiguen las posibles aplicaciones de dichos energéticos.

## Energía hidroeléctrica.-

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) clasifica las centrales generadoras, según su tamaño, en: microcentrales hasta un límite de 50 KW, minicentrales de 50 a 500 KW y pequeñas centrales hidroeléctricas de 500 a 5,000 KW [20.].

El potencial hidroeléctrico total nacional se estima en 53,000 MW, del cual se tienen identificados 541 sitios con un potencial de 19,600 MW. Según los datos proporcionados por la CFE el potencial hidroeléctrico aprovechado actualmente para generación de electricidad asciende a los 9,121 MW en 77 centrales con una generación anual de poco más de 20,000 GWh al año [20.].

La Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, en su papel de promotora de las Energías Renovables, actualmente patrocina un proyecto para realizar la evaluación del potencial minihidroeléctrico nacional en los estados de Veracruz y Puebla para centrales con capacidades menores a 5 MW, los resultados preliminares del proyecto arrojan un potencial del orden de 400 MW. Del mismo proyecto se ha desprendido la posibilidad de rehabilitar una minihidroeléctrica en Ixtaczoquitlán, Ver., la cual tiene actualmente una capacidad de 500 KW y se piensa que puede llegar a 2 MW [20.].

El potencial estimado para centrales con capacidades instaladas menores a los 10 MW se sitúa en los 3,250 MW. Actualmente se han instalado 34 centrales dentro de este rango de capacidad, en los que se ha instalado una capacidad total de 109 MW, generándose anualmente 479 GWh. Una tarea importante que se deberá cumplir en breve, a fin de promover el aprovechamiento de estos recursos, es el estudio de la factibilidad técnica y económica de desarrollar proyectos en los distintos sitios identificados [20.].

### **Comentarios y sugerencias.-**

Dada la obvia dependencia que tiene este tipo de energía con los usos que se le da a los recursos hidrológicos, se requiere realizar un estudio a largo plazo que contemple el crecimiento de las poblaciones (tanto rurales como urbanas); lo anterior es debido a que el crecimiento de la población tiene un consecuente aumento en el consumo de agua, tanto para consumo humano como para los diferentes servicios. De no llevarse a cabo un estudio de esta naturaleza, se corre el riesgo de realizar una serie de inversiones y/o de consideraciones a largo ó mediano plazo, en una fuente de energía renovable que paulatinamente podría ir disminuyendo su disponibilidad, esto debido a las crecientes necesidades de agua por parte de la población.

## **El transporte y las energías renovables en México.-**

Como se mostró con anterioridad, en México el combustible que pudieran utilizar la mayor parte de los sistemas de transporte, no puede tener de forma sustentable su origen en la biomasa obtenida a través de los cultivos. Esto indica que conforme se agoten los hidrocarburos, la mayor fuente de energía que recibirá este sector, provendrá fundamentalmente de la electricidad producida por las diversas fuentes renovables, teniéndose como consecuencias que la mayoría de los sistemas de transporte serán alimentados a través de electricidad ó de combustibles elaborados a partir de la misma.

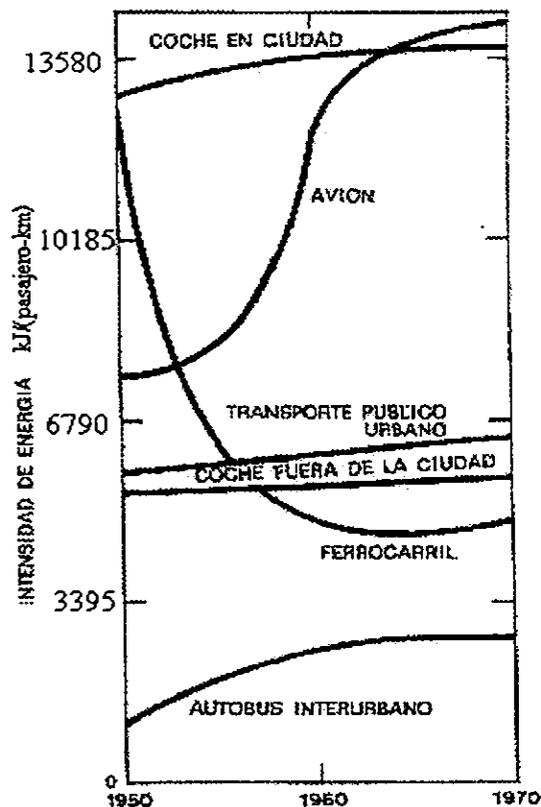
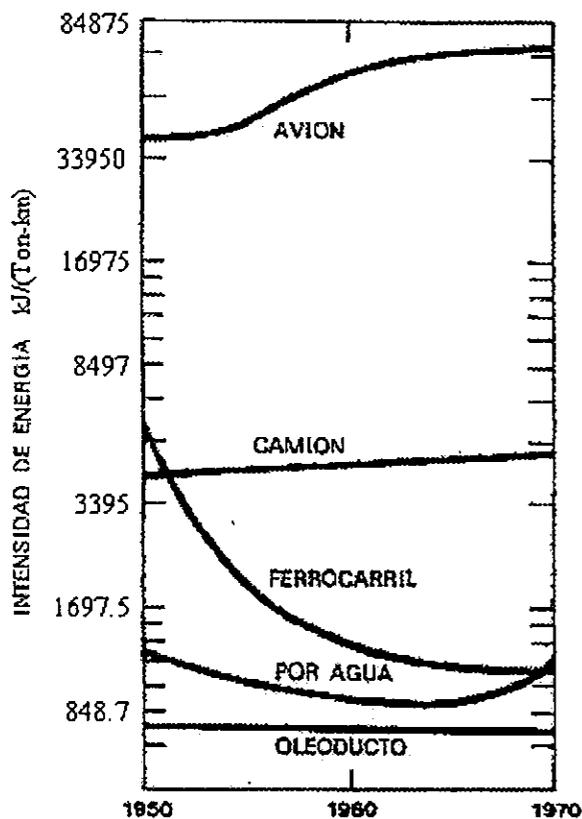
### **Características actuales del transporte en México [36].-**

- La infraestructura del transporte es relativamente grande ya que actualmente la red de carreteras alcanza una longitud de 225,000 kilómetros, mientras que la red ferroviaria tiene 26,500 kilómetros de extensión.
- El transporte es casi totalmente dependiente de las fuentes de petróleo (cerca del 99%).
- El uso del ferrocarril para el transporte de pasajeros ha ido disminuyendo paulatinamente, debido principalmente al deterioro en la calidad del servicio.
- En México, la estructura del sistema de transporte se encuentra desequilibrada debido a que el 70% del de carga y el 97% del de pasajeros descansa en el autotransporte.
- La ciudad de México y su área metropolitana, con una población de 18 millones de habitantes, concentra el 42% del parque vehicular, y consumen el 27% de los combustibles destinados a automotores del país.
- La edad promedio del parque automotor en México es superior a los 10 años, mientras que en E.U. no asciende a los 5 años.

Las Figs. 6.2 y 6.3, muestran que en E.U., los medios terrestres más eficientes para el transporte de mercancías sólidas son los ferrocarriles, para el transporte de pasajeros entre ciudades son los ferrocarriles y los autobuses, y para el transporte de pasajeros dentro de

las ciudades son los transportes públicos urbanos. En México la situación es muy similar, para ejemplificarlo se muestran los siguientes casos:

- E. Blanchi calculó que para 1000 toneladas-día-kilómetro brutas transportadas, el camión de carga es 5.6 veces menos eficiente que la tracción eléctrica ferroviaria con regeneración y recuperación de energía y la tracción ferroviaria a diesel es 2.73 veces menos eficiente [36].
- Si 50% del transporte de mercancías fueran transferidas de las carreteras hacia los ferrocarriles, se obtendrían sustanciales ahorros de energía, del orden de  $125.6 \times 10^{12}$  kJ al año [36].



Figs. 6.2 y 6.3 Consumos específicos de diversos transportes en E.U. (Carga y pasajeros, respectivamente) Obtenidas de ref. [42]

En el futuro, por conveniencia energética, los medios de transporte deben ser lo más eficientes posibles y debido a que ésta eficiencia depende tanto de las características específicas de las unidades utilizadas, como de la forma en que éstas se empleen, se realizan las siguientes recomendaciones a implementar en el país:

1. Paulatinamente aumentar la organización (puntualidad, eficacia, etc.) de los sistemas de transporte, tanto ferroviarios, sistemas urbanos de transporte, etc. Lo anterior se debe hacer con el fin de: 1) adquirir experiencia en la organización y control de los diferentes medios de transporte, 2) comenzar a ubicar las infraestructuras a realizar ó cambiar (construcción de vías férreas, etc.), con el fin de aumentar la organización del mismo.
2. Se deben realizar estudios que permitan el desarrollo continuo y sustentable a largo plazo (30 a 40 años) de medios de transporte tales como ferrocarriles, sistemas de metro y sistemas de autobuses urbanos (evidentemente, tomando en cuenta el agotamiento de los combustibles fósiles).
3. Paulatinamente promover e instaurar cambios en los sistemas vehiculares actuales, de forma que se comiencen a conocer otras tecnologías (tales como vehículos híbridos). De ésta forma se garantice que las inversiones a realizar se hagan en un periodo de tiempo tal que, se permita una transición sustentable energética y económicamente en las tecnologías del transporte.
4. Se recomienda que privatizaciones y concesiones a gran escala en el transporte, se estudien detalladamente de forma que los participantes a la par que se beneficien, queden comprometidos a participar en los planes nacionales de investigación y desarrollo de los sistemas de transporte del futuro.
5. Con en fin de coordinar las actividades académicas, económicas, administrativas, etc., que se requieren para el desarrollo sustentable del transporte; resulta conveniente la implementación de un plan nacional a largo plazo (30 ó 40 años); en coordinación con otros planes a largo plazo (industriales, educativos, energéticos, etc.).

## Comentarios generales sobre el desarrollo de las energías renovables en México.-

Se recomienda que privatizaciones y concesiones a gran escala (de sectores que se relacionen de forma importante con la energía), se estudien detalladamente de forma que los participantes y la nación, se beneficien mutuamente, y queden comprometidos los inversionistas privados a participar en los planes nacionales de desarrollo de los diferentes sistemas que se relacionen con la energía.

Independientemente de las condiciones actuales del país (tanto en política, economía, condiciones sociales, etc.), es un hecho que México, en el futuro se deberán utilizar energías renovables que sustituyan totalmente a los combustibles fósiles, debido a que éstas necesariamente se agotarán. Por lo anterior sería conveniente que para cada una de las alternativas energéticas, se desarrollen las acciones sugeridas en el capítulo 6 y las que resulten convenientes del capítulo 5. Dado que en general las acciones sugeridas, requieren de un gran tiempo de implementación, grandes cantidades de capital invertido y de: infraestructuras a realizar, gran número de técnicos y científicos de distintas disciplinas, etc., el problema necesariamente deja de ser simplemente planeación energética y se convierte en un problema multidisciplinario que requiere de un plan nacional de desarrollo a largo plazo (de 30 a 40 años) que garantice la sustentabilidad en las diferentes disciplinas (alimentación, vivienda, educación, medio ambiente, energía, etc.). Resulta conveniente que dicho plan nacional se implemente paulatinamente (con el fin de ir conociendo los retos a vencer con mayor detalle), de forma que gradualmente se comiencen a canalizar recursos y apoyos de diversos tipos para su implementación. A éste respecto se debe estudiar la posibilidad de realizar diversos estudios coordinados con industrias ú organizaciones gubernamentales extranjeras, de forma que con la ayuda de diversos esfuerzos coordinados, se garantice la sustentabilidad nacional en todos los aspectos.

Para que las acciones que se desarrollen entre las diferentes disciplinas sean sustentables entre sí, se sugiere que se utilicen herramientas teóricas similares a las mostradas en el capítulo 2, que tomen en cuenta efectos cruzados entre diferentes fenómenos y además que se encuentren basadas en hechos físicos comprobables (tal como lo es la conservación de energía), ya que de ésta forma se garantizan las condiciones energéticas mínimas necesarias

requeridas para alcanzar la sustentabilidad (esto es, un estado estacionario desde el punto de vista de termodinámica de procesos irreversibles). Por otra parte, se propone que en el futuro los proyectos a gran escala, se estudien tanto económicamente como energéticamente, de forma que si éste último se basa en un modelo similar al mostrado en el capítulo 2, se pueden conocer las repercusiones energéticas a largo plazo de un proyecto, tomando en cuenta las interacciones que se consideren convenientes.

En el capítulo 7 se sugieren acciones más específicas a lo mencionado anteriormente.

# *Capítulo 7.*

*Sugerencias de acciones  
a desarrollar.*

## SUGERENCIAS DE ACCIONES A DESARROLLAR

Como se mostró en el capítulo anterior, es necesario que se desarrolle un plan ó proyecto estratégico a escala nacional, a largo plazo (no menos de 30 años), de forma que se garantice un desarrollo sustentable global que involucre las diversas áreas del país y los diversos procesos que en él se realizan. Tal y como se ha podido observar, lo anterior no es una solución utópica, sino al contrario, es una necesidad fundamental para que el país tenga en el futuro las posibilidades de brindar condiciones mínimas necesarias de supervivencia a sus pobladores humanos (tales como alimentos, electricidad, actividades industriales, sistemas de transporte eficientes, etc.).

Dado que cambiar de una etapa tecnológica a otra, requiere un aumento acelerado de la inversión de capital, en el futuro a escala internacional se pueden presentar fenómenos de escasez del mismo, debido a que los países industrializados realizarán una gran parte de sus inversiones dentro de ellos mismos. Esto tiene como consecuencia que exista escasez de capital para realizar inversiones ó préstamos a los países subdesarrollados. Lo mencionado anteriormente, indica México no debe esperar pasivamente a que otros países desarrollen la tecnología para luego importarla, por cuanto el periodo internacional de escasez de capital puede durar muchos años, debido a la magnitud de las inversiones involucradas y por lo tanto es altamente probable que México no tenga los medios para realizar la transición con éxito, a menos que emprenda acciones con el tiempo suficiente para realizar las inversiones necesarias.

La alternativa en México para ser autosuficientes energéticamente en no más de treinta años, es desarrollar sus propias alternativas mediante los recursos materiales y humanos que se encuentran dentro del país y aquellos que se puedan desarrollar a futuro. Dado que el proceso de formación de personas y de infraestructuras, es largo (de 20 a 30 años), se debe ya comenzar a estudiar este problema detalladamente en todos los niveles (académicos, políticos, gobernantes, científicos, profesores, etc.).

De acuerdo a lo expresado anteriormente, se propone que dicho proyecto tenga las siguientes características concretas:

1. Deberá tener un objetivo central e invariable: garantizar la independencia energética en todos los niveles de potencia y de tipo de uso, alrededor del año 2030 (que es cuando la escasez de energéticos comenzará a ser importante en México), aportando soluciones integrales y armoniosas con la naturaleza, a problemas centrales de la sociedad relacionados directa ó indirectamente con aspectos energéticos: como transporte, industria, urbanismo, etc., sobre la base a futuro de escasez de fuentes de energía.
2. Debe consultar de forma directa y libre a todos los investigadores activos, relacionados directa ó indirectamente con las alternativas energéticas de alta potencia ó tecnologías de ahorro de energía.
3. Deberá ser un proyecto estatal a largo plazo, que transite a través de los sexenios, por ello deberá ser un proyecto aprobado por consenso entre todas las fuerzas políticas del país.
4. La organización del proyecto, deberá ser flexible y estar regida por criterios de producción científico-tecnológicos y no por criterios burocráticos o decisiones momentáneas de carácter sexenal. La organización deberá ser autónoma.
5. La dirección del proyecto en todos los niveles, deberá estar a cargo de especialistas en áreas energéticas ó afines.
6. La coordinación directiva del proyecto deberá estar formada por personal profesional en áreas relacionadas a energéticos provenientes de Pemex, CFE, Secretaría de Energía, Universidades y Cámaras de la Industria.
7. Al inicio del proyecto, se pondrá énfasis en la formación de investigadores e ingenieros del más alto nivel posible tanto en el país como en el extranjero.
8. Se deberá contemplar el desarrollo paulatino de condiciones materiales tales como, la infraestructura industrial requerida para la puesta en práctica o aplicación de metas parciales relacionadas al objetivo central del proyecto.
9. En una primera etapa, el proyecto requeriría recursos económicos, a mediano plazo sería autofinanciable y podría ser incluso fuente de ingreso de capital, por venta de tecnología al extranjero y venta de maquinaria. El proyecto no requiere en medida

apreciable de recursos en dólares, excepto en la compra de equipos para hacer experimentos y mediciones varias. La mayor inversión se requeriría para: salarios de personal técnico, educación del personal en Universidades, materiales y desarrollos industriales en prototipos y maquinaria a escala piloto. En su fase productiva, el proyecto sería uno de los principales motores que impulsaría el desarrollo económico y social del país. En principio, el proyecto anualmente podría financiarse en pesos con recursos de impuestos al consumo de productos de Pemex y CFE.

