

*IMPACTOS POTENCIALES DE LOS  
CAMBIOS CLIMATICOS GLOBALES  
EN LOS  
SISTEMAS AGRICOLAS Y EN LOS  
ECOSISTEMAS TERRESTRES  
DE VENEZUELA:  
RESULTADOS PRELIMINARES*

PREPARADO  
POR

PAN EARTH - VENEZUELA

PARA EL  
GRUPO INTER-INSTIUCIONAL  
DE CAMBIOS CLIMATICOS

MARNR

OCTUBRE 1991

*IMPACTOS POTENCIALES DE LOS  
CAMBIOS CLIMATICOS GLOBALES  
EN LOS  
SISTEMAS AGRICOLAS Y EN LOS  
ECOSISTEMAS TERRESTRES  
DE VENEZUELA:  
RESULTADOS PRELIMINARES*

PREPARADO  
POR

PAN EARTH - VENEZUELA

PARA EL  
GRUPO INTER-INSTITUCIONAL  
DE CAMBIOS CLIMATICOS

MARNR

OCTUBRE 1991

## AUTORES PRINCIPALES

Miguel F. Acevedo (1)  
Rigoberto Andressen (2)  
Ramón Jaimez (3)  
Luis La Cruz (4)  
Carlos Maytín (5)

(en orden alfabético)

(1) Escuela de Ingeniería de Sistemas y CESIMO, Universidad de Los Andes y Coordinador PAN EARTH, VENEZUELA

(2) CIELAT, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes y Director, CEACTION, MARNR.

(3) CESIMO, Universidad de Los Andes e Investigador PAN EARTH, VENEZUELA

(4) Investigador PAN EARTH, VENEZUELA

(5) CIELAT, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, e Investigador PAN EARTH, VENEZUELA

La realización de este trabajo fué posible gracias al apoyo de Anibal Rosales, Martha Perdomo y Ana Cristina González de la Dirección de Información, Investigación y Conservación de Agua, Suelo y Vegetación del MARNR.

Este trabajo ha sido preparado para el GRUPO INTERINSTITUCIONAL DE CAMBIOS CLIMATICOS, coordinado por la Dirección de Proyectos Especiales de la Dirección de Información, Investigación y Conservación de Agua, Suelo y Vegetación del MARNR.

## C O N T E N I D O

### CAPITULO 1: INTRODUCCION

- 1.1. Antecedentes.....pp. 1-1
- 1.2. Objetivos .....pp. 1-2
- 1.3. Estructura.....pp. 1-3

### CAPITULO 2: CAMBIOS DE CLIMA Y ESCENARIOS DE CAMBIOS CLIMATICOS PARA VENEZUELA

- 2.1. Introducción.....pp. 2-1
- 2.2. El Clima de la Tierra como Sistema.....pp. 2-2
- 2.3. Cambios Climáticos: Cambios Pasados en el Clima Global.....pp. 2-8
- 2.4. Balance Energético Global y Efecto Invernadero...pp. 2-11
- 2.5. Escenarios de Cambios Climáticos para Venezuela.....pp. 2-14
- Bibliografía.....pp. 2-21

### CAPITULO 3: IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS EN EL SECTOR VEGETAL DE LA AGRICULTURA VENEZOLANA

- 3.1. Introducción.....pp. 3-1
  - 3.1.1. Objetivos.....pp. 3-1
  - 3.1.2. Experiencias en Otras Regiones y Países.....pp. 3-1
  - 3.1.3. Metodologías Disponibles.....pp. 3-12
- 3.2. Areas y Cultivares Representativos.....pp. 3-29
- 3.3. Evaluación de Impactos Agrícolas de Cambios Climáticos a Través de Modelos de Simulación...pp. 3-43
- 3.4. Impacto de Cambios Climáticos en el Sector Vegetal de la Agricultura Venezolana.....pp. 3-57
- 3.5. Algunas Estrategias e Investigaciones Necesarias para Evaluar el Impacto Agrícola de los Cambios Climáticos en Venezuela.....pp. 3-69
- Bibliografía..... pp. 3-79

**CAPITULO 4: IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS EN LOS  
ECOSISTEMAS TERRESTRES VENEZOLANOS**

4.1.	Introducción.....	pp. 4-1
4.1.1.	Objetivos.....	pp. 4-1
4.1.2.	Experiencias en Otras Regiones y Países.....	pp. 4-2
4.1.3.	Metodologías para la Evaluación de Impactos de Cambios Climáticos en Ecosistemas Terrestres....	pp. 4-16
4.2.	Áreas y Ecosistemas Representativos.....	pp. 4-19
4.3.	Evaluación Mediante Modelos de Simulación.....	pp. 4-22
4.3.1.	Modelos de Bosques.....	pp. 4-22
4.3.2.	Modelos de Sabanas.....	pp. 4-26
4.4.	Evaluación de Impactos de Cambios Climáticos sobre los Ecosistemas Terrestres en Venezuela..	pp. 4-28
4.4.1.	Impacto de Cambios Climáticos Pasados.....	pp. 4-28
4.4.2.	Impacto de Cambios Climáticos Futuros.....	pp. 4-29
4.5.	Estrategias e Investigaciones Necesarias para Evaluar el Impacto de Cambios Climáticos en los Ecosistemas Terrestres Venezolanos.....	pp. 4-31
	Bibliografía.....	pp. 4-39

## INDICE DE TABLAS

- Tabla 2.1. Composición del Aire Seco en la Baja Atmósfera
- Tabla 2.2. Porcentajes de Superficie de los Principales Tipos de Relieve
- Tabla 2.3. Intervalos Cálidos en los Últimos 4 Millones de Años
- Tabla 2.4. Dimensiones y Área Aproximada (6° N.) de los Cuadrados de Grilla OSU, GFDL, GISS y UKMO
- Tabla 2.5. Precipitación Observada-Estimada (mm) para cada Área Geográfica
- Tabla 2.6. Comparación entre la Precipitación Simulada por los Modelos (1 x CO<sub>2</sub>) y la Observada-Estimada para cada Área Geográfica
- Tabla 2.7. Estaciones Meteorológicas Seleccionadas para la Validación de la Temperatura Simulada (1 x CO<sub>2</sub>) por los Modelos OSU, GFDL, GISS y UKMO
- Tabla 2.8. Modelos que Mejor Simulan la Precipitación para cada Mes y cada Área Geográfica
- Tabla 2.9. Modelos que Mejor Simulan la Cantidad y Régimen de Precipitación para cada Área Geográfica
- Tabla 2.10. Temperatura Media (°C) para Enero, Abril, Julio y Octubre. Valores Observados y Valores Simulados (1 x CO<sub>2</sub>) por los Modelos OSU, GFDL, GISS y UKMO para cada Área Geográfica
- Tabla 2.11. Modelos que Mejor Simulan la Temperatura Media de Enero, Abril, Julio y Octubre para cada Área Geográfica
- Tabla 2.12. Cambios en la Precipitación de Acuerdo al Modelo UKMO
- Tabla 2.13. Escenarios de Cambios Climáticos para Venezuela (2 x CO<sub>2</sub>).
- Tabla 3.14. Cambio de Producción (%) por el Efecto Invernadero según Simulaciones con los OSU, GFDL y GISS en el Cultivo de Soya en Varias Localidades de los EE.UU.
- Tabla 3.2. Cambio de Producción (%) por el Efecto Invernadero en los Cultivos de Maíz y Algodón en algunas Regiones de los Estados Unidos

- Tabla 3.3. Cambios de Producción Agrícola Global (%) por Efecto Invernadero en varios Países de Europa
- Tabla 3.4. Superficie de Maíz, Arroz y Sorgo para 1984-85 en los Principales Estados Cerealeros de Venezuela
- Tabla 3.5. Superficie de Maíz, Arroz y Sorgo para 1990 en los Principales Estados Cerealeros de Venezuela
- Tabla 3.6. Cantidad (Ton.) y Valor de Producción (miles de Bs.) de las Leguminosas en Venezuela Durante el Período 1986-1988
- Tabla 3.7. Superficie Cosechada (Ha) y Producción (Ton) de Caraotas en los Principales Estados Productores
- Tabla 3.8. Volumen (Ton) y Valor de Producción (miles de Bs) de Raíces y Tubérculos en Venezuela Durante el Período 1986-1988
- Tabla 3.9. Superficie (Ha) Cosechada de Yuca en las Principales Entidades Productores de Venezuela en 1984-85 y 1990
- Tabla 3.10. Areas y Cultivares Propuestos Preliminarmente para Evaluaciones de Impacto por Cambio Climático en Venezuela
- Tabla 3.11. Coeficientes Genéticos de Cultivares de Maíz en Venezuela y en Otras Areas de Maíz Intertropicales
- Tabla 3.12. Coeficientes Genéticos de Soya para el Grupo de Maduración 10 (0° a 25° de latitud)
- Tabla 3.14. Escenarios de Cambios Climáticos para Venezuela y su Impacto sobre el Maíz Híbrido Obregón
- Tabla 3.15. Simbología de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación (figs. 3.18 a 3.20)
- Tabla 3.16. Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1. Componentes del Macrosistema Tierra
- Figura 2.2. Flujos de Energía a Través del Sistema Tierra-Atmósfera
- Figura 2.3. Estructura Vertical de la Atmósfera Terrestre
- Figura 2.4. Balance Global de Energía y Efecto Invernadero
- Figura 2.5. Esquema Metodológico para la Evaluación de los Modelos GCMs y Generación de los Escenarios de Cambios Climáticos
- Figura 2.6. Cuadrado de Grilla de los Modelos OSU, GFDL, GISS y UKMO sobre el Territorio Venezolano
- Figura 2.7. Areas Geográficas Seleccionadas para la Evaluación de los GCMs en Venezuela
- Figura 2.8. Distribución Geográfica de la Precipitación de Agosto en Venezuela
- Figura 2.9. Posición de la Vaguada Intertropical en Febrero y Agosto sobre Suramérica
- Figura 2.10. Salidas Gráficas de la Precipitación Simulada (1 x CO<sub>2</sub>, mm/día) por los Modelos OSU, GFDL, para Febrero y Agosto
- Figura 3.1. Tipos de Modelos y Estados de Análisis en el Enfoque Parcialmente Integrado de Evaluación de Cambios Climáticos en la Agricultura
- Figura 3.2. Metodología para la Evaluación del Impacto de Cambios Climáticos sobre el Cultivo del Maíz
- Figura 3.3. Esquema del Sistema Regional de Planificación y Evaluación de Políticas AEGIS
- Figura 3.4. Integración de un Sistema de Información Geográfica Agrícola y Modelos de Simulación
- Figura 3.5. Regiones Agrícolas de Venezuela
- Figura 3.6. Venezuela. Calorías para Consumo Humano Según Grupos de Alimentos. Año 2010
- Figura 3.7. Venezuela. Proteínas para Consumo Humano Según Grupos de Alimentos. Año 2010
- Figura 3.8. Venezuela. Superficie Cosechada Según Grupos de Cultivos. Periodos 1985-1988



- Figura 3.9. Venezuela. Valor de Producción Según Grupos de Cultivos. Periodos 1986-88 (precio de 1978)
- Figura 3.10. Venezuela. Producción Según Grupos de Cultivos. Periodo 1986-88
- Figura 3.11. Venezuela. Producción de Maíz, Arroz y Sorgo. Periodo 1985-90
- Figura 3.12. Necesidad de Superficie para Cultivos en el Año 2010 en Venezuela
- Figura 3.13. Venezuela. Metas de Producción para Algunos Cultivos. Año 2010
- Figura 3.14. Venezuela. Valor de Producción para Algunos Cultivos. Año 2010
- Figura 3.15. Jerarquía de Modelos Utilizados en Agricultura
- Figura 3.16. Comparación de Eventos Fenológicos del Maíz por el Modelo CERES-Maíz en Venezuela
- Figura 3.17. Comparación de las Producciones de Maíz Simuladas y Observadas por el Modelo CERES-Maíz en Venezuela
- Figura 3.18. Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el Maíz Híbrido PB-8 en Barinas
- Figura 3.19. Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el Maíz Híbrido PB-8 en Turén
- Figura 3.20. Impacto Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el Maíz Híbrido CENIAP PB-8
- Figura 3.21. Impacto de Cambios Climáticos sobre Fenología, Productividad y Biomasa de la Caraota en Maracay
- Figura 4.1a. Localización de Estaciones Seleccionadas
- Figura 4.1b. Ordenamiento de las Estaciones Seleccionadas en el Primer Plano del Análisis de Componentes Principales
- Figura 4.2a. Ordenamiento de las Estaciones de Acuerdo a Variables Relacionadas con la Precipitación
- Figura 4.2b. Efectos de Cambios Climáticos en las Estaciones Seleccionadas.

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. ANTECEDENTES

El problema del calentamiento global del planeta producto del "Efecto Invernadero", inducido por el uso de combustibles fósiles, deforestación de importantes bosques tropicales, cambios en los patrones de uso de la tierra y otras actividades humanas constituye, además de un serio planteamiento científico, un asunto geopolítico de gran importancia. En los últimos años se ha agregado al concepto de la "Seguridad Nacional, Regional y Global", los aspectos de "Seguridad Alimentaria" y "Seguridad Ecológica", íntimamente relacionados con las consecuencias que se pueden derivar de los Cambios Climáticos Globales.

La Declaración de Villach, Austria, señala que: "como consecuencia de las concentraciones crecientes de los gases-invernadero, se cree en la actualidad que para la primera mitad del próximo siglo podría ocurrir un incremento de la temperatura promedio de la tierra, de una magnitud mayor a cualquier otro aumento ocurrido durante la historia del hombre sobre la tierra". Luego esta declaración agrega que "muchas decisiones económicas y sociales importantes en relación a proyectos a largo plazo (obras de gran envergadura para manejos de recursos como riego, generación de hidro-energía y navegación, uso agrícola, desarrollo de infra-estructuras y proyectos de ingeniería de costas y planificación energética) se hacen y se llevan a cabo asumiendo que los datos climáticos pretéritos, sin ninguna modificación, son una guía confiable para el futuro. Esto ya no constituye una buena premisa...Es materia de urgencia refinar las estimaciones de las condiciones climáticas futuras, para mejorar las decisiones".

En un contexto nacional, la evaluación de los posibles efectos de los cambios climáticos, requiere de un plan integral de esfuerzos que incluya, desde la participación de Venezuela en todas las iniciativas internacionales que sobre este tema se llevan a cabo, hasta la identificación y promoción de la investigación necesaria para el diseño de planes y estrategias de adaptación a condiciones climáticas, probablemente diferentes a las actuales.

Uno de los objetivos del Plan de Acciones que adelanta la Dirección de Hidrología y Meteorología del MARNR, es la preparación de un documento preliminar sobre los Efectos Ambientales, Ecológicos y Socio Económicos de los Cambios Climáticos en Venezuela. El siguiente informe tiene como objetivo fundamental, presentar los lineamientos generales para el desarrollo de una primera fase de dicho documento.

## 1.2. OBJETIVOS

a) Proporcionar algunos lineamientos generales para la elaboración de un Plan Integral de Investigación sobre los Aspectos Climáticos y los Efectos Agrícolas, Ecológicos e Hidrológicos de los Cambios Climáticos sobre Venezuela;

b) compilar la información básica disponible sobre cambios climáticos globales y regionales, y analizar su aplicabilidad para el caso de Venezuela;

c) definir los escenarios climáticos probables para Venezuela;

d) revisar la bibliografía disponible acerca de las evaluaciones de impacto por cambio climático en sistemas agrícolas y ecosistemas terrestres efectuadas en otros países; y

e) plantear, en forma preliminar, los posibles efectos de la incidencia de diferentes escenarios de climáticos sobre la agricultura, los ecosistemas terrestres y los recursos hídricos del país.

## 1.3- ESTRUCTURA

El presente estudio está constituido por las secciones siguientes:

- Capítulo 1 : Introducción.
- Capítulo 2 : Cambios Climáticos Globales y Escenarios de Cambios Climáticos Probables para Venezuela.
- Capítulo 3: Efectos de los Cambios Climáticos sobre la Agricultura.
- Capítulo 4: Efectos de los Cambios Climáticos sobre los Ecosistemas Terrestres.
- Capítulo 5: Efectos de los Cambios Climáticos sobre la Hidrología.

## 2. CAMBIOS DE CLIMA Y ESCENARIOS DE CAMBIOS CLIMATICOS PARA VENEZUELA

### 2.1. INTRODUCCION

Un incremento gradual en la temperatura de la tierra parece ser una de las tendencias más probables para la primera mitad del próximo siglo, resultado de las alteraciones que las actividades humanas han estado y estarán produciendo sobre las características del clima terrestre.

Para principios de los años setenta, los científicos atmosféricos consideraban que los esfuerzos para predecir cambios climáticos tenían un éxito muy limitado, e ignoraban en muchos casos las verdaderas causas de la variabilidad climática (Machta y Telegadas 1974). En las últimas dos décadas el desarrollo de modelos climáticos ha avanzado significativamente, constituyendo una valiosísima herramienta de investigación para evaluar las posibles tendencias de las condiciones climáticas globales y sus efectos sobre la agricultura, los ecosistemas y la hidrología.

La composición química de la atmósfera está cambiando a ritmos que no se han registrado nunca antes (Patrusky 1988; Robock 1989; Graedel y Crutzen 1989; Ashmore 1990; IGBP 1990), debido fundamentalmente a la emisión de gases como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ) y los clorofluorocarbonados (CFC) (Ashmore 1990). Aunque algunos de estos gases - $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ - son originados por medio de ciertos procesos naturales (emisiones biogénicas), la proporción en el aumento de su concentración resulta de aquellas actividades humanas que están relacionadas con la agricultura intensiva, el uso de combustibles fósiles, la deforestación y la quema, la emisión de aerosoles y la utilización de CFC (Graedel y Crutzen 1989; Ashmore 1990).

Varios efectos inducidos por los cambios en la composición química de la atmósfera se han observado en proporciones bastante aceleradas en las últimas décadas, lo cual ha ocasionado reacciones en la comunidad científica internacional. Entre los efectos atmosféricos más polémicos se encuentran: la intensificación del Efecto Invernadero y la disminución de la capa de ozono estratosférica (Patrusky 1988; Schneider 1989). Estos dos efectos son prácticamente inducidos por la acumulación de gases esencialmente de origen antrópico en la atmósfera y, en el caso del ozono, por las subsecuentes reacciones químicas debido a tal acumulación.

Se estima que a raíz del aumento en las concentraciones de gases de origen antropogénico, se puede producir un aumento de la temperatura superficial de la Tierra entre

1.5 y 4.5 °C, un aumento en la precipitación media global (aunque ciertas regiones pudieran experimentar una reducción en su frecuencia y distribución), una reducción en las capas polares, y el probable incremento del nivel del mar (Davies 1989). Tales predicciones hacen necesario planificar medidas y acciones para la prevención de efectos mayores que puedan acontecer en un futuro cercano.

## 2.2 EL CLIMA DE LA TIERRA COMO SISTEMA

Podemos concebir a la Tierra y su atmósfera como un macrosistema, constituido por varios subsistemas, entre los cuales la atmósfera, hidrósfera y litósfera, son los más importantes (Fig. 2.1). La energía que alimenta a estos subsistemas proviene de la gravedad terrestre, del movimiento de rotación de la Tierra, y de la radiación solar, siendo ésta última la principal fuente energética de todos los procesos atmosféricos, físicos, químicos y biológicos que tienen lugar dentro de los subsistemas antes mencionados.

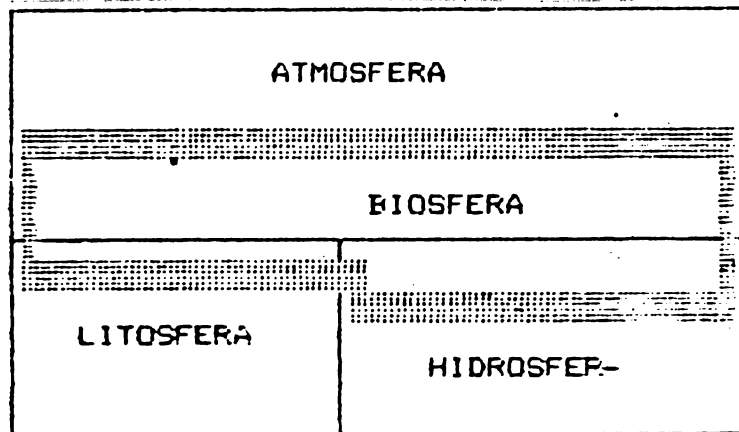


Fig. 2.1 Componentes del Macrosistema Tierra. El Sistema Biósfera comprende parte de cada uno de los otros sistemas.

La energía solar llega a la atmósfera terrestre por un proceso de radiación. La cantidad efectiva de radiación solar se mide por la constante solar, definida como el flujo de radiación solar en el límite exterior de la atmósfera terrestre (alrededor de 1000 kilómetros), recibida sobre una superficie normal a la radiación incidente, a la distancia promedio Sol-Tierra. El valor de esta constante solar es de 1,952 langley/minuto. Esta energía fluye desde las capas superiores de la atmósfera hasta el nivel de la superficie terrestre, y es almacenada en los diferentes componentes del sistema (Fig. 2.2).

Para entender las causas de los cambios climáticos y sus procesos, se hace necesario estudiar con más detalle el

Sistema Clima, sus componentes, interacciones, las fuerzas que actúan y las escalas espacio-temporales que caracterizan a los los procesos que dentro del mismo se desarrollan.

Se define como sistema a un conjunto estructural de objetos y/o atributos que consisten de componentes o variables que exhiben inter-relaciones entre unos y otros, y que operan en su totalidad como una integridad compleja, de acuerdo a un patrón observado (Lockwood, 1979). De acuerdo a lo anterior, resulta de gran utilidad aplicar este enfoque al estudio del clima, que mucho más que una idea de condiciones atmosféricas promedios, o de un estado colectivo de regímenes atmosféricos predominantes en un lugar o región, es un sistema geofísico y geoquímico muy complejo; y para su comprensión se necesita no sólo conocer el comportamiento de la atmósfera, sino también el de la hidrósfera, criósfera, biósfera, y de las variaciones de la superficie de la litósfera. Además, en este sistema se debe tomar en cuenta el efecto de las actividades humanas sobre el mismo.

El sistema climático está constituido por seis subsistemas: la atmósfera, la hidrósfera, la criósfera, la litósfera, la biósfera y la antropósfera. Considerado en su totalidad, el sistema clima es un sistema cerrado; que no intercambia materia.

### **Subsistemas del Sistema Clima**

#### **a) La Atmósfera:**

Es la masa gaseosa que envuelve a la Tierra y que está estructurada en varias capas: tropósfera, estratósfera, mesósfera y termósfera (Fig 2.3). En cada una de estas capas la naturaleza de los procesos que tienen lugar, es diferente. También es diferente el comportamiento físico de las variables atmosféricas, esencialmente la temperatura. En cuanto a la composición, el aire es una mezcla de gases; algunas de las partículas en la atmósfera son átomos simples, como el argón y el helio, otras son moléculas constituidas por átomos del mismo elemento, como el oxígeno ( $O_2$ ), o de elementos diferentes, como el anhídrido carbónico o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) (Tabla 2.1).

La atmósfera es el subsistema más variable del Sistema Climático. Gran parte de los procesos atmosféricos ocurren en rangos de escala temporal, muy breves horas, días o semanas. En la atmósfera los siguientes procesos y variables son importantes, desde el punto de vista de los cambios de clima (Cubash y Cess, 1990):

- la transferencia turbulenta de calor, momento y humedad;

**Tabla 2.1: Composición del Aire Seco en la Baja Atmósfera**

GASES	[1]	[2]	[3]		[4]
			[a]	[b]	
Nitrógeno	28,01	78,084	1250	0,967	-147,2 (33,5)
Oxígeno	32,00	20,946	1429	1,105	-118,9 (49,7)
Argón	39,94	0,934	1786	1,379	-122,0 (48,7)
CO <sub>2</sub>	44,01	0,033	1977	1,529	31,0 (73,0)
Neon	20,18	1,8x10 <sup>-3</sup>	900	0,695	-228,0 (26,0)
Helio	4,00	5,2x10 <sup>-4</sup>	178	0,138	-258,0 ( 2,3)
CH <sub>4</sub>	16,04	2,2x10 <sup>-4</sup>	717	---	----
Kriptón	83,70	1,1x10 <sup>-4</sup>	3736	2,868	-63,0 (54,0)
NO	44,01	0,5x10 <sup>-4</sup>	1978	---	----
Hidrógeno	2,01	0,5x10 <sup>-4</sup>	90	0,070	-239,0 (12,8)
Xenón	131,3	0,09x10 <sup>-4</sup>	5891	4,524	16,6 (58,2)
Ozono	48,0	variable	2140	1,624	5,0 (92,3)
Aire seco	28,97	100	1293	1,000	-140,7 (37,2)

[1] Peso molecular

[2] Contenido % por volumen

[3] Densidad: [a] absoluta (g/m<sup>3</sup>); [b] relativa al aire seco

[4] Temperatura crítica, entre paréntesis presión en atm.

- el tipo de cobertura, que determina su albedo y el parámetro de rugosidad;

- la liberación de calor latente, particularmente importante en la región intertropical;

- la nubosidad;

- el calentamiento y enfriamiento radiativo de los gases atmosféricos (CO<sub>2</sub>, vapor de agua y O<sub>3</sub>, particularmente);

- los aerosoles: materia particulada de origen natural (polvo volcánico) o de origen antrópico; y

- los factores geográficos del clima: distribución de mares y continentes, cadenas de montañas, cuerpos de agua, etc.

#### **b) La Hidrósfera:**

Está constituida por toda el agua líquida de los mares y océanos, y de los cuerpos de agua y ríos sobre la superficie sólida de la Tierra. De estos componentes de la Hidrósfera, los mares y océanos juegan un papel muy importante dentro del Sistema Climático. Ellos cubren un área de 361x10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> (un 70.8% de la superficie terrestre), y constituyen un eficiente

sistema de intercambio de calor con la atmósfera, además de ser su principal fuente de vapor de agua.

Los procesos en los mares y océanos se desarrollan con rangos de escala temporales que van de semanas a meses en la capa superior de mayor actividad. Estos rangos de escalas aumentan a años y centenas de años en las capas inferiores, y de centenas a miles de años en las capas del océano profundo.

→ El acoplamiento océano-atmósfera es muy importante dentro del Sistema Climático. Debido a sus propiedades de fluidos (térmicas y dinámicas), los mares y océanos se distinguen de las superficies terrestres por sus características importantes como almacenadores de energía. Los intercambios de energía que ocurren en la interfase agua-aire, no obstante, son complicados debido a la variedad de procesos implicados. En otras palabras, la transferencia térmica en los mares y océanos no solamente ocurre mediante los procesos de radiación y conducción, sino también a través de la convección y advección. El régimen radiativo sobre un océano tropical se puede visualizar de la siguiente forma. Durante el día, la mayor parte de la energía absorbida es almacenada, lo cual resulta en un intercambio de calor sensible reducido, aunque el intercambio mediante el proceso de evaporación se acentúa a mediados de la tarde. En cambio, la energía almacenada durante el día constituye una fuente durante la noche sosteniendo un transporte de calor hacia la atmósfera (Holland, 1971, citado por Oke, 1987).

Ya que los mares y océanos son fluidos más densos que la atmósfera, presentan una estratificación vertical más pronunciada. Esta estructura vertical comprende (Cubash y Cess, 1990):

- una Capa Límite Estacional, que se mezcla anualmente, a partir de la superficie. Esta capa tiene menos de 100 m. de profundidad en los mares tropicales y varios cientos de metros en los mares sub-polares;

- una Capa de Agua Cálida, definida por la Termoclina Permanente, y que intercambia calor y gases a partir de la capa anterior; y

- Una Capa de Agua Fría, el océano profundo, que constituye un 80% del fondo oceánico.

Las respuestas climáticas de los océanos está controlada por diferentes procesos, que incluyen remolinos a pequeña escala ( $\approx$  50 km en dimensión), intercambios convectivos que permiten la transferencia de calor y de químicos disueltos, mecanismos de ventilación térmica, mecanismos biológicos de ciclaje del CO<sub>2</sub> (importante en el estrato superficial) y



circulaciones a gran escala asociados con las corrientes marinas.

El agua en los mares y océanos está en continuo movimiento. Las corrientes marinas juegan un papel importante en la formación y características del campo térmico de la atmósfera. A su vez estas corrientes marinas son causadas por la acción de los vientos, además de las diferencias de temperatura y salinidad dentro de las masas de agua, fuerzas de fricción superficiales e internas en los mares y modificadas por la fuerza de Coriolis.

Los cuerpos de agua de la litósfera: lagos y mares interiores, los ríos y aguas subterráneas son componentes esenciales del Ciclo Hidrológico, ejerciendo un papel muy importante en el Sistema Climático, pero a escala regional y local.

#### **c) La Criósfera:**

Hay un creciente interés en el papel que juega la Criósfera dentro del Sistema Climático. La Criósfera está constituida por las cubiertas de nieve estacional, el hielo en el mar, los grandes casquetes de hielo de Groenlandia y la Antártica y el Permafrost. Los componentes de la Criósfera cubren una buena parte de la superficie terrestre. Durante el invierno (desde diciembre hasta marzo) casi una cuarta parte del Hemisferio Norte queda cubierta por nieves estacionales y hielo marino (Barry, 1987). Las cubiertas de nieve estacional responden en escalas temporales cortas (días) a cambios atmosféricos. Su importancia radica en el cambio del albedo de la superficie de nieve con el tiempo, lo que afecta su balance de calor.

Los límites del hielo marino, su concentración y espesor, juegan un papel importante en el desacoplamiento entre la atmósfera y el océano. Los mantos y casquetes de hielo, como el de Groenlandia y la Antártica almacenan enormes cantidades de agua. El nivel del mar ascendería 70 m. si toda el agua almacenada en el manto de hielo de la Antártica fuese derretida (Barry, 1987). Los glaciares altitudinales, en general parecen haber retrocedido dramáticamente en los últimos 50 años. La dinámica de los principales glaciares en el mundo, ha sido objeto de estudio en relación a variabilidad y cambios del clima. Finalmente, el Permafrost, que consiste en la condición de un subsuelo permanentemente congelado, afecta muy seriamente los ecosistemas terrestres (biósfera) y el régimen hídrico de los lugares donde ocurre.

#### **d) La Biósfera:**

La Biósfera es la capa de la superficie terrestre, que

incluye parte de la atmósfera y la totalidad de la hidrósfera, donde exista vida, en cualquiera de sus formas. La biósfera tanto marina como continental, juega un importante papel en el ciclo global del CO<sub>2</sub> y otros gases invernaderos (como el metano, CH<sub>4</sub>) en el Sistema Climático. Los ciclos anuales del CO<sub>2</sub> atmosférico están regulados por el balance entre los procesos de fotosíntesis y respiración. En los mares y océanos, se encuentran grandes cantidades de compuestos de carbono inorgánico y orgánico.

Los ecosistemas marinos desempeñan un papel importante en los procesos de flujo de carbono (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) de la atmósfera hacia el océano. Este flujo entre la atmósfera y los océanos es cuantitativamente muy importante, y es un sistema de equilibrio químico bastante complejo en el que interviene el CO<sub>2</sub> atmosférico y el disuelto en el agua (Sarmiento, 1984). Entre la atmósfera y la biósfera continental, la transferencia de CO<sub>2</sub> más importante es por medio de la fotosíntesis, acumulándose el carbono como materia orgánica en la biomasa vegetal, para ser restituido a la atmósfera a través de la respiración y la descomposición de necromasa (Sarmiento, 1984).

**e) La Geósfera:**

La porción de la Tierra, presenta en su superficie una serie de procesos que afectan el ciclo hidrológico. Desde el punto de vista fisiográfico, la superficie terrestre presenta conjuntos y patrones de formas de relieve de diversa complejidad, distribuidos irregularmente en los distintos continentes (Tabla 2.2).

**Tabla 2.2: Porcentajes de Superficie de los Principales Tipos de Relieve (Tomado de Trewartha, et. al. 1961)**

Tipo de Relieve	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Llanuras	37	47	32	45	55	0	36
Mesetas	6	14	3	5	1	0	5
Colinas	24	15	21	33	31	0	21
Montañas	25	24	44	17	13	0	27
Hielo	8	0	0	0	0	100	11
% del total mundial	16	12	36	20	6	10	100

[1] América del Norte      [5] Australia y Nueva Zelanda  
 [2] América del Sur      [6] Antártica  
 [3] Eurasia                  [7] Total en el Mundo  
 [4] Africa

Estos conjuntos y patrones fisiográficos interactúan con los diversos procesos atmosféricos, controlándolos o modificándolos, y generando complicaciones en el comportamiento climático. El suelo interactúa con la atmósfera mediante el intercambio de gases, aerosoles, humedad y energía. Estos procesos, por supuesto, van a estar condicionados por la cobertura vegetal.

### **2.3. CAMBIOS CLIMATICOS: CAMBIOS PASADOS EN EL CLIMA GLOBAL**

La evolución del clima de la Tierra constituye el aspecto más interesante de la investigación climatológica; pero a su vez, es el más complicado y lleno de incertidumbres. El clima terrestre ha variado desde el inicio de la formación de la atmósfera terrestre, y no hay duda de que continuará cambiando en el futuro.

Reconstruir los patrones atmosféricos -como la circulación de la atmósfera- de los períodos geológicos con climas cálidos, es más difícil que reconstruir los correspondientes a tiempos glaciales. Para ello los investigadores han sugerido, como métodos, el estudio y observación de las atmósferas de otros planetas y la realización de experimentos hidrodinámicos de laboratorio y, más recientemente, simulaciones con modelos climáticos.

En el primer caso, los trabajos de Kuiper y colaboradores (en la Universidad de Chicago) en la década de 1940, y los de Kaplan en la década de 1960, han sido clásicos. Recientemente, este tipo de investigaciones ha contado con el valioso aporte de información proveniente de sondas interplanetarias y el desarrollo de mejor instrumentación para observaciones astronómicas. Nuevas ideas han surgido con respecto a la circulación atmosférica y su relación con la velocidad angular, distancia al Sol, composición de la atmósfera y otras variables.

#### **a) Cambios Climáticos Ocurridos en Tiempos Geológicos**

En relación a los cambios climáticos ocurridos en tiempos geológicos, restringiendo nuestra atención a los últimos 250 millones de años de la historia de la Tierra, y siguiendo de cerca la interesante discusión planteada en el Reporte Especial US/USSR sobre Clima y Cambios Climáticos (MacCracken, Hecht, Budyko & Izrael, eds., 1990), encontramos los siguientes aspectos relevantes:

i) Hace 250 millones de años el flujo de radiación solar pudo haber sido 1% menor que el actual, incrementándose en forma lineal hasta su valor actual.

ii) Importantes cambios han ocurrido en la litósfera:

distribución de mares y continentes, cambios en la geometría de los océanos y cambios en las características de los accidentes orográficos de la superficie terrestre. Estos cambios han influenciado los patrones de distribución de presión, vientos, temperatura y precipitación, y de otros elementos del Sistema Climático, como corrientes marinas.

iii) Durante la Era Cenozoica, que empezó hace 63 a 67 millones de años y que comprende los Periodos Terciario y Cuaternario, el clima global posiblemente experimentó una tendencia de enfriamiento, acompañada de un aumento en el albedo planetario, a medida que cambiaba la relación entre tierras emergidas y superficies de agua. Este cambio parece haber estado acompañado con una fuerte disminución de la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico. Se pasó, entonces, de un clima cálido y húmedo, que prevaleció en la primera mitad del Terciario, incluyendo la mayor parte del Mioceno, a condiciones de enfriamiento, que se intensificaron particularmente en el Plioceno y que se generalizaron en el Cuaternario, con la formación periódica de vastos mantos de hielo, sucesión de épocas glaciales e interglaciales (estas últimas aún más cálidas que las condiciones climáticas actuales), y una clara diferenciación de zonas climáticas. Las fuertes fluctuaciones climáticas que caracterizaron la Epoca del Pleistoceno, empezaron hace 2 a 3 millones de años.

A pesar de las hipótesis que se han formulado acerca de las relaciones entre la temperatura y la composición de la atmósfera (concentraciones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y aerosoles), es sólo para el lapso de los últimos 160.000 años, que se ha podido determinar, con mayor precisión, la relación entre la temperatura local y la composición atmosférica. (Barnola, J. M. D. et al., 1987).

Estas relaciones entre temperatura y composición de la atmósfera, en el pasado geológico de la Tierra, han mostrado una significativa asociación entre estas variables durante los periodos de calentamiento. No obstante, no ha sucedido lo mismo durante los intervalos glaciales. Tampoco hay una clara explicación acerca de los rápidos cambios en la concentración de CO<sub>2</sub>, entre los periodos glaciales e interglaciales. (MacCracken, et al. eds., 1990).

Particular atención se ha dado a tres intervalos geológicos, relativamente cálidos, del pasado que, en opinión de Budyko (Budyko, 1990), se podrían tomar como analogías en relación a prospectos de futuro calentamiento global. Estos intervalos son el Holoceno Medio, el intervalo Interglacial Eemian y el Optimo del Plioceno.

a) El Holoceno Medio, de hace 6.000 a 5.000 años: Las estimaciones paleoclimáticas para este intervalo, son

relativamente buenas. Las reconstrucciones de la precipitación anual indican cambios complicados en los patrones regionales. Los cambios en la distribución pluviométrica fueron, aparentemente, más variados que los ocurridos en periodos geológicos previos, en los que hubo mayores incrementos de temperatura. Estas variaciones han podido ser causadas por cambios en la distribución del balance energético causados, a su vez, por posibles variaciones en los parámetros orbitales de la Tierra. Durante este óptimo climático, el aumento estimado de la temperatura en el Hemisferio Norte fue de aproximadamente 1 °C. (MacCracken, et al., 1990). Para las regiones tropicales y subtropicales ocurrieron, durante este periodo, significativos aumentos en la precipitación.

b) El Intervalo Interglacial Eemian, cuya ocurrencia se centra hacia hace 125.000 años: La reconstrucción del clima interglacial del Eemian muestra dos aspectos importantes: fue muy húmedo y cálido en el Hemisferio Norte, y el clima terrestre estuvo caracterizado por una cierta homogeneidad en la distribución latitudinal de temperatura y precipitación. (MacCracken, et al., eds., 1990).

c) El Intervalo Optimo del Plioceno, de hace 4.3 a 3.3 millones de años: Las estimaciones de las paleotemperaturas continentales y oceánicas están en el orden de  $\pm 1.5$  a  $2.0$  °C, con respecto a los valores modernos (Valores de referencia del Siglo XIX). Se ha estimado que en dicho intervalo las diferencias térmicas más grandes ocurrieron en las altas latitudes del Hemisferio Norte. En general, el calentamiento superficial llegó a ser de alrededor  $4.0$  °C, con respecto al valor de referencia moderno. Con respecto a la precipitación, se ha estimado que las latitudes altas y subtropicales experimentaron aumentos de  $300$  mm/año, mientras en las latitudes medias fue del orden de  $100$  a  $150$  mm/año.

Las reconstrucciones climáticas de este intervalo también han sugerido que las condiciones de precipitación y humedad fueron favorables en Asia Central, el Levante Medio y el Sahara, regiones que hoy en día son fundamentalmente desérticas. (MacCracken, et al., eds., 1990).

Para el Intervalo Optimo del Plioceno Budyko, et al. (1985), ha estimado que la concentración de CO<sub>2</sub> fue alrededor de  $600$  ppmv., mientras que para los otros óptimos climáticos, las estimaciones están entre  $270$  y  $300$  ppmv. (Lorius, et al.; tabla 2.3).

Tabla 2.3: Intervalos Cálidos en los  
Ultimos 4 Millones de Años

Intervalo	Aumento estimado de temperatura del aire (°C) en el Hemisferio Norte con respecto al valor moderno	Concentración estimada de CO2 (ppmv)
Optimo del Holoceno	1	270 a 280
Interglacial del Eemian	2	280 a 300
Optimo Climático del Plioceno	3 a 4	550 a 600

Fuente: MacCracken, et al., eds., 1990.

Como señalan los autores del Reporte Especial US/USSR sobre Clima y Cambio Climático, el estudio de las reconstrucciones paleoclimáticas de la Tierra sugiere que el clima parece haber sido muy sensitivo a los cambios en la concentración de CO2 atmosférico, y a otras causas, como cambios en los parámetros orbitales de la Tierra, cambios en las características de la litósfera (variaciones en la geografía, orografía, geometría de los océanos), etc.

Del análisis de los tres óptimos climáticos, antes discutidos, se puede inferir que durante los lapsos de calentamiento global, han sido las latitudes altas las que han experimentado los mayores incrementos térmicos. Sin embargo, en este mismo trabajo (MacCracken, et al., eds, 1990), se hace énfasis en la necesidad de llevar adelante más investigaciones para mejorar los modelos de simulación climática y refinar y reconfirmar las reconstrucciones paleoclimáticas.

### 2.3. BALANCE ENERGETICO GLOBAL Y EFECTO INVERNADERO

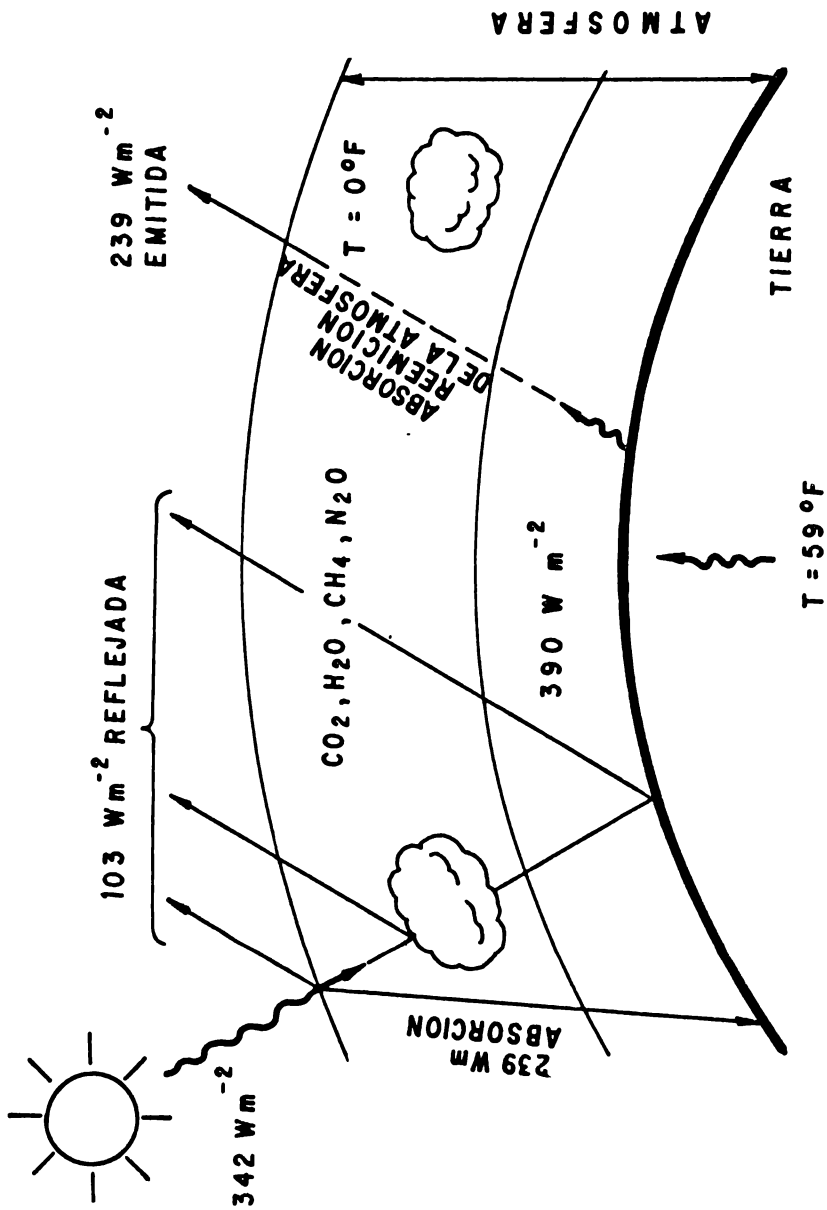
El Efecto Invernadero ha causado reacciones en la comunidad científica debido a su carácter global y a los posibles impactos regionales (Dickinson y Cicerone 1986; Patrusky 1988; Schneider 1989; Davies 1989; IGBP 1990). Se entiende por Efecto Invernadero, aquel proceso por el cual la radiación de onda larga (o infraroja) emitida por la superficie del planeta es absorbida en la atmósfera y, posteriormente, re-radiada en parte hacia la superficie terrestre por nubes y partículas atmosféricas. Su nombre proviene de los conocidos invernaderos en los cuales la luz

solar penetra libremente pero el calor producido en su interior es atrapado, permitiendo de esta forma las condiciones favorables para el crecimiento artificial de plantas. Cabe resaltar que la analogía, y así el uso del término "Efecto Invernadero", entre el sistema atmósfera-tierra y los invernaderos artificiales se basa en el proceso de atrapamiento, de la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre en el primer caso; o el calor producido y las parcelas de aire que ascienden por medio del proceso de convección libre en el segundo caso.

De la misma forma, el planeta "Tierra" debe su hospitalidad climática a el Efecto Invernadero. Visto desde el espacio, el planeta emite energía a ciertas ondas e intensidades que son características de un cuerpo a la temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ , pero la temperatura promedio en la superficie del planeta es aproximadamente  $33$  grados más cálida (Schneider 1989). Sin embargo, los cambios actuales en la composición química de la atmósfera, en gran parte debido a la emisión antropogénica de los gases tipo invernadero (Graedel y Crutzen 1989) amenazan con intensificar el Efecto Invernadero, con el resultado del rápido calentamiento global del planeta (Dickinson y Cicerone 1986). Según Dickinson y Cicerone (1986), si el incremento en las emisiones antropogénicas continúa en forma acelerada hasta el próximo siglo, la temperatura global de la superficie es probable que pueda aumentar a valores tan altos, sin precedentes en los últimos  $10$  millones de años. El balance radiativo del sistema tierra-atmósfera se muestra en la Fig. 2.4, en donde se puede visualizar cómo se produce el Efecto Invernadero.

Es importante resaltar las características de los gases tipo invernadero y la función que desempeñan en el balance radiativo. Estos gases son prácticamente transparentes a la radiación solar (o radiación de onda corta), permitiendo así su libre paso hacia la superficie terrestre resultando en su calentamiento, lo cual lleva a la emisión de radiación térmica (o radiación de onda larga) por la superficie en la dirección opuesta. Sin embargo, tanto estos gases como también el vapor de agua no son transparentes al escape de radiación térmica; en cambio, ellos son buenos elementos absorbentes de las ondas emitidas por la superficie, lo cual resulta -consecuentemente- que parte de la radiación térmica es reemitida hacia la superficie causando su recalentamiento. Como es de notar, el crecimiento en las concentraciones de los gases tipo invernadero llevaría a un incremento del Efecto Invernadero, lo cual producirá, posiblemente, un desbalance en el flujo de energía en el sistema tierra-atmósfera.

Aunque existe un amplio consenso entre los científicos



**Fig 2-4 BALANCE GLOBAL DE ENERGIA Y EL EFECTO DE INVERNADERO**  
 FUENTE: FORD COMPANY; 1988.



atmosféricos acerca del calentamiento potencial debido al aumento del Efecto Invernadero, hay muchas controversias acerca de los posibles impactos predecidos y los procesos de feedback dentro del sistema tierra-atmósfera. Por ejemplo, no se conoce la magnitud exacta del calentamiento predecido debido a los pocos conocimientos asociados con los feedbacks tales como las propiedades radiativas de las nubes y la inercia térmica de los océanos, los cuales pudieran reducir el incremento del calentamiento global pronosticado (Mitchell 1988).

El rápido crecimiento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, desde 280 y 0.7 ppmv, antes de la Revolución Industrial a cifras actuales de 345 y 1.7 ppmv, y los incrementos anuales de 0.5% y 1%; respectivamente, indican que estos gases son los mayores contribuyentes al Efecto Invernadero (Rosenberg et. al. 1983; Patrusky 1988; Schneider 1989; Ashmore 1990). Sin embargo, debido a la mayor concentración de CO<sub>2</sub> y a sus propiedades de absorbente de la radiación térmica, es probable que el CO<sub>2</sub> tenga -actualmente- mayores efectos inductivos sobre el Efecto Invernadero; aunque debido al más rápido incremento en las concentraciones de los otros gases, se estima que el efecto combinado de estos gases podrá igualar o sobrepasar al del CO<sub>2</sub> (Patrusky 1988). Según las proporciones actuales en las emisiones de gases antropogénicos, se estima que para el año 2025, las concentraciones de CO<sub>2</sub> duplicarán a las estimadas para el período de la Revolución Industrial (Schneider 1989).

El inminente calentamiento global es serio, como ha sido observado recientemente. Según informes realizados por expertos del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS de la NASA), el año de 1990 se registró como el más caliente en los últimos 50 años; de la misma forma, la década de los años ochenta se consideró como la más cálida en los registros de temperatura.

Probablemente, un cambio climático está ocurriendo debido en gran parte al Efecto Invernadero y su acción en el balance radiativo del sistema atmósfera-tierra. Sin embargo, otros factores también se pueden sumar al cambio climático, como por ejemplo, variaciones en la cantidad de energía emitida por el sol o variación en la órbita del planeta, cambios en la composición atmosférica debido a erupciones volcánicas, cambios en el régimen térmico de los océanos, o variaciones impredecibles (Dickinson 1986). Indudablemente, es necesario una mayor comprensión de los mecanismos que rigen o controlan el clima, como también una historia detallada de su evolución, para así poder evaluar con cierta precisión las posibles causas y efectos de los cambios climáticos.

## **2.4. ESCENARIOS DE CAMBIOS CLIMATICOS PARA VENEZUELA (CONCENTRACION DE 2 x CO<sub>2</sub>)**

### **2.4.1. Procedimientos para la Generación de los Escenarios de Cambios Climáticos**

#### **a) Procedimiento para la Evaluación de la Simulación del Clima Actual por los Modelos GCMs**

La evaluación de cuatro modelos GCMs para Venezuela se hizo de acuerdo a los pasos propuestos en el esquema metodológico de la figura 2.5, que se refiere a cambios climáticos que podrían derivarse de una doble concentración de CO<sub>2</sub>, en la atmósfera terrestre.

Para este análisis se trabajó en base a las salidas gráficas de los modelos de "Oregon State University" (OSU), "Geophysical Fluid Dynamics Laboratory" (GFDL), "Goddard Institute for Space Studies" (GISS) y "United Kingdom Meteorological Office" (UKMO).

La figura 2.6 muestra los mapas de cada uno de los modelos con sus respectivos cuadrados de grilla superpuestos sobre el mapa del territorio de Venezuela. Los datos disponibles (en cinta) para estos modelos incluyen una corrida de control que debería simular el clima actual (1 x CO<sub>2</sub>), sobre un valor base (Robock, 1989).

Para evaluar el grado de aproximación de los GCMs, arriba indicados, en simular el clima observado y siguiendo el esquema planteado en la figura 2.5, se siguieron los pasos siguientes:

1) Se dividió el país en celdas geográficas de 1° latitud x 1° longitud (fig. 2.7). Las dimensiones aproximadas de estas celdas es de 110.58 Km x 110.72 Km, para un área de 12.243 Km<sup>2</sup> (tabla 2.4).

2) Se seleccionaron nueve de estas celdas, tres de la Faja Norte Costera, cuatro en la región de Los Llanos y dos en la región meridional del país.

3) A partir del Atlas Climatológico de Venezuela (Ministerio de la Defensa: FAV, 1984), se obtuvo para cada una de las celdas las medias pluviométricas, espacialmente ponderadas, para cada mes. Estos valores fueron considerados como valores observados representativos de cada celda (tabla 2.5).