10. El proyecto tendría la obligación de informar y rendir cuentas periódicamente, al H. Congreso de la Unión, del avance de sus actividades y necesidades específicas de recursos en relación con su programa de desarrollo vigente.
11. Deberá evaluar posibles alianzas con el extranjero, de forma que en un periodo inicial se intercambien las diversas experiencias obtenidas en el desarrollo de diversas actividades.
12. Deberán evaluarse las posibles maneras en que la industria nacional podría participar en el proyecto, de forma que en general se promoviera a la par un desarrollo sustentable de éstas.

# *Capítulo 8.*

*Discusión y conclusiones.*

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las reservas mundiales de hidrocarburos se espera que se agoten antes del año 2037, sin embargo existen ciertos países que verán agotadas sus reservas antes de dicho año (como E.U.A, el cual antes del año 2007 se estima que se agotarán sus reservas de gas y petróleo). Esto tiene la consecuencia de que si bien países como México, tienen reservas para no más del año 2040, se presentarán problemas económicos y comerciales debido a la creciente necesidad de ciertos países como E.U.A. de importar energía para satisfacer su demanda interna. Esto provocará que alrededor del año 2006, comiencen a presentarse en forma creciente una serie de inestabilidades económicas y comerciales, debido a decisiones políticas internacionales relacionadas con los energéticos fósiles.

Respecto a las variaciones internacionales del precio de los hidrocarburos, no se puede determinar con exactitud la magnitud de éstas, ya que dependen de las decisiones políticas y comerciales tomadas por diversos países como E.U.A. (como compromisos financieros adquiridos, presiones comerciales indirectas para forzar la venta de energéticos, etc.).

Los problemas comerciales y económicos que se presentarán debido al agotamiento de los hidrocarburos, tendrán repercusiones negativas crecientes en las actividades industriales, agropecuarias y poblacionales; esto es debido a que para seguir realizando las mismas actividades, se deberá pagar una mayor cantidad de dinero por la energía consumida. No se podrán realizar planes a largo plazo para invertir en diversos rubros, debido a las grandes variaciones que tendrá el precio de los hidrocarburos, de ésta forma el crecimiento nacional se verá mermado.

Por otra parte, dado que México es fuertemente dependiente de los recursos adquiridos mediante la venta de energéticos, se debe hacer gran énfasis en el desarrollo de fuentes alternas de capital, que permitan independizarse paulatinamente de los ingresos dependientes de los hidrocarburos.

Todo lo anterior indica que México debe comenzar a desarrollar fuentes de energía independientes de los hidrocarburos, y como se ha mostrado con anterioridad, esto se debe hacer a pesar de que las reservas sean aún relativamente grandes con el fin de lograr:

1. Que el desarrollo nacional se vea menos afectado por los futuros altos precios de los hidrocarburos.
2. Que las inversiones y los desarrollos tecnológicos a realizar, queden distribuidos en un periodo largo de tiempo que permita la realización de los diversos proyectos.
3. Lograr una transición sustentable y paulatina entre las tecnologías actuales y las futuras fuentes renovables de forma que la disponibilidad de la energía no disminuya durante la transición.
4. Dado que el desarrollo de fuentes alternas de energía, requiere de gran cantidad de energéticos, es necesario que la mayor parte de dichos desarrollos se lleven a cabo cuando los hidrocarburos aún no son prohibitivos por su alto costo ni por su baja disponibilidad (pocas reservas).

Todo ello requiere de una planeación energética a escala estratégica, la cual se observó que requiere de:

- Un marco teórico que se encuentre basado en leyes físicas comprobables, de forma que los resultados que se obtengan de éste, sean irrefutables desde cualquier punto de vista y permitan la realización de acciones coordinadas en diferentes áreas de desarrollo.
- Una planeación simultánea de diferentes rubros, tales como: producción de recursos y servicios, alimentos, demografía, generación y consumo de energía, urbanismo, etc.
- Dada la participación de múltiples disciplinas, se requiere de un programa que promueva la interacción de gran cantidad de profesionistas de diferentes áreas, industrias, etc., que bajo el mismo marco teórico, intercambien información y experiencias que se puedan implementar en la creación de un programa de desarrollo estratégico que considere a los aspectos mencionados en el punto anterior.
- Conocer las capacidades y características de generación mediante energía renovable que posee una determinada región (país, estado, etc.), con el fin de establecer lineamientos

generales de desarrollo de dicha localidad, para la planeación demográfica, industrial, alimenticia, etc.

Sugerencias a seguir:

- Se recomienda que no se adopte una actitud pasiva en el desarrollo de fuentes alternas, debido a que se puede dar el caso de que no haya equipo extranjero a importar, en suficiente cantidad como se requiera, debido a la gran demanda mundial que tendrán éstos y a las inestabilidades económicas, políticas y sociales que generará el agotamiento de los combustibles fósiles.
- Desarrollar por lo menos en parte, tecnología propia para generar energía renovable; esto es con el fin de sobrepasar (con el menor daño económico, humano y político) la etapa de escasez y caos económico que se presentará al agotarse los combustibles fósiles.
- Dado que la población en el futuro será totalmente dependiente de la generación de energía por medio de fuentes renovables, se deben estudiar a detalle las formas en que éstas se pueden desarrollar en coordinación con diferentes organismos nacionales ó extranjeros.
- Para todo lo expuesto en este capítulo, en el caso de México, se sugiere la creación de un plan nacional de desarrollo que contemple la sustentabilidad interconectada de los rubros más importantes que se relacionan con la energía, población y creación de recursos y servicios. Esto con el fin de alcanzar a largo plazo la independencia energética sustentable de México y de evitar situaciones de tipo catastrófico debido a la falta de cumplimiento de las condiciones mínimas de sustentabilidad .

## 9 REFERENCIAS

- 1.- 1 MW Stall-regulated Wind Turbine. CADDET, Technical Brochure No. 15. United Kingdom.
- 2.- A Biphase Turbine at a Geothermal Well: Economic Benefits. CADDET, Technical Brochure No. 52. United Kingdom.
- 3.- Alexander Tarasyev and Chihiro Watanabe. IIASA: Interim Report IR-99-001/ January 99. "Optimal control of R & D Investment in a Techno-Metabolic System". [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)
- 4.- Almanaque Mundial. Editorial Televisa, México (Números de los años 1965 a 1999).
- 5.- Andrea P. Bassinini. IIASA: Interim Report IR-97-086/December 1997. "Localized Technological Change and Path-Dependent Growth" web: [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)
- 6.- Annual Energy Review. U.S. Department of Energy, Energy Information Administration. 1997.
- 7.- Anthony G. Patt in: IIASA: Interim Report IF-97-056/August "Economists and Ecologists: Different frames of Reference for Global climate change" Web: [www.iiasa.ac.at](http://www.iiasa.ac.at)
- 8.- Augusto Remesal. Un banquete para los dioses. Alianza Editorial, Madrid (1993).
- 9.- Banco de Información Económica, INEGI. Sector Energético. Consulta por Internet, en [www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx).

- 10.- Bernard L. Cohen. La energía nuclear (una opción para el futuro).  
Ed. Siglo XXI (1993)
- 11.- Bertrand Russell. Nuevas esperanzas para un mundo en transformación.  
Editorial Hermes. Buenos Aires (1964).
- 12.- Bio Facts, Fueling a Stronger Economy, Ethanol from Biomass.  
U.S Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory.  
Enero, 1995.
- 13.- Bio Facts, Fueling a Stronger Economy, Methanol from Biomass.  
U.S Department of Energy, National Renewable Energy Laboratory.  
Enero, 1995.
- 14.- Carbon Secuestration State of the Science.  
U.S Department of Energy, Office of Science, Office of Fossil Energy.  
Febrero, 1999.
- 15.- CEPAL. Economía campesina y agricultura empresarial.  
Ed. Siglo XXI, cuarta edición (1989), México.
- 16.- Climate Change, in Canadian Sites en la siguiente  
dirección: <http://www.cent.org/geo12/foc2a3d.htm>
- 17.- CONAE. Energías Renovables, Energía solar fototérmica. Página de consulta en  
internet, en [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), 1999.
- 18.- CONAE. Energías Renovables, Energía solar fotovoltaica. . Página de consulta en  
internet, en [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), 1999.
- 19.- CONAE. Energías Renovables, Energía Eólica. . Página de consulta en  
internet, en [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), 1999.

- 20.- CONAE. Energías renovables, Energía Minihidráulica. . Página de consulta en internet, en [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), 1999.
- 21.- CONAE. Energías renovables, Energía de la Biomasa. . Página de consulta en internet, en [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), 1999.
- 22.- CONAE. Energías renovables, Energía Minihidráulica. . Página de consulta en internet, en [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx), 1999.
- 23.- Concentrating Solar Power Program overview por Sun Lab., Abril 1998.  
Documento No. DOE/GO-10098-567.
- 24.- D. S. Metcalfe and D.M Elkins. Producción de cosechas  
(Fundamentos y prácticas). Ed. Limusa (1987)
- 25.- D.S. Halacy Jr. The Geometry of Hunger. Harper & Row, Publishers,  
New York U.S.A.(1972).
- 26.- Darrel S. Metcalfe, Donald M. Elkins. Producción de Cosechas  
Fundamentos y prácticas. Edit. Limusa 1987 México, D.F.
- 27.- Debra J. Lew, Robert H. Williams, Xie Shaoxiong y Zhang Shihui.  
Industrial-Scale Wind Power in China. De: center for Energy  
and Enviromental Studies, princeton University and Ministri of  
Electric Power Beijim China. Noviembre 7 de 1996.
- 28.- Economía Campesina y Agricultura Empresarial. Por CEPAL. Ed Siglo XXI,  
cuarta edición (1989), México.

- 29.- El Agua y la Energía en la Cadena Alimentaria: Granos Básicos.  
Foro de Consulta Permanente. Programa Universitario de Energía,  
Programa Universitario de Alimentos, Instituto de Investigaciones Económicas.  
Universidad Nacional Autónoma de México.
- 30.- El Sector Eléctrico de México (coordinación Daniel Resendiz-Nuñez) Comisión  
Federal de Electricidad y Fondo de Cultura Económica, México (1994) p. 470.
- 31.- Energy for Planet Earth. (Readings from Scientific American Magazine).  
W.H. Freeman and Company, New Yor, U.S.a. (1991).
- 32.- Enrique Ruíz García. La Estrategia Mundial el Petróleo. Editorial Nuevo Imagen.  
México (1982).
- 33.- Envían Carta a Zedillo (Alertan científicos sobre riesgos transgénicos para la  
biodiversidad) La Jornada, 6 julio (1999) p. 52.
- 34.- Estrada. Comportamiento Animal, el caso de los primates. Fondo de Cultura  
Económica. México (1993) 99.
- 35.- FAOSTAT, Africulture Data. Population (Annual Time series). F.A.O.  
(Web page, 1998)
- 36.- FAOSTAT, Africulture Data. Land (Land use) F.A.O.  
(Web page, 1998)
- 37.- FAOSTAT, Africulture Data. Land (Irrigaton) F.A.O.  
(Web page, 1998)
- 38.- FAOSTAT, Africulture Data. Agricultural Production (Crops Primary) F.A.O.  
(Web page, 1998)

- 39.- FAOSTAT, Agriculture Data. Agricultural Production (Livestock primary) F.A.O. (Web page, 1998)
- 40.- Felipe Muñoz, Martín Arciga. Evaluación de los RSM como fuente de energía en la ciudad de México. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
- 41.- Fernando Alba Andrade. Introducción a los energéticos. El Colegio Nacional, México, 1997.
- 42.- G.B. Zorzoli. H. Blume El Dilema Energético. Ediciones, Rosario 17, Madrid (1978).
- 43.- Gerardo Bazán. Transporte y Energía, consumo de energía en el sector transporte. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Fondo de Cultura Económica. México, D.F., 1988.
- 44.- H.J. Helikson, D.Z. Haman and C.D. Baird. Pumping Water for Irrigation using Solar Energy. University of Florida, November 1991.
- 45.- Hank Price, David Kearney. Parabolic-Trough Technology Roadmap: A pathway and Sustained Commercial Development and Deployment of Parabolic Trough Technology. SunLab/NREL, Kearney and Associates. Enero, 1999.
- 46.- I Progoine. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes (Third Edition). U.S.A., 1967.
- 47.- International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA Annual Report 1998). Vol 3, Números 2-4, 1998. Special issue on: Long-term Greenhouse gas emission scenarios and their driving forces. Guest Editors J. Alcamo and N. Nakieenov (Web:www.iiasa.ac.at).

- 48.- Interview with Umberto Colombo, by Valentina Sereni. "Not Simple Recepte". Galileo, Diary of Science and Global Issues, Year III - n° 10. Septiembre, 1998.
- 49.- Isaac. F. Palacios Solano. América Latina: El estigma del petróleo. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM y Ediciones El Caballito (1996).
- 50.- J. Filipovich, Las Fuentes de Energía. Ed. Prensa Española (1975).
- 51.- J. Guevara Calderón. La Agricultura Mexicana y su desarrollo regional. Universidad Autónoma de Chapingo (1989), pág 10.
- 52.- J.I. Zimmerman. Países pobres. Países ricos. Siglo XXI Editores, México (1979) p. 101.
- 53.- J.M. Blair. The Control of Oil. Vintage Books. Division of Random House, New York, USA (1978).
- 54.- Jaques Demange, Florence Jaudin, Jen Lemale, Alain Menjoz. The Use of Low-Enthalpy Geothermal Energy in France. International Geothermal Association.
- 55.- Jared Diamon. Natural History 9 (1994) 4.
- 56.- Jean Meyer, La Jornada 1 julio 1999 p. 1.
- 57.- José Antonio Rojas Nieto. Desarrollo Nuclear en México. UNAM, serie Economía de los 80. México, 1989.
- 58.- K. Openshaw, Wood Energy News, Vol. 13 No.3 (1996)

- 59.- Kenneth H. Cooper. The Aerobics Way. McEvans and Company, Inc. New York, N.Y. U.S.A. (1979).
- 60.- L.R. Brown, In the Human Interest. W.W. Norton & Co. Inc. New York (1974).
- 61.- Leonard Cotterell. Land of the Two Rivers, The World Publishing Co., Cleveland Ohio, U.S.A.(1962).
- 62.- Lester R. Brown. The Twenty-Ninth Day. Accommodating human needs and numbers to the earth's resources, by Worldwatch Institute. W.W. Norton and Co. Inc. New York, USA (1978).
- 63.- Luis G. López Lemus (comunicación personal, relativa a su documento técnico: Energy use and production, demography and the world market oil price influencing twenty years of economic performance and environmental degradation in Mexico).
- 64.- M. J. Kirkby and R.P.C. Morgan. Erosión de suelos. Ed. Limusa (1984).
- 65.- Man's Impact on the Global Environment (Report of the Study of Critical Environmental Problems (SCEP)). The Massachusetts Institute of Technology, USA (1970).
- 66.- Marina Marrazzi. Which Engine for the Year 2000 Earth? Galileo, Diary of Science and Global Issues, Year III - nº 10. Septiembre, 1998.
- 67.- Miguel Leon-Portilla. Antropología de teotihuacán a los aztecas. UNAM, 1995 México, D.F.
- 68.- New Turbine Technology Cuts the Costs of Small-scale Hydro Plants. CADDET, Technical Brochure No. 27. United Kingdom.

- 69.- Paul Govaerts, en el trabajo de bienvenida de: Proceedings of the Fifth International Information Exchange Meeting Mol, Belgium 25-27 November (1998) On Activide and Fission Product Partitioning and Transmutation. Coorganised by the European Commision EUR 18899EN. (Nuclear Energy Agency Organization For Economic Co-operation and Development).
- 70.- Pemex, Anuario Estadístico (1985). La Industria Petrolera, Pemex (1986).
- 71.- Peter Faulkner. La Bomba silenciosa. Ed. Argos, S.A. Barcelona, 1978.83
- 72.- Presentación del Secretario de Energía ante la Comisión de Energéticos de la LVII Legislatura de la H. Cámara de Diputados, 12 de noviembre de 1997, p 26.
- 73.- Programa Nacional de Acción Climática. Documento para Consulta Pública. SEMARNAP (1999) p. 92.
- 74.- R. Gerald Nix. Wind Energy as a Significant Source of Electricity. NREL, Golden Colorado, U.S., 1995.
- 75.- Revolución Tecnológica (coordinador Marcos Kaplan) Tomo I (Ciencia, Estado y Derecho en las Primeras Revoluciones Industriales). Universidad Nacional Autónoma de México y Petróleos Mexicanos. México (1993).
- 76.- Richard C. Duncan. México's Petroleum exports: Safe Collateral for a \$50 billion Loan? Institute on Energy and Man. 3821 NE 45<sup>th</sup>, # 37 Seatle, WA 98105, USA (January 1, 1996).
- 77.- Plática personal con Román Piña Chan.
- 78.- Rosa María Prol-Ledesma. El Calor de la Tierra. Colección la ciencia desde México. Vol 58 F.C.E, México D,F.

- 79.- Selected Wind Facts. DOE Wind Energy Program.
- 80.- Small-scale Hydro-power at Mae Ya, Thailand. CADDET, Technical Brochure No. 57. United Kingdom.
- 81.- Solar Dish/Engine Systems. por Sun Lab., Abril 1998. Documento No. DOE/GO-10097-407.
- 82.- Solar Power Towers. por Sun Lab., Abril 1998. Documento No. DOE/GO-10097-406.
- 83.- Solar Trough Systems. por Sun Lab., Abril 1998. Documento No. DOE/GO-10097-395.
- 84.- Summary Results of an Assessment of research projects in the National Photovoltaics Program. U.S. Department of Energy, Office of Energy Research. Julio 1995.
- 85.- T. Szulec. The Energy Crisis (Revised Edition). Franklin Watts. New York, USA (1978).
- 86.- Technology Draws Geothermal Heat from Subsurface Rock. Los Alamos National Laboratory (USA), CADDET.
- 87.- The Annenberg / CPB Project Exhibitions Collection  
<http://www.learner.org/exhibits/collapse/>
- 88.- The End of Cheap Oil by C.J. Campbell and J.H. Laherrère:  
in Scientific American March (1998).

- 89.- The Wall Street Journal Almanac (1998). Ronald J. Alsop  
Editor. Ballantine Books. New York. USA (1997).
- 90.- Theodore J. Gordon and Olaf Helmer. Report on a Long-Range Forecasting Study.  
(Santa Mónica, Calif.: The Rand Corporation, USA, September, 1964).
- 91.- U.S. Council for Energy Awareness. USCEA 1988 International Survey. 1989.
- 92.- U.S. Department of Energy, Office of Transportation Technologies, Office of  
Energy Efficiency and Renewable Energy. Marzo, 1995.
- 93.- States Department of Agriculture History of American Agriculture  
(1776-1990), (1999). Transportation in [www.usda.gov/history/text6.htm](http://www.usda.gov/history/text6.htm)
- 94.- Walter B. Wriston "Technology and Sovereignty".  
Foreign Affairs, New York, Council of Foreign Relations, Vol. 67, núm. 2 (1988).
- 95.- Wood Energy data, An overview, Wood Energy News. Vol.11, No.2 1996.
- 96.- Wood Energy News, Vol.10 No.4. F.A.O.\* (\*members of). Diciembre, 1995.
- 97.- Wood Energy News, Vol.11 No.1. F.A.O.\* (\*members of). Marzo, 1996.
- 98.- Wood Energy News, Vol.11 No.2. F.A.O.\* (\*members of). Junio, 1996
- 99.- Wood Energy News, Vol.11 No.3. F.A.O.\* (\*members of). Octubre, 1997.
- 100.- Wood Energy News, Vol.9 No.1. F.A.O.\* (\*members of). Julio 1994.

**REFERENCIAS ADICIONALES QUE GUIARON EL DESARROLLO  
DE ESTE TRABAJO.**

- A Alba Fernando. Introducción a los Energéticos; pasado, presente y futuro. El Colegio Nacional. 1987, México D.F.
- B Bassols Batalla Angel. Recursos naturales de México. Editorial Nuestro Tiempo, S.A. 1991, México.
- C Bauer Mariano, García Colín Leopoldo, Moshinsky Marcos (Coordinadores). Planeación energética en México, ¿Mito ó realidad?. El Colegio Nacional-Programa Universitario de Energía UNAM. 1982, México D.F.
- D Brown Lester. R. El Vigésimo noveno día, las necesidades humanas frente a los recursos de la tierra. Fondo de Cultura Económica. 1982, México.
- E Castillo Heberto, Naranjo Rogelio. Cuando el petróleo se acaba. Edit. Océano 1984, México.
- F Fisas Armengol Vicent. Despilfarro y control de la Enrgía. Edit. El viejo Topo.
- G Gentemann Karen M. Perspectivas social y política sobre directrices de energía. NOEMA editores. 1985, México D.F.
- H Informe de Waes. Energía: Perspectivas mundiales 1985-200
- I M. Mesarovic, E. Pestel. La Humanidad en la Encrucijada. Fondo de Cultura Económica. 1975, México D.F.
- J Mazari Marcos (Coordinador). Hacia el tercer Milenio. El Colegio Nacional. México 1996.
- K Rojas José Antonio. Desarrollo Nuclear en México. Facultad de Economía, UNAM, 1989, México.
- L Saxe-Fernandez Jhon. Petróleo y estrategia. Siglo Veintiuno Editores.
- M Tad Szulc. The Energy Crisis. 1978 New York
- N Werner Watson Jane. Alternate Energy Sources. 1979 New York

# *Anexo I.*

*Ecuaciones Teóricas para la  
simulación de Teotihuacán.*

## APLICACIÓN DE LA TEORÍA ANTERIORMENTE PROPUESTA.

### Caso de Teotihuacán

#### Aspectos Agrícolas

Sabemos [71], que las sociedades agrícolas primitivas, no tenían conocimientos de la necesidad de fertilizar la tierra para restaurar su capacidad productiva. Una consecuencia general de esta ignorancia, no sólo en México sino en todo el mundo (excepto la región del Nilo), es que cuando crecía un pueblo para convertirse en una ciudad, después de un tiempo se agotaba paulatinamente la capacidad agrícola del terreno circundante, y esto en algún momento provocaba éxodos masivos de humanos de la región en decadencia, hacia regiones que no hubiesen sido depredadas agrícolamente por el hombre.

En esta subsección, abordamos el problema agrícola general de Teotihuacán en el período que va del año cero de esta era hasta el año 850. Este análisis se llevará a cabo bajo la hipótesis de que los pobladores de la región no fertilizaban la tierra. Primero, trataremos el caso de una población constante, que cultiva una región de tamaño también constante; luego el caso de una población creciente incluyendo las consecuencias respectivas.

Imaginemos que tenemos una población estable, con tecnología constante, la cual cultiva un terreno de radio  $R_s$  (de magnitud constante) para su supervivencia. Si consideramos que se tiene un factor de erosión anual,  $f \ll 1$ , de magnitud constante; entonces la producción agrícola de un año,  $P_{agr}$  viene dada por:

$$P_{agr}(0) = \rho_{sagr}(0) * \Pi R_s^2 \quad (I.1)$$

donde  $P_{agr}(0)$  es la producción total del área  $\Pi R_s^2$  cuando la erosión todavía no ha comenzado (1<sup>era</sup> cosecha) y  $\rho_{sagr}(0)$  es la densidad superficial original de la tierra agrícola.

Para el segundo año tenemos

$$P_{agr}(1) = P_{agr}(0) (1-f) \quad (I.2)$$

para el año n, tenemos

$$P_{agr}(n) = P_{agr}(n-1) (1-f). \quad (I.3)$$

Expresando  $P_{agr}(n)$  en función de la producción original tenemos

$$P_{agr}(n) = P_{agr}(0) (1-f)^n. \quad (I.4)$$

Con la Ec. (I.3) podemos expresar la variación de  $P_{agr}$  en función del tiempo

$$\frac{dP_{agr}^{(n)}}{dt} = \frac{P_{agr}(n) - P_{agr}(n-1)}{\text{año}} = P_{agr}(n-1) * \left[ \frac{(1-f) - 1}{1} \right]. \quad (I.5)$$

Si suponemos que  $P_{agr}(n-1) \cong P_{agr}(n)$ , entonces

$$\frac{dP_{agr}(n)}{dt} = - \frac{P_{agr}(n)f}{\text{año}} \quad (I.6)$$

y entonces; integrando entre un tiempo  $t_0$  y tiempo  $t$ ,

$$P_{agr}(t) = P_{agr}(0)e^{-\frac{f(t-t_0)}{\text{año}}} \quad (I.7)$$

Esta ecuación, indica que si no se fertiliza el suelo agrícola, la producción del terreno decaerá exponencialmente con el tiempo de trabajo agrícola acumulado. Donde el argumento de la exponencial es el coeficiente de erosión. Nota: es evidente [3,4] que el coeficiente de erosión tiene dos contribuciones: una de erosión macroscópica debida a la acción del viento, o al arrastre por agua que corre sobre la superficie del suelo. La otra contribución tiene por origen los elementos químicos que toman las plantas del suelo

durante su desarrollo; este factor puede erosionar el suelo manera importante, cuando los procesos agrícolas se han llevado a cabo por períodos largos de tiempo en el mismo terreno (aún cuando el factor macroscópico de erosión sea despreciable). Por ejemplo el maíz tiene raíces que llegan hasta dos metros de profundidad desde donde absorben micronutrientes [71]. p. 255.

¿Qué hace una sociedad como la Teotihuacana para compensar la caída de la producción agrícola debido a la erosión? En estricto rigor en el lado derecho de la igualdad de la Eq. (I.6), se debe sumar un término que balancee al término debido a la erosión. De manera tal que

$$\frac{dP_{agr}}{dt} = \frac{P_{agr}}{l} (-f + a_m) = 0 \quad (I.8)$$

con,

$$a_m = f. \quad (I.9)$$

En una sociedad desarrollada, esto se logra mediante la fertilización con los elementos cualitativa y cuantitativamente adecuados (con retención de suelo) y sin necesidad de aumentar el área de cultivo. En una sociedad como la teotihuacana, esto se lograba (Ec. (I.8)) con la extensión del radio de cultivo. De acuerdo con la Ec. (I.6) la rapidez de

incremento en el área de cultivo,  $\frac{dA_{agr}}{dt}$  viene dada según:

$$\frac{dA_{agr}}{dt} = \frac{A_{agr} * a_m}{\text{año}} = \frac{A_{agr} * f}{\text{año}} \quad (I.10)$$

de la cual,

$$A_{agr}(t) = A_{agr}(0)e^{+\frac{f}{1}(t-t_0)} \quad (I.11)$$

o, el radio del cultivo viene expresado como:

$$R(t) = R(0)e^{+\frac{f}{2\text{años}}(t-t_0)} \quad (I.12)$$

Es claro, que como  $f \ll 1$ , para tiempos pequeños tales que  $\frac{f}{2}(t - t_0) \ll 1$ , el radio que delimita la zona agrícola crece linealmente con el tiempo; en ese lapso el precio de los alimentos en la ciudad, debido al acarreo, aumenta linealmente con el tiempo.

En este marco, es claro que con el crecimiento de la población de la ciudad y el paso del tiempo, se tendrá una situación tal que la región agrícola que circunda la ciudad tenderá a crecer para proporcionar la alimentación que requieren los pobladores de la ciudad. Además podemos suponer que cada año,  $j$ , se añadirá una nueva región de cultivo comprendida entre los radios  $r_j$  y  $r_{j+1}$ , siendo el área correspondiente al anillo delimitado por los radios anteriores  $dA_{r_j} = 2\pi r_j dr_{j+1}$ . La ecuación (I.7) la podemos escribir en función de la densidad de producción agrícola por unidad de área  $\rho_{agr}$  para el radio  $r_j$  al tiempo  $t$

$$\rho_{agr}(r_j, t) = \rho_{agr}(0) e^{\frac{f(t-tr_j)}{1año}} \quad (I.13)$$

por tanto, la producción agrícola para el anillo comprendido entre los radios  $r_j$  y  $r_{j+1}$  al tiempo  $t$  viene dado según la siguiente expresión:

$$P_{agr}(r_j, t) = \rho_{agr}(0) * \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2) * e^{\frac{f(t-tr_j)}{1año}} \quad (I.14)$$

donde  $tr_j$  es el tiempo al cual se comenzó a cultivar el área de cultivo comprendida entre  $r_j$  y  $r_{j+1}$ . Entonces la producción total al tiempo  $t$ , se puede expresar de la siguiente manera,

$$P_{agr}(t) = \sum_j P_{agr}(r_j, t) \quad (I.15)$$

$$= \sum_{j \leq t} \rho_{agr}(0) \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2) e^{\frac{f(t-tr_j)}{1año}} \quad (I.16)$$

Donde  $r_j$ , se define como sigue,

$$r_j \equiv r_0 + \sum_{i=1}^j dr_i. \quad (I.17)$$

Siendo  $dr_i$  el ancho del anillo agrícola anual que aumenta el área agrícola necesaria para abastecer la ciudad de alimentos.

Es evidente que los campesinos que producen  $P_{agr}(t)$  dado por la Ec. (I.16), también tienen que comer. Por tanto, la cantidad que se exporta a la ciudad de cada anillo, va a ser excedente de la producción de ese anillo que no fue utilizado en autoconsumo local. Si consideramos constante la densidad de familias campesinas por unidad de área,  $dc$ , entonces el número de campesinos del anillo comprendido entre  $r_j$  y  $r_{j+1}$ ,  $N_c(dr_j)$  aparece como sigue

$$N_c(r_j) = 5dc * \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2), \quad (I.18)$$

donde se ha supuesto que la familia campesina tiene 5 miembros.

Si  $a_c$  es el número de kilogramos que consume cada habitante por año para su alimentación; entonces el total del consumo dentro del anillo comprendido entre  $r_j$  y  $r_{j+1}$ ,  $A_c(dr_j)$  es

$$A_c(r_j) = 5a_c dc * \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2). \quad (I.19)$$

Entonces, el excedente que es exportable hacia la ciudad y los leñadores desde el anillo de radio  $r_j$  y ancho  $dr_{j+1}$  es:

$$P_{exc}(r_j, t) = P_{agr}(r_j, t) - A_c(r_j) \quad (I.20)$$

$$P_{exc}(r_j, t) = [\rho_{agr}(r_j, t) - 5a_c dc] \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2), \quad (I.21)$$

donde se han utilizado las Ecs. (I.13), (I.14) y (I.19) en la Ec. (I.20). Escrito de otra manera tenemos,

$$P_{exc}(r_j, t) = \left[ \rho_{agr}(0) e^{\frac{f(t-tr_j)}{1año}} - 5a_c dc \right] \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2), \quad (I.22)$$

Es evidente de la Ec. (I.22) que mientras transcurre el tiempo, el excedente de cada anillo disminuye exponencialmente con el tiempo, hasta que eventualmente dicho anillo no contribuye a la alimentación de la ciudad.

La producción agrícola excedente total que llega a la ciudad y a los leñadores  $P_{exc}(t)$ , se puede calcular con la siguiente ecuación,

$$P_{exc}(t) = \sum_j P_{exc}(r_j, t) \quad (I.23)$$

$$P_{exc}(t) = \sum_{j \leq t} \left( \left[ \rho_{agr}(0) e^{-\frac{r(t-t_j)}{\text{año}}} - 5a_c dc \right] \Pi(r_{j+1}^2 - r_j^2) \right) \quad (I.24)$$

Por otro lado, si consideramos que la variación porcentual de la población de un año para otro es muy pequeña; podemos suponer que se abren nuevas tierras al cultivo en cuanto aumenta la necesidad de alimentos. Es decir de una manera aproximada se acopla la agricultura al cambio en la población para cubrir las necesidades alimenticias. Y si además, suponemos que después de una etapa inicial de tiempo despreciable se da una especialización y división del trabajo y los agricultores residen en las parcelas que cultivan, tenemos:

$$\frac{dP_{agr}}{dt} = a_t \frac{dP_{obT}}{dt} \quad (I.25)$$

donde  $P_{obT}$  es la población total de la región que es una unidad económica: ciudad más agricultores que la proveen de alimentos, más leñadores que proveen leña. Para la población de la ciudad  $P_{obci}$  y la población de leñadores  $P_{leñ}$ , si  $a_{lper}$  es el alimento percápita en la ciudad, tenemos:

$$\frac{dP_{exc}}{dt} = a_{lper} \frac{dP_{obci}}{dt} + a_l \frac{dP_{leñ}}{dt} \quad (I.26)$$

y para la población campesina  $P_{obcam}$ , por supuesto se cumple la siguiente ecuación

$$\frac{d(P_{agr} - P_{exc})}{dt} = a_l \frac{dP_{obcam}}{dt} \quad (I.27)$$

## Aspectos Energéticos

Sabemos que en épocas equivalentes a la del pueblo de Teotihuacán (0 → 850 D.C.) en Europa y Asia se tenían grandes animales mamíferos herbívoros domesticados. Animales que habían sido criados en cautividad y habían sido modificados de sus antecesores salvajes a través de la intervención humana que controlaba y seleccionaba las condiciones animales de reproducción y las fuentes alimentarias de los mismos. Estos animales de tiro además no competían por el alimento humano por cuanto en general consumían pastos, los cuales no son aprovechables de manera directa por los humanos. La eficiencia energética de la especie humana, subió pues además de aprovechar la energía humana para realizar trabajo, ahora tenían a su disposición la fuerza animal y la posibilidad adicional de fuerza de transporte de carga. Además del fuego, estas fueron las fuentes mayores de energía móvil disponible por el hombre hasta la época de la Revolución Industrial. Así mismo los animales de tiro, eran fuentes de carne, leche, fertilizantes, lana y pieles.