4) Se procedió a comparar los valores de la tabla 2.5 con los valores de precipitación, estimados a partir de las salidas cartográficas de los modelos OSU, GFDL, GISS y

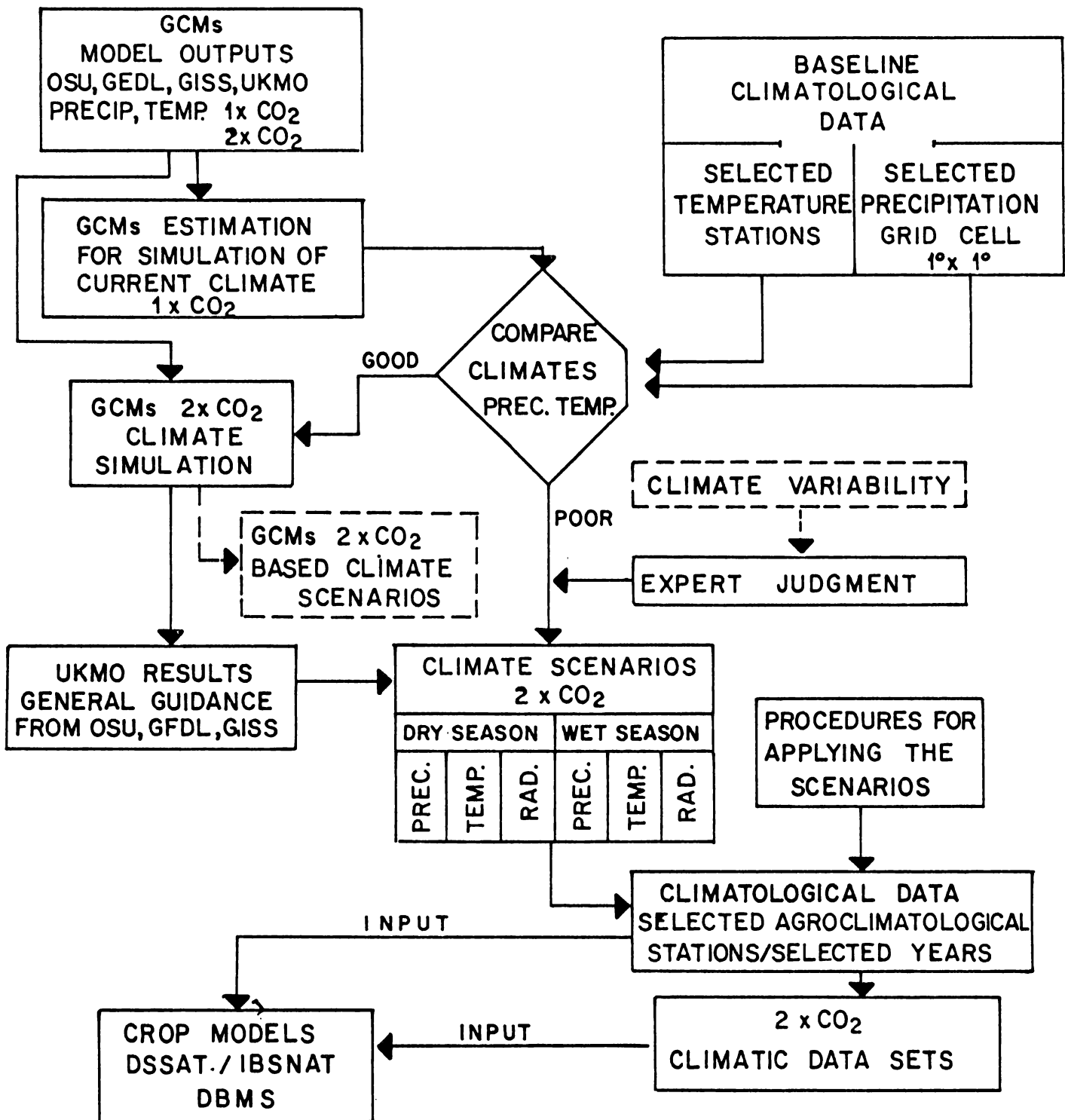


FIG. 2.5 ESQUEMA METODOLOGICO PARA LA EVALUACION DE LOS MODELOS GCMs Y LA GENERACION DE LOS ESCENARIOS CLIMATICOS PARA VENEZUELA

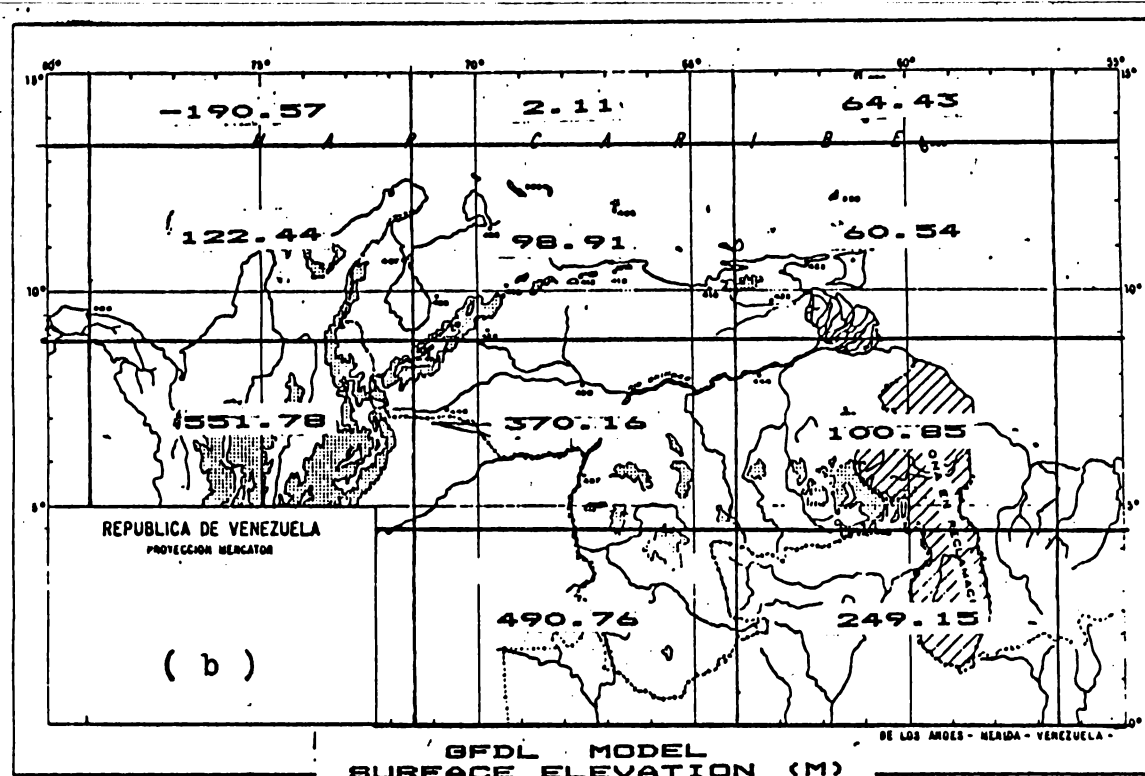
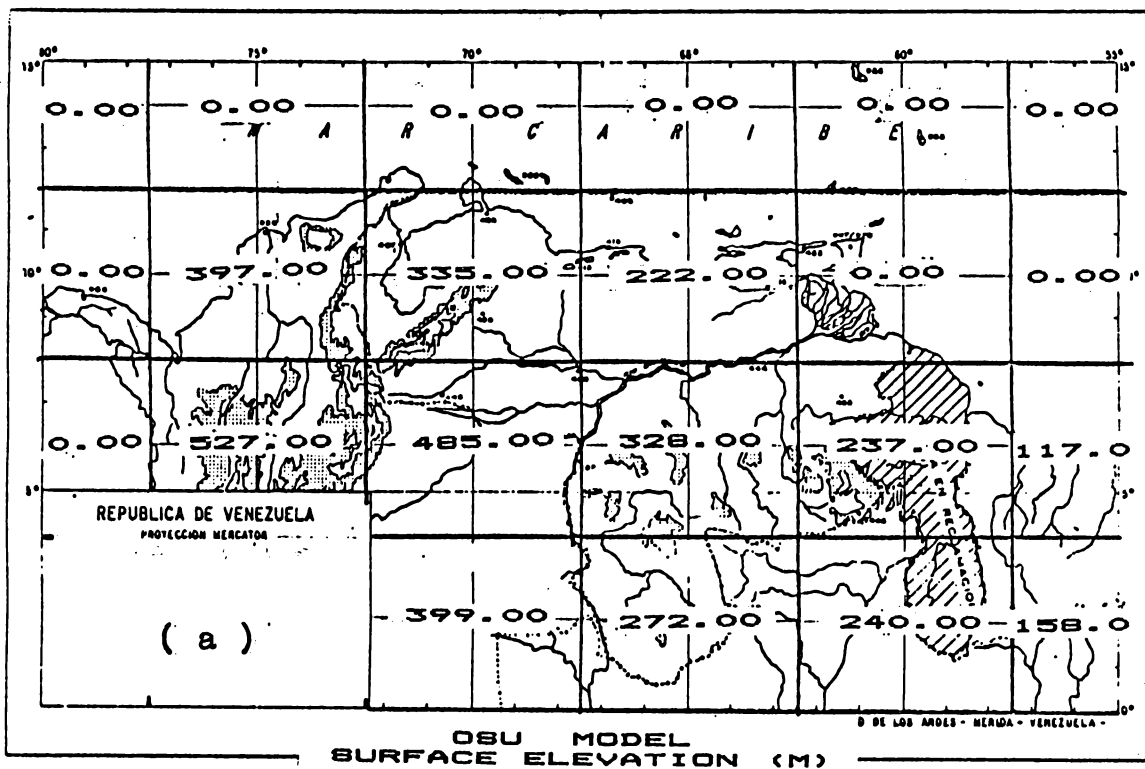
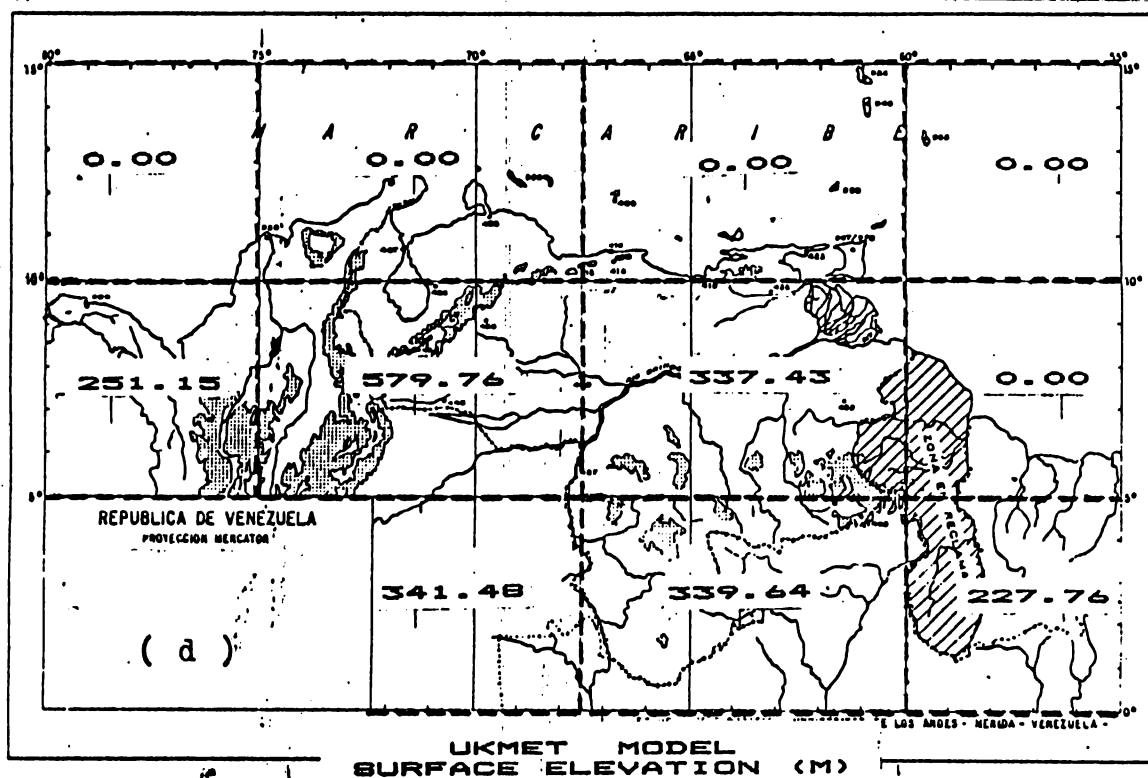
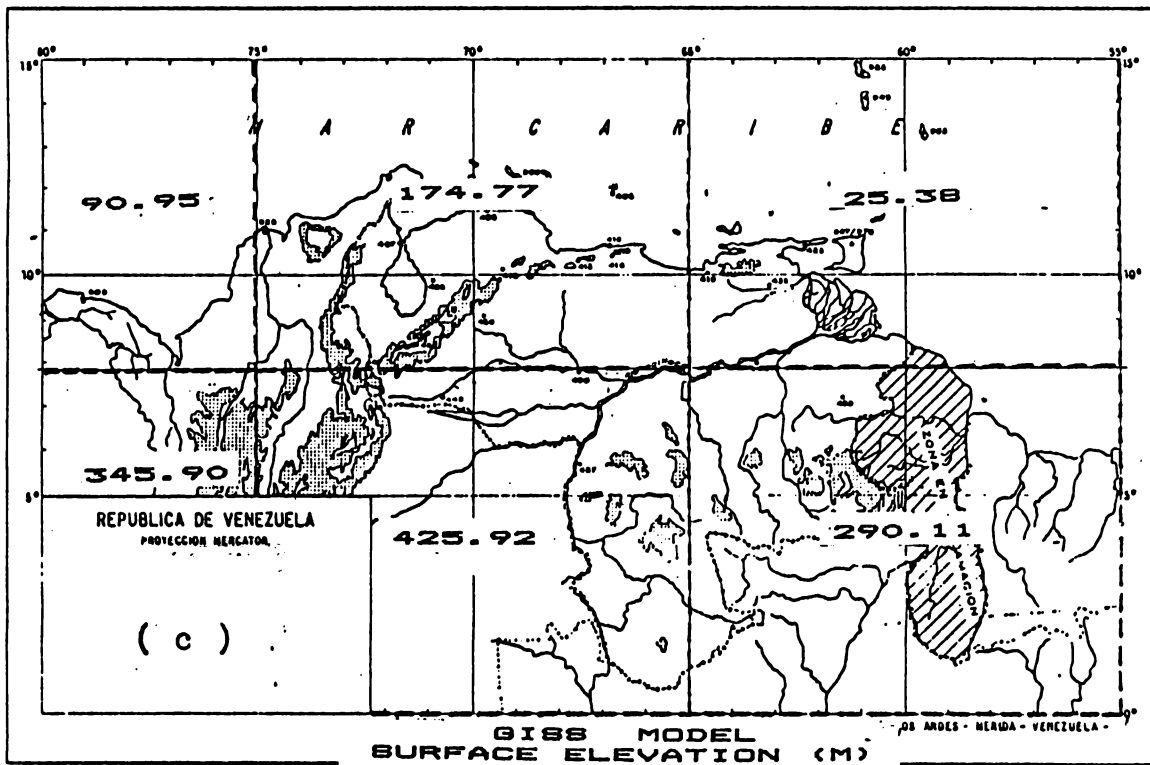


FIG. 2.6 CUADROS DE GRILLA CORRESPONDIENTES A LOS MODELOS GCMs SOBRE EL TERRITORIO DE VENEZUELA. (a) OSU, (b) GFDL, (c) GISS Y (d) UKMO



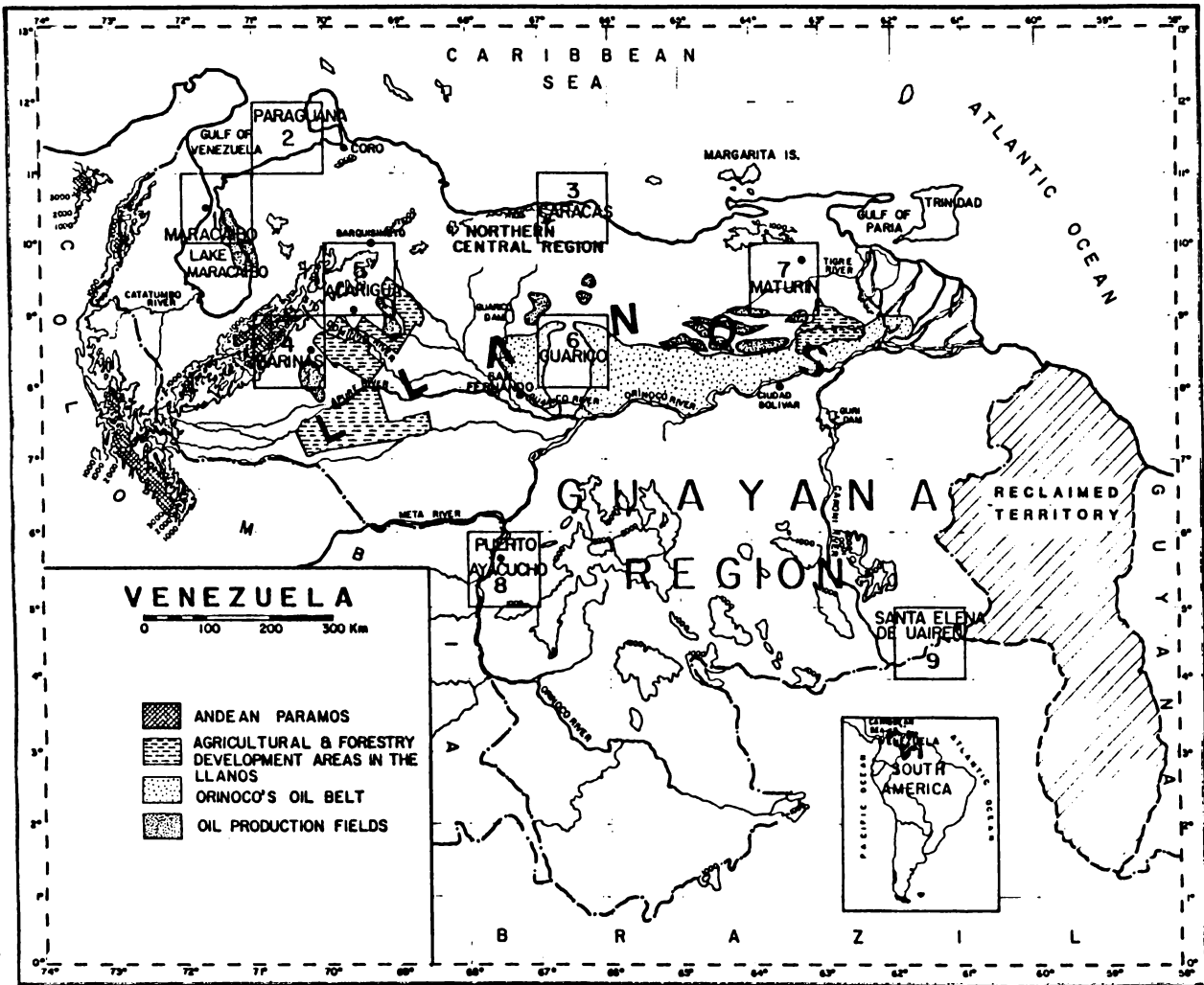


FIG. 2.7 AREAS GEOGRAFICAS SELECCIONADAS PARA LA EVALUACION DE LOS GCMs PARA VENEZUELA

Tabla 2.4. DIMENSIONES Y AREA APROXIMADA (6° N) DE LOS CUADROS DE GRILLA DE LOS MODELOS OSU, GFDL, GISS Y UKMO

MODELO	DIMENSIONES DEL CUADRADO DE GRILLA (LATITUD x LONGITUD)	AREA DEL CUADRADO DE GRILLA (Km <sup>2</sup> )	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
OSU	4° x 5°	244.865	Schlesinger et al., 1985
GFDL	4.44° x 7.5°	407.691	Manabe & Stouffer, 1980
GISS	7.83° x 10°	958.626	Hansen et al., 1983
UKMO	5° x 7.5°	459.116	

Tabla 2.5 PRECIPITACION OBSERVADA-ESTIMADA PARA CADA AREA GEOGRAFICA

CELDA GEOGRAFICA	ENE	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT
N <sub>o</sub> NOMBRE								
1. MARACAIBO	5.7	40.0	90.0	75.0	60.0	90.0	70.0	125.0
2. PARAGUANA	15.0	15.0	30.0	15.0	20.0	30.0	45.0	30.0
3. CARACAS	90.0	65.0	110.0	200.0	215.0	175.0	130.0	135.0
4. BARINAS	20.0	150.0	240.0	300.0	300.0	275.0	200.0	215.0
5. ACARIGUA	20.0	100.0	200.0	250.0	260.0	220.0	145.0	170.0
6. GUARICO	1.0	50.0	160.0	250.0	280.0	250.0	175.0	95.0
7. MATURIN	35.0	25.0	70.0	150.0	190.0	200.0	110.0	95.0
8. P. AYACUCHO	50.0	140.0	220.0	400.0	400.0	320.0	275.0	175.0
9. STA. ELENA	90.0	210.0	250.0	310.0	310.0	270.0	190.0	175.0

UKMO (tabla 2.6).

5) En el caso de la temperatura, se seleccionó para una celda una estación meteorológica de primer orden (tabla 2.7) y se utilizaron los valores mensuales medios de temperatura para enero, abril, julio y octubre; ya que la variación estacional de la temperatura es muy pequeña en estas latitudes. Estos valores, corregidos altitudinalmente de acuerdo a la altitud del punto de referencia de cada modelo, fueron comparados con los modelos simulados por los modelos para el clima actual ( $1 \times \text{CO}_2$ ).

## **b) Análisis de los Resultados de la Evaluación**

### **Precipitación**

Los valores de precipitación simulados para  $1 \times \text{CO}_2$ , para cada uno de los meses considerados (tabla 2.6), permiten establecer lo siguiente:

i) En aquellas regiones de clima seco, las cantidades observadas de precipitación son simuladas, con cierta aproximación, por los modelos OSU y GISS, mientras que el régimen pluviométrico es aproximado al simulado por el modelo GFDL.

ii) Para la extensa región de los Llanos, donde ocurre una pronunciada variación estacional de la precipitación, el modelo UKMO es el que mejor simula la cantidad de precipitación, y este modelo junto con el OSU son los más próximos en simular el régimen pluviométrico.

iii) En la región al sur del río Orinoco, la que se encuentra afectada por la faja ecuatorial lluviosa, tanto la cantidad como el régimen pluviométrico son simulados con cierta aproximación, por el modelo UKMO.

Un análisis de verificación de modelos GCMs para una región, debe también incluir una comparación entre la variabilidad climática observada y la simulada, con respecto a la escala temporal anual y estacional (Jung E Bach, 1985). En el caso de Venezuela, si dividimos el país en dos grandes regiones, separadas por el meridiano  $70^\circ \text{ W}$  (Barry et al., 1990), el modelo GCM que mejor simula la climatología de la precipitación en Venezuela, debe mostrar una tendencia del patrón pluviométrico bimodal que se observa al oeste del meridiano  $70^\circ \text{ W}$  y al sur de los  $15^\circ \text{ N}$ , y otra tendencia hacia el patrón pluviométrico con un solo máximo (junio-julio-agosto) que se observa al este de  $70^\circ \text{ W}$ . En general, para la región semiárida ubicada al noroeste de Venezuela, el modelo GFDL tiende a mostrar el régimen bimodal



TABLA 2.6 COMPARACION ENTRE LA PRECIPITACION SIMULADA POR LOS MODELOS (1 X CO2) Y LA ESTIMADA PARA CADA AREA GEOGRAFICA

( a )

(a) Modelo OSU; (b) Modelo GFDL; (c) Modelo GISS y (d) Modelo UKMO

PRECIPITACION ESTIMADA MODELO OSU - OBSERVADA

Celda	ENERO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPT.		OCTUBRE			
	OSU	OBS	DIF	OSU	OBS	DIF	OSU	OBS	DIF	OSU	OBS	DIF	OSU	OBS	DIF	OSU	OBS	DIF
1	46	7,5	38,5	42,7	90	-47,3	42,7	75	-32,3	67,1	60	7,1	51,8	90	-38,2	54,9	70	-15,1
2	54	15	39	53,4	30	15,6	48,8	15	33,8	76,2	20	56,2	64	30	34	73,2	45	28,2
3	46	90	-44	41,1	65	-23,9	53,4	200	-146,6	79,3	215	-135,7	61	175	-114	64	130	-66
4	30,5	20	10,5	38,1	150	-111,9	45,7	300	-251,2	56,4	300	-243,6	39,6	275	-235,4	42,7	200	-157,3
5	36,6	20	16,6	40	100	-60	42,7	200	-157,3	61	260	-199	45,8	220	-174,2	51,8	145	-93,2
6	30,5	1	29,5	38,1	50	-11,9	45,7	160	-114,3	68,6	280	-211,4	58	250	-192	54,9	175	-120,1
7	53,4	35	18,4	38,1	25	13,1	45,7	70	-24,3	91,5	190	-98,5	67,1	200	-132,9	76,2	110	-33,8
8	24,4	50	-25,6	54,9	140	-85,1	76,2	400	-323,8	67,1	400	-332,9	67,1	320	-252,9	61	275	-214
9	24,4	90	-65,6	42,7	210	-167,3	61	250	-189	73,2	310	-230,7	103,7	270	-166,3	106,8	190	-83,2

( b )

PRECIPITACION ESTIMADA MODELO GFDL - OBSERVADA

Celda	ENERO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPT.		OCTUBRE			
	GFDL	OBS	DIF	GFDL	OBS	DIF	GFDL	OBS	DIF	GFDL	OBS	DIF	GFDL	OBS	DIF	GFDL	OBS	DIF
1	68,6	7,5	61,1	53,4	40	13,4	106,6	90	16,6	122	75	47	106,6	60	46,8	67,1	90	-22,9
2	68,6	15	53,6	45,6	15	30,6	91,5	30	61,5	119	15	104	109,8	20	89,8	64	30	34
3	79,3	90	-10,7	68,6	65	3,6	122	110	12	137,2	200	-62,8	137,2	215	-77,8	97,6	175	-77,4
4	79,3	20	59,3	88,4	150	-61,6	158,6	240	-81,4	149,4	300	-150,6	137,2	300	-162,8	106,8	275	-168,2
5	76,2	20	56,2	73,2	100	-26,8	137,2	200	-62,8	134,2	250	-115,8	129,6	260	-130,4	94,6	220	-125,4
6	88,4	1	87,4	79,3	50	29,3	155,6	160	-4,4	140,3	250	-109,7	144,8	280	-135,2	112,8	250	-137,2
7	76,2	35	41,2	83,9	25	58,9	149,4	70	79,4	152,5	150	2,5	160,1	190	-29,9	125	200	-75
8	106,8	50	56,8	122	140	-18	186	220	-34	146,4	400	-253,6	176,9	400	-223,1	140,3	320	-179,7
9	125	90	35	129,6	210	-80,4	199,2	250	-51,8	161,6	325	-163,4	183	310	-127	128,1	270	-141,9

( c )

PRECIPITACION ESTIMADA MODELO GISS - OBSERVADA

Celda	ENERO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPT.		OCTUBRE									
	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF	GISS OBS	DIF								
1	58	7,5	61	40	21	39,6	90	-50,4	42,7	75	-32,3	42,7	60	-17,3	39,6	90	-50,4	61	70	-9	80,8	125	-44,2	
2	51,8	15	36,8	15	41,4	25,9	30	-4,1	30,5	15	15,5	25,9	20	5,9	30,5	30	0,5	54,9	45	9,9	74,7	30	44,7	
3	94,6	90	4,6	65	14,3	61	110	-49	61	200	-139	58	215	-157	67,1	175	-107,9	96,9	130	-43,1	98,2	135	-36,8	
4	91,5	20	71,5	122	150	-28	97,6	240	-142,4	82,4	300	-217,6	91,5	300	-208,5	91,5	275	-183,5	122	200	-78	137,2	215	-77,8
5	76,2	20	56,2	85,4	100	-14,6	61	200	-139	56,4	250	-193,6	58	260	-202	61	220	-159	87,8	145	-57,2	109,2	170	-60,8
6	112,8	1	111,8	106,8	50	55,8	82,4	160	-77,6	64	250	-186	71,7	280	-208,3	82,3	250	-167,7	115,9	175	-59,1	141,8	95	46,8
7	161,6	35	126,6	125	25	100	122	70	52	100,6	150	-49,4	86,9	190	-103,1	112,8	200	-87,2	125	110	15	137,2	95	42,2
8	170,8	50	120,8	193,7	140	53,7	161,6	220	-58,4	129	400	-271	152,5	400	-247,5	167,8	320	-152,2	213,5	275	-61,5	225,7	175	50,7
9	192,2	90	102,2	154	210	-56	124,4	250	-125,6	61	325	-264	76,2	310	-233,8	105,2	270	-164,8	175,4	190	-14,6	228,8	175	53,8

( d )

PRECIPITACION ESTIMADA MODELO UKMET - OBSERVADA

Celda	ENERO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPT.		OCTUBRE									
	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF	UKMET OBS	DIF								
1	51,8	7,5	44,3	122	40	82	259,2	90	169,2	259,2	75	184,2	228,8	60	166,8	228,8	90	138,8	143,4	70	73,4	198,2	125	73,2
2	48,8	15	33,8	97,6	15	82,6	198,2	30	168,2	183	15	166	167,8	20	147,8	198,2	30	168,2	109,8	45	64,8	173,8	30	143,8
3	56,4	90	-33,6	73,2	65	8,2	195,2	110	85,2	213,5	200	13,5	259,2	215	44,2	225,7	175	50,7	106,8	130	-23,2	198,2	135	63,2
4	29	20	9	143,4	150	-4,6	366	240	126	350,8	300	50,8	335,5	300	35,5	283,6	275	8,6	199,2	200	-1,8	237,9	215	22,9
5	35,1	20	15,1	115,9	100	15,9	283,6	200	83,6	298,9	250	48,9	274,5	260	14,5	253,2	220	33,2	158,6	145	13,6	210,4	170	40,4
6	47,3	1	46,3	91,5	50	41,5	236,2	160	96,2	280,6	250	30,6	314,1	280	34,1	250,1	250	0,1	161,6	175	-13,4	222,6	95	127,6
7	67,1	35	32,1	61	25	36	173,9	70	103,9	224,2	150	74,2	311,1	190	121,1	222,6	200	22,6	103,7	110	-6,3	204,3	95	109,3
8	33,6	50	-16,4	213,5	140	73,5	402,6	220	182,6	381,2	400	-18,8	302	400	-96	244	320	-76	253,2	275	-21,8	283,6	175	108,6
9	64	90	-26	204,4	210	-5,6	320,2	250	70,2	305	325	-20	256,2	310	-53,8	189,1	270	-80,9	210,4	190	20,4	292,8	175	117,8

Tabla 2.7. ESTACIONES METEOROLOGICAS SELECCIONADAS PARA LA VALIDACION DE  
LA TEMPERATURA SIMULADA POR LOS MODELOS OSU, GFDL, GISS Y UKMO

CELDA GEOGRAFICA	SERIAL	LUGAR	LAT. N	LONG. W.	ALT. ( m ).	REGISTRO
1	1015	MARACAIBO	10°34'	71°44'	85	1951/80
2	0232	COBO	11°25'	69°41'	16	1951/80
3	0544	CARACAS	10°30'	66°53'	835	1955/80
4	3178	BARINAS	08°37'	70°14'	185	1951/80
5	2264	ACARIGUA	09°34'	69°12'	186	1955/80
6	4404	S. FERNANDO	07°54'	67°25'	73	1951/80
7	2827	MATURIN	09°45'	63°11'	65	1951/80
8	6424	PTO. AYACUCHO	05°36'	67°30'	73	1951/80
9	7947	STA. ELENA	04°36'	61°07'	907	1951/80

característico de esta área, mientras que para la extensa región llanera, el modelo UKMO se aproxima a la tendencia unimodal.