En América no se dio el caso de domesticación de herbívoros grandes, debido a que a diferencia de Europa y Asia donde los herbívoros coevolucionaron junto con los humanos y aprendieron a temerles, y las habilidades para cacería de los humanos se fueron desarrollando lentamente durante millones de años, por lo cual el cambio en las poblaciones animales fue lento y dio tiempo a la especie humana que ante la creciente escasez de herbívoros útiles, fuera buscando maneras de domesticarlos, para reproducirlos bajo control y utilizarlos con garantía a largo plazo; la mayoría de los grandes herbívoros en América tuvo un encuentro súbito con los humanos a un tiempo en el cual las habilidades de cacería estaban muy avanzadas y los animales, como los animales de islas remotas, no habían desarrollado temor al hombre. Así las cosas, en América los grandes herbívoros fueron arrasados completamente debido a que ellos no pudieron desarrollar lo suficientemente rápido temor a los humanos y a que éstos los mataban tan rápida y eficientemente que no tuvieron tiempo de aprender a domesticarlos [55].

En América pues, todo el aporte energético para el cultivo tenía origen humano. Lo mismo puede decirse del transporte de productos agrícolas y forestales. Para tener una idea de las

eficiencias relativas entre Eurasia y América, cabe tomar en cuenta que dos bueyes uncidos a una carreta de carga transportan fácilmente 1½ toneladas de alimento a una velocidad similar al avance de un humano a pie, mientras un tameme (ser humano utilizado como bestia de carga) podía transportar dos arrobas una distancia de 5 leguas al día, lo cual equivale a transportar por día 25 kilogramos una distancia de 25 kilómetros sobre terreno más o menos plano. Esto indica que una carreta con dos bueyes sustituye a 60 tamemes y además ahorra los alimentos de 55 por un día, los cuales se calculan a 900 gramos diarios de maíz por persona (casi 53 Kgs. de maíz).

Si bien el alimento por persona con cereales en la antigüedad es aproximadamente de 900 gramos diarios de maíz o arroz o trigo [41], el rendimiento del trabajo del individuo medio es función creciente de la energía libre (adicional a los alimentos) per cápita disponible para realizar trabajo sobre la naturaleza, como se ha visto claramente, en particular desde la Revolución Industrial.

El requerimiento anual de leña, es proporcional a la cantidad de alimentos a cocinar durante el año por la población de la región. De acuerdo con un estudio reciente [69] la cantidad de leña requerida para cocinar 1 kilogramo de maíz, en condiciones rurales es de 1 kilogramo de leña. Pero además, en toda casa se requiere calentar agua para diversos usos 10% de la energía total, más 9% para calentar la habitación. Por lo cual en la familia promedio indígena se requería 1.25 Kg. de leña por cada Kg. de cereal a cocinar [98]. Como en Teotihuacán, también se consumía frijol, aparentemente en una proporción de alrededor del 10% del peso del maíz [51], al final el consumo de energía por Kg. de maíz, subiría a 1.33 Kg. de leña (incorporando los rubros antes señalados).

Un aspecto interesante de este problema, es el origen físico de la leña consumida. Para regiones no forestales en grado de desarrollo muy bajo, se realizó un estudio en profundidad con duración de 10-15 años [8,10]. La evidencia esquemática muestra que en muchos países alrededor del 50% del combustible de leña proviene de: árboles frutales; árboles muy grandes que no se pueden talar con métodos primitivos, y sólo se pueden

arrancar ramas pequeñas, de ramas de árboles a lo largo de los caminos y de desechos de la cosecha.

El análisis del caso de Teotihuacán no sólo es interesante a nivel histórico, sino que puede tener repercusiones políticas, ecológicas y sociales actualmente por cuanto, la leña aporta el 38% del combustible cotidiano en promedio en los países en desarrollo sobre todo en el continente Asiático. Proporcionando el 52% del combustible utilizado en el sector doméstico [98]. En países como Pakistán o Filipinas el 10% de la población rural está involucrada con el asunto de combustible de leña y recibe en promedio el 40% de sus ingresos de este negocio [100].

Como hemos establecido previamente, la necesidad anual de leña por individuo es  $n_\ell = 486$  kilogramos. Entonces tendremos que los requerimientos anuales de leña, con fines energéticos, en ciudad son:

$$N_{\ell ci} = n_\ell * P_{obci} \quad (I.28)$$

y dado que  $n_\ell = \text{constante}$

$$\frac{dN_{\ell ci}}{dt} = n_\ell \frac{dP_{ob.ci}}{dt} \quad (I.29)$$

Análogamente para las necesidades energéticas de los campesinos tendremos:

$$N_{\ell cam} = \frac{n_\ell}{2} P_{obcam} \quad (I.30)$$

y

$$\frac{dN_{\ell cam}}{dt} = \frac{n_\ell}{2} \frac{dP_{obcam}}{dt} \quad (I.31)$$

Toda la comunidad (ciudad + campesinos + leñadores)  $P_{ob.T}$  consumirá leña como combustible anualmente por la cantidad de:

$$N_{LT} = n_t P_{obci} + \frac{n_t}{2} P_{obcam} + n_1 P_{leñ} \quad (2.32)$$

y

$$\frac{dN_{LT}}{dt} = n_t \frac{dP_{obci}}{dt} + \frac{n_t}{2} P_{obcam} + n_1 P_{leñ} \quad (2.33)$$

Otro rubro, que requiere del uso de madera, es el de la construcción de casas-habitación. Las casas requerían para su construcción vigas de madera para la estructura básica de soporte de paredes y techo; además necesitaban adobe para las paredes y paja y carrizo, así como tierra para los techos.

La construcción de cada casa requiere una cantidad de madera:  $m_c$ ; por tanto si el aumento del número de casas tiende a ser proporcional al aumento de población, tenemos que en ausencia de aumento del costo de la vida y del transporte de madera la rapidez de aumento del número de casas, en la ciudad viene dada por

$$\frac{dC_{cciu}}{dt} = \frac{1}{5} \frac{dP_{obei}}{dt} \quad (I.34)$$

y en el campo,

$$\frac{dC_{cam}}{dt} = \frac{1}{5} \frac{dP_{obcam}}{dt} \quad (I.35)$$

Las casas no sólo requieren madera para ser construidas, también la necesitan para su mantenimiento. Si consideramos que  $\gamma$  es la fracción anualizada del total de madera que se necesita para construir una casa nueva, para reponer el desgaste natural, tenemos que la rapidez de cambio en la cantidad de madera que se requiere cada año para asuntos relacionados con construcción y mantenimiento de casas  $\frac{dM_c}{dt}$  en la ciudad tenemos,

$$\frac{dM_{cciu}}{dt} = m_c \frac{dC_{cciu}}{dt} + \frac{\gamma}{5} P_{ob} \quad (I.36)$$

$$= m_c \frac{dC_{cciu}}{dt} + \gamma C_{cciu} \quad (I.37)$$

De la ecuación estadística anterior es claro lo siguiente: Al principio de la historia de la ciudad el término debido a la construcción de casas es absolutamente mayoritario; conforme transcurre el tiempo, las casas van envejeciendo y paulatinamente se llega a una situación en la que los dos términos son iguales; a partir de ese punto, se emplean más madera en mantenimiento de casas que en la construcción de nuevas casas, hasta llegar a un estado estacionario en el cual no se construyen (en principio) nuevas casas, sino que sólo se les da mantenimiento a las ya existentes (para compensar de manera dinámica el deterioro natural de las mismas).

Para el campo agrícola, la rapidez de cambio en la cantidad de madera requerida para construcción de casas viene dada por

$$\frac{dM_{ccam}}{dt} = m_c \frac{dC_{ccam}}{dt} + \gamma C_{ccam} \quad (I.38)$$

Y la rapidez de cambio en cantidad total de leña utilizada para construcción de casas es:

$$\frac{dM_{cT}}{dt} = \frac{dM_{cciu}}{dt} + \frac{dM_{ccam}}{dt} + \frac{dM_{cleñ}}{dt} \quad (I.39)$$

En lo que se refiere a la zona de donde se extrae la leña para los distintos usos: combustible y construir casas (y su mantenimiento) tenemos que, para los campesinos la mitad de sus necesidades se cubre con leña extraída de su propia parcela [99] según hemos mencionado previamente, la otra mitad debe obtenerse de la zona de leña o foresta. Para los pobladores de la ciudad el 100% de sus necesidades de leña se cubren con acarreo desde la zona de leño. Para ambas poblaciones, las necesidades de leña para construir casas se cubren con material de la zona de leño. Si se considera una tasa de regeneración de la leña  $\Omega$ , la ecuación que describe el consumo de madera es:

$$leñ_{tot}[t] = \rho_{leña} \Pi(r_{leñ}^2[t+1] - r_{leñ}^2[t]) = N_{Lci} + \frac{N_{Lcom}}{2} + \frac{dM_{ct}}{dt} * (\Delta t = 1año) + a1Pleñ.[t-1] - \Omega \Pi(r_{leñj}^2 - r_{MAXa}^2) \quad (I.40)$$

donde  $\rho_{leña}$  es la densidad superficial de leña en kilogramos obtenible por unidad de área,  $leñ[t]$  es la leña total consumida en una año,  $P_{leñ}$  es la población de leñadores y queda definida como  $P_{leñ}[t] = cte. leñ_{tot}[t-1]$ , mientras que  $\Omega$  es el coeficiente de reforestaci[on natural de la leña.

El avance del frente de zona de leñeo, tiene un valor mínimo que corresponde a la necesidad de avance de la zona agrícola, la cual requiere desmonte. Dependiendo de la densidad arbórea de la masa vegetal a desmontar y la necesidad de leña la rapidez de desmonte puede ser mayor.

### Aspectos Económicos

En esta subsección, se presentan los principales aspectos económicos relacionados con la producción agrícola y el aumento en los costos de transporte de productos agrícolas, así como de los productos forestales requeridos para combustible y para construcción y mantenimiento de casas.

Hemos visto en subsecciones anteriores que debido al efecto de la erosión, la producción en cada parcela de tierra cultivada depende del número de ciclos agrícolas que dicha parcela haya sido cultivada. En particular, para una familia campesina que cultive una parcela en el radio  $r_j$ , al tiempo  $t$ ; el costo de producción del kilogramo de maíz  $C_{pro}(r_j, t - tr_j)$  vendrá dado por

$$C_{pro}(r_j, t - tr_j) = \frac{\rho_{agr}(0)}{\rho_{agr}(r_j, t - tr_j)} \quad (I.41)$$

donde  $tr_j$  es el tiempo al cual se comenzó a cultivar de manera continúa la parcela que está a un radio  $r_j$ . La cual mediante la Ec. (I.13) se puede escribir como:

$$C_{pro}(r_j, t - tr_j) = e^{\frac{f(t-tr_j)}{1año}} \quad (I.42)$$

Por otro lado, el acarreo humano de carga mediante tamemes permitía transportar 2 arrobas por una distancia de 5 leguas en un día (lo cual equivale a transportar 25 kilogramos una distancia de 25 kilómetros en un día). Como para llevar una carga del sitio de producción al de consumo se requiere regresar al punto de partida y podemos considerar que con carga la velocidad media de avance es de 2.1 Km/h y sin carga de 3.5Km/h, por lo cual la velocidad media  $\bar{v}$  puede considerarse  $\bar{v} = 2.6\text{Km/h}$ . Matemáticamente, significa que mover una carga dada una distancia  $r_i$  requiere

$$2r_i = 2\bar{v} t_i \quad (\text{I.43})$$

Por lo anterior, podemos considerar que el movimiento de 2 arrobas por una distancia de 12.5Kms. en terreno horizontal equivale a una jornada de trabajo, simbólicamente, tenemos

$$1\text{JT} \rightarrow 25\text{Kgs.} \times 12.5\text{Kms.} \quad (\text{I.44})$$

Las consideraciones anteriores son aplicables al transporte de cualquier carga ya sea esta leña o cereales secos como maíz.

Para el caso del transporte anual de cereales a la ciudad, tenemos que el número de jornadas requeridas para el efecto al tiempo  $t$ ,  $N_{\text{Tci}}$  es,

$$\begin{aligned} N_{\text{Tci}}(t) &= \sum_j \frac{(P_{\text{exc}}(r_j, t) * r_j)}{1\text{JT}} \\ &= \sum_j \frac{(P_{\text{exc}}(r_j, t) * r_j)}{312.5\text{Kg.} * \text{Km.}} \end{aligned} \quad (\text{I.45})$$

Como el movimiento de alimento para autoconsumo no entra en el circuito de movimiento de mercancías, no se contabilizará en el intercambio de valores.

El transporte de leña a la ciudad requiere, el movimiento de material desde la zona de leñeo delimitada por un radio  $r_i(t) = \sum_{i=1} r_o + dr_i$ . Por tanto el número de jornadas que involucra el traslado de leña viene dado por,

$$N_{TLci}(t) = \frac{N_{\ell ci}(t) * r_{\ell}(t)}{1JT} = \frac{n_{\ell} P_{ob.ci} * r_{\ell e}(t)}{312.5Kg.Km} \quad (I.46)$$

donde se utilizaron las Ecs. (I.118) y (I.134).

El transporte de leña a las parcelas de cultivo es

$$N_{TLcam}(t) = \frac{\sum_j [(5a_{\ell} dc 2 \Pi r_j dr_j) * (r_{\ell eñ} - r_j)]}{2 * 1JT} \quad (I.47)$$

$$= \frac{\left[ a_{\ell} \sum \bar{P}_{obcam}(r_j, T) * (r_{\ell eñ} - r_j) \right]}{2 * 1JT}$$

El transporte de leña a la ciudad para la construcción de nuevas casas, con una rapidez anual el número de jornadas para este propósito  $\frac{dN_{cciu}}{dt}$  se puede expresar como:

$$\frac{dN_{cciu}}{dt} = \frac{1}{1JT} \frac{dM_{cciu}}{dt} * r_{\ell} \quad (I.48)$$

donde se debe utilizar la Ec. (I.36)

Para las casas del campo, en el transporte de sus materiales de construcción, sólo ha de tomarse en cuenta para su mantenimiento anual, pues al construirla por primera vez se toma el material de la zona local a desmontar para la siembra. Una vez construida se considera que se construye paulatinamente a través del mantenimiento anual. El número asociado de jornadas  $\frac{dN_{ccam}}{dt}$  viene dado como:

$$\frac{dN_{ccam}}{dt} = \left( \sum_j \frac{\gamma dc (2 \Pi r_j dr_j) * (r_{\ell e} - r_j)}{1JT} \right) \quad (I.49)$$

Por otro lado, los principales costos en esta sociedad están asociados con la producción de maíz y leña; mientras que los costos de transporte lo están al movimiento del excedente de maíz del campo a la ciudad, y de la leña de la foresta hacia los campesinos y hacia la ciudad, tanto para combustible, como para material de construcción y reparación de casas habitación.

El costo promedio del maíz en la ciudad puede calcularse, en primera aproximación, como el trabajo socialmente necesario para producirlo y llevarlo a la ciudad. Así para el anillo de radio  $r_j$ , y ancho  $dr_j$ , al tiempo  $t$ , tenemos que en general el costo total para 25 kilogramos  $C_{25m}(r_j, t)$  viene expresado como:

$$C_{25m}(r_j, t) = C_{\text{prom}_{25}}(r_j, t) + C_{\text{Trans}_{25}}(r_j, t) \quad (\text{I.50})$$

donde el primer término corresponde a la producción y el segundo al costo de transporte, en particular si consideramos que el costo de transporte de maíz corresponde a la necesidad de reponer nutrientes en el campesino productor que acude al mercado a vender su mercancía en pequeños lotes de lo cosechado, a medida que se le van presentando las necesidades de comprar bienes o pagar tributo[28], tendremos que la Ec. (I.50) se puede escribir de la siguiente manera:

$$C_{25m}(r_j, t) = \frac{25\text{Kg}}{P_{\text{exc}}(r_j, t)} * dc(\text{JATC}) * 2\pi r_j dr_j + \frac{Pr_{\text{exc}}(r, t)}{25\text{kg}} \frac{r_j}{12.5\text{km}} \quad (\text{I.51})$$

donde JATC está definida como la jornada anual campesina. La cual implica 1200h/año por hectárea [28], para una familia con 2.5 miembros activos, si tomamos en cuenta que la parcela media tenía aproximadamente 4 hectáreas de tamaño [28], entonces JATC (inicialmente  $90,000 \text{ kg/km}^2 / 10,000 \text{ JT} * \text{km}^2 = 9 \text{ kg/Jtrabajo}$ . costo inicial de prod./kg =  $\frac{1}{9}$

$$\text{JATC} \rightarrow 4800\text{h} / \text{año} = 400\text{JT} . \quad (\text{I.52})$$

Esto implica 160 JT anuales para cada uno de los dos adultos de la familia y 80JT para el menor que ayudaba. 1JT = 12 horas de trabajo de un hombre. Si en la Ec. (I.51) utilizamos la Ec. (I.22) tenemos

$$C_{25Km}(r_j, t) = \frac{25Kg * (JATC)dc}{\left[ \rho_{agr}(0)e^{-\frac{f(t-r_j)}{1año}} - 5a_l dc \right]} + \frac{P_{exc}(r, t) r_j}{25Kg * 12.5Km} \quad (I.53)$$

El análisis de la Ec. (I.51) o Ec. (I.53) para distintos radios indica que el costo social del alimento tiende a aumentar conforme transcurre el tiempo, debido a dos factores a).- los efectos de la erosión microscópica del suelo, y b).- por la necesidad de transporte de alimento desde distancias cada vez mayores.

El costo promedio de producción del maíz llevado a la ciudad para el tiempo t, se puede calcular de la siguiente expresión:

$$\bar{C}_{25Km}(t) \equiv \frac{\left( \sum_j C_{25K}(r_j, t) * P_{exc.}(r_j, t) \right)}{P_{exc}(t) = \sum_j P_{exc.}(r_j, t)} \quad (I.54)$$

con la Ec. (I.53) y la Ec. (I.22) en la ecuación anterior ésta queda:

$$\bar{C}_{25Km}(t) = \frac{\sum_j 25Kg * JATC)dc (*2\Pi r_j dr_j)}{\left\{ P_{exc}(t) = \sum_j \left[ (\rho_{agr}(0)e^{-\frac{f(t-r_j)}{1año}} - 5a_l dc) 2\Pi r_j dr_j \right] \right\}} + \frac{P_{exc}(r, t) r_j}{25kg * 12.5km} \quad (I.55)$$

Este costo promedio de producción del maíz y frijol consumidos dentro de la ciudad, nos proporciona una idea cuantitativa del impacto de la erosión (en micronutrientes del suelo) debido a la producción agrícola en los mismos terrenos, sin fertilizar o compensar los elementos químicos específicos en las cantidades y lugares extraídos por los productos agrícolas cultivados en los terrenos ya citados.

En cuanto al costo de la leña, se tienen dos zonas cualitativamente distintas. Una, la ciudad totalmente dependiente de la producción en la zona de leñeo; otra, correspondiente a la

zona campesina agrícola parcialmente autosuficiente. Para ambas zonas, el costo de la leña tiene dos factores distintos: el primero representa al costo social de corte de leña, y el otro el costo de transportación al sitio de consumo.

El costo total de una carga de 25 kilogramos de leña para la ciudad, se puede expresar como sigue

$$C_{25\ell}(r_{\ell}, t) = \frac{25\text{Kg} * \text{JATL} * dL * 2\pi r_{\ell} * dr_{\ell}}{P_{\text{exc.}\ell}(r_{\ell}, t)} + \frac{5a_{\ell}}{25\text{Kg}} \frac{(r_{\ell})}{12.5\text{Km}} \quad (\text{I.56})$$

donde  $P_{\text{exc.}\ell}(r_{\ell}, t)$ , el excedente de leña de la zona de productores de leña se puede expresar como la diferencia entre la producción total menos el autoconsumo

$$\begin{aligned} P_{\text{exc.}\ell}(r_{\ell}, t) &= \rho_{Lc} * 2\pi r_{\ell} * dr_{\ell} - 5(13)a_{\ell} * dL * 2\pi r_{\ell} * dr_{\ell} \\ &= (\rho_{Lc} - 5 * 1.3a_{\ell}dL) * 2\pi r_{\ell} dr_{\ell}. \end{aligned} \quad (\text{I.57})$$

con la Ec. (I.57), la Ec. (I.56) queda como sigue:

$$C_{25\ell}(t) = \frac{25\text{Kg} * \text{JATL} * dL}{(\rho_{Lc} - 5 * 1.3a_{\ell}dL)} + \frac{5a_{\ell}}{25\text{Kg}} \frac{(r_{\ell})}{12.5\text{Km}}. \quad (\text{I.58})$$

De la ecuación anterior es claro que el costo de la leña aumenta linealmente con la distancia a la que se tiene que cortar la leña (esto en primera aproximación).

El costo de la carga de leña de 25 Kg. en la zona agrícola al radio  $r_j$  al tiempo  $t$ ,  $C_{25\ell}(r_j, t)$  se puede expresar así,

$$C_{25\ell}(r_j, t) = \frac{25\text{Kg} * \text{JATL} * dL}{(\rho_{Lc} - 5 * 1.3a_{\ell}dL)} + \frac{5a_{\ell}}{25\text{Kg}} \frac{(r_{\ell} - r_j)}{12.5\text{Km}}. \quad (\text{I.59})$$

Por supuesto las mismas ecuaciones (I.58) y (I.59) sirven para describir los costos de troncos para soportes de pared y techos en las casas a construir en la ciudad y en el campo respectivamente.

¿Cómo afectan los aumentos en los costos conforme pasa el tiempo en rubros tales como: compras dentro de la ciudad, construcción de casas, casamientos, rapidez de crecimiento de la población de la ciudad, etc.?

En primera aproximación el poder de compra de los campesinos disminuye debido a dos factores, el primero debido a la disminución del excedente agrícola local y además debido a que los productos citadinos se encarecen conforme transcurre el tiempo debido al aumento del costo de transporte del alimento y la leña a la ciudad.

El poder aparente de compra del conjunto de campesinos que viven dentro del anillo de área  $2\pi r_j dr_j$  viene dado por

$$P_{\text{cacam.}}(r_j, t) = P_{\text{exc.}}(r_j, t - tr_j). \quad (\text{I.60})$$

Si los gastos por aumento de transporte, de alimentos, combustible y mantenimiento de casas repercuten en  $\beta\%$  del total de gastos en la ciudad, entonces el índice de precios

$$\left(\frac{\bar{I}}{I_o}\right) = 1 + \beta \left(\frac{a_t}{25\text{Kg}} * \frac{r_{te}(t)}{12.5\text{Km}}\right) \quad (\text{I.61})$$

con el uso de la Ec. (I.61) y la Ec. (I.60) podemos escribir el poder de compra real de los campesinos del anillo  $2\pi r_j dr_j$

$$P_{\text{ef.c.}}(r_j, t) = P_{\text{ca}}(r_j, t) \left(\frac{P_o}{\bar{P}}\right) = P_{\text{exc.}}(r_j, t - tr_j) * \left(\frac{P_o}{\bar{P}}\right) \quad (\text{I.62})$$

donde hemos despreciado el factor de traslado durante la compra. Si lo tomamos en cuenta en particular para los campesinos cercanos a la zona de leño, podemos ver que su poder de compra puede ser mayor en otra ciudad distinta de la ciudad metrópoli si se cumple la siguiente desigualdad,

$$P_{exc}(0) * \left( \frac{I_o}{\bar{I}} \right) * \left( 1 - \frac{a_t}{25Kg} * \frac{r_{te}}{12.5Km} \right) < P_{exc}(0) * 1 * \left( 1 - \frac{a_t}{25Kg} \frac{(r_{te} - r_n)}{12.5Km} \right) \quad (I.63)$$

donde  $r_n$  es la distancia entre Teotihuacán y la nueva ciudad, y  $P_{exc}(0)$  corresponde a la producción excedente sin erosión.

La desigualdad 2.63 aportaría una tendencia creciente, en el tiempo, para que los agricultores más externos a un centro de civilización antiguo tiendan a comerciar con otros grupos de civilización cercanos, con menor costo de los productos elaborados en la ciudad nueva. Si a esto le añadimos, el hecho de que conforme pasa el tiempo los campesinos que cultivan más cerca de la ciudad antigua, tienen cada vez más una situación económica de mayor pobreza debido a los efectos acumulados de la erosión, tendremos que cuando se tienda a cumplir con dificultad la siguiente igualdad los campesinos tenderán a emigrar a otras tierras donde puedan sobrevivir:

$$P_{exc}(r_j, t) - \alpha A_c(r_j, t) = 0. \quad (I.64)$$

Esto es, con Ecs. (I.19) y (I.21) tenemos:

$$\rho_{agr}(0) e^{-\frac{f(t-t_j)}{\text{año}}} - (1 + \alpha) 5a_t dc = 0 \quad (I.65)$$

donde el término multiplicado por  $\alpha$  en la Ec. (I.65) representa los bienes mínimos adicionales a la comida que requiere la familia campesina para vestido, útiles de trabajo y cocina, leña y mantenimiento de la casa. Siendo un parámetro que en principio debía poder determinarse a partir de datos históricos.

Respecto a la construcción de casas, es plausible considerar que al igual que el índice de nacimientos y muertes, ellos son, en primera aproximación funciones simples en el primer caso del índice de precios de la leña [ $C_{25e}(t)/C_{25e}(0)$ ] ver Ec. (68) y en el segundo del índice general de precios dado por la Ec. (I.61).

Por ejemplo, respecto al asunto de construcción de nuevas casas y mantenimiento de casas antiguas, tenemos que en situación de inflación  $\frac{dM_{Cciu}}{dt} \rightarrow \frac{dM_{Cciu}}{dt}$  según la siguiente ecuación

$$\frac{dM_{Cciu}(t)}{dt} = \left( \frac{C_{25KI}(r_0, t=0)}{C_{25KI}(r_t, t)} \right) \frac{dM_{Cciu}(t)}{dt} \quad (I.66)$$

donde  $\frac{dM_{Cciu}}{dt}(t)$  correspondería al caso en que no hubiese inflación (véase Ec. (I.48)).

Por supuesto, la densidad de personas por casa al tiempo t es,

$$dpc_{ciu}(t) \equiv \frac{(Pob)_{ciu}(t)}{Ncas_{ciu}(t)} \quad (I.67)$$

donde  $N_{casciu}(t)$  es el número de casas en la ciudad al tiempo t, considerando que el tamaño de las casas no cambia según el año en que se construya.

# *Anexo II.*

*Simulación del crecimiento  
de Teotihuacán y análisis  
de los resultados.*

## Simulación del crecimiento de la civilización de Teotihuacán.

### Consideraciones generales.-

Para la simulación se consideraron los siguientes parámetros:

VARIABLE	VALOR ASIGNADO.
Productividad inicial de la tierra	90000 kg/km <sup>2</sup>
Factor de erosión	0.001
Alimento per cápita anual de campesinos y leñadores	328 kg
Requerimiento de leña por cantidad de alimento.	1.33 kg/kg
Cantidad de madera por casa.	100 kg
Madera anual requerida por casa para su mantenimiento.	6 kg
Campesinos por casa	5
Densidad de campesinos activos por unidad de área.	25 camp/km <sup>2</sup>
Producción anual por leñador	2600kg
Porcentaje mínimo de la productividad, respecto a la inicial, para evitar el abandono de tierras de cultivo.	68.33%
Densidad de leña	3600000kg/km <sup>2</sup>
Regeneración de la zona forestal	270000kg/km <sup>2</sup> -año
Jornadas anuales para cultivo por área.	10000Jornadas/km <sup>2</sup>
Jornadas de trabajo para el transporte de alimentos ó leña.	312.5Jornadas/km
Jornadas de trabajo para la producción de leña.	0.077Jornadas/kg
Radio exterior inicial de cultivo	4.1km
Radio interior inicial de cultivo	1.13km
Consumo urbano de leña en el año -1	5700000kg
Radio de tala de leña inicial	4.7km
Población inicial de campesinos	3260
Porcentaje inicial de producción excedente	40%
Temperatura media ambiental	293 K
Periodo de simulación	760 años

El valor inicial de la productividad se consideró uniforme al inicio de la simulación, debido a que se supuso que antes de que el crecimiento de la población comenzara, el tipo de cultivo que se llevaba a cabo era a prueba y error (sin uso de calendarios agrícolas), de forma que la civilización inicial se encontraba en un estado muy cercano al estacionario.

Una vez que se desarrollaron los métodos de cultivo (se supone en el año 0), el uso de las tierras se vuelve metódico, de forma que a partir de dicho año comienzan a presentarse los fenómenos de erosión anteriormente descritos.

Para la simulación, se supuso que los agricultores exportan sólo el excedente de la producción hacia la ciudad, de forma que consumen el alimento per cápita mínimo de forma constante. Esto tiene como consecuencia que el alimento per cápita de los ciudadanos urbanos, en general presente ciertas oscilaciones alrededor del valor predeterminado per cápita diario de alimento.

Basándose en datos antropológicos [67], se supuso la distribución de la población urbana de Teotihuacán y del área que cubría la ciudad a lo largo del periodo de tiempo estudiado, obteniéndose los siguientes perfiles:

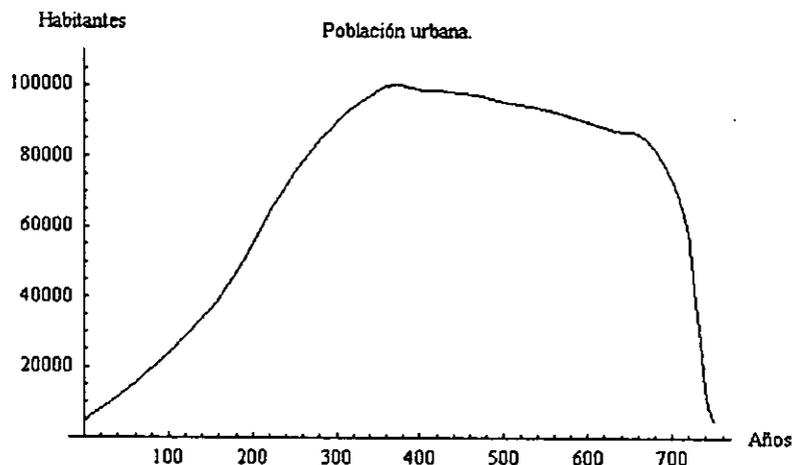


Fig. II.1

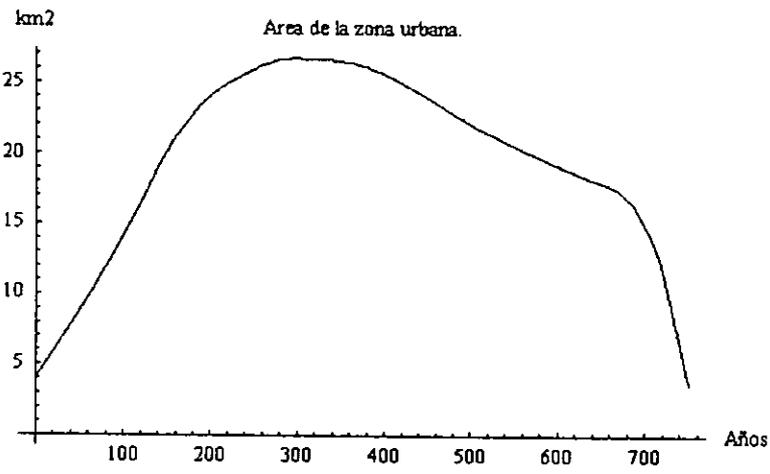


Fig. II.2

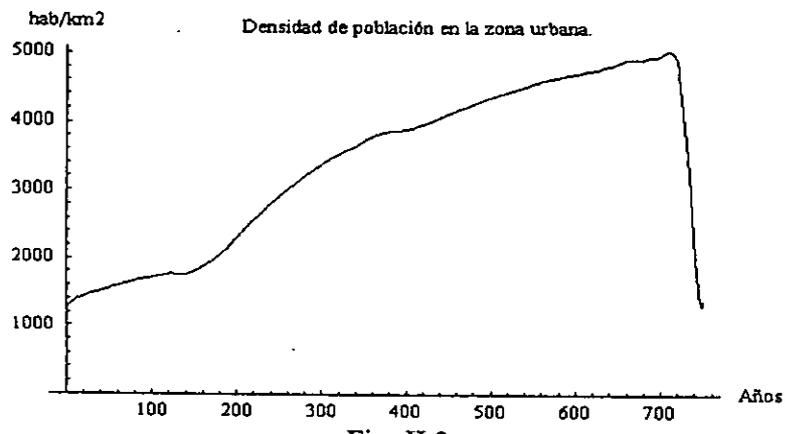


Fig. II.3

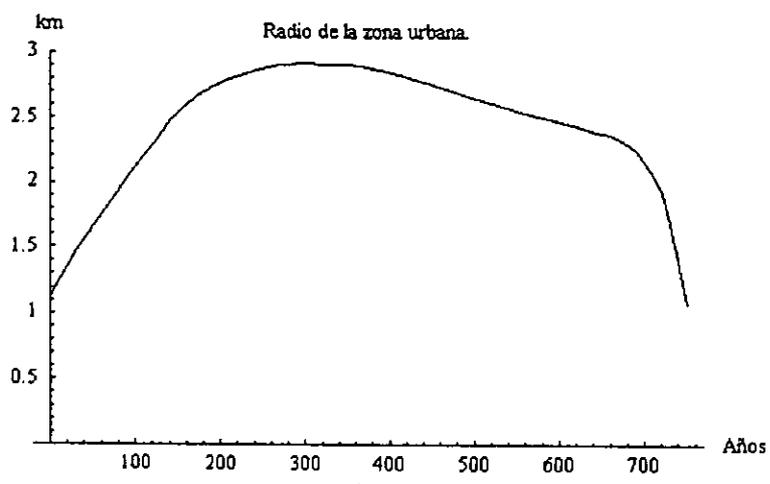


Fig. II.4

El objetivo de la simulación no fue el reproducir el comportamiento exacto de dicha civilización, sino mostrar que aún en las condiciones mínimas de supervivencia (tales como alimento per cápita constante en el valor mínimo, etc.) y con ventajas adicionales a las reales (como distancias distribuidas en radios perfectos, etc.), se generarían condiciones que provocarían una catástrofe poblacional debido a las múltiples interacciones entre las diferentes variables. Cabe señalar que las poblaciones de agricultores y leñadores, son sólo las mínimas necesarias que deben interactuar con la ciudad para mantener la población de Teotihuacán, por ejemplo: si el radio exterior de cultivo disminuye, ello no indica que los agricultores que se encontraban en los radios exteriores hayan emigrado, sino que sólo dejaron de interactuar en todo sentido con la población de Teotihuacán.