En cuanto a cantidades de precipitación, el modelo OSU simula con bastante aproximación el periodo seco (noviembre-abril), y el modelo UKMO, la mayor parte el periodo lluvioso (abril/mayo - octubre/noviembre), excluyendo los meses del inicio y ocaso del periodo lluvioso, que son mejor simulados por el modelo GFDL (tablas 2.8 y 2.9).

### **Temperatura**

La región tropical de Sur América se haya bajo la influencia de los Alisios, de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), o de ambos controles. Las temperaturas son uniformemente altas, a través del año, excepto para las áreas montañosas; pero en todo caso, la amplitud de la variación entre los meses más cálidos y los menos cálidos, está en el orden de los 2 a 3°C.

Para la evaluación de la simulación del clima actual, en lo referente a temperatura, se contó con las salidas de los modelos antes señalados para enero, abril, julio y octubre (tabla 2.10).

De la comparación entre los valores de temperatura observados y simulados por los modelos, indican que el modelo GISS presenta los mejores resultados para la mayor parte de las áreas geográficas consideradas, y que, en segundo lugar, el modelo UKMO presenta una buena simulación para el caso de la región de los Llanos occidentales y centrales (tabla 2.11).

### **b) Simulación Regional y Estacional de los Cambios de Precipitación y Temperatura para 2 x CO<sub>2</sub>**

De acuerdo al esquema metodológico de la fig. 2.5, si la comparación entre la simulación del clima actual producida por cada uno de los modelos y la generada por las observaciones es buena, el procedimiento de crear los escenarios se debería basar en las simulaciones para una situación de 2 x CO<sub>2</sub>, del modelo seleccionado. En nuestro caso, ninguno de los modelos produjo una buena simulación de las condiciones pluviométricas (cantidad y régimen) para todo el país; sino que en algunos casos un modelo daba una buena aproximación par el periodo seco, para una región determinada, pero no lo hacia para el periodo lluvioso. En cuanto a un mismo periodo seco o lluvioso, tampoco encontramos una consistencia general en las simulaciones de un modelo en particular. A pesar de ello, si es evidente un mayor grado de aproximación a la simulación del clima

Tabla 2.8. MODELOS QUE MEJOR SIMULAN LA PRECIPITACION PARA CADA MES Y CADA AREA GEOGRAFICA

MES	CELDA GEOGRAFICA								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ENERO	N	N	GISS	OSU	OSU	N	OSU	UKMO	N
ABRIL	OSU	N	GFDL	UKMO	GISS	OSU	OSU	GFDL	UKMO
MAYO	GFDL	GISS	GFDL	N	N	GFDL	OSU	GFDL	GFDL
JUNIO	N	GISS	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO	GFDL	UKMO	UKMO
JULIO	OSU	GISS	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO	GFDL	UKMO	GFDL
AGOSTO	GFDL	GISS	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO	GISS	GFDL
SEPTIEMBRE	OSU	GISS	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO	GFDL	UKMO	GISS
OCTUBRE	GFDL	UKMO	GFDL	UKMO	GFDL	GFDL	GISS	GISS	GISS

N= ninguno

Tabla 2.9. MODELOS QUE MEJOR SIMULAN LA CANTIDAD Y REGIMEN DE PRECIPITACION EN CADA AREA GEOGRAFICA

AREA GEOGRAFICA	CANTIDAD DE PRECIPITACION	REGIMEN DE LA ESTACION LLUVIOSA
1. MARACAIBO	OSU	GFDL
2. FARAGUANA	GISS	GFDL
3. CARACAS	UKMO	OSU
4. BARINAS	UKMO	UKMO
5. ACARIGUA	UKMO	UKMO
6. GUARICO	UKMO	OSU
7. MATURIN	OSU/GFDL	GFDL
8. PTO. AYACUCHO	UKMO	UKMO
9. STA. ELENA	UKMO	UKMO

Tabla 2.10. TEMPERATURA MEDIA (°C) PARA ENERO, ABRIL, JULIO Y OCTUBRE. VALORES OBSERVADOS (OBS) Y VALORES SIMULADOS (1 x CO2) POR LOS MODELOS OSU, GFDL, GISS Y UKMO PARA CADA AREA GEOGRAFICA

AREA GEOGRAFICA	ENERO						ABRIL						JULIO						OCTUBRE					
	O	D	6	6	U	0	O	0	6	6	U	0	O	0	6	6	U	0	O	0	6	6	U	0
1. MARACAIBO	26.5	32.3	23.6	25.8	23.4	27.7	32.7	24.7	27.1	25.8	26.5	30.2	24.6	28.8	24.9	27.7	31.6	25.4	28.2	25.6				
2. PARAGUANA	26.2	31.6	24.4	26.3	25.2	27.7	32.6	25.5	27.6	26.2	28.5	30.4	25.5	29.3	26.1	28.5	31.7	26.6	28.8	27.3				
3. CARACAS	20.1	26.9	18.4	21.1	17.9	22.5	27.3	19.4	22.1	21.1	22.2	25.0	18.9	23.7	20.8	22.3	26.3	20.4	23.1	21.2				
4. BARINAS	27.0	33.0	21.6	24.7	23.4	28.2	32.7	24.9	25.9	28.6	25.2	29.6	22.6	26.9	26.1	26.2	31.0	23.3	26.5	26.2				
5. ACARTIGUA	27.1	32.0	21.8	24.5	23.9	28.6	32.1	23.4	25.5	28.2	26.1	29.1	22.6	27.1	26.4	27.4	30.5	23.6	26.6	26.9				
6. S. FERNANDO	26.5	33.3	22.3	25.8	22.8	28.3	33.2	24.6	26.7	28.1	25.9	30.2	22.7	28.3	25.4	27.1	31.2	24.1	27.5	26.0				
7. MATORIN	24.9	31.8	22.9	24.9	24.4	26.8	32.1	24.2	25.6	27.9	25.7	29.9	23.2	27.0	27.3	26.6	31.0	24.6	26.4	27.7				
8. P. AYACUCHO	27.9	35.3	22.0	26.2	23.2	27.5	34.5	26.4	27.0	27.8	25.2	31.0	22.9	28.0	25.4	26.5	32.0	23.3	27.6	25.2				
9. STA. ELENA	21.2	30.0	17.0	20.7	18.2	22.0	29.7	19.1	21.4	21.8	20.6	26.6	18.6	24.0	20.4	21.5	26.3	18.9	22.1	20.8				

Tabla 2.11. MODELOS QUE MEJOR SIMULAN LA TEMPERATURA MEDIA DE ENERO, ABRIL, JULIO Y OCTUBRE PARA CADA AREA GEOGRAFICA

AREA GEOGRAFICA	ENERO	ABRIL	JULIO	OCTUBRE	MODELO CANDIDATO PARA EL AREA
1. MARACAIBO	GISS	GISS	GISS	GISS	GISS
2. PARAGUANA	GISS	GISS	GISS	GISS	GISS
3. CARACAS	GISS	GISS	UKMO/GISS	GISS	GISS
4. BARINAS	GISS	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO
5. ACARIGUA	GISS	UKMO	UKMO	GISS	UKMO/GISS
6. GUARICO	GISS	UKMO	UKMO	UKMO	UKMO
7. MATURIN	GISS	UKMO/GISS	GISS	GISS	GISS
8. P. AYACUCHO	GISS	GISS	UKMO	GISS	GISS
9. STA. ELENA	GISS	UKMO	UKMO	GISS	UKMO/GISS

Tabla 2.12. CAMBIOS DE PRECIPITACION DE ACUERDO AL MODELO UKMO (PROPORCION DE PRECIPITACION PARA 2 x CO2/1 x CO2)

AREA GEOGRAFICA	ENE	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT
1. MARACAIBO	1.0	1.0	1.0	1.1	1.4	0.8	1.2	1.1
2. PARAGUANA	1.0	1.0	1.0	1.3	1.5	0.8	1.2	1.1
3. CARACAS	1.0	1.3	1.0	1.4	1.3	0.8	1.0	1.1
4. BARINAS	1.0	1.1	1.0	1.2	1.3	0.9	0.9	1.1
5. ACARIGUA	0.9	1.1	1.0	1.2	1.3	0.9	1.0	1.1
6. GUARICO	0.8	1.3	1.1	1.2	1.2	0.9	0.9	1.1
7. MATURIN	0.9	1.5	1.3	1.5	1.2	0.9	0.9	1.2
8. P. AYACUCHO	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	0.8	0.9	1.0
9. STA. ELENA	0.9	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.7	1.0

pluviométrico de Venezuela por parte del modelo UKMO, especialmente para las regiones de los Llanos y al Sur del Orinoco.

En relación a la temperatura, el modelo GISS, seguido por el UKMO presentan los mejores resultados de simulación para el clima actual.

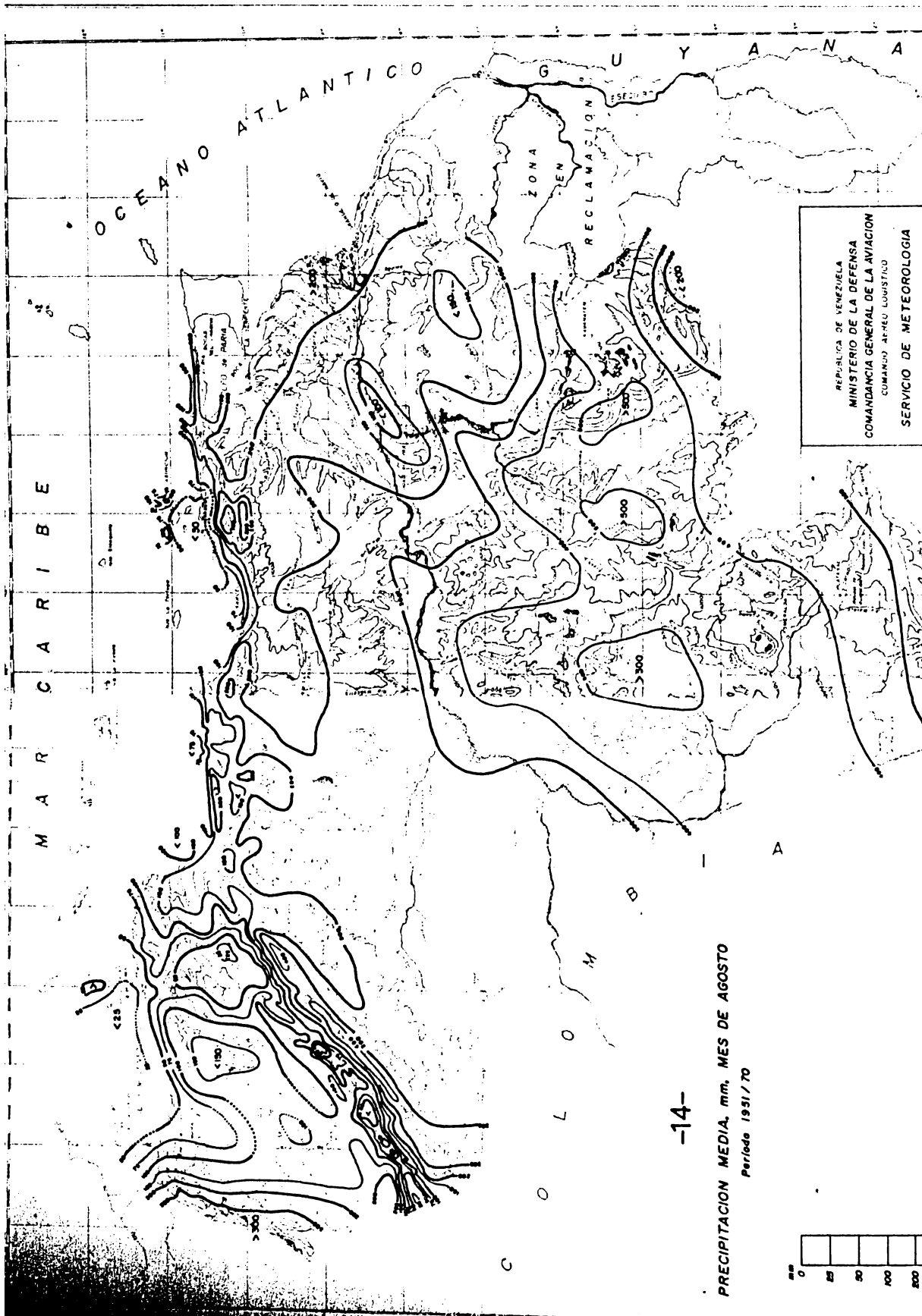
En vista de lo anterior, y de acuerdo a lo planteado en el esquema metodológico, en relación con la fase de generación de escenarios climáticos para una situación de  $2 \times \text{CO}_2$ , se propone como lineamientos básicos la consideración de las simulaciones del modelo UKMO, tomando en consideración, igualmente, la información proveniente de los otros modelos y las propuestas y juicios de expertos climatólogos.

Los cambios de precipitación estimados a partir de las salidas de simulación del modelo UKMO para  $2 \times \text{CO}_2$  se presentan en la tabla y los correspondientes a temperatura en la tabla 2.12. Como puede apreciarse, el rango de los cambios pluviométricos (de acuerdo a este modelo) va desde una disminución proporcional de 0.7 hasta un incremento proporcional de 1.5. Se observa un gradiente latitudinal que muestra una tendencia hacia un mayor incremento de la precipitación en la faja norte-costera, un predominio de un mayor número de meses con mayor precipitación que con menor precipitación. Esta zona corresponde, de manera muy general, a una faja caracterizada por climas semi-áridos y subhúmedos. Luego, en la faja de los Llanos la tendencia de un incremento de la precipitación es más moderada y, por último, hacia la región al Sur del Orinoco la tendencia es hacia un mayor número de meses con disminución de la precipitación, en proporciones entre un 10 y 20 %. Justamente, esta región al Sur del Orinoco está caracterizada por ser climáticamente perhúmeda en la actualidad.

Otro aspecto interesante es que los resultados detallados del modelo UKMO indican una disminución de la precipitación en agosto, en casi todo el país, en un 10 a 20 % (proporción  $2 \times \text{CO}_2 / 1 \times \text{CO}_2$  de 0.9 a 0.8). Agosto es un importante mes lluvioso en casi toda Venezuela, especialmente en los Llanos y al sur del Orinoco. Los otros meses que podrían ser afectados por una disminución de la precipitación son enero y septiembre, particularmente los Llanos y la región al sur del Orinoco (fig. 2.8). Abril, junio, julio y octubre son los meses que podrían recibir mayores incrementos de precipitación, entre 10 y 50 %.

Los escenarios que a continuación se presentan, fueron preparados en el Taller Internacional sobre Variabilidad y Cambios Climáticos en Venezuela y El Caribe, por el Grupo de Escenarios (Grupo de Trabajo C). Posteriormente A. Robock





PRECIPITACION MEDIA, mm, MES DE AGOSTO  
 Período 1951/70

FIG. 2.8 DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LA PRECIPITACION  
 DE AGOSTO EN VENEZUELA  
 Fuente: FAV-Servicio de Meteorología. Período 1951-80  
 Atlas Climatológico de Venezuela.

REPUBLICA DE VENEZUELA  
 MINISTERIO DE LA DEFENSA  
 COMANDANCIA GENERAL DE LA AVIACION  
 COMANDO EN JEFE LOGISTICO  
 SERVICIO DE METEOROLOGIA

hizo algunas modificaciones a los resultados emanados del Taller (Robock, 1990).

Tabla 2.13: Escenarios de Cambios Climáticos para Venezuela ( 2 x CO<sub>2</sub> )

Nivel de Sensibilidad	Período	Cambios en la Temperatura °C			Precipitación %
		MAX	MIN	MED	
ALTA	seco	+4,5	+5,5	+5,0	0
	húmedo	+2,5	+4,5	+3,5	+40
MEDIA	seco	+3,0	+4,0	+3,5	0
	húmedo	+2,0	+3,0	+2,5	+20
BAJA	seco	+2,0	+2,0	+2,0	0
	húmedo	+2,0	+2,0	+2,0	0

Mes seco: con precipitación inferior a 50mm

### Procedimiento para Aplicar los Escenarios Propuestos

#### a) Cambios de Precipitación

Para incrementos en la precipitación: Aumentar el número de eventos de lluvia, en el mes (Riehl, 1990). Proceder de la manera siguiente (Andressen, Robock y Maytín, 1990).

1) Escoger el episodio lluvioso de menor duración, es decir aquel episodio con un número menor de días lluviosos, y al día sin lluvia anterior o posterior al inicio u ocaso de dicho episodio, asignarle una precipitación igual a la cantidad de precipitación del día más lluvioso del mes, si ésta es igual o menor que el cambio de precipitación propuesto para 2 x CO<sub>2</sub>. En caso contrario, agregar al día seleccionado sólo el cambio de precipitación propuesto.

2) En caso de que el cambio propuesto sea mayor que la cantidad de precipitación del día más lluvioso del mes, continuar con el procedimiento arriba indicado, hasta que la cantidad adicional de precipitación en un mes haya sido asignada. En caso necesario, usar una fracción de la cantidad del día más lluvioso para el último día agregado, a objeto de hacer el total mensual correcto.

3) Si en un mes no nos quedan días sin precipitación, para continuar aplicando el procedimiento, tomar en el episodio lluvioso de menor duración, el día con menor precipitación, e incrementar su cantidad hasta hacerla igual a la del día más lluvioso del mes.

4) Si en un mes determinado no se encuentran días sin

precipitación, proceder de acuerdo con lo establecido en 1, pero seleccionando el día de menor precipitación para aplicar los cambios y, de ser necesario, seleccionar días adicionales.

5) En el caso de escenarios de reducción de precipitación (no aplicable en el caso de escenarios de  $2 \times \text{CO}_2$  antes presentados), proceder de la manera inversa, es decir, del episodio lluvioso de mayor duración, convertir en días sin lluvias, días al comienzo u ocaso del episodio, hasta lograr reducir en la cantidad prescrita en el escenario propuesto. Utilizar una fracción de la cantidad para hacer el total mensual correcto.

Este procedimiento se ajusta a las características sinópticas de la precipitación en las regiones intertropicales. Un incremento de la precipitación por efecto de cambios climáticos, debe producir episodios lluviosos más largos o viceversa en el caso de una reducción de la precipitación.

#### **b) Cambios de Temperatura**

Tomar las series históricas de datos diarios de temperaturas máximas y mínimas, y cambiar los valores por los estipulados en la Tabla de Escenarios.

De acuerdo con lo sugerido por Robock (1990), los escenarios de cambio pluviométrico y de temperatura deben ser corridos en el mismo nivel de sensibilidad.

Para aplicar estos escenarios climáticos se deben seleccionar estaciones climatológicas de primer orden, o tipo C1 (de acuerdo a la clasificación del MARNR). Las estaciones a ser seleccionadas, su ubicación y otros atributos, deben depender de la clase de efectos a ser analizados. Para la agrícola, seleccionar estaciones agroclimatológicas (la mayoría dependientes de FONAIAP); para la parte de márgenes costeros, estaciones insulares (La Orchila, por ejemplo) y de la zona costera.

Es importante que las estaciones exhiban un buen registro histórico, con pocos datos faltantes y englobados y que hayan tenido un buen mantenimiento. También es importante utilizar estaciones distantes de centros urbanos (para evitar el sesgo urbano sobre la temperatura, principalmente) y de otras áreas perturbadas en los últimos 25 años.

Una vez seleccionadas las estaciones, obtener las series históricas de los datos mensuales para un período suficientemente largo (al menos 20 años). Estos datos deben ser analizados para determinar años especiales: los más secos, los más húmedos, etc. Se escogerá luego, el año más

seco y el más húmedo, así como un año cuya precipitación sea igual o próxima a la media y otro a la mediana (de los totales anuales). Obtener los datos diarios o mensuales (según el caso) de precipitación, temperaturas máxima y mínima (y radiación para el caso de estudiar efectos sobre la agricultura) y aplicar a estos datos los cambios propuestos en los escenarios de la Tabla de Escenarios, según los criterios arriba expuestos.

## BIBLIOGRAFIA

- Andressen, R., 1990. "Evaluation of the GCMs for Venezuela". In **PAN-EARTH/CEACT International Workshop on Climate Variability and Climate Change in Venezuela and the Caribbean**, Mérida: 23 - 27 de abril de 1990.
- Ashmore, M., 1990. "The Greenhouse Gases", in **Trends in Ecology and Evolution**, (TREE) Vol. 5, No. 9, pp. 293-294.
- Barnola, J. M., Raynaud, D., Korotkevich and C. Lorius, 1987. "Vostok ice core provides 160.000 year record of atmospheric CO<sub>2</sub>". **Nature**, Vol. 329, pp. 408 - 414.
- Barry, R. G., 1987. **World Data Center-A for Glaciology: The First Ten Years at the University of Colorado**. Glaciological Data. 10th Anniversary Seminar. Report GD-19. (Boulder, Col.USA)
- Budyko, M. I., Ronov, A. B. and A. L. Yanshin, 1987. **The History of the Earth's Atmosphere**, English translation: Springer-Verlag, 139 pp.
- Cubash, U. y R. Cess, 1990. "Processes and Modelling" **Scientific Assessment of Climate Change**. Report to I.P.C.C. from Working Group I.
- Davies, T., 1989. Executive Summary. **The Potential Effects of Global Climate Change on the United States**. edited by Smith, J. B. and Tirpak, D.. Report to the U. S. Congress, pp. xxv-liv.
- Drew, D. 1982. **Man-environment Processes**. (London: George Allen & Unwin).
- Dickinson, R. E., 1986. "How will Climate Change? The Climate System and Modelling of Future Climate". In **The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems**. Edited by Bolin B., Doos B., Hager J. and Warrick R. (SCOPE 29), pp.207-270.
- Dickinson, R. E. and R. Cicerone, 1986. "Future global warming from atmospheric trace gases", **Nature**, Vol. 319, pp.109-115.
- Graedel, T. E. and Crutzen, P. J., 1989. "The Changing Atmosphere", **Scientific American**, Vol. 261, No. 3, pp.58-68.
- Holland, J. Z., 1971. "Interim report on the results from the BOMEX core experiment". **BOMEX Bull.**, No. 10, NOAA, U.S. Dept. Commerce, pp. 31-43.

IGBP, 1990. **The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Climate Change.** The Initial Core Projects. IGBP Reporte 12, (Junio 1990).

Lockwood, J., 1979. **Causes of Climate.** Van Nostrand, London.

Lorius, C., Jouzel, J., Ritz, C., Merlivat, L., Barkov, N. I., Korotkevich, Y. and M. N. Ktlyakov, 1985. "A 150.000 year climatic record from Antarctic ice". **Nature**, Vol. 316, pp. 591-596.

MacCracken, M. C., Budyko, M. I., Hecht, A. D., and Y. A. Izrael, 1990. **Prospects for Future Climate: A Special US/USSR Report on Climate and Climate Change.** Lewis Publ., Michigan, 270 pp.

Machta, L. and K. Telegadas, 1974. "Inadvertent large-scale weather modification", in Hess, W. N. (ed.) **Weather and Climate Modification**, J. Wiley, pp. 687 - 725.

Mitchell J. B. F., 1988. "Local Effects of Greenhouse Gases", **Nature**. Vol. 332, pp.399-400.

Oke, T. R., 1987. **Boundary Layer Climates** 2nd. Ed. University Press, Cambridge.

Patrusky, B., 1988. "Dirtying the Infrared Window", **MOSAIC** Vol. 19, No. 3/4, pp. 25-37.

Rosenberg Norman J., Blad Blaine L. y Verma Shashi B., 1983. **Microclimate: The Biological Environment.** 2nd Ed. John Wiley & Sons.

Robock, A., 1989. "Global Climate Change" En Smith, J.B. and Tirpak, D. (eds.) **The Potential Effects of Global Climate Change on the United States.** EPA Report to the U. S. Congress.

Robock, A., 1990. "Creating Regional Climate Scenarios". In PAN EARTH/CEACT **International Workshop on Climate Variability and Climate Change in Venezuela and the Caribbean**, Mérida: 23 - 27 de abril de 1990, 5 pp.

Sarmiento, G., 1984. **Los Ecosistemas y la Ecósfera**, Barcelona, España: Editorial Blume.

Schneider Stephen H., 1989. "The Changing Climate", **Scientific American** Vo. 261, No. 3, p.70-79.

Trewartha, G. T. et. al. 1961. **Fundamentals of Physical Geography.** New York: Mc Graw-Hill.

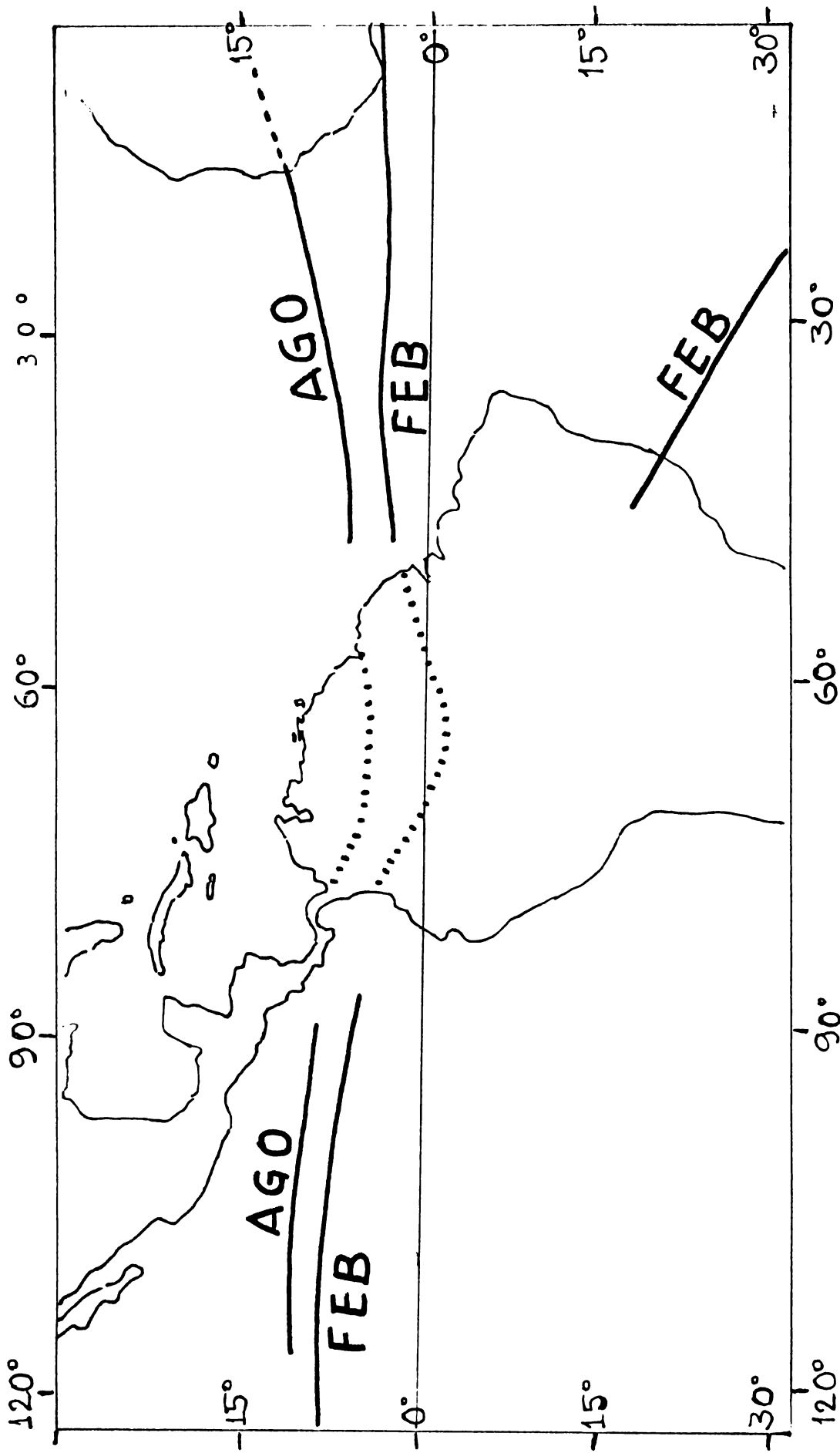


FIG. 2.9 POSICION DE LA VAGUADA INTERTROPICAL EN FEBRERO Y AGOSTO (SEGUN SAHA, 1973, RIEHL, 1954 Y YOSHINO, 1969).