### Resultados de la simulación.-

Se obtuvieron los siguientes resultados al realizar la simulación del sistema en Matemática 3.0:

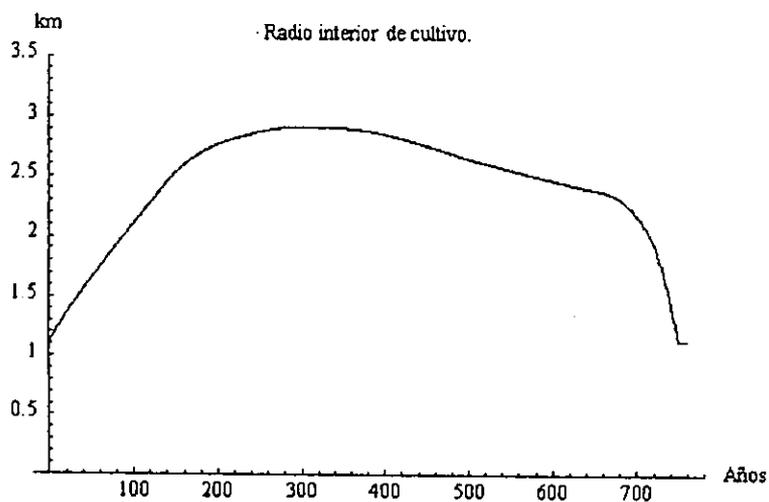


Fig. II.5

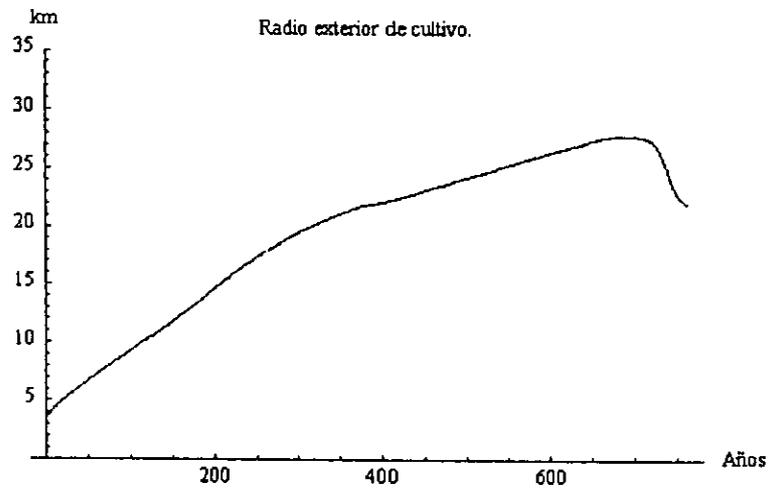


Fig. II.6

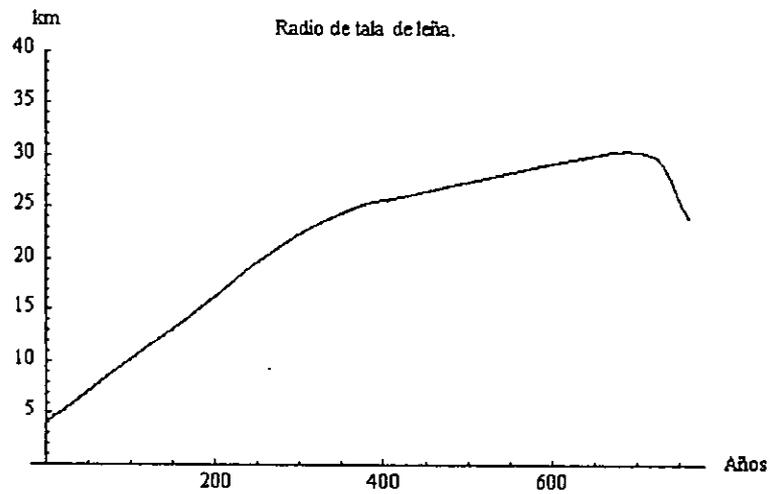


Fig. II.7

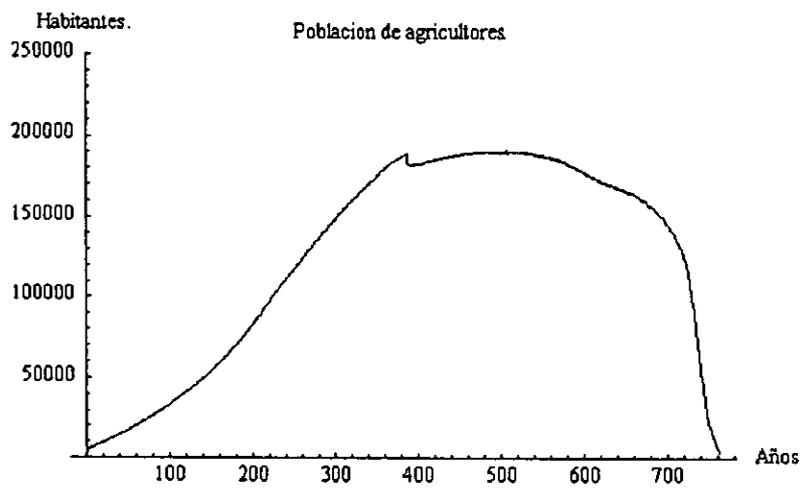


Fig. II.8

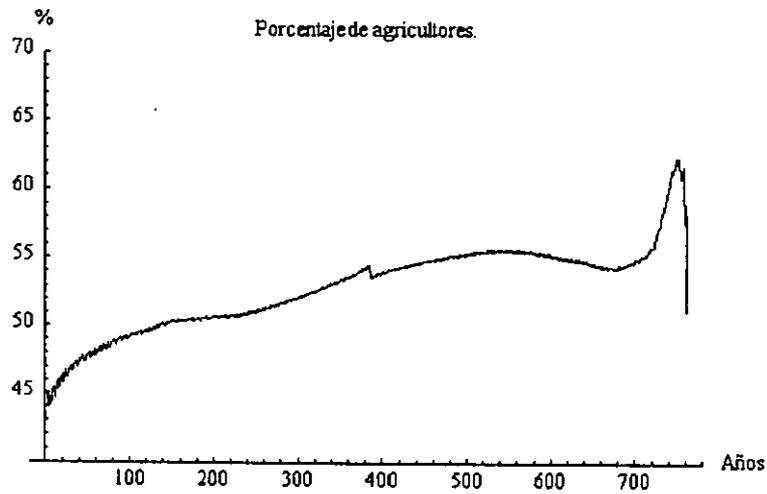


Fig. II.9

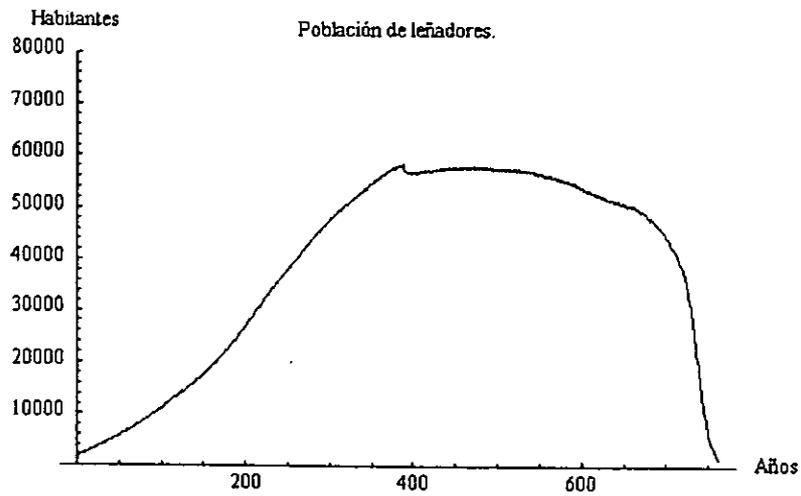


Fig. II.10

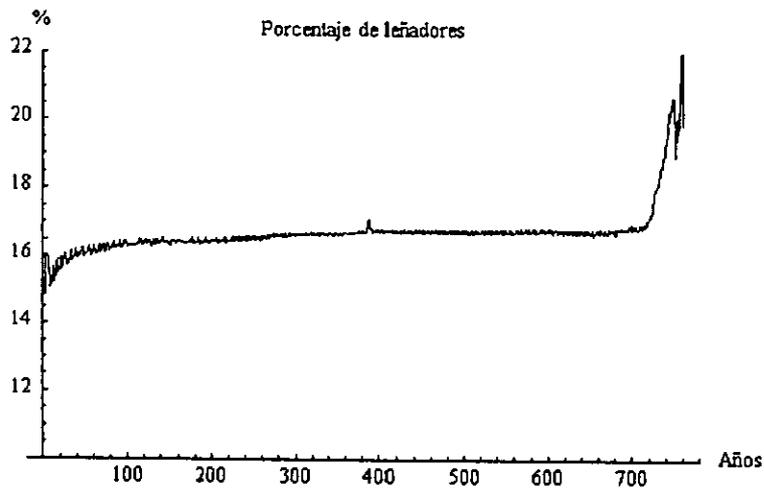


Fig. II.11

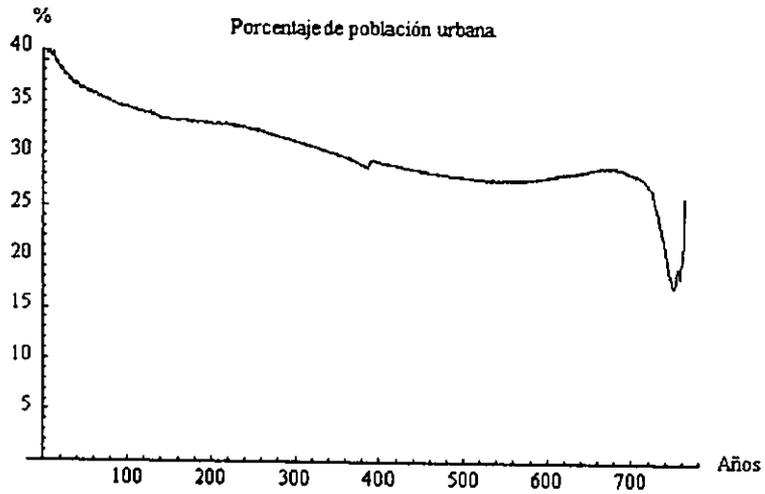


Fig. II.12

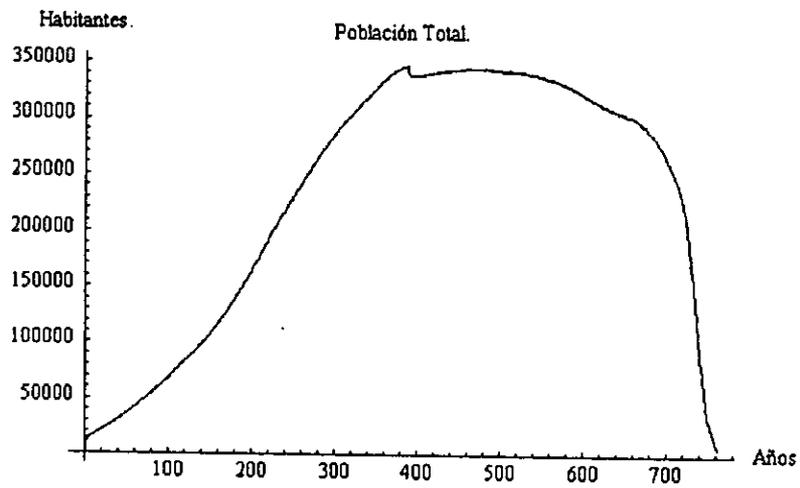


Fig. II.13

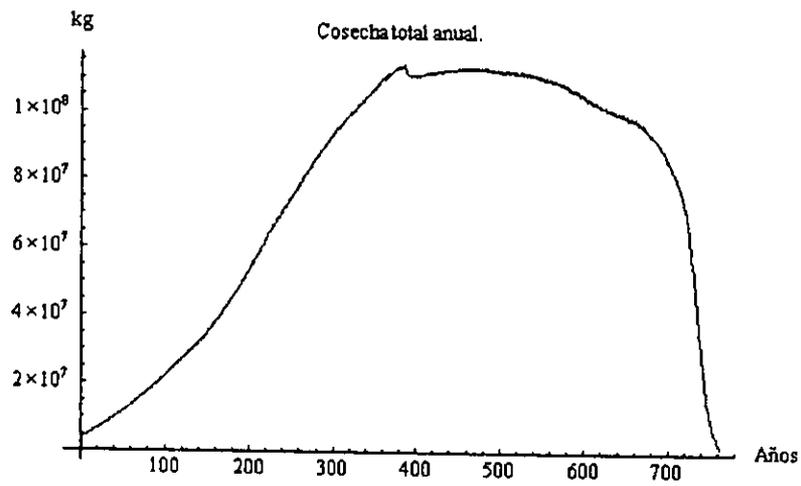


Fig. II.14

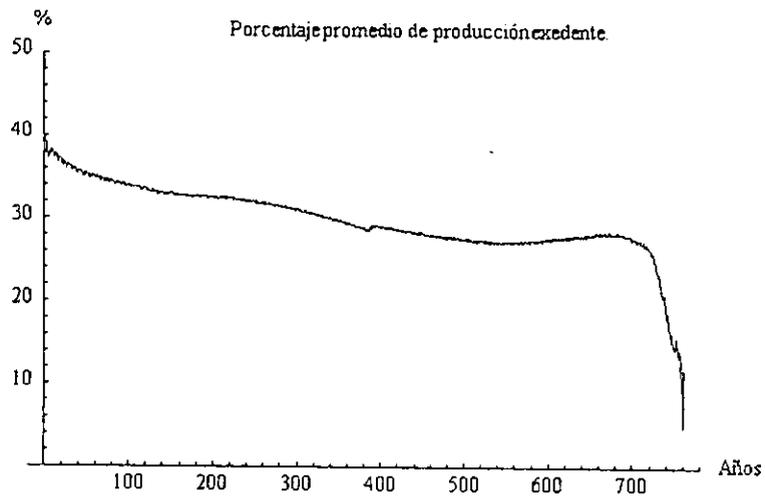


Fig. II.15

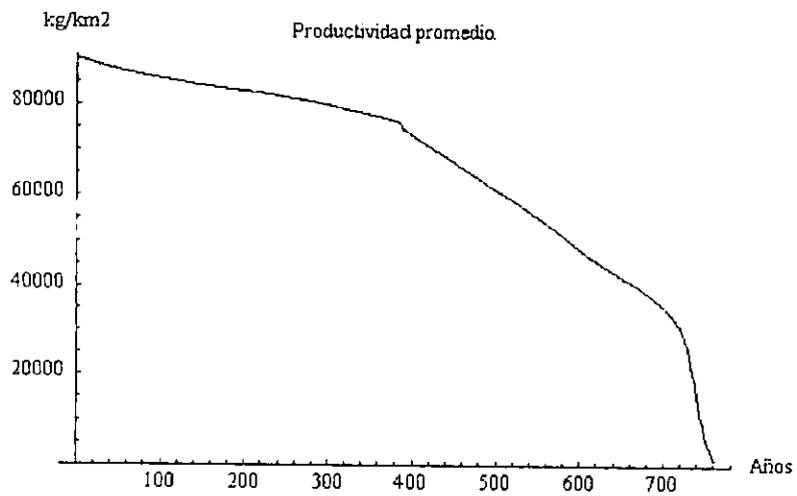


Fig. II.16

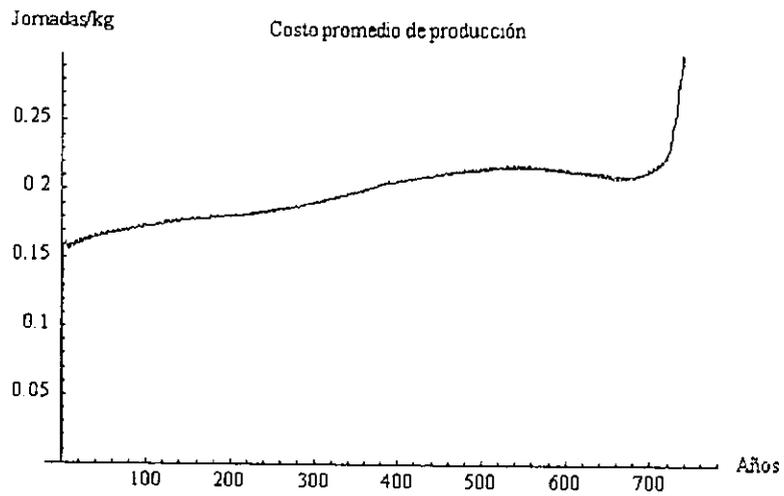


Fig. II.17

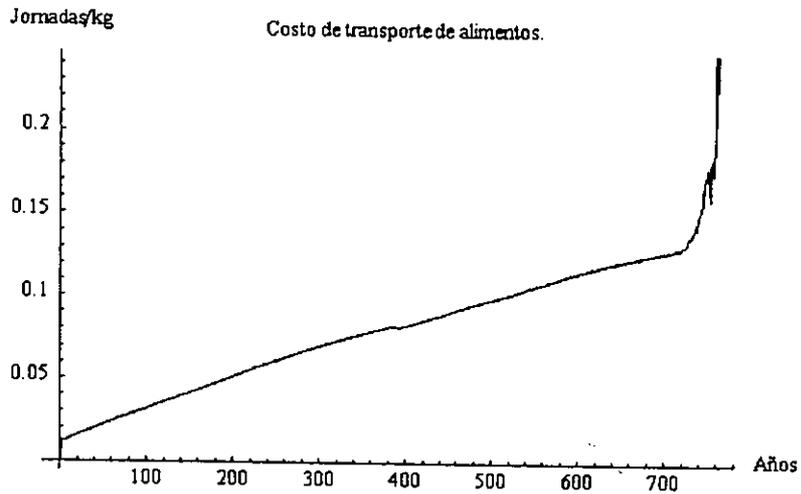


Fig. II.18

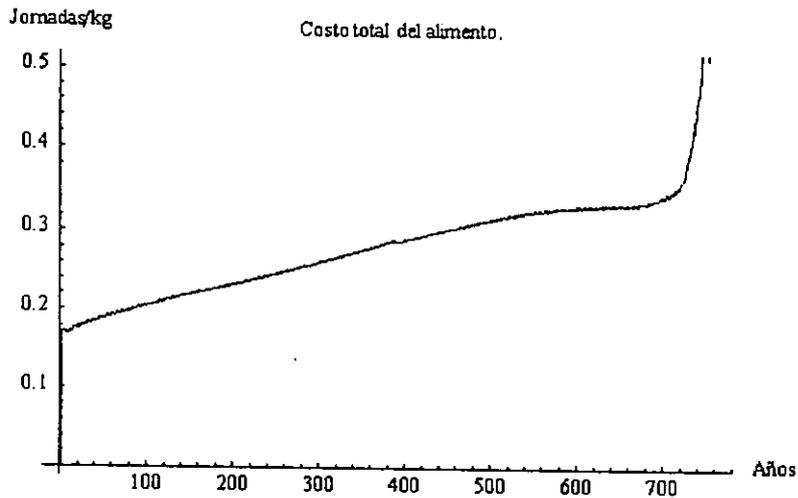


Fig. II.19

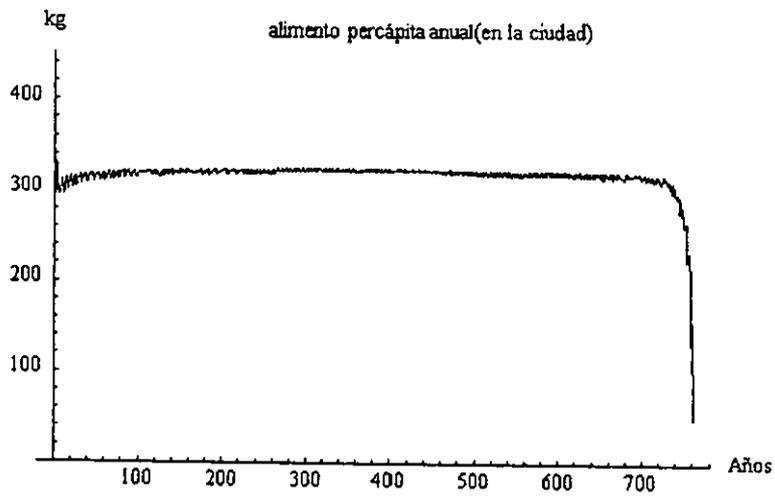


Fig. II.20

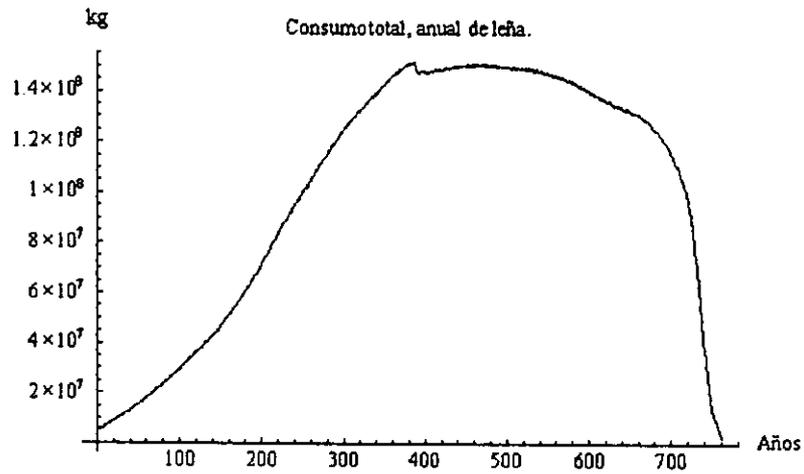


Fig. II.21

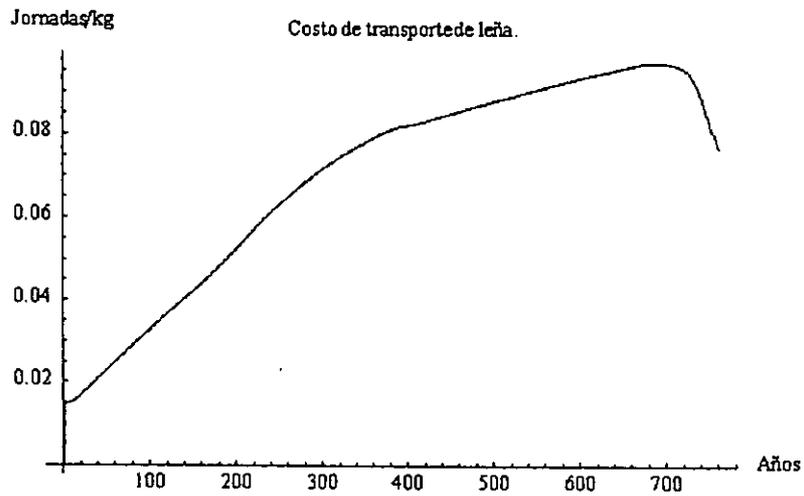


Fig. II.22

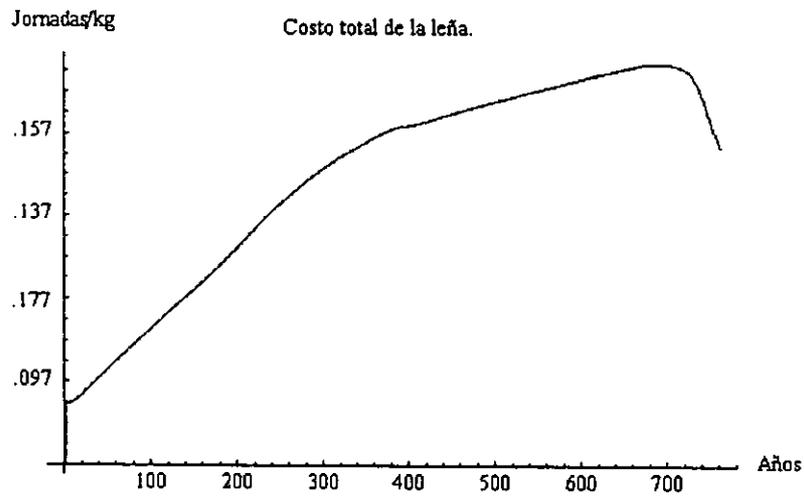
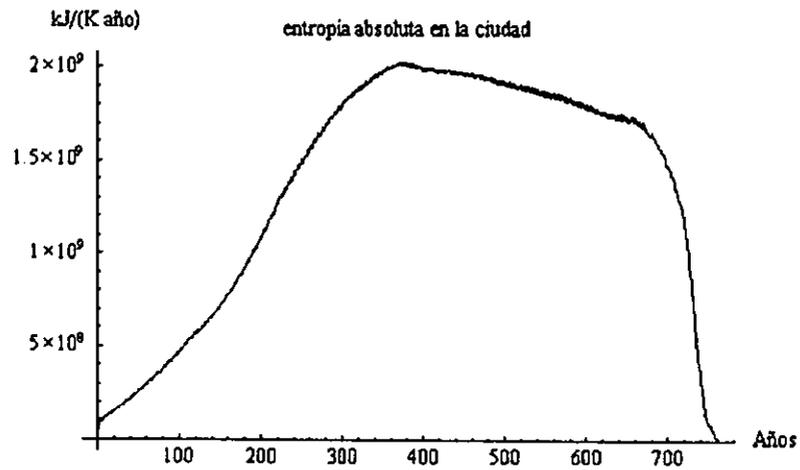
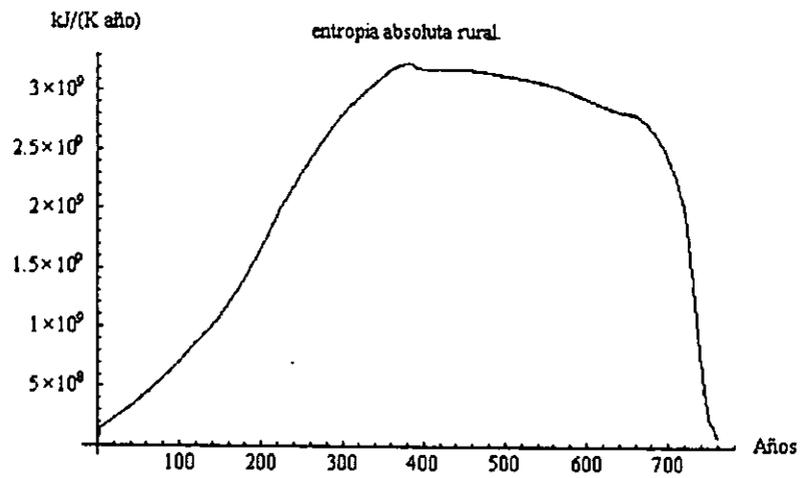
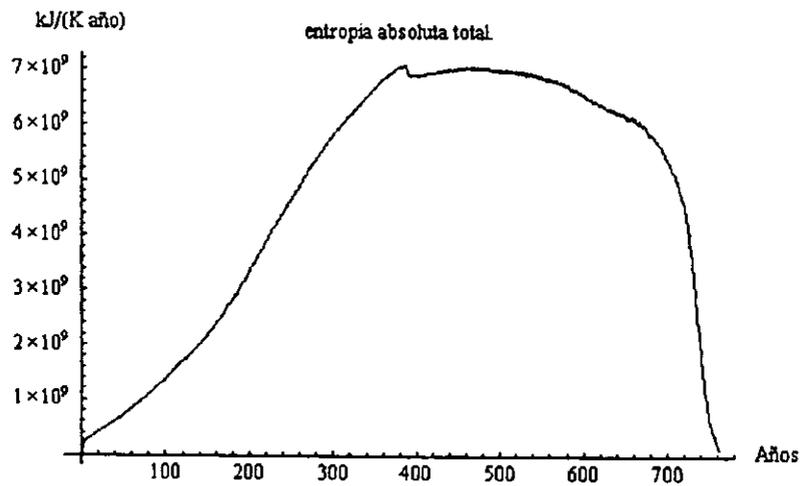


Fig. II.23



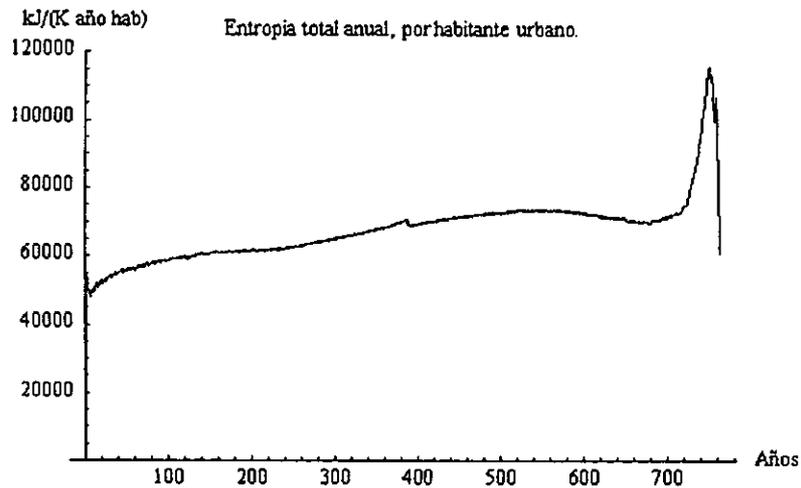


Fig. II.27

### Análisis de los resultados.-

En la Fig. II.1, se puede observar que a pesar de que las poblaciones iniciales y finales de Teotihuacán en el periodo estudiado son muy similares, el radio exterior de cultivo es considerablemente más grande al final del periodo, que al inicio del mismo (Ver Fig. II.6). Esto se debe a la disminución de la productividad de la tierra de cultivo, la cual provoca que para mantener a una población similar, se requiera una mayor cantidad de área cultivada, con lo cual necesariamente aumenta la proporción de población campesina (Ver Fig. II.9). Lo anterior indica que durante el crecimiento de la población de Teotihuacán, se llevan a cabo procesos irreversibles que impiden que el sistema vuelva, en su totalidad, a las condiciones iniciales.