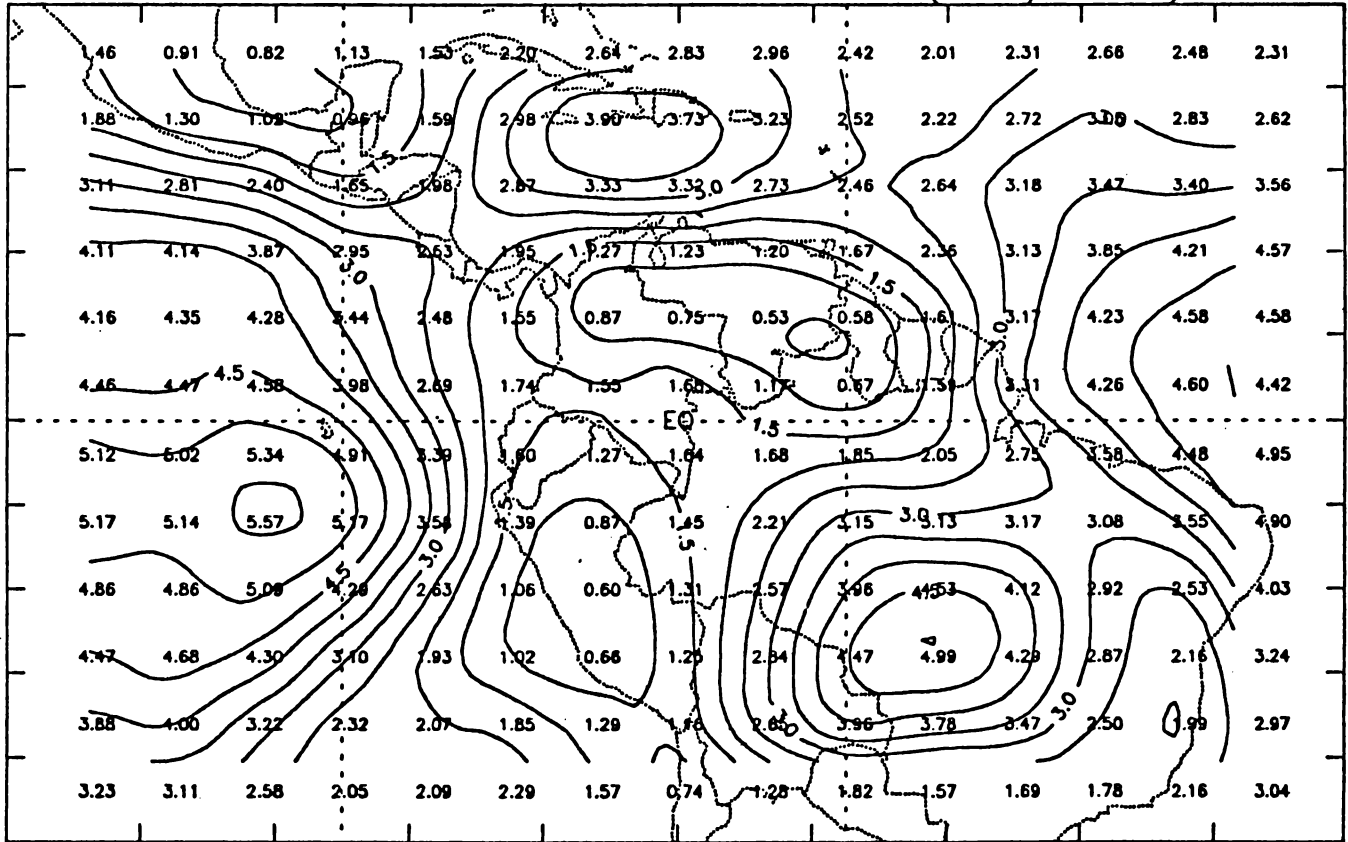
FUENTE: BARRY, R. G.

---

FIG. 2.10 SALIDAS GRAFICAS DE LA PRECIPITACION SIMULADA  
(1 X CO2 MM/DIA) PARA FEBRERO Y AGOSTO.  
(a) y (b) Modelo CSU; (c) y (d) Modelo GFDL;  
(e) y (f) Modelo GISS; (g) y (h) Modelo UKMO

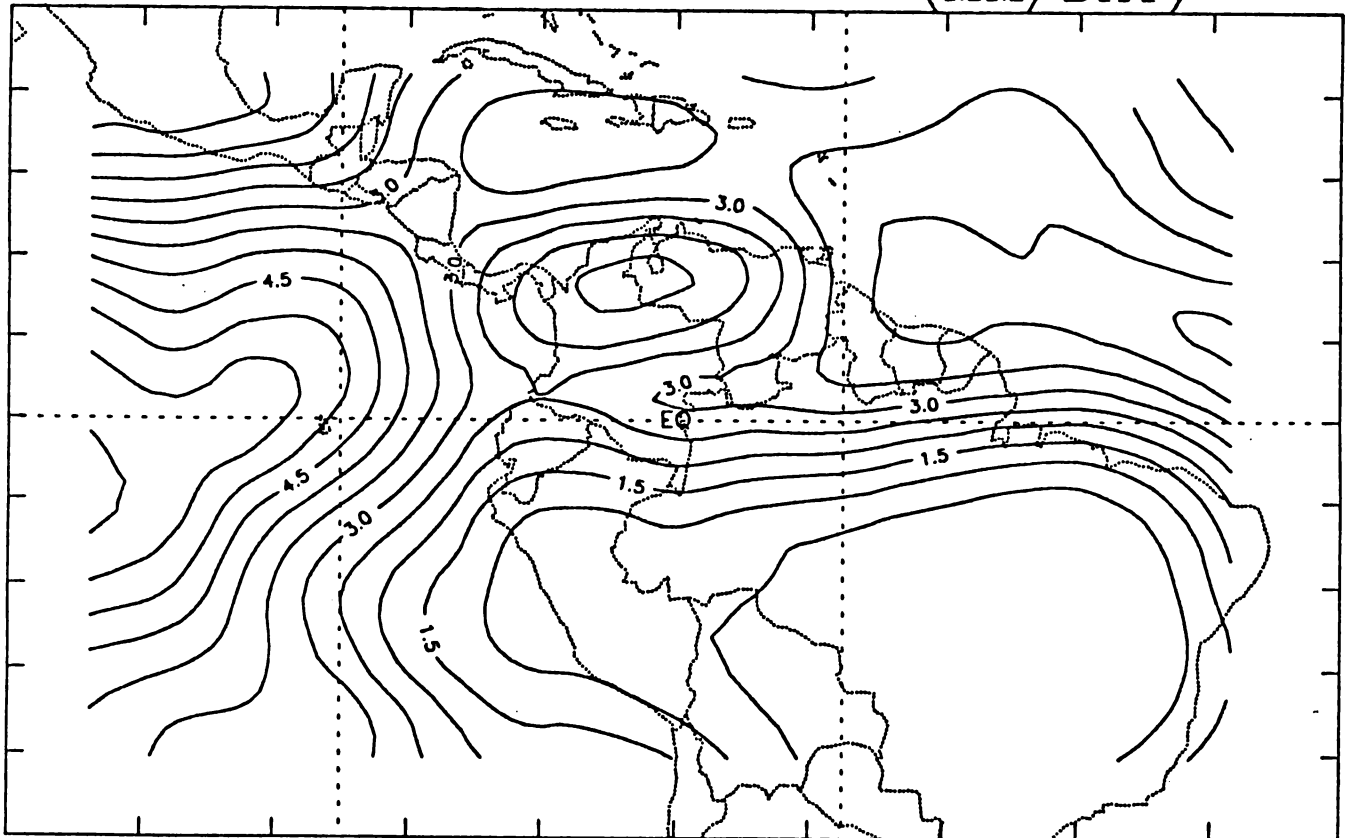


(a) OSU 1xCO2 FEB PRECIP (MM/DAY)



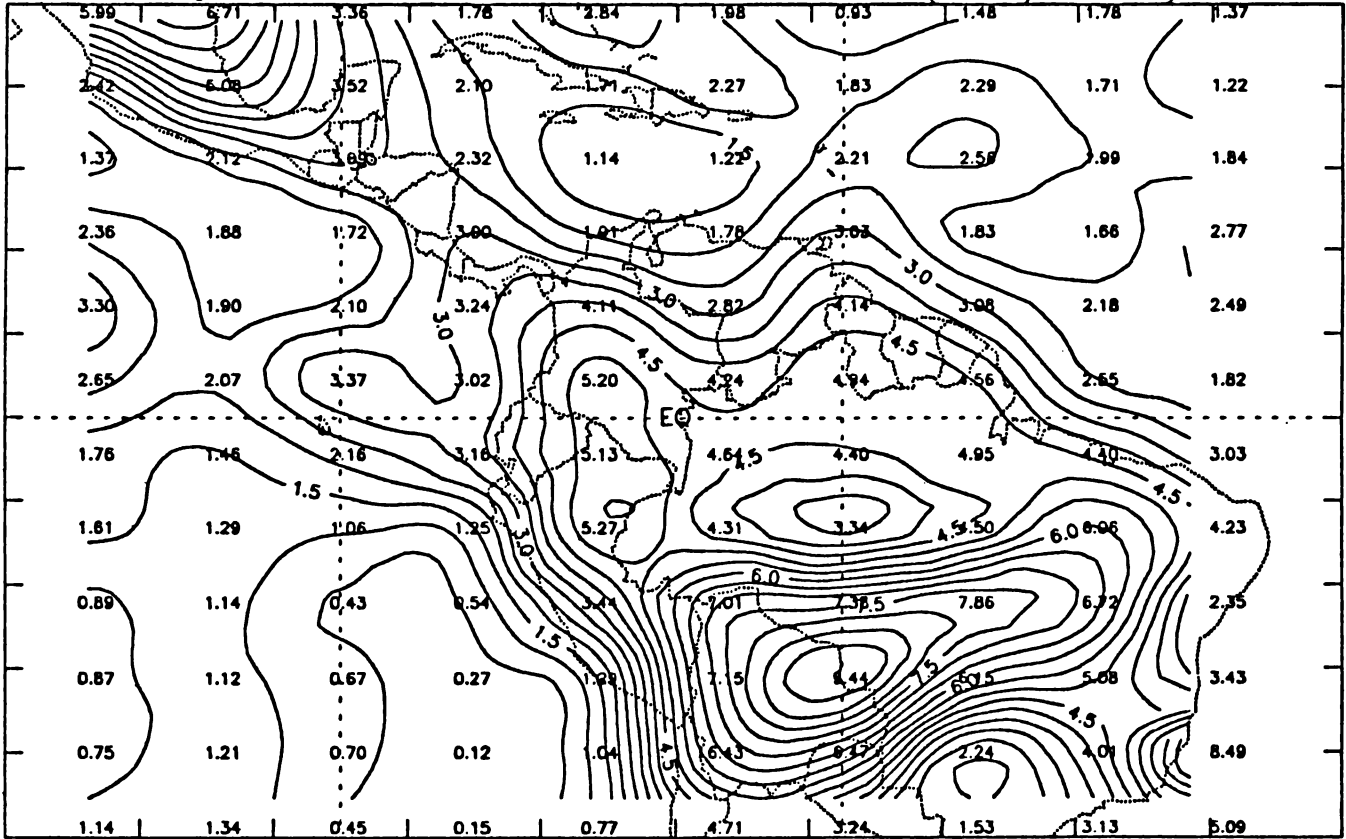
CONTOUR FROM 0.50000 TO 6.0000 CONTOUR INTERVAL OF 0.50000  
X INTERVAL= 7.0000 Y INTERVAL= 4.4000

(b) OSU 1xCO2 AUG PRECIP (MM/DAY)



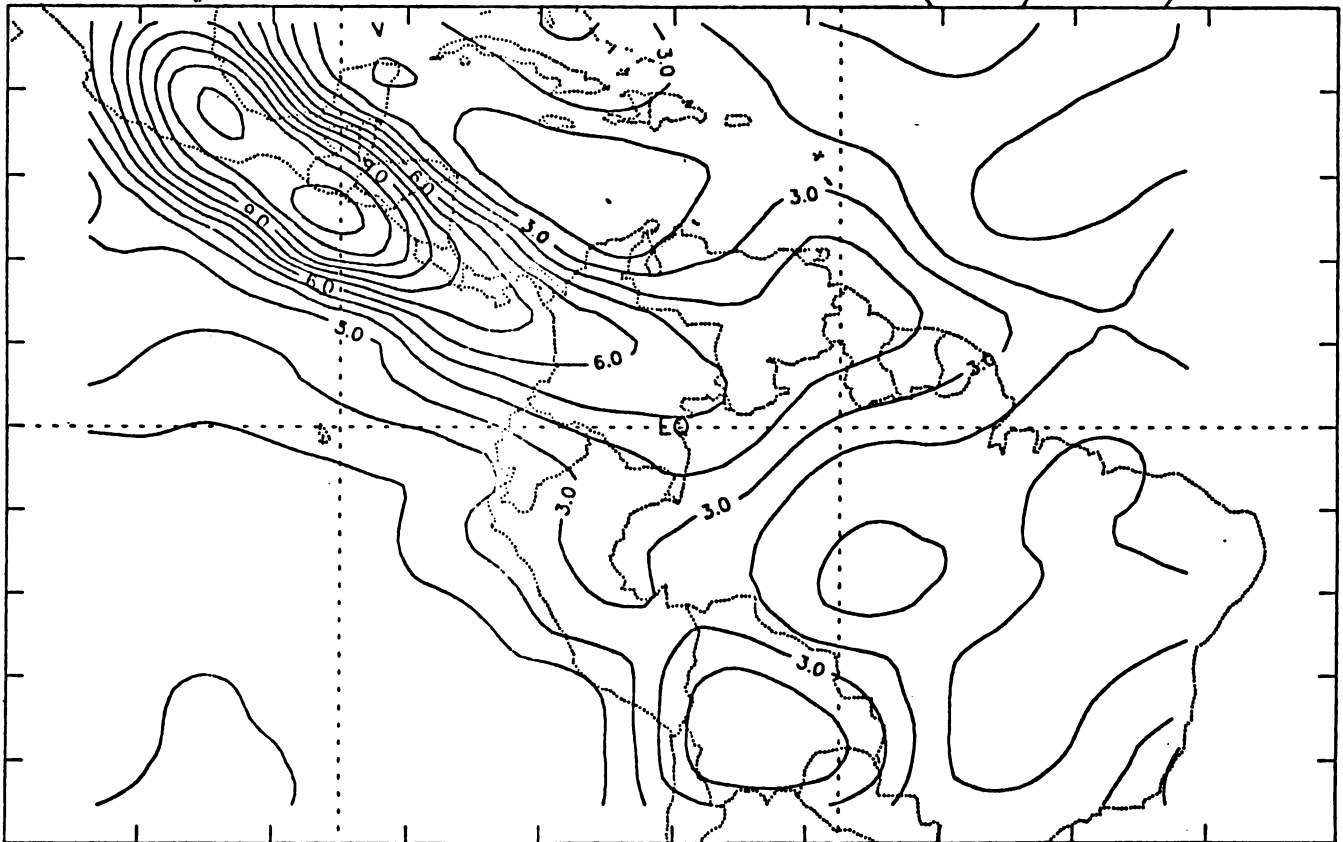
CONTOUR FROM 0.00000 TO 6.5000 CONTOUR INTERVAL OF 0.50000  
X INTERVAL= 7.0000 Y INTERVAL= 4.4000

(c) GFDL Q 1xCO2 FEB PRECIP (MM/DAY)



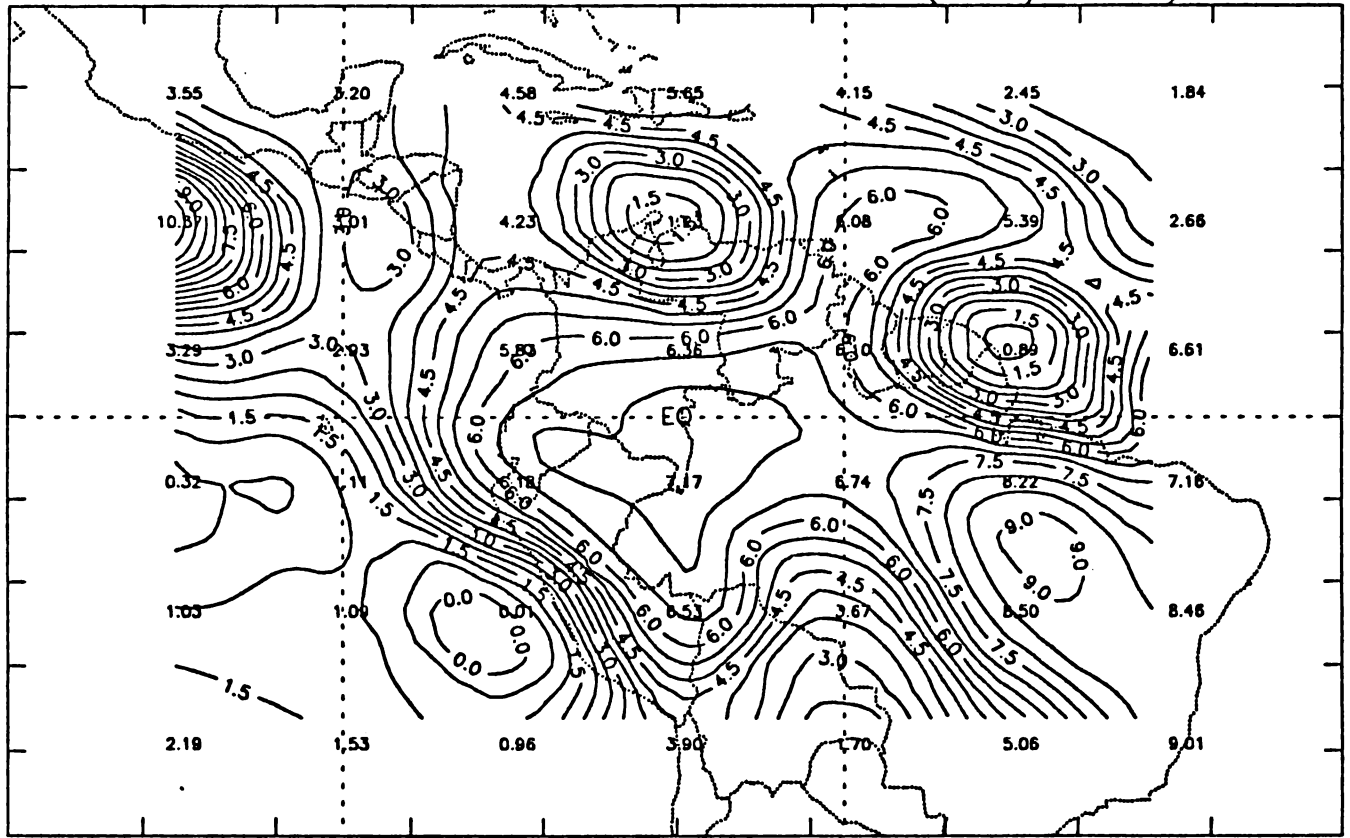
CONTOUR FROM 0.0000 TO 9.5000 CONTOUR INTERVAL OF 0.50000  
X INTERVAL= 6.7500 Y INTERVAL= 4.8884

(a) GFDL Q 1xCO2 AUG PRECIP (MM/DAY)



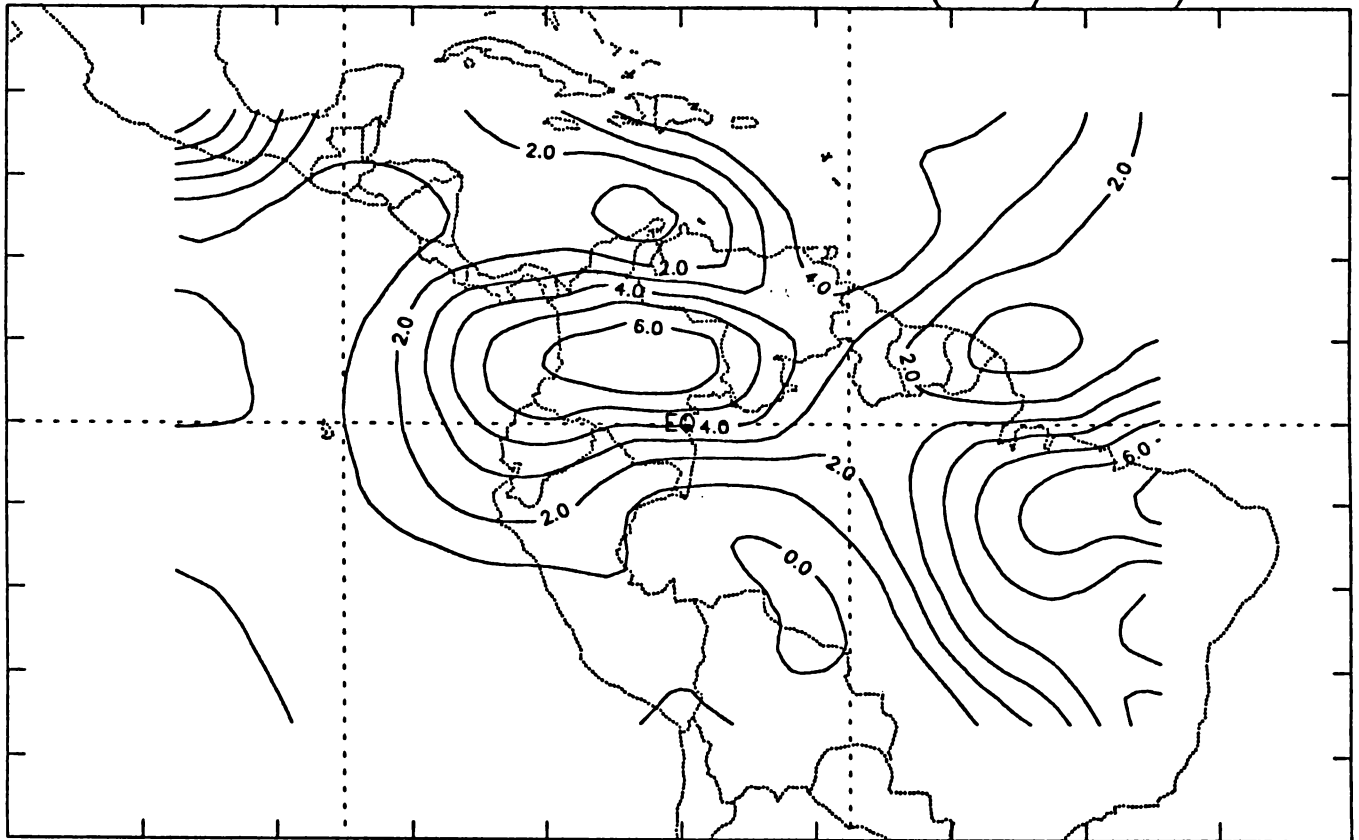
CONTOUR FROM 0.0000 TO 13.0000 CONTOUR INTERVAL OF 1.0000  
X INTERVAL= 6.7500 Y INTERVAL= 4.8884

(e) GISS 1xCO2 FEB PRECIP (MM/DAY)



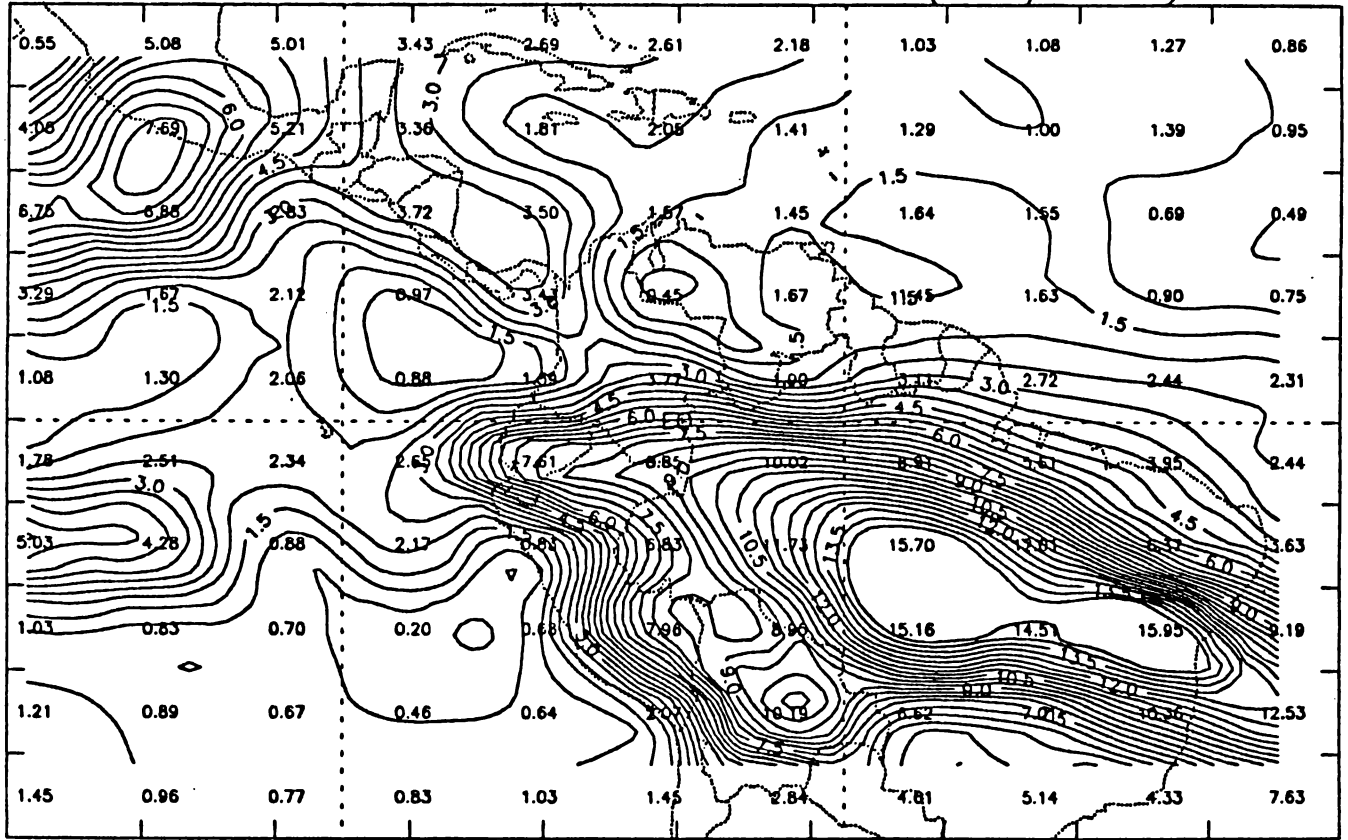
CONTOUR FROM 0.0000 TO 10.5000 CONTOUR INTERVAL OF 0.50000  
X INTERVAL= 6.0000 Y INTERVAL= 3.9130

(f) GISS 1xCO2 AUG PRECIP (MM/DAY)



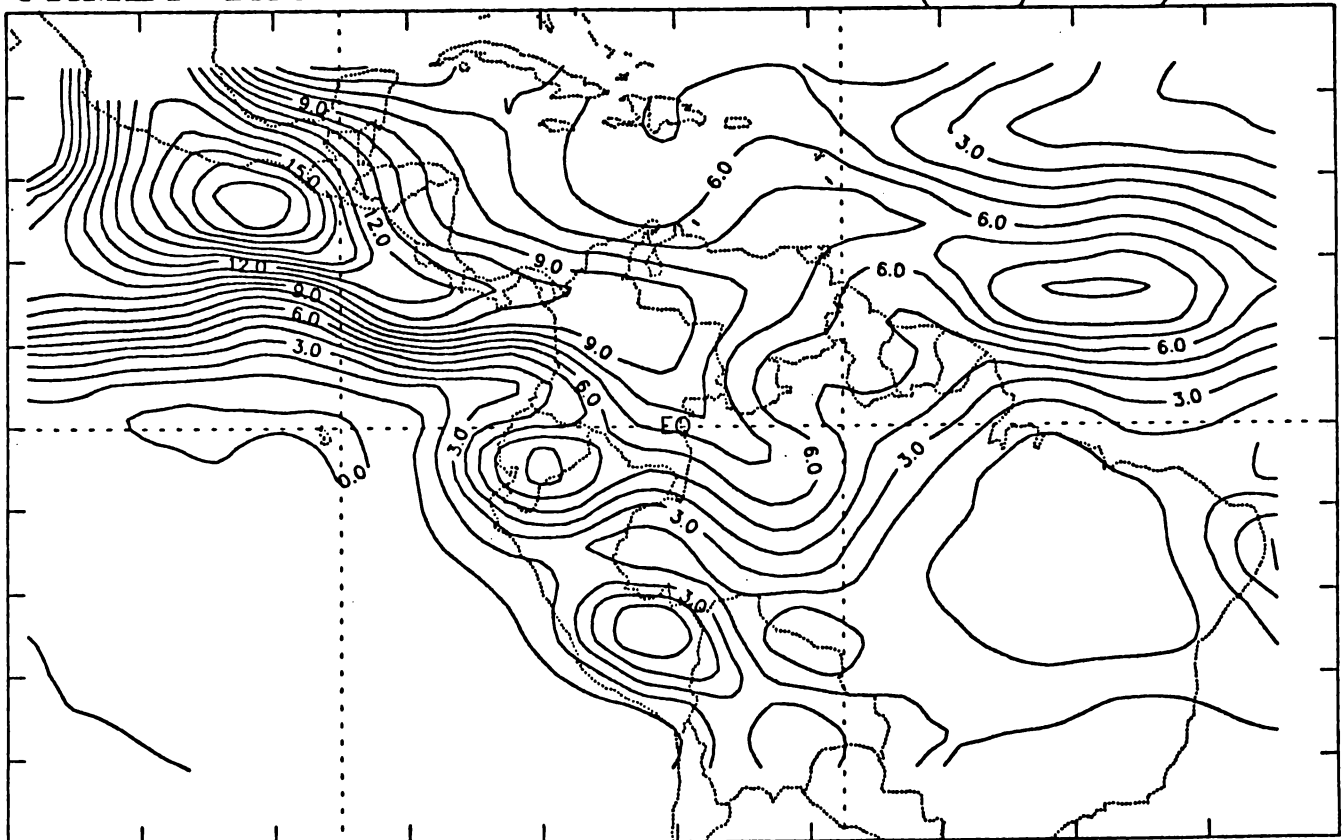
CONTOUR FROM 0.0000 TO 8.0000 CONTOUR INTERVAL OF 1.0000  
X INTERVAL= 6.0000 Y INTERVAL= 3.9130

(g) UKMET 1xCO2 FEB PRECIP (MM/DAY)



CONTOUR FROM 0.00000 TO 14.500 CONTOUR INTERVAL OF 0.50000  
X INTERVAL= 7.5000 Y INTERVAL= 4.5000

(h) UKMET 1xCO2 AUG PRECIP (MM/DAY)



CONTOUR FROM 0.00000 TO 19.000 CONTOUR INTERVAL OF 1.0000  
X INTERVAL= 7.5000 Y INTERVAL= 4.5000

### **3. IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS EN EL SECTOR VEGETAL DE LA AGRICULTURA VENEZOLANA**

#### **3.1. INTRODUCCION**

##### **3.1.1. Objetivos**

La agricultura venezolana depende en gran parte de la la variabilidad interanual de las características climáticas del territorio, en especial de los regímenes de precipitación, radiación, temperatura, vientos y humedad. En consecuencia, un cambio en el clima venezolano actual, tal como se ha destacado en el capítulo No. 2, podría impactar significativamente la producción de alimento para consumo humano o animal, con amplias repercusiones socioeconómicas en nuestro país. Al respecto, se destacan los siguientes objetivos:

- Revisar bibliografía sobre evaluación de impactos agrícola de cambios climáticos otros países, ya que las metodologías disponibles se han desarrollado sobre todo en el exterior y además somos importadores de alimentos;

- reseñar algunas metodologías hasta ahora aplicadas para evaluar los impactos agrícolas de los cambios climáticos;

- seleccionar áreas y cultivares representativos de las principales regiones agrícolas del país donde resulta prioritario implementar las evaluaciones de los impactos de posibles cambios climáticos;

- mostrar los resultados obtenidos hasta ahora en la evaluación de posibles impactos de cambios climáticos en el sector vegetal de la agricultura venezolana; y

- proponer una serie de estrategias e investigaciones necesarias para una evaluación más detallada de los efectos de cambios climáticos en la agricultura venezolana, tanto a nivel local, regional y nacional.

##### **3.1.2.- Experiencias en otras Regiones y Países**

La mayoría de las evaluaciones de los posibles impactos de los cambios climáticos en la agricultura se han realizado en países industrializados de latitudes medias y altas, destacándose los esfuerzos de investigación llevados a cabo en los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y varios países europeos. También se han hecho evaluaciones en Australia y Nueva Zelanda y países del continente asiático como Japón, la Unión Soviética y en menor grado en China y la India. Sólo hasta recientemente (sobre todo a partir de 1988) se han publicado resultados acerca del

posible impacto de los cambios climáticos en la agricultura de diversos países del continente africano y de América Latina.

#### a) América del Norte

A causa del incremento de dióxido de carbono atmosférico al doble de su concentración actual, las temperaturas promedio en el territorio norteamericano podrían aumentar de 3.8 a 6.3 °C, lo que generaría una disminución de la disponibilidads hídricas en un 10%. En base a estos escenarios de cambios climáticos, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1989) evaluó el posible impacto en la productividad de cultivos de gran importancia como el trigo, el maíz, la soya y el algodón; además, estableció algunas implicaciones socioeconómicas referentes a los sistemas agrícolas asociados a los cultivos citados. Algunos resultados del estudio de la EPA son los siguientes:

- Si se produce un calentamiento promedio de 1.5 °C se podría esperar un desplazamiento de 500 Km. hacia el norte en las principales áreas agrícolas de los EE.UU, mientras que si el calentamiento es de 5 °C tal desplazamiento podría llegar a unos 1500 Km., con el riesgo de la desaparición de ciertas áreas donde actualmente se cultiva maíz, soya y trigo. Inclusive, el estudio de la EPA estima que aún si el desplazamiento es de sólo 500 Km., se causaría una dislocación regional en la agricultura con importantes efectos en la economía tanto regional como nacional. Sin embargo, también se debe destacar que hacia el norte un calentamiento sería beneficioso, ya que las temperaturas actuales son muy bajas (inclusive para cultivos como la cebada) y el nuevo ambiente térmico significaría una menor incidencia de heladas y un aumento de la duración de la estación de crecimiento.

- En general se espera que para el sur y centro de los EE.UU los niveles productivos de cultivos como el trigo, el maíz y la soya disminuyan, independientemente de que estén regados o no. La disminución de producción de acuerdo a los modelos de simulación utilizados para el estudio (CERES-Maíz, CERES-Wheat y SOYGRO), se debería principalmente al acortamiento del ciclo de vida de los cultivos por el incremento térmico, en especial al reducir el período de llenado de los granos.

- Si se considera el efecto directo del incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico sobre los niveles de fotosíntesis y transpiración, se estima que en algunas localidades aumentaría la producción, pero a condición de que los

incrementos térmicos y las reducciones en la disponibilidad hídrica no lleguen a extremos perjudiciales, destacándose que la extensión en la cual se esperan efectos benéficos de la fertilización por efecto del incremento del CO<sub>2</sub> es incierta.

- La tabla 3.1 muestra los cambios productivos simulados para el cultivo de la soya en algunas localidades de los EE.UU, considerándose tanto los efectos directos del incremento del CO<sub>2</sub>, que como se sabe ocasionarían un incremento de las tasas de fotosíntesis y un cerrado de los estomas, aumentando la eficiencia en el uso de agua (Rosenberg, 1981), como los efectos indirectos asociados sólo a las variables temperatura y precipitación (el estudio de la EPA no tomó en cuenta el impacto de las posibles variaciones de radiación).

Tabla 3.1  
Cambio de Producción (%) por el Efecto Invernadero según Simulaciones con los GCMs GFDL y GISS para el Cultivo de Soya en Varias Localidades de los EE.UU.

LOCALIDAD	EFECTO INDIRECTO		ADICION DE CO <sub>2</sub>	
	GISS	GFDL	GISS	GFDL
Menphis	-38	-88	-13	-70
Charlotte	-7	-92	+32	-88
Raleigh	-3	-87	+39	-76
Columbia	-20	-78	+39	-76
Atlanta	-11	-78	+27	-67
Birmingham	-31	-54	0	-29

Fuente: EPA (1989, tabla 16-8, pp. 16-47)

Los resultados de la tabla 3.1 indican que en las localidades citadas siempre hay un efecto productivo negativo si sólo se consideran los cambios térmicos y de precipitación (efecto indirecto), sobre todo para los escenarios sugeridos por el modelo GFDL; por otra parte, si se consideran los efectos adicionales del incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico se simulan aumentos de producción en algunas localidades, pero únicamente en los escenarios de cambios climáticos sugeridos por el modelo GISS (no incluye a Memphis, que con GISS disminuye de producción ni Birmingham).

- Para el caso del maíz y el algodón, la tabla No. 3.2 muestra los cambios de producción en algunas regiones de los EE.UU, por efecto de cambios climáticos sugeridos por los

modelos de circulación general de la atmósfera GFDL y GISS.

Tabla 3.2  
Cambio de Producción (%) por el Efecto  
Invernadero en Maíz y Algodón para  
Regiones de los Estados Unidos

REGION	ESCENARIO	MAIZ		ALGODON	
		EI	EI+CO <sub>2</sub>	EI	EI+CO <sub>2</sub>
Costa Sur (Los Angeles)	GISS	-41	-37	-22	+11
	GFDL	-26	-22	- 4	+41
Sur de San Joaquín (Fresno)	GISS	-26	-21	-16	+25
	GFDL	-14	- 8	-10	+36
Desierto del Sur (Blythe)	GISS	-31	-27	-28	+ 6
	GFDL	-14	-8	-12	+15

EI: Efecto Indirecto debido a cambios de temperatura y precipitación). Fuente: EPA (1989, tabla 14-1, pp. 14-37)

Comparando los resultados de las tablas 3.1 y 3.2 se concluye que para soya, maíz y algodón los efectos de los cambios térmicos y de precipitación son perjudiciales, pero al agregarse el efecto directo del incremento del CO<sub>2</sub> tal impacto se reduce, sobre todo en la soya y el algodón, ya que al contrario de lo que sucede con el maíz que es de mecanismo fotosintético C<sub>4</sub>, el carácter C<sub>3</sub> de la soya y el algodón les asegura un mayor aprovechamiento del beneficio de la fertilización por incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico.

- El calentamiento podría hacer cambiar el rango de distribución espacio-temporal de algunas plagas, favoreciendo la supervivencia en invierno y un establecimiento más temprano en relación a la estación de cultivo; además, en algunas plagas (no indican cuáles) se podría producir más de una generación por año, todo lo que resulta en una mayor posibilidad de ataques perjudiciales a los cultivos.

- Las demandas de irrigación se van a incrementar en casi todas las regiones, pero sobre todo en el sur y centro de los EE.UU, lo que pudiera generar una mayor competencia interregional por los recursos hídricos.

- Desde el punto de vista de las implicaciones sobre políticas de planificación agrícola, se hace énfasis en que se debería evaluar la actual legislación



agrícola para hacer ajustes que permitan una mejor adaptación a los impactos de los cambios climáticos. Por ejemplo; se deberán evaluar la implicaciones de los cambios climáticos en relación al proceso de exportación y los intereses estratégicos de la nación, ya que la producción en los Estados Unidos va a disminuir dificultando enormemente el proceso de exportación. En términos generales, se considera que la producción agrícola en los EE.UU bajo efecto invernadero será suficiente para cubrir la demanda interna de alimentos.

Neild et al. (1979) presentaron resultados sobre el efecto de posibles cambios térmicos para la región donde se cultiva maíz en norteamérica, concluyendo que un enfriamiento de unos 2 °F significaría una reducción de la longitud de la estación libre de heladas en un mes, lo que debe afectar severamente la capacidad del maíz (y en general de otros cultivos de la estación cálida) para lograr un desarrollo normal. Ante estos resultados, los autores citados sugieren que de producirse un enfriamiento la mejor estrategia será adelantar las fechas de siembra, caso contrario si se produce una fase de calentamiento. Por otra parte, se logró determinar que las fases de enfriamiento tienen mayor efecto que las de calentamiento, ya que la contracción de la estación de crecimiento en el primer caso es mayor; se sugiere además una disminución de las temperaturas en verano sería favorable para lograr mayores rendimientos en el maíz.

Para el caso del Canadá, William et al. (1988) concluyen que un calentamiento de 3 a 4 °C combinado con una reducción de humedad en el suelo en base a escenarios sugeridos por el modelo GISS para doble CO<sub>2</sub>, significaría una reducción de producción del trigo de primavera en un 19% a nivel nacional, con variaciones regionales que van desde un -18% en Saskatchewan hasta -10% en Manitoba, aunque en regiones más norteadas donde las bajas temperaturas actuales son una limitante para lograr mayores producciones, los incrementos térmicos serían beneficiosos. En este sentido, se estima que el trigo de invierno se desarrollaría mejor que el de primavera.

Smith et al. (1989) sugieren que en la Provincia de Ontario en Canadá se podría producir un desplazamiento hacia el norte de las áreas actualmente cultivadas con maíz a causa de los aumentos térmicos. Sus resultados, basados en escenarios de cambios climáticos simulados por el modelo GISS, indican que los impactos son de considerable magnitud, ya que en las áreas más norteadas donde actualmente no se puede desarrollar el cultivo a causa de las bajas temperaturas, el incremento térmico esperado, cercano a 1.9 °C, haría posible producciones de más de 6000

Kg/ha. Sin embargo, para las áreas localizadas al suroeste de Ontario, los cambios climáticos propuestos implican poco cambio de precipitación pero aumento de la evapotranspiración potencial por el incremento de las temperaturas, lo que traería como consecuencia un desbalance entre las disponibilidades hídricas del suelo y el consumo de los cultivos, significando drásticas reducciones de producción. En relación al área total de la Provincia de Ontario, los cambios climáticos propuestos por el modelo GISS significan que en un 70% del territorio se podrá cultivar el maíz. En el caso de cultivos como la cebada y la soya se esperan reducciones de producción, sobre todo en la parte norte de la Provincia de Ontario.

#### b) Europa

Santer (1985) evaluó los posibles impactos de cambios climáticos inducidos por  $2\times\text{CO}_2$  en el sector agrícola de Europa Occidental, en base a escenarios sugeridos por los modelos UKMO y GISS y no tomándose en cuenta los efectos directos del incremento del  $\text{CO}_2$ . Los principales resultados (decitoneladas/ha) para 8 países se sintetizan en la tabla 3.3

Tabla 3.3  
Cambios de Producción Agrícola Global (%) por Efecto Invernadero en varios Países de Europa

PAIS	GISS	UKMO
Luxemburgo	+1.9	+2.4
Irlanda	-8.4	-4.2
Dinamarca	+0.6	+9.8
Holanda	+0.2	+0.7
Bélgica	-3.2	-4.5
Francia	-5.4	-4.2
Rep. F. A.	-4.0	-0.5
Italia	-0.4	-0.2

Fuente: Santer (1985)

Según la tabla anterior Dinamarca, Holanda y Luxemburgo son los únicos países donde se produce un efecto positivo bajo los escenarios propuestos por cualquiera de los dos GCM utilizados. Irlanda y Francia serían los países más perjudicados, mientras que en Italia las disminuciones de producción parecen ser leves. Se estima que si se producen los cambios climáticos sugeridos para el sur

de Europa se generarían efectos negativos, ya que la producción tendería a disminuir por efecto de menores recursos hídricos a causa de los incrementos térmicos y la disminución de precipitación, especialmente en el verano; además, se espera un hacia el norte de las áreas agrícolas.

Concordando con Santer (1985), Keneth et al. (1988, citado Parry et al., 1990) sugieren que el norte de Europa sería una de las regiones más favorecidas en el mundo a causa del efecto invernadero. Por ejemplo, un aumento de 4 °C en la temperatura promedio y mayores precipitaciones incrementarían la producción del trigo de primavera un 20% en el centro de Finlandia, mientras que al sur el incremento sería de 10%. En el caso de la avena los incrementos de producción según las regiones varían entre 9 y 18%.

Si en Europa junto al calentamiento no se produjeran cambios en la precipitación, o ésta disminuyera, la situación sería diferente a la anterior, ya que investigadores como Bolin et al. (1986, citado por Crosson, 1989) encontraron que sin cambios de precipitación un incremento de 2 °C reduce la producción de trigo y maíz en un 7% para Europa Occidental, lo que se agravaría si se produce una disminución de las precipitaciones. A nivel general los modelos UKMO y GISS simulan importantes reducciones de precipitación para el sur de Europa, sobre todo en Italia y Grecia.

Para el caso de sectores europeos localizados en altitudes superiores a los 1000 metros los incrementos térmicos ejercerían efectos productivos benéficos al contrarrestar el actual impacto negativos de las bajas temperaturas, esperándose los mayores aumentos de producción en el norte de Italia (Balteanu et al., 1987). Para los Alpes europeos se propone además que un aumento de 1 °C puede hacer subir los límites de las áreas agrícolas unos 150 m., mientras que si se producen los incrementos térmicos esperados para 2 x CO<sub>2</sub>, unos 4 °C, el desplazamiento altitudinal sería de 440 a 650 m.

A nivel general una similitud en los impactos de los cambios climáticos por efecto invernadero que se han reseñados para norteamérica y europa, es que al sur se espera reducción de producción por un balance termohídrico desfavorable, mientras que el norte el incremento térmico puede ser benéfico en áreas que actualmente presentan agroclimas limitantes por efecto de las bajas temperaturas.

### c) Asia

En 1978 se realizó en Japón un reunión internacional sobre el efecto de los cambios climáticos en la agricultura de varios países asiáticos, en especial el Japón y aquellos

afectados por influencias monzónicas. Los principales objetivos de esa reunión fueron:

- Describir algunos cambios climáticos ocurridos hasta el año de 1976.

- Hacer clara la relación entre fluctuaciones climáticas y producción agrícola, sobre todo en el sur, sureste y este de Asia.

- Discutir los modelos existentes sobre cambios de clima y principales cultivos desarrollados en la región.

Algunos resultados de investigaciones presentadas en la reunión científica de Japón son los siguientes:

- Takahashi y Nemoto (1978) en base a análisis estadístico de información climatológica registrada desde el año de 1401, encontraron que en Japón aproximadamente cada 80 años se producen condiciones climáticas asociadas a muy bajas temperaturas en el verano, lo que causa una fuerte disminución de producción de los cultivares de arroz, sobre todo en el norte del Japón. En este sentido, para el año de 1976 hubo reducciones de producción de hasta un 87% por efecto de las bajas temperaturas durante el ciclo de verano. La menor incidencia de veranos anormalmente fríos años antes de 1976 se asoció a la posibilidad de que ya se estaba produciendo para ese año el efecto invernadero.

- Wada (1978) concordando con Lamb (1969) plantea que para el Japón se han notado ciclos de 100 años desde el punto de vista térmico, destacando además que dichos ciclos presentan retardos de aproximadamente 20 años respecto a países de latitudes altas. Al igual que Takahashi y Nemoto, Wada plantea la gran importancia de las temperaturas de verano en el norte del Japón para el logro de una buena cosecha de los cultivares de arroz, estimándose que de acuerdo a los ciclos térmicos citados anteriormente se debe esperar un aumento de veranos fríos hacia finales del presente siglo, ya que esta última condición se produjo entre finales del pasado siglo y comienzos del presente. Se debe notar sin embargo la diferencia de 20 años en la duración de los ciclos térmicos propuestos para el Japón por Takahashi-Nemoto y Wada-Lamb.

- Para el caso de los países afectados por influencias monzónicas como la India, Bengladesh, Corea del Sur y Japón, Tanaka (1978) estableció relaciones entre fluctuaciones climáticas y producción de arroz, determinándose que las sequías son las que tienen los efectos más importantes, siendo la del año 1967 una de las más severas de las ocurridas en el siglo veinte, aunque

problemas con inundaciones por excesos de precipitación también pueden presentarse. En los últimos 50 años se ha producido un aumento de la variabilidad del monzón, sobre todo en el mes de julio, lo que ha generado consecuentemente una gran variación de la producción agrícola, en especial en aquellas áreas donde no existe riego.

- Rasmidatta (1978) señaló que de 1973 a 1987 hubo fuertes fluctuaciones de precipitación que afectaron la producción de maíz en Tailandia, siendo los años secos como el de 1972 los que determinaron las mayores reducciones de producción.

- A nivel general en la reunión de Japón en 1978 se concluyó que es necesario desarrollar modelos de relaciones clima-cultivo e incrementar los esfuerzos por mejorar las técnicas de producción y la resistencia de los cultivares ante problemas de bajas o altas temperaturas.

En 1988 el Proyecto PAN-EARTH realizó en China su primera reunión internacional para analizar el problema de los efectos de los cambios climáticos en diversos sistemas, especialmente los ecosistemas naturales y los agroecosistemas. Sobre todo se analizaron aquellos cambios que podrían sucederse de ocurrir una guerra nuclear; es decir, cambios asociados a los que se conoce como el "invierno nuclear". En este sentido, Suhua et al. (1988) presentaron resultados sobre evaluaciones de algunas respuestas productivas en China ante disminuciones térmicas de 1, 2 y 3 °C, encontrando que en promedio a nivel nacional se produciría una disminución de producción agrícola de 5, 10 y 15% respectivamente, lo que podría causar serios impactos en la economía del país.

En China resultados acerca de posibles efectos de los cambios climáticos en la agricultura también han sido aportados por investigadores como Terjun et al. (1984), quienes encontraron que para el maíz sin riego un incremento de 1 °C significaría una reducción de producción cercana al 3%.

Parry et al. (1990) sugieren que en la Región Central de la Unión Soviética el incremento térmico haría que el maíz sustituya a cultivos como la avena; además, el trigo de invierno se desarrollaría mejor que el de primavera. Por otra parte destacan que uno de los principales problemas a presentarse en los cultivos que actualmente se desarrollan en áreas que van a ser más cálidas en el futuro, sería el acortamiento del ciclo de vida y en especial la maduración más temprana, lo que impediría un llenado de los granos lo suficientemente largo. Comparando para Leningrado los efectos de años del clima actual anormalmente cálidos con los aumentos térmicos propuestos por GISS para 2 x CO<sub>2</sub>, se

se nota un efecto positivo en los primeros pero negativo en los escenarios GISS. En general para la URSS se espera que cultivos con altos requerimientos térmicos como el maíz y el trigo de invierno sustituyan al trigo de primavera.

#### d) Africa

Mabbutt (1989) ha presentado una síntesis general de posibles efectos de cambios climáticos en varios sectores de Africa, la que se resume a continuación:

- En los sectores semiáridos de Africa las sequías y lo errático de las precipitaciones constituyen el principal problema para la producción de alimentos, ya que la mayoría de las áreas agrícolas no están regadas afectándose negativamente cultivos como el sorgo y el maíz. En este sentido, de producirse cambios climáticos que impliquen reducción de precipitación, se podría esperar que en países como Nigeria ocurra un desplazamiento de las actuales áreas agrícolas hacia sectores húmedos, hoy en día poco utilizados, estimándose que para el Africa del Oeste en general el desplazamiento hacia el sur sería de unos 200 Km; además, dependiendo de las condiciones de comercialización, rubros como el sorgo y los granos de leguminosas podrían extender sus áreas de cultivo hacia sectores con suelos de alta capacidad de reserva de agua.

- En relación a climáticos que impliquen aumento de precipitación se destaca el hecho de que las mayores pérdidas de cultivos por ataque de hongos en Africa (y en los trópicos semiáridos en general) se producen en mayor medida en años pluviosos, en los que además se presentan problemas de erosión física y/o química del suelo.

- Una extensión de las áreas de sabanas tanto hacia regiones húmedas a causa de cambios climáticos que impliquen condiciones futuras más secas, o hacia regiones semiáridas si los cambios son hacia mayor humedad, podría generar ataques de la mosca tse tse, destacándose también que la mayoría de las malezas son de mecanismo fotosintético  $C_3$ , lo que significa que el incremento del  $CO_2$  atmosférico las puede hacer más competitivas, en especial respecto a cultivos tipo  $C_4$  como el maíz y el sorgo.

Según Whyte (1963) en Africa la mayor parte de la población se localiza en áreas de pastoreo no sólo mal manejadas sino afectadas por fuertes fluctuaciones climáticas, no existiendo duda de que cambios climáticos aún de magnitud no muy fuerte pueden causar impactos importantes en la productividad agrícola, sobre todo por efecto de los cambios de precipitación, los que además deben incrementar los ataques de pestes y malezas, ya que si el clima cambia hacia

condiciones más desérticas los ataques de las langostas rojas pueden ser mayores, mientras que si la precipitación aumenta los hongos podrían constituirse en un problema. Cambios hacia condiciones de sequía podrían también generar problemas en los reservorios de agua subterráneas tan importantes en lugares áridos y semiáridos, no sólo por la menor recarga por el clima más seco sino que el agua de los mismos se salinizaría, tal como actualmente sucede en países como Sudán (reservorio de Khashm el Girba Dam).

#### e) Australia y Nueva Zelanda

Pittock y Nix (1989) sugieren que bajo efecto invernadero se puede esperar para el sector norte del continente australiano un incremento de precipitación durante el verano astronómico, lo que podría causar un aumento de productividad cercano al 20%, aunque se pueden presentar problemas con la erosión de los suelos. Para el sur (sobre todo el suroeste) las precipitaciones disminuirían tal como sucedió en la década del 40, que fue cálida en Australia y Nueva Zelanda al igual que en latitudes medias y altas del hemisferio norte; además, el aumento térmico ocasionaría un desplazamiento de cultivos como el trigo, la avena y la cebada por maíz y sorgo (en Nueva Gales del Sur).

Los resultados de Pittock y Nix sobre las variaciones de productividad por bandas latitudinales en Australia, por el aumento de 1 °C y de 6% en la precipitación, concuerdan con los de Lieth (1978) pero a nivel global: +6% entre 10 y 20° S., +3.9% entre 20 y 30° S. y +5.6% de 30 a 40° S.

La Universidad de la Defensa Nacional de los Estados Unidos (NDU, 1980) estimó que en Australia disminuiría la producción del trigo de invierno entre 3 y 6% si se produce incrementos de 1 °C y de 2% en precipitación. En el caso del trigo de primavera estudios experimentales sugieren habría mayor productividad si la temperatura aumenta de 2 a 3 °C, pero a condición de que se riegue (Gifford 1988, citado por Parry y Carter 1990). Por otra parte, de acuerdo a Russel (1981), si en el futuro se produce un incremento de precipitación como el ocurrido entre 1945 y 1955, se puede esperar en Australia un desplazamiento hacia el oeste de la región donde actualmente se cultiva trigo.

En el caso de Nueva Zelanda se espera un incremento de la producción de pastos de 6, 9 y 18% si las temperaturas aumentan 1, 2 y 3 °C respectivamente; por otra parte, y al igual que en Australia, cultivos como el maíz y el sorgo tenderían a sustituir el trigo, la cebada y la avena, esperándose en general un desplazamiento de las áreas

agrícolas hacia el sur (Parry y Carter, 1990).

#### f) Latinoamérica (sin incluir a Venezuela)

Según Mabutt (1989) en México los escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero en la región norte del país son parecidos a los del sur de los Estados Unidos; es decir, se incrementa la falta de recursos hídricos por el aumento de las temperaturas (mayor evapotranspiración potencial) combinado con disminución de precipitación. Esto podría traer serias consecuencias desde el punto de vista productivo y una mayor competencia entre los dos países por los recursos hídricos, debiéndose tomar en cuenta que México se sitúa aguas abajo de los Estados Unidos (mayores ventajas para este último país); además, en México las áreas actualmente húmedas ya están cultivadas, lo que dificulta un procesos de adaptación por migraciones de las áreas de cultivo hacia esos sectores (a diferencia de lo que el mismo Mabbutt propuso para países de Africa con Nigeria).