En las Figuras II.8, II.9, II.10, II.12, II.13, II.14, II.15, II.16, II.21, II.24, se observan claras discontinuidades, las cuales se deben a que en ése punto se comienzan a presentar abandonos de las tierras de cultivo, debido a la disminución de la productividad de la tierra, la cual hace que el cultivo no sea redituable. Esto produce, entre otras cosas, que la población que interacciona con la ciudad disminuya, debido a que parte de los agricultores se desplaza a tierras más lejanas y productivas, provocando que se requiera una menor cantidad de éstos para producir la misma cantidad de alimento.

En lo que respecta a los diversos costos relacionados con los alimentos, se puede observar que:

1. El costo promedio de producción (Fig. II.17) parece acercarse a un estado estacionario y cerca del final del periodo estudiado, sufre un repentino y rápido aumento, hasta ser cerca del doble del costo inicial. Esto se debe a que al irse retirando la población urbana, el radio exterior de cultivo comienza a disminuir, de forma que la mayoría de los alimentos se obtienen de tierras que tienen más tiempo cultivándose y como consecuencia tiene una productividad baja. Esto a su vez produce que los costos aumenten, provocando que la población comience a salir con más rapidez, de forma que se presenta un comportamiento autoestimulado, cuyas características producen el rápido crecimiento de los costos de producción.
2. Los costos de transporte de alimentos (Fig. II.18), presentan un comportamiento similar a los de producción. Como se mencionó anteriormente, la producción de alimentos cerca del final del periodo estudiado, se lleva a cabo en tierras poco productivas; sin embargo la mayor parte de la producción se obtiene cerca del radio exterior de cultivo (debido a que son zonas relativamente más productivas), provocando que aumente distancia promedio que deben recorrer los alimentos, de forma que se presenta el rápido crecimiento de los costos de transporte.
3. El costo total del alimento (Fig. II.19), presenta un repentino crecimiento al final del periodo estudiado, debido a que los costos de producción y transporte aumentan de forma similar debido a las causas mencionadas anteriormente.