Para el sur de Mexico y en América Central los resultados de los GCMs sugieren aumentos térmicos entre 3.3 y 5.4 °C combinado con disminuciones de precipitación del 23%. Como consecuencia, se esperan reducciones de producción entre 5 y 25% en maíz y otros cultivos de secano (Parry et al., 1990). En el caso de América del Sur un incremento de 2 a 4 °C significaría para las pampas argentinas un desecamiento (Salinger, 1989), mientras que en las regiones andinas del Ecuador un calentamiento de 1 °C significaría un aumento de los límites de la agricultura cercano a los 200 m., aunque un incremento de las precipitaciones podría significar una disminución de producción en cebada pero aumento en la de papa (Bravo et al. 1988, citado por Parry y Carter, 1990).

Podemos concluir que de producirse cambios climáticos a causa del efecto invernadero algunas regiones del planeta podrían verse perjudicadas por una posible disminución de producción (centro y sur de los EE.UU, sur de Europa, Centro América), mientras que en otras regiones, sobre todo las de áreas de latitudes altas (Canadá y el norte de Europa y Asia) y en las tierras de mayor altitud, donde actualmente las temperaturas son muy bajas para la agricultura, los efectos de los cambios climáticos podrían ser benéficos.

#### 3.1.3.- Metodologías Disponibles

A nivel general dos enfoques básicos se han propuestos hasta ahora para evaluar el impacto de cambios climáticos en la agricultura: a) el "método directo", que parte de una definición previa de los escenarios de cambios climáticos para luego evaluar su impacto en diversos componentes de los



sistemas agrícolas (Ackerman y Cropper, 1988); b) el "método indirecto" (Parry y Carter 1984), que implica estudiar primero la sensibilidad de los sistemas a ser impactados ante la variabilidad del clima actual o pasado, para luego generar los escenarios de cambios climáticos en base a esa particular sensibilidad.

Independientemente de que se aplique un método de evaluación directo o indirecto, siempre se requerirá que además de una serie de escenarios de cambios climáticos con adecuada resolución espacial y temporal, se disponga también de medios para analizar los efectos de esos cambios en diversos aspectos agrícolas de interés, como serían entre otros la respuesta productivas de los cultivo y sus implicaciones a nivel de oferta de productos para diversos mercados, necesidades de importación de alimentos, nivel de empleo agrícola, etc. En este sentido, varios métodos podrían utilizarse:

- Modelos Empírico-Estadísticos
- Analogías Históricas;
- Clasificaciones y Regionalizaciones Agroclimáticas
- Experimentos de Laboratorio;
- Experimentos de Campo;
- Modelos de Físico-Matemáticos;
- Modelos de Base Biofísica;
- Modelos Paramétricos (combinación de modelos físico-matemáticos con los de tipo biofísico);
- Modelos Económicos (oferta y demanda, insumos, etc) y Socio-económicos (niveles de empleo agrícola, migraciones, etc).
- Juicio de Expertos (a menudo combinado con uso de analogías históricas).
- Combinación de algunos de los métodos anteriores (enfoques parcialmente integrados).

#### **Métodos Empírico-Estadísticos**

##### **a) Índices Agroclimáticos**

Según Parry et al. (1990) los índices agroclimáticos

combinan en un término aquellas variables meteorológicas que más influyen en el crecimiento y productividad de las plantas, dando una idea general del potencial agroecológico de una región.

Un ejemplo del uso de índices agroclimáticos para evaluar el impacto por cambios climáticos en la agricultura fue el trabajo presentado por Williams (1985) en la Provincia de Alberta (Canadá). El índice utilizado, desarrollado por Turc y Lecerf (1972), resulta de calcular para los doce meses del año, en base a promedios climáticos normales (series de 30 años), los siguientes factores:

- Necesidades de riego ( $B_i$ ) para mantener las tasas máximas de transpiración si se presentan déficits de agua en el suelo ( $B_i$ ). Se calcula en función de la precipitación, la evapotranspiración potencial (ETP) y los déficits hídricos promedios mensuales, agregando la capacidad de reserva de agua en el suelo;

- Un factor de sequía ( $F_s$ ) función de ETP y  $B_i$ ;

- Un factor solar ( $F_h$ ) función de la latitud (fotoperíodo) y la radiación global promedio mensual;

- Un factor térmico ( $F_t$ ) función de las temperaturas medias mensuales y la temperatura mínima diaria;

- Un factor heliotérmico ( $F_h$ ) que resulta de multiplicar los dos últimos factores mencionados ( $F_h \times F_t$ )

Con los factores anteriores se calcula para cada mes un índice que resulta de multiplicar a  $F_s$  y  $F_h$ ; finalmente la suma de los doce valores individuales de  $F_s \times F_h$  es igual al índice de potencial agrícola PA.

El efecto de los cambios climáticos en el índice de potencial agrícola PA se logra modificando convenientemente los promedios climáticos mensuales que sirvieron de base para el cálculo de PA.

Una de las ventajas de la aplicación de los índices agroclimáticos para estudiar las relaciones clima-cultivo, es su sencillez y rapidéz de cálculo, lo que se puede facilitar aún más por el uso de programas para computadora; así mismo, algunos índices sólo requieren de datos promedios de variables frecuentemente medidas en estaciones climatológicas como la temperatura y/o la precipitación. Las posibilidades de mapeo son amplias siempre que se cuente con los datos de varias localidades en un área de interés, de manera tal que se puedan realizar los correspondientes mapas de isolíneas.

## **b) Asociación Estadística**

Coeficientes de correlación se han utilizado para demostrar la asociación estadística entre variables climáticas y la producción agrícola, tal como es el caso de los estudios realizados por Handler (1985) para destacar que existe cierta asociación entre la producción de cultivos de maíz en los estados Unidos e índices representativos de la cantidad de aerosoles estratosféricos (efecto vía radiación solar); de igual forma este tipo de enfoque fue aplicado por Nicholls (1986) para establecer asociaciones entre las anomalías de producción de sorgo en Australia y un índice representativo de la Oscilación Sur antes y durante la estación de crecimiento. En los dos casos citados se aplicaron técnicas de filtrado para remover posibles tendencias de producción asociadas a cambios tecnológicos.

## **c) Modelos de Análisis Clima-Cultivo**

Según Baier (1981, 1983) estos modelos relacionan características del clima con aspectos de los cultivos como desarrollo morfológico, crecimiento vegetativo o rendimiento, constituyendo un compromiso entre modelos de simulación matemáticos y los modelos estadísticos de regresión.

Un ejemplo de modelos de análisis de clima-cultivo muy utilizado y destinado para aplicación en países en desarrollo es el de la FAO (Modelo de Potencial de Productividad de Cultivo; Frere y Popov, 1979), el cual se basa en el cálculo de balances hídricos decadales para la estación de crecimiento y de un índice asociado a la satisfacción de los requerimientos hídricos. Este índice se relaciona al rendimiento de los cultivos tomándose también en cuenta posibles problemas de plagas y/o enfermedades.

El modelo de la FAO puede resultar muy útil para las investigaciones sobre impactos agrícolas de cambios climáticos, ya que calculando los nuevos balances hídricos asociados a esos cambios climáticos se podrían a su vez obtener los índices asociados a la satisfacción de los requerimientos de agua en diferentes tipos de cultivos, permitiendo así ver los cambios en los potenciales de productividad. La metodología de la FAO suministra en tablas la información necesaria para poder utilizarla y es computarizable, por lo que se facilita su implementación.

## **d) Modelos de Rendimientos Basados en Regresión Múltiple**

El uso de regresiones múltiples ha constituido uno de los medios más ampliamente utilizados en la evaluación del impacto de las condiciones climáticas en la agricultura. En

este caso las variables predictoras por lo general son la temperatura y/o la precipitación, aunque se han aplicado regresiones donde se incluyen otras variables climáticas como la radiación solar, la evaporación y la velocidad del viento. La variable a predecir es con bastante frecuencia la productividad de los cultivos.

Santer (1985) nos da un ejemplo del uso de regresiones estadísticas para la evaluación del posible impacto de cambios climáticos (efecto invernadero) a la agricultura europea occidental. En este caso se aplicó un modelo propuesto por Hanus (1978) que asocia mediante una serie de ecuaciones de regresión lineal la producción del trigo de invierno con variables climáticas como los promedios mensuales de temperatura máximas y mínimas y la precipitación total mensual; además en las rectas de regresión se incluye la variable tiempo (años) para tomar en cuenta posibles tendencias.

A nivel general los modelos de regresión han recibido una serie de críticas en relación a su utilidad para la evaluación de los posibles efectos de cambios climáticos en la agricultura, habiendo sido Katz (1977) quien realizó una evaluación bastante completa acerca de este problema. Sus principales conclusiones fueron las siguientes:

- Se consideran por lo general pocos elementos climáticos asumiéndose que los demás permanecen constantes, a lo que se puede agregar que las respuestas de los procesos fisiológicos de los cultivos ante los elementos del clima a veces no son lineales; así mismo, se asume que no existe asociación entre los elementos climáticos (independencia de las variables predictoras) ya que se parte de la base de que los efectos de dichos elementos pueden ser individualizados;

- Los coeficientes de los modelos de regresión se obtienen en base a registros asociados a condiciones climáticas que precisamente se consideran van a cambiar, por lo cual pudieran también variar dejando así de ser representativos de las asociaciones entre variables climáticas y variables agroecológicas;

- Al no estar basados en fundamentos biofísicos limitan la capacidad de interpretación de los resultados, impidiendo tomar en cuenta efectos importantes como el asociado al incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico en la ecofisiología de los cultivos.

No obstante las críticas anteriores, los modelos de regresión estadística representan una opción que no debe ser desechada en la evaluación de posibles cambios climáticos en la agricultura, sobre todo en el caso de cultivos que no

tengan todavía desarrollados modelos biofísicos de simulación.

### Uso de Analogías Históricas

En este enfoque se trata de analizar las respuestas de los cultivos en años o períodos de años en que se produjeron condiciones climáticas que se consideran en cierta forma representativas de cambios climáticos futuros.

Rosenberg (1982) planteó la aplicación del método de las analogías históricas como alternativa a lo que él considera deficiencias en los métodos empírico-estadísticos para evaluar el impacto de cambios climáticos en la agricultura (coincide con las críticas de Katz, 1977). Se propone un enfoque basado en el estudio de las migraciones de las áreas de cultivo en el pasado por efecto de variaciones climáticas significativas, habiéndolo utilizado para el estudio de las posibles respuestas del trigo de invierno en norteamérica ante calentamiento por efecto invernadero, en base a su comportamiento durante el desplazamiento hacia el norte en el período cálido ocurrido entre 1920 y 1940.

Se puede agregar que el comportamiento de los cultivos en años individuales que presentaron un comportamiento extremo resulta una analogía de cierta utilidad para evaluar los posibles efectos de cambios climáticos futuros; por ejemplo, años con excesos o falta de precipitaciones; estos últimos por lo general son cálidos, ventosos y de alta radiación, a diferencia de los primeros que son más frescos y de baja radiación. Los investigadores japoneses han utilizado este último tipo de enfoque destacando la relación entre años con veranos anormalmente fríos y la productividad del arroz en el norte del Japón, tal como se señaló.

Las necesidades de información para aplicar el método de analogías históricas se asocian a datos sobre comportamiento de los cultivos o demás aspectos de interés en los años o períodos análogos a lo que se considera sea el posible clima futuro. En este sentido, los registros estadísticos son de particular valor incluyéndose el posible uso de encuestas a los agricultores de las regiones a estudiar. Por ejemplo, en el caso de nuestras zonas andinas consultar a los agricultores si en el pasado se han producido desplazamientos verticales de las áreas de cultivos o ajustes tecnológicos para enfrentar variaciones climáticas y luego buscar las estadísticas climáticas y de producción para establecer conclusiones. Proceder de manera inversa, es decir, partir de las estadísticas climáticas y luego corroborar si hubo cambios en el desarrollo de la agricultura, podría ser también un método utilizable.

Un problema que limita la validez de las conclusiones obtenidas con el método de las analogías históricas, es que las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera para el próximo siglo podrían no tener precedentes en tiempos históricos (Robock, 1989). Por otra parte, las técnicas de manejo también pudieran ser diferentes, aunque Parry y Carter (1990) proponen que las técnicas agrícolas aplicadas actualmente en áreas que tengan climas análogos a los que se esperan para otras regiones en el futuro, pueden servir de guía acerca de las posibles respuestas de los agricultores bajo condiciones de cambios climáticos. Sin embargo, también se destaca que las diferencias ambientales entre las regiones análogas, sobre todo diferencias de suelo, pueden complicar el análisis, siendo necesario aplicar técnicas de filtrado para destacar el componente climático.

### **Clasificaciones y Regionalizaciones Bioclimáticas**

Los métodos de clasificaciones y regionalización agroclimáticas podrían ser de mucha utilidad en la evaluación de los impactos de los cambios climáticos en nuestra agricultura, ya que se basan en buena medida en parámetros climáticos a partir de los cuales se pueden generar diferentes escenarios de cambios climáticos para así evaluar los impactos respectivos.

Un ejemplo de clasificación agroclimática muy conocida en Venezuela es la de balance hídrico propuesta por Thornthwaite (1948). Otro enfoque de clasificación y zonificación agrícola donde se incluyen variables climáticas y el balance hídrico es el aplicado por los investigadores del FONAIAP (véase la definición de esta metodología en Sánchez et al., 1982, y un ejemplo de aplicación para el cultivo del sorgo en Benacchio et al. 1987). Igualmente, la sección de Agroclimatología del Ministerio del Ambiente en Caracas está actualmente realizando una clasificación y regionalización agroclimática del país, también basada en gran parte en diferencias de balance hídrico, incluyendo la capacidad de predecir las variaciones de rendimientos en base a los déficits o excesos de agua.

La utilidad de la clasificación de Thornthwaite se explica por su poco requerimiento en cuanto a parámetros climáticos. Además, no exige conocer a la velocidad de viento, variable que hasta ahora no ha sido incluida en los escenarios de cambios climáticos disponibles. Por otra parte, si bien la fórmula propuesta por Thornthwaite para calcular la evapotranspiración potencial tiende a dar sobreestimaciones en las zonas intertropicales, se pueden realizar ajustes con mediciones de tinajas de evaporación y coeficientes; es decir,  $ETP(\text{ajustada}) = ETP(\text{Thornthwaite}) \times \text{coeficiente}$ ; este último con un valor menor que la unidad.

Si a los promedios mensuales precipitación y temperatura de una estación cualquiera se le aplican diferentes escenarios de cambios climáticos, podremos calcular los nuevos balances hídricos y verificar si se producen variaciones en la clasificación y regionalización actual.

En relación a la velocidad del viento, que como se señaló anteriormente aún no ha sido incluida en los escenarios de cambios climáticos disponibles, pero forma parte de los requerimientos de la clasificación y regionalización que actualmente desarrolla el MARNR, se propone realizar análisis de sensibilidad lo más detallados posibles, combinando los diferentes escenarios disponibles con aumentos y disminuciones graduales en la velocidad del viento para así ver las respuestas en la clasificación y regionalización agroclimática del país.

Finalmente, un problema que deberá ser tomado en cuenta al aplicar clasificaciones y regionalizaciones agroclimáticas para evaluar los efectos de los cambios climáticos en nuestra agricultura, es que estos métodos no consideran el impacto directo del aumento de la concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$  en los cultivos. Por ejemplo, en el caso de clasificaciones basadas en balances hídricos, se deberá tomar en cuenta que una mayor concentración de  $\text{CO}_2$  incrementa la eficiencia del uso de agua de los cultivos, con lo cual probablemente en el caso de los déficits hídricos se van a obtener sobreestimaciones si no se toma en cuenta esa variación de eficiencia.

### **Experimentos de Laboratorio**

Por lo general buscan evaluar las respuestas de los cultivos ante los efectos de variables climáticas como la radiación, la temperatura, el fotoperíodo, etc., incluyendo las respuestas a diferentes niveles de  $\text{CO}_2$  atmosférico, todo esto en condiciones lo más controladas posibles realizadas sobre todo en invernaderos y cámaras de crecimiento (incluyendo grandes fitotrones). Ejemplos de la aplicación de este tipo de enfoque al problema de los efectos de los cambios climáticos sobre diversos cultivos ha sido realizada por Idso et al. (1988), cuando evaluaron los efectos de concentraciones de 640 micro mol de  $\text{CO}_2$  por mol de aire y compararlas con el comportamiento a una concentración de 340 micro mol de  $\text{CO}_2$  por mol de aire (utilizaron cámaras de crecimiento de paredes de plástico claro y tope abierto).

En los métodos de laboratorio más que las necesidades de información lo crucial es tener a la disposición los equipos necesarios para realizar los experimentos, ya que por lo general son costosos, lo que a veces se convierte en una limitante; además, algunas condiciones ambientales los

laboratorios a veces son bastante diferentes de las que en realidad se producen en el campo, pero el grado de control de algunas variables (lo que precisamente en campo es el problema) en este caso se da de manera más adecuada.

### **Estudios de Campo**

Estudios experimentales de campo pueden servir para evaluar las posibles respuestas de cambios climáticos en la agricultura; por ejemplo, condiciones de excesos de precipitaciones se pueden inducir controlando el riego. Por otra parte, sembrando parcelas en lugares semiáridos o áridos o en la época seca, se pueden evaluar las respuestas de los cultivos ante posibles escenarios de sequía; inclusive se han realizado intentos de evaluar las respuestas de cultivos como el sorgo ante altas concentraciones de  $CO_2$  (véase por ejemplo a Takami y Bavel, 1975; este tipo de experimento es costoso a causa de lo elevado del valor actual del  $CO_2$ ).

También se pueden realizar evaluaciones donde a través de superficies interceptoras de radiación solar se analicen las respuestas ante los cambios radiativos; así mismo, escogiendo sitios ventosos se podrían analizar los efectos sobre la dinámica evapotranspirativas y comparar con el comportamiento de los cultivos en lugares menos ventosos; de la misma manera, algunos posibles efectos de cambios térmicos pueden evaluarse al seleccionar transectas altitudinales, aunque en este caso el cambio de otras variables como los suelos y la exposición pueden significar factores que impidan establecer de manera clara las relaciones entre las variaciones térmicas y las respuestas de los cultivos.

La gran utilidad de los experimentos de campo se deriva de mantener las condiciones naturales de los cultivos, pero el control de las variables climáticas en algunos casos es bastante problemático. Al igual que los experimentos de laboratorio, más que las necesidades de información los requerimientos de aplicación se asocian a la disponibilidad de ciertos equipos (sistemas de riego, simuladores de precipitación, bombonas y sistemas de fertilización con  $CO_2$ , instrumentos de medición de las respuestas de los cultivos, tractores y otros implementos para preparar los terrenos a cultivar, etc.) y del personal adecuadamente entrenado para manejar los dispositivos de medición y control de las ambientales y las respuestas de los cultivos ante dichas variables.

### **Modelos Físico-Matemáticos**

Se basan en representaciones matemáticas de ciertos principios físicos que rigen algunos fenómenos ecofisiológicos de los agroecosistemas. Estos tipos de



modelos se han aplicado al problema de los de los posibles efectos directos del incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico en las tasas de evapotranspiración, tal como fue realizado por Martin et al. (1989) para evaluar la sensibilidad de este proceso en campos de trigo (en Nebraska, EE.UU) y pastos (en Tennessee, idem.). El modelo utilizado es la conocida ecuación de Penman-Monteith (1973) que toma en cuenta tanto aspectos climáticos radiativos y advectivos como los efectos del control estomático sobre el fenómeno de la evapotranspiración.

Las necesidades de información para utilizar estos modelos pueden ser bastante exigentes por lo complejo de algunas de las fórmulas utilizadas, limitando su uso. Sin embargo, una vez que se hayan obtenidos los datos necesarios para ciertas localidades, a veces logrados a partir de experimentos de campo y/o laboratorio), los beneficios desde el punto de vista evaluativo son de importancia, ya que inclusive las ecuaciones utilizadas pueden servir para procesos de simulación.

#### **Modelos Simulación de Base Biofísica**

Junto a los modelos señalados anteriormente constituyen una de las herramientas metodológicas de mayor utilidad en la evaluación de los impactos de los cambios climáticos en la agricultura, además se agrega ahora la importante característica de que algunos modelos pueden simular procesos a nivel diario en los que no sólo se incluyen aspectos físicos sino también químicos (dinámica de nutrientes). Por otra parte, los procesos biológicos están mejor representados y permiten al investigador evaluar respuestas asociadas a fenómenos fenológicos (fases vegetativas y reproductivas) y de índole ecofisiológica como fotosíntesis, respiración, distribución de fotosintetatos y otros componentes químicos. Algunos modelos como el CERES-Maíz (Jones y Klainry, 1986) se han modificado para tomar en cuenta los efectos directos del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre los niveles de fotosíntesis (por lo general se incrementa) y la transpiración (por lo general disminuye), tal como fue aplicado por Peart et al. (1989) para el sur de los EE.UU.

Las necesidades de información requeridas para utilizar los modelos de simulación de tipo biofísico por lo general son bastante exigentes, ya que los que tienen salidas a nivel diario lógicamente necesitan datos de clima a este nivel y de variables que incluyen elementos climáticos no corrientemente medidos como la radiación solar.

En algunos de los modelos más sofisticados las exigencias en datos de suelos (sitio específicos) y de los cultivares seleccionados (características genéticas) son también de

cierta complejidad. Las ventajas se asocian a la posibilidad de evaluar gran cantidad de procesos agroecológicos importantes en sus posibles respuestas ante los cambios de clima, incluyendo la ventaja de que una vez que se hayan satisfecho los requerimientos iniciales de información se pueden realizar análisis de sensibilidad detallados.

Posibilidades de análisis regional con modelos de simulación de tipo biofísico han sido demostradas por trabajos como los de Hodges et al. (1987) para el territorio de los EE.UU y Liu et al. (1989) para el caso del Brasil. En estos dos estudios el cultivo evaluado fue el maíz y el modelo de simulación utilizado el CERES-Maíz (Jones y Kiniry, 1986).

### **Modelos Paramétricos**

Constituyen según Liverman et al. (1986) una combinación (híbridos) de modelos físico-matemáticos con modelos biofísicos y presentan la ventaja de que los requerimientos de información respecto a los modelos de base biofísica son menores, aparte de que conservan algunas propiedades útiles de los dos tipos de modelos. Los autores citados aplicaron un modelo paramétrico denominado YIELD para evaluar las respuestas productivas de cultivares de maíz en la Gran Planicie norteamericana ante posibles cambios climáticos. Este modelo fue desarrollado por Hayes et al. (1982) y simula tanto la producción del cultivo de maíz como el balance hídrico, aunque no toma en cuenta problemas de nutrientes, pestes y malezas, pero presenta la ventaja de que es independiente de las técnicas de manejo aplicadas por lo que es útil para comparaciones interregionales. Otros modelos de tipo paramétrico son el Spaw (Sudar et al., 1981; para maíz y soya) y PLANTGRO de Wenda y Hanks (1981, maíz).

### **Modelos Económicos y/o Socioeconómicos**

Una evaluación detallada del posible impacto de los cambios climáticos en la agricultura, requiere que luego de haber obtenido las respuestas productivas de los cultivos ante dichos cambios, se estudien las consecuencias que esas respuestas pueden tener en los componentes económicos y /o socioeconómicos de los sistemas agrícola. En este sentido, resulta interesante analizar las adaptaciones de manejo por parte de los agricultores, los cambios en los niveles de insumos (fertilizantes, riego, competencia por estos recursos que en el futuro se pueden volver escasos, etc), la oferta de alimentos y el impacto sobre el empleo agrícola.

Un ejemplo de aplicación de modelos económicos al problema de los impactos de los cambios climáticos en la agricultura, fue llevado a cabo por Adams et al. (1990) para el caso de

los Estados Unidos> En este estudio se estimaron los efectos que sobre los precios agrícolas; procesamiento, exportación e importación de alimentos; bienestar de agricultores y consumidores estadounidenses, podrían tener cambios climáticos que implicaran ajustes en la productividad de los principales cultivos y en la disponibilidad y demanda de recursos hídricos.

### **Juicio de Expertos**

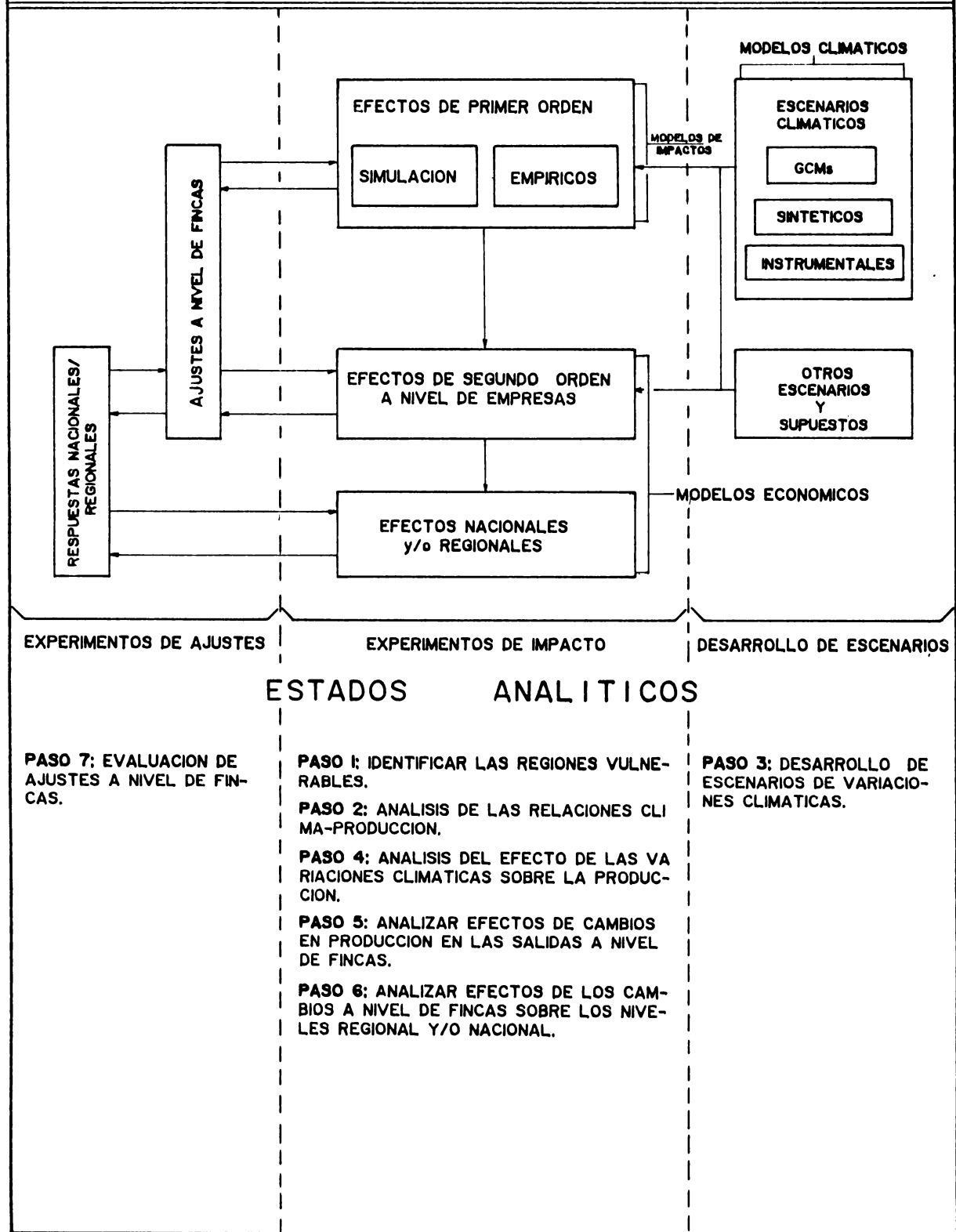
Se debe consultar la opinión de expertos agroclimatólogos acerca de las posibles respuestas de los cultivos ante cierto tipo de variaciones climáticas; así mismo la información aportada por los agricultores puede ser de utilidad. En general, este tipo de enfoque debe complementar a otro metododos de evaluación.