En lo que se refiere al porcentaje promedio de producción excedente (Fig. II.15), se puede observar que disminuye gradualmente y cerca del final del periodo estudiado presenta una brusca y rápida disminución. Esto es debido a que como se mencionó anteriormente, al final del periodo, se realiza el cultivo en zonas poco productivas, provocándose que en general exista poco excedente disponible para ser exportado hacia la ciudad.

Respecto a la disminución de la productividad, se puede mencionar que el modelo teórico utilizado, no considera que en tierras cercanas a la ciudad, los desechos orgánicos de la misma, evitan que la productividad continúe disminuyendo al mismo ritmo que en el resto de las tierras de cultivo. Esto implica en la realidad, la productividad de la tierra en los

alrededores de la ciudad disminuía hasta un valor y a partir de éste permanecía en un estado cercano al estacionario.

En la Fig. II.27, se muestra la entropía total que se genera anualmente por habitante urbano, observándose que parece alcanzarse con cierto sobrepaso, un valor de estado estacionario; sin embargo al final del periodo estudiado se presenta un aumento súbito y repentino en la entropía generada. Esto es indicio de que al final del periodo se ve súbitamente disminuida la eficiencia energética de la estructura urbana, ya que para mantener a un individuo en la ciudad cada vez se requiere disipar anualmente una mayor cantidad de energía (tanto en combustible como en alimentos). Posteriormente se presenta una disminución en el valor de la entropía producida anualmente, esto no es indicio de una recuperación de eficiencia, sino una consecuencia de que hay menor cantidad de alimento disponible y por ello la energía disipada necesariamente disminuye (Ver Fig. II.20).

#### Análisis adicionales.-

Con el fin de conocer con más detalle el comportamiento del sistema, se realizaron simulaciones adicionales, de forma que se mantuvieron constantes todos los parámetros, excepto el coeficiente de erosión. De dichas simulaciones, se obtuvieron los siguientes resultados.

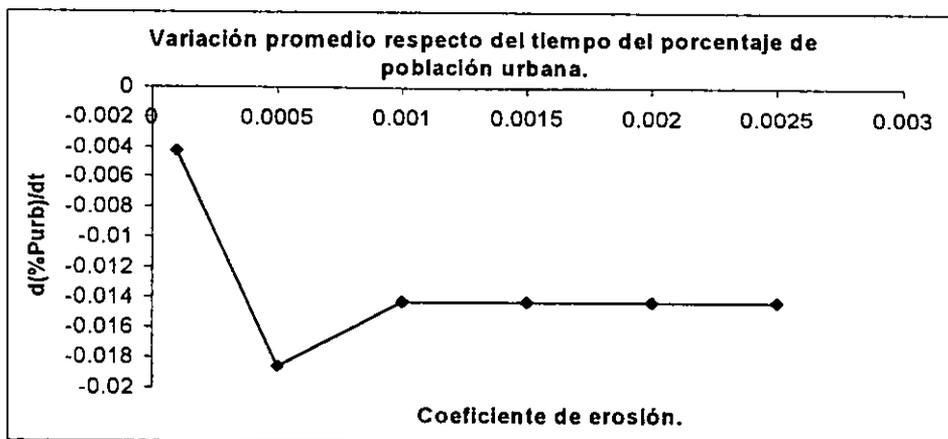


Fig. II.28

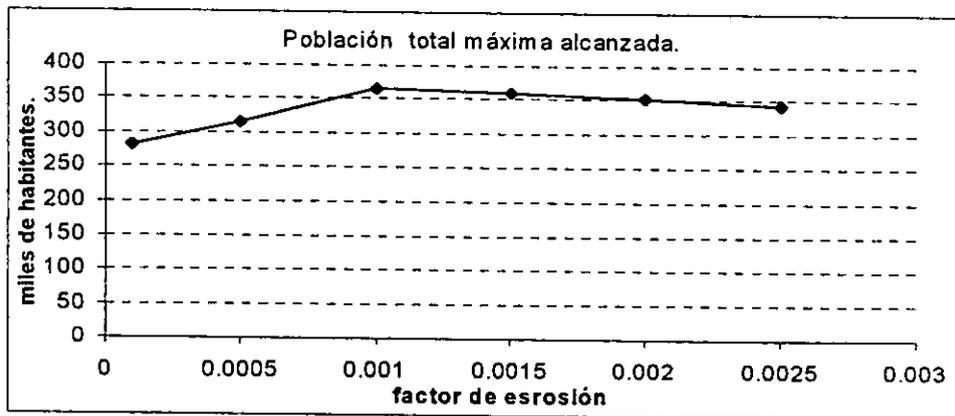


Fig. II.29

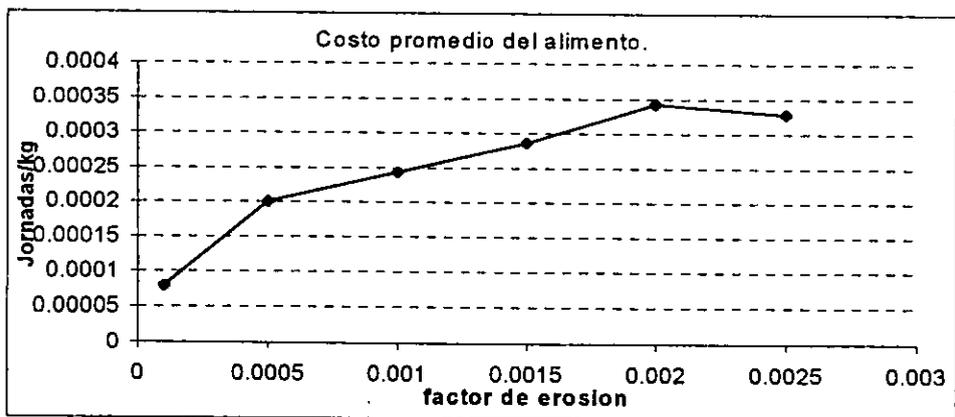


Fig. II.30

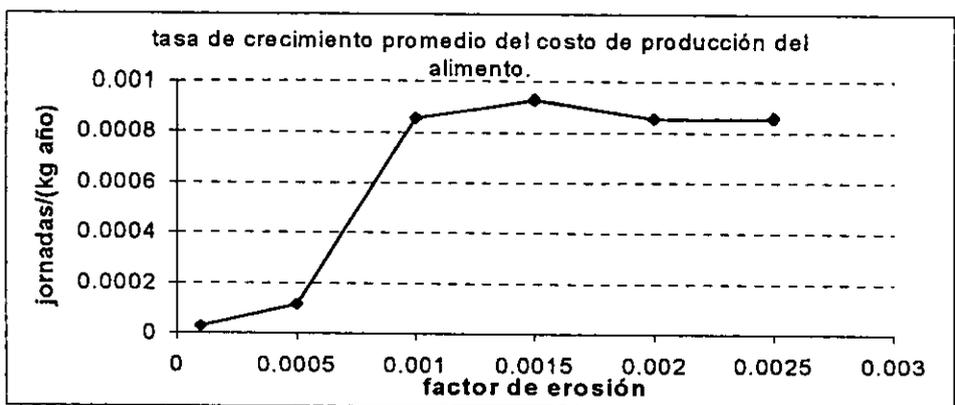


Fig. II.31

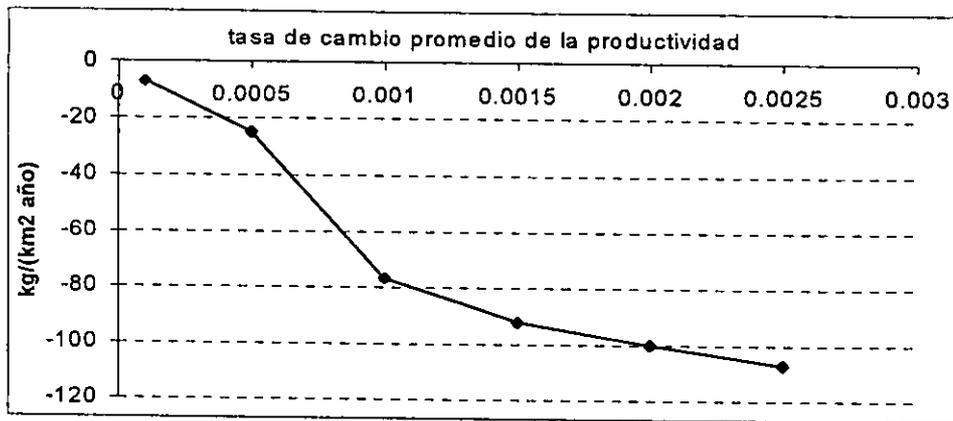


Fig. II.32

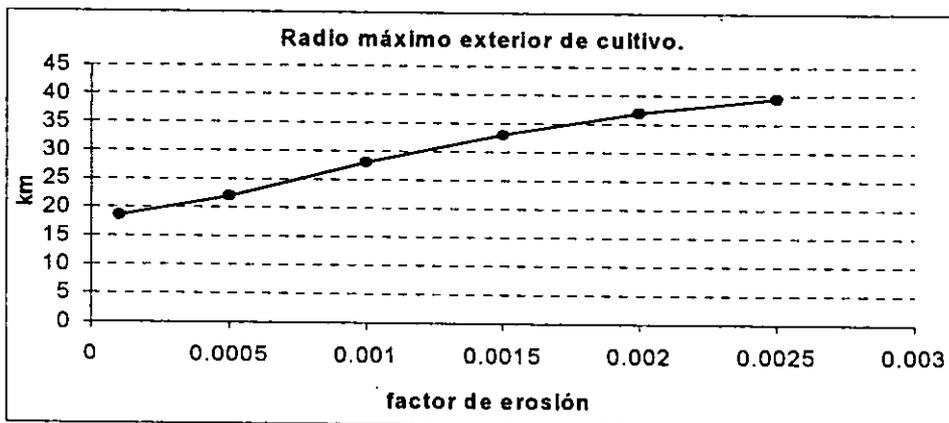


Fig. II.33

Conforme el coeficiente de erosión aumenta, se producen con mayor rapidez abandonos de tierras de cultivo por parte de los agricultores. Este fenómeno promueve una renovación relativamente uniforme de las zonas de cultivo, teniéndose como consecuencia que el cambio promedio del porcentaje de la población urbana (Fig. II.27), y la población máxima alcanzada, presenten variaciones menores conforme el coeficiente de erosión aumenta. Situaciones similares se presentan con el costo promedio del alimento, la tasa de crecimiento promedio de los costos de producción de alimentos y con la tasa de cambio de la productividad.

El radio máximo exterior de cultivo (Fig.II.32), presenta un punto de inflexión, de forma que a partir de un factor de erosión de 0.0025, el cambio que presenta es considerablemente pequeño.

### Comentarios generales.-

Se pudo observar que una de las principales causas del abandono catastrófico de la ciudad, fue el rápido aumento del costo de los alimentos, sin embargo éstos tiene su origen a través de múltiples interacciones entre diferentes fenómenos, tales como erosión de la tierra, grandes distancias de transporte de alimentos y de leña, escasez de alimento, disminución de la población, etc.

Este ejemplo muestra claramente que en el caso de modelos no lineales, pueden llegar a existir largos periodos de tiempo en los cuales los efectos cruzados entre variables sean casi despreciables, de forma que el sistema se comporta de manera casi lineal. Sin embargo pueden existir momentos críticos en los cuales los efectos no lineales y las interacciones cruzadas entre variables sean repentinamente importantes, de forma que para sistemas complejos es conveniente realizar un estudio detallado a éste respecto para evaluar la posible aparición repentina de comportamientos no deseables a largo plazo.

Se puede mencionar que la forma general de las ecuaciones de Teotihuacán y las del modelo general presentado en éste capítulo, son muy similares. Esto indica que si no se lleva a cabo un estudio detallado sobre las condiciones actuales y tendencias de las diferentes variables en México y el Mundo, se pueden llegar presentar situaciones catastróficas, similares al caso de Teotihuacán. Por otra parte, esto indica que se puede utilizar un modelo similar al propuesto en éste capítulo, para estudiar la forma en que una sociedad puede alcanzar un estado sustentable a través de una trayectoria sustentable.

# *Anexo III.*

## *Lista de símbolos.*

$\dot{e}$	POTENCIA LIBRE PERCÁPITA DIRECTAMENTE CONSUMIDA.
$\dot{r}_{eci}$	Producción del recurso i, directamente utilizado (consumido)
$\dot{e}_i$	Potencia consumida para la producción del recurso i.
$\dot{E}_T$	Potencia total disponible para la producción de recursos.
$\dot{R}_{ecj}$	Producción total de recursos.
$N(\dot{r}_{ecj})$	Fracción de la población que elabora al recurso j.
$\dot{P}_{heer}(r_{ecj})$	Productividad de las personas al producir el recurso j
$N(\dot{r}^-_{ecj})$	Fracción total de la población que consume el recurso j
$\dot{r}_{con}(r_{ecj})$	Consumo promedio del recurso j de los habitantes correspondientes.
$maiz_{percap}$	Producción anual per cápita de maíz. (respecto a la ciudad)
$maiz$	Producción anual de maíz (respecto a la ciudad)
$costo_{maiz}$	Costo anual para la producción del maíz. (respecto a la ciudad)
$costo_{percapmaiz}$	Costo per cápita anual de producción de maíz. (respecto a la ciudad)
$leña_{percap}$	Producción per cápita de leña anual. (respecto a la ciudad)
$leña$	Producción anual de leña. (respecto a la ciudad)
$costo_{leña}$	Costo anual de producción de leña. (respecto a la ciudad)
$costo_{percapleña}$	Costo per cápita anual de producción de leña (respecto a la ciudad)
%Agric	Porcentaje de agricultores en Teotihuacán.
$\varphi$	Producción de entropía por unidad de tiempo.
$\mu_\gamma$	Potencial químico del componente $\gamma$
$\xi_\gamma$	Grado de avance de la reacción $\gamma$
$\nu_\gamma$	Coefficiente estequiométrico de $\gamma$
Eja	Energía almacenada después de la producción
Ejd	Energía disipada durante la producción
Eji	Energía almacenada antes de la producción.
$e_{leña}$	Energía per cápita recibida de la leña. (en la ciudad)

$e_{\text{maiz}}$	Energía per cápita recibida del maíz. (en la ciudad)
$E_{pj}$	Energía de producción por unidad de recurso.
H	Entalpía
$L_{ik}$	Coefficiente fenomenológico
$m_{\gamma}$	Masa del componente $\gamma$
$n_{\gamma}$	Número de moles del componente $\gamma$
p	Presión
Pob	Población
$Pob_{\text{urb}}$	Población urbana de Teotihuacán.
Prod(Agric)	Productividad de los Agricultores
S	Entropía
$T_{\text{amb}}$	Temperatura ambiental.
$X_i$	Fuerza termodinámica generalizada i
$J_i$	Flujo termodinámico generalizado i.
V	Volumen

# *Anexo IV.*

*Conversión de unidades utilizadas.*

### **Longitud**

$$1\text{ km} = 1000\text{ m} = 0.6214\text{ mill}$$

$$1\text{ cm} = 0.3937\text{ pulg.}$$

### **Volúmen**

$$1\text{ lt} = 1000\text{ cm}^3 = 0.0351\text{ pie}^3 = 61.02\text{ pulg}$$

$$1\text{ pie}^3 = 7.477\text{ galones.}$$

$$1\text{ Barril de petróleo} = 158.9873\text{ lts}$$

### **Presión**

$$1\text{ Pa} = 1.451 \times 10^{-4}\text{ lb-plg}^{-2} = 0.209\text{ lb-pie}^{-2}$$

$$1\text{ atm} = 1.013 \times 10^5\text{ Pa} = 14.7\text{ lb-pulg}^{-2} = 2117\text{ lb-pie}^{-2}$$

### **Energía**

$$1\text{ cal} = 4.186\text{ J}$$

$$1\text{ lb-pie} = 1.356\text{ J}$$

$$1\text{ Btu} = 1055\text{ J} = 252\text{ cal.}$$

$$1\text{ kWh} = 3,600 \times 10^6\text{ J}$$

### **Poder calorífico**

$$1\text{ Barril de crudo} = 1.354 \times 10^6\text{ kcal.}$$

$$\text{Gas Natural} = 8460\text{ kcal/m}^3$$

$$\text{Carbón mineral} = 5 \times 10^6\text{ kcal}$$

$$\text{Harina seca de maíz} = 3571.5\text{ kcal/kg}$$