### **Enfoques Parcialmente Integrados**

Este tipo de metodología trata de integrar en las evaluaciones varios de los métodos señalados anteriormente, siendo Parry y Carter sus principales promotores desde 1984. Este enfoque es mejor conocido como el método adjunto (adjoint method según Parry y Carter, op. cit.) y ha sido aplicado como ya se señaló a las evaluaciones realizadas entre 1983 y 1987 en diferentes regiones del mundo por parte del IIASA y el UNEP para el Programa Mundial de Estudios sobre Cambios Climáticos (WCIP).

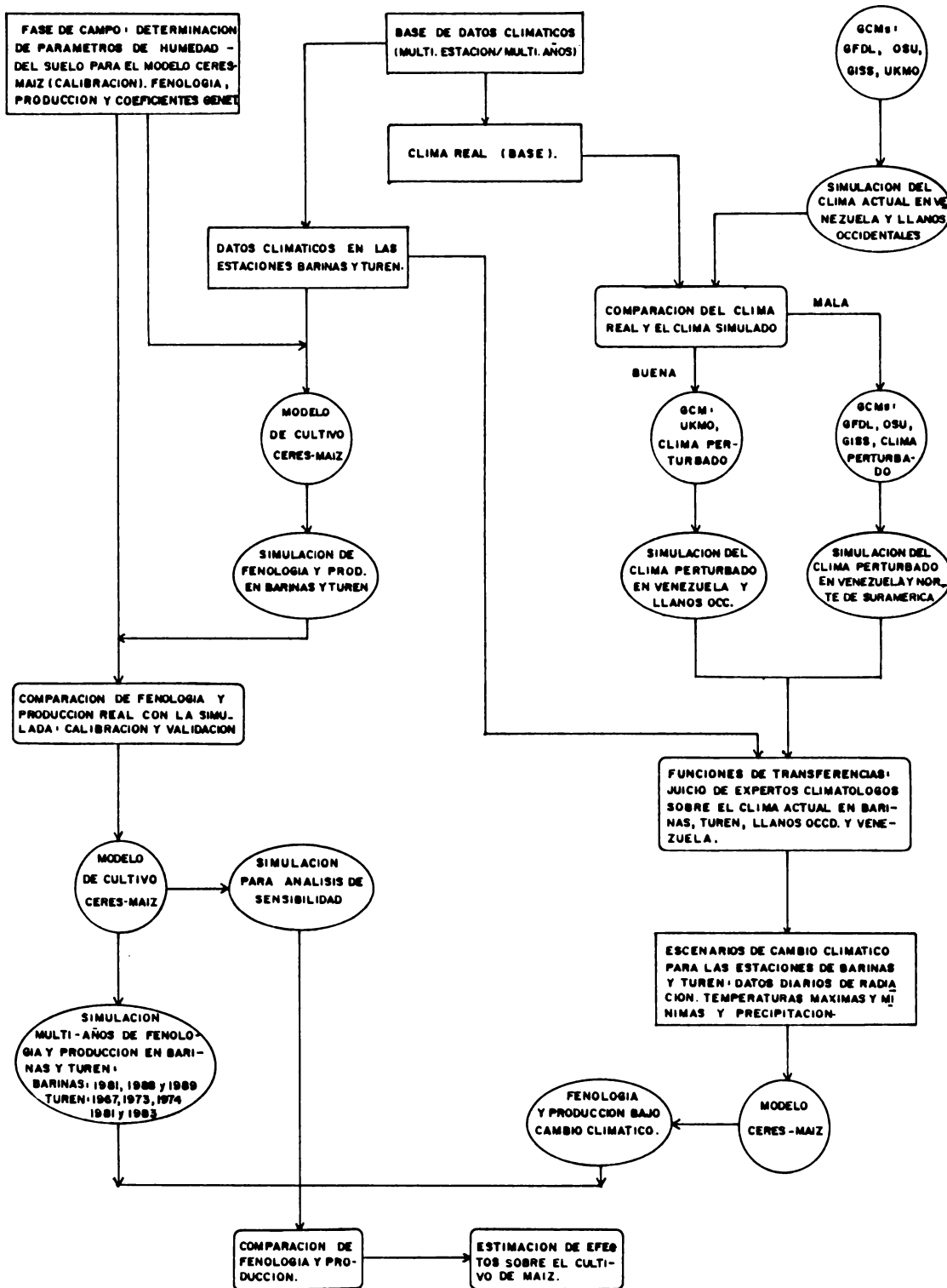
El método propuesto por Parry y Carter parte de la base de que en los sistemas agrícolas existen una serie de componentes jerarquizados que pueden responder de manera diferencial ante los cambios de clima y que interactúan entre sí. Estos componentes pueden ir desde aquellos considerados de primer orden como los que caracterizan las interacciones entre los elementos climáticos y las plantas y/o animales, pasando a través de interacciones de segundo orden a nivel de fincas, para llegar a las de tercer orden que serían los aspectos que tienen que ver con los niveles regionales y nacionales. En cada uno de estos niveles se evalúan los efectos de los cambios climáticos, iendo por supuesto en orden ascendente; por otra parte, en vez de partir de los escenarios de cambios climáticos para después evaluar sus impactos en los diferentes componentes de los sistemas agrícolas (método directo), se hace primero un análisis de la sensibilidad particular de los diferentes niveles de jerarquía en las regiones estudiadas ante la variabilidad climática y luego se definen los escenarios de cambios para así evaluar su impacto. Este método tiene la ventaja sobre el enfoque de tipo directo en que permite seleccionar para evaluación sólo aquellos sistemas agrícolas que muestren las sensibilidades mayores ante la variación del clima. En

**FIG. 3.1 TIPOS DE MODELOS Y ESTADOS DE ANALISIS EN EL ENFOQUE PARCIALMENTE INTEGRADO DE EVALUACION DE IMPACTOS DE CAMBIOS CLIMATICOS EN LA AGRICULTURA ( Parry y Carter, 1988).**



**FIGURA 3.2 METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DEL IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS SOBRE EL CULTIVO DEL MAIZ.**

BASADA PREFERENTEMENTE EN LAS PROPUESTAS DE ACKERMAN Y CROPPER (1988) Y ROBOCK (1990). CON ALGUNAS ADAPTACIONES.



general, los pasos para aplicar el método adjunto son los siguientes:

- a) Identificar las diferentes regiones y sectores vulnerables a los cambios de clima (los más sensibles);
- b) Analizar las relaciones clima-cultivos en las diferentes regiones y/o localidades identificadas en el paso anterior;
- c) Generar escenarios de cambios climáticos;
- d) Analizar los efectos de las variaciones climáticas en la producción de los cultivos;
- e) Analizar los efectos de los cambios productivos sobre las salidas a nivel de fincas;
- f) Analizar los efectos de los cambios a nivel de fincas y en los niveles regional y nacional;
- g) Evaluar los ajustes a nivel de fincas;
- h) Evaluar las respuestas a nivel de políticas agrícolas.

Cada uno de los pasos anteriores pertenecerían a categorías diferentes de acciones: el c a la generación de escenarios de cambios climáticos; g y h a lo que Parry y Carter denominan experimentos de ajustes, mientras que el resto a los experimentos de impacto.

En el esquema de la figura 3.1 se puede observar los diferentes los tipos de modelos, estados de análisis y jerarquías que conforman la metodología propuesta por Parry y Carter. Compárese dicha figura con la No. 3.2, la cual presenta un enfoque de tipo directo aplicado por Maytín (1991) para la evaluación de impactos de cambios climáticos por efecto invernadero o deforestación en la productividad del maíz híbrido PB-8 en Barinas y Turén.

En el caso de las evaluaciones de IASSA y UNEP de 1983 a 1987, se combinaron técnicas como los índices agroclimáticos, modelos de simulación de base biofísica y modelos de tipo socioeconómicos; además, también se utilizó un procedimiento que puede catalogarse como de analogías regionales, al considerar que ciertas regiones hoy en día presentan las características climáticas que se esperan para otras regiones pero bajo condiciones de cambios climáticos. En este sentido, resulta importante destacar que se analizaron las estrategias actuales de los agricultores en las regiones análogas, ya que podrían representar sugerencias de adaptación para las otras regiones; por ejemplo, las variedades de arroz cultivadas en el Japón Central se

consideran adecuadas para el norte si se produce el calentamiento por efecto invernadero tal como lo sugiere el modelo GISS; por otra parte, se asume que la productividad de las regiones análogas debiera ser igual, aunque se tienen en cuenta problemas asociados a las diferencias de suelos y técnicas de manejo, pero métodos de filtrado como los propuestos por Hagget (1964) pudieran ser de utilidad para resolverlos. Se deben estudiar también los problemas asociados con la variación de las necesidades agroecológicas en cuanto a fotoperíodo por el cambio de latitud en algunas regiones análogas, destacándose que las variedades y/o híbridos intertropicales son por lo general más exigentes en este sentido.

### **Integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Modelos de Cultivo e Imágenes de Satélites.**

Una técnica de gran utilidad para la posible evaluación de los efectos de los cambios climáticos en la agricultura, es la asociada al almacenamiento, procesamiento y mapeo simultáneo de datos espacio-temporales en forma automatizada y con posibilidad de manejarlos a través de computadoras personales (en algunos casos), lo que facilita su uso y el intercambio de información entre investigadores y planificadores. Este tipo de técnica es característica de los denominados sistemas de información geográfico (SIG).

Investigadores como Hoogemboom y Thorton (1990) plantean que el uso de sistemas de información geográfica asociados a los modelos de simulación agroecológica o a aquellos representativos de la dinámica agrícola a nivel de fincas, resulta de gran utilidad sobre todo a nivel de planificación regional y nacional. Estos investigadores realizaron un estudio para facilitar la transferencia de agrotecnología en Guatemala, que pudiera servir en parte de guía para destacar algunas aplicaciones al estudio de los efectos de los cambios climáticos. En este sentido, los datos requeridos por los modelos de simulación agroecológica y a nivel de fincas se espacializaron utilizando las bases de datos de dichos modelos para suministrar información a la base de datos de los SIG. Si se dispone de escenarios de cambios climáticos para las variables meteorológicas que requieren los modelos de cultivo, en cada áreas de interés (fincas o agrupación de éstas, cada una con sus suelos y técnicas de manejo característica) que conforman una región determinada, se pueden introducir en la base de datos de dichos modelos y evaluar las respuestas, las cuales podrán ser entonces mapeadas con el uso de los SIG.

En la figura 3.3 se puede observar el esquema de asociación presentado por Hoogemboom y Thorton (op. cit.)

entre algunos modelos de cultivos que conforman el denominado DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, el cual será descrito en detalle más adelante) y el SIG por ellos utilizado (figura adaptada de King, 1989). Se observa como la superposición de mapas individuales de suelos, clima, etc., permite definir mapas síntesis asociados a los niveles de fincas, regional y nacional.

Otro ejemplo de estudio donde se propone aplicar la integración SIG-modelos agroecológicos (para tres sectores de Puerto Rico) fue realizado por Lal et al. (1990). En este estudio se buscan integrar algunos modelos de simulación del DSSAT (cuya base de datos se refiere como se señaló a información sobre áreas que pueden ser mapeables), con un sistema experto que incluye un SIG y que da información orientada a usuarios (agricultores y planificadores agrícolas). El sistema completo resultante se denomina AEGIS (Agricultural and Environmental Geographical Information System) y tiene como objetivo generar un enfoque metodológico de tipo integrado para el esesoramiento y transferencia de tecnología agrícola, evaluación de impacto ambiental (relación con el impacto de cambios climáticos en la agricultura) y la planificación del desarrollo regional y nacional.

En la figura 3.4 se pueden observar los diferentes componentes del AEGIS, destacándose una base de datos sobre suelos, clima, cultivos y manejo; información que a su vez se utiliza para calcular para un área determinada las posibles pérdidas de suelo a través la denominada ecuación universal de la pérdida de suelos (Wishmeier y Smith, 1965). Esta base de datos se utilizaría para suministrar información al SIG correspondiente, permitiendo así el mapeo no sólo de los atributos que caracterizan las diferentes áreas en estudio, sino que se mapearían también las respuestas de interés ante el cambio de las condiciones climáticas o de otros factores afectados por dichos cambios; por ejemplo, la disponibilidad de agua en el suelo, o el cambio de la erosión potencial de este último.

La variable de mayor interés a ser mapeada para efecto de impacto agrícola de los cambios climáticos sería la producción de los cultivos, aunque se pueden mapear también otras características importantes como serían los tipos de estrategias de manejo que minimizarían los posibles efectos negativos de los cambios climáticos, tal como resultaría de mapear para cada área en estudio las densidades de siembra que minimicen los posibles efectos negativos de un menor nivel de radiación solar a causa del incremento de nubosidad en un mundo bajo el efecto invernadero, como ya se ha propuesto en el capítulo asociado a los escenarios de cambios climáticos más probables para



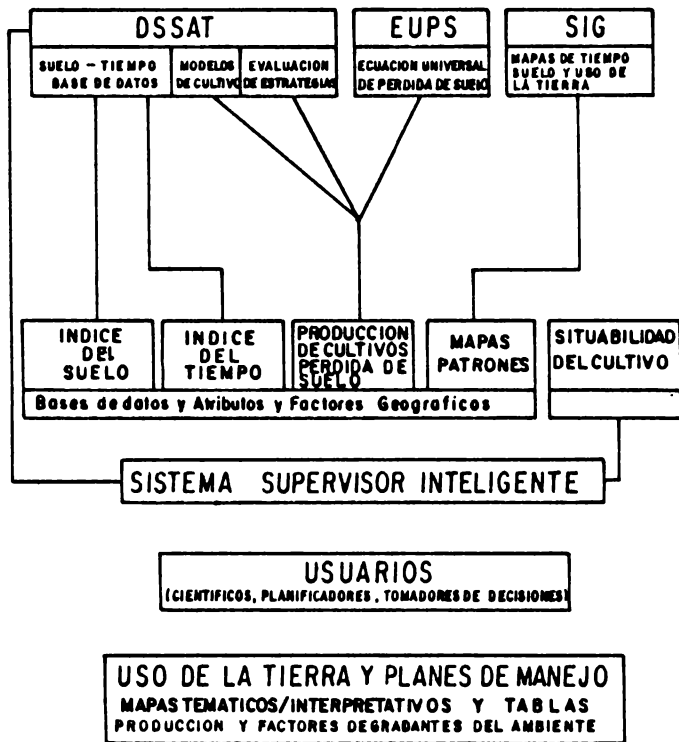


FIGURA 3.3  
 ESQUEMA DEL SISTEMA REGIONAL DE PLANIFICACION  
 Y EVALUACION DE POLITICAS AEGI  
 FUENTE: LAL et al 1990

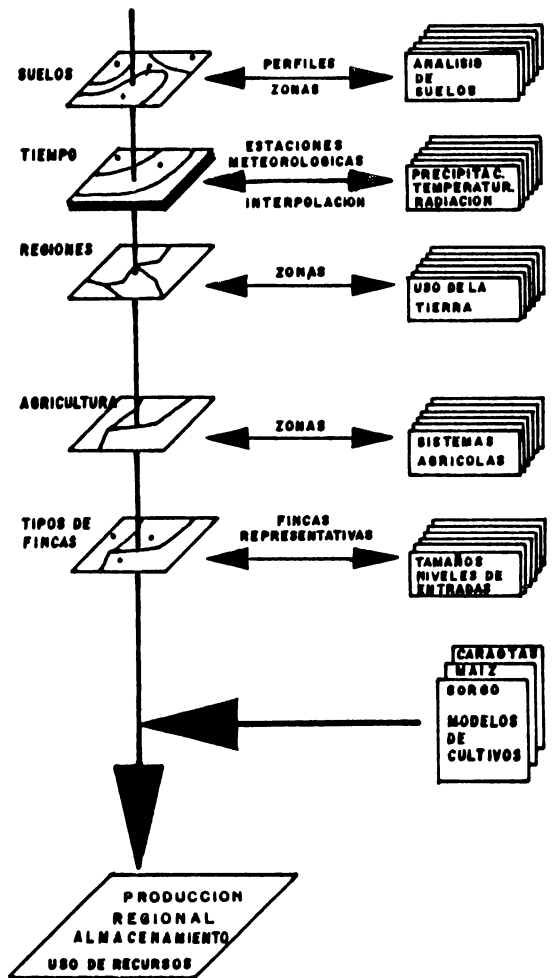


FIGURA 3.4  
 INTEGRACION DE UN SISTEMA DE INFORMACION  
 GEOGRAFICA AGRICOLA Y MODELOS DE SIMULACION  
 FUENTE: HOOGENDOORN Y THORNTON, 1990

nuestro país.

En general, el uso de SIG permitiría realizar procesos de modelaje de las respuestas espacio-temporales de los atributos de los sistemas agrícolas ante los diferentes escenarios de cambios climáticos, al poder producirse una secuencia de mapas que muestren esas respuestas.

Se debe considerar también la posibilidad de utilizar la valiosa información agroecológica contenida directamente o extraíble en forma indirecta de las imágenes de satélites como el LANDSAT (norteamericano) y el SPOT (francés), sobre todo con la finalidad de alimentar la base de datos del binomio SIG-Modelo de Cultivo. Esto resultaría de gran utilidad, en especial al utilizar la información satelitaria proveniente de imágenes tomadas en años o períodos que se consideren representativos de las posibles condiciones climáticas futuras en nuestro país y sus diversas regiones (método de las analogías históricas); por ejemplo, años pluviosos y de baja radiación, o años muy cálidos, como analogía para el efecto invernadero; años cálidos de poca precipitación y de alta radiación solar, es decir, condiciones de sequía, como analogía de cambios climáticos por efecto de la deforestación de bosques intertropicales.

Otra utilidad que se derivaría de utilizar información contenida en imágenes de satélites, es la relativa a la necesidad de probar el grado de exactitud de las predicciones de los modelos de cultivo (y en consecuencia útil para procesos de calibración), ya que se podrían comparar las respuestas agroecológicas de los cultivos, tal como se desprende del análisis de la información de esas imágenes con las propuestas por dichos modelos. Este tipo de enfoque ha sido sugerido y aplicado por investigadores como Andresen et al. (1989), a través de la utilización de los denominados índices de vegetación (VIs), para lo cual se analizaron datos de sensores remotos instalados en satélites meteorológicos (NOAA/AVHRR) y así obtener información acerca de los cambios temporales de biomasa en cultivos de maíz en los estados de Iowa, Illinois e Indiana (Cornbelt, USA), los cuales fueron posteriormente comparados con los estimados propuestos por el modelo de simulación CERES-Maíz.

Otro tipo de información de interés agroecológico que se puede obtener al utilizar los índices de vegetación, se refiere al índice de área foliar (LAI), porcentaje de cobertura de biomasa al suelo y contenido de humedad en este último. Por ejemplo, los índices de vegetación más simples, como los asociados al brillo en ciertas bandas simples del MSS (LANDSAT), presentan alta correlación con algunas de las características que se acaban de señalar, tal como es el caso de la banda 6 (MSS6) y el índice de área

foliar ( $r = 0.88$ ). Índices más complejos como los que resultan de dividir bandas diferentes ("band rationing") de las imágenes MSS o del mapeador temático (TM) del LADNSAT, han sido utilizados para monitorear los cambios espacio-temporales de cobertura vegetal (aplicable a cambios de cobertura de cultivos). Inclusive, NOAA produce un mapa hemisférico (ambos hemisferios) basado en estos índices de vegetación que pudieran ser de utilidad para estudios a nivel de grandes regiones como los llanos, áreas montañosas, etc..

Para el caso venezolano, la integración de la información proveniente de imágenes de satélites en un sistema de información geográfica, ya ha sido llevada a cabo en varios estudios realizados por el CPDI (Instituto de Ingeniería. En este caso el sistema de información geográfico utilizado es el ARCINFO, por lo cual ya existe personal entrenado en su uso, lo que facilitará su implementación en estudios de evaluación del impacto agrícolas por cambios climáticos. Por otra parte, este fue el SIG utilizado en las investigaciones anteriormente citadas sobre la integración SIG-Modelos de Cultivos, experiencia que deberá ser aprovechada.

#### **Necesidad de Combinar las Metodologías Descritas**

Dado que cada una de las metodologías descritas presenta ventajas y desventajas para su aplicación en las evaluaciones de impacto de cambios climáticos en los sistemas agrícolas, se considera que la mejor opción es aplicar un enfoque que trate de integrarlas, lo que pudiera ser de utilidad si se considera que de acuerdo a las regiones del país donde se vayan a implementar las evaluaciones, existirán diferencias en la disponibilidad de datos para aplicarlas. Es decir, en cada región la metodología que en principio se debería aplicar sería aquella para la cual existe la mayor cantidad y calidad de datos disponibles, por lo menos hasta que sea llevado a cabo un proceso de investigación con el fin de generar la información faltante para la aplicación de las metodologías más sofisticadas como las asociadas al uso de los modelos de simulación.

### 3.2.- AREAS Y CULTIVARES REPRESENTATIVOS

Tal como lo destacan expertos de la agricultura venezolana (Segnini, 1978; Eder y Avilán, 1986), nuestro país presenta una amplia gama de tipos de aprovechamiento agrícola, que van desde agricultura aborigen de subsistencia (policultivos) basada en conucos migratorios que se localizan preferentemente al sur del río Orinoco, hasta sistemas de explotación netamente comerciales basados en el modelo agrícola norteamericano, cuyo ejemplo más representativo en Venezuela son los cultivos anuales mecanizados (en especial los cereales: maíz, arroz, sorgo), que se desarrollan en las regiones llaneras occidental, central y oriental.

A nivel general en Venezuela se podrían identificar según Eder y Avilán (op. cit) por lo menos 11 regiones agrícolas (figura 3.5), cada una con sus peculiares condiciones agroecológicas y cultivos característicos, lo que nos da una idea de la complejidad de los patrones espaciales de nuestra agricultura. Una síntesis de la distribución de los principales grupos de cultivos en Venezuela sería:

a) Los cereales (maíz, arroz y sorgo) y las oleaginosas como el ajonjolí, algodón y maní, son cultivados preferentemente en las regiones llaneras;

b) La horticultura se desarrolla sobre todo en las regiones andina (hortalizas de piso alto, altura mayor de 400 msnm: remolacha, lechuga, espinaca, ajo porro, coliflor, apio, repollo, ajo, acelga) central, Lara-Falcón y en menor grado en la región Oriental (sobre todo hortalizas de piso bajo: en especial tomate, cebolla y pimentón);

c) Las raíces y tubérculos más importantes son la yuca y la papa. La primera se cultiva especialmente en las regiones andina y Lara-Falcón (Lara), mientras que la yuca se cultiva preferentemente en Guayana

d) De las leguminosas la caraota y el frijol son las más importantes, la primera se cultiva sobre todo en las regiones Lara-Falcón (Lara), Central (Miranda y Aragua) y llanera (Guárico, Portuguesa, Cojedes y Monagas), mientras que el frijol se cultiva más en la región llanera (Guárico, Cojedes y Apure).

e) Los cultivos de plantación, de los cuales el café, la caña de azúcar, el plátano, el cacao y el coco son los más importantes, se desarrollan en las regiones andinas (café, caña de azúcar, plátano), central (café, cacao, coco), oriental (café, cacao, coco), Lara-Falcón (caña de azúcar) y zuliana (plátanos, cacao); otros cultivos de plantación son el merey (región Guayana) la piña y el sisal (región Lara-

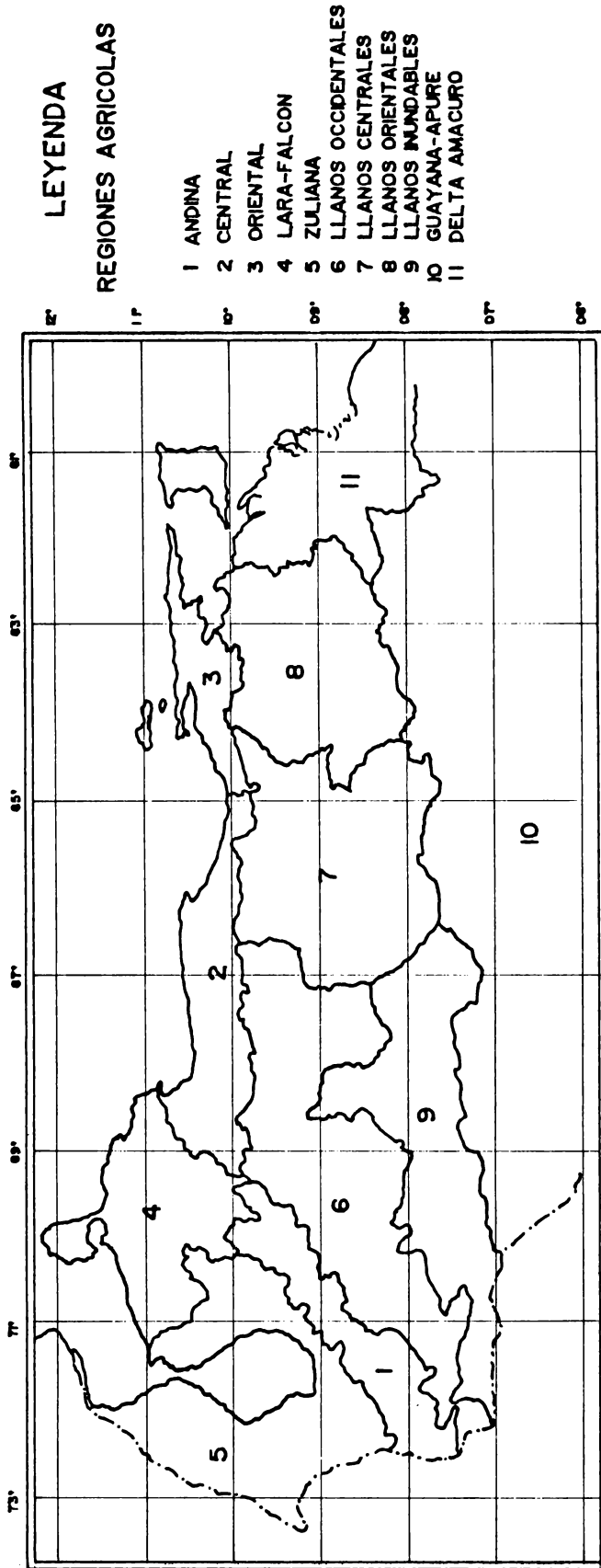


FIGURA 3.5 REGIONES AGRICOLAS DE VENEZUELA SEGUN EDER Y AVILAN (1986)

Falcón), agregándose en los últimos años la palma africana (oleaginoso, región zuliana);

f) Los frutales son importantes en las regiones central, oriental, zuliana y Lara-Falcón;

A causa de la complejidad espacial antes mencionada y de la misma falta de conocimiento acerca de las relaciones clima-suelo-cultivo en algunos rubros agrícolas, se hace compleja la evaluación del posible impacto de los cambios climáticos en nuestra agricultura, más si se considera que las investigaciones en este campo están comenzando en Venezuela. En consecuencia, se seleccionaron áreas y cultivares representativos tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Situación agrícola venezolana durante la década del 80 y comienzos del 90 en cuanto a superficie cosechada, cantidad y valor de producción, aportes nutricionales de los cultivos a la población venezolana (Hoja de Balance de Alimentos del Instituto Nacional de Nutrición) y animal;

- Necesidades futuras de superficie a cultivar, producción y aportes nutricionales, según lo estipulado en el Plan Agrícola a largo plazo de MAC-MARNR-CORDIPLAN (1983);

- Información acerca de los cultivos, incluyendo existencia o no de modelos de simulación y conocimiento sobre rango de condiciones agroclimáticas de desarrollo óptimo, así como existencia de estaciones climatológicas cercanas a las áreas seleccionadas.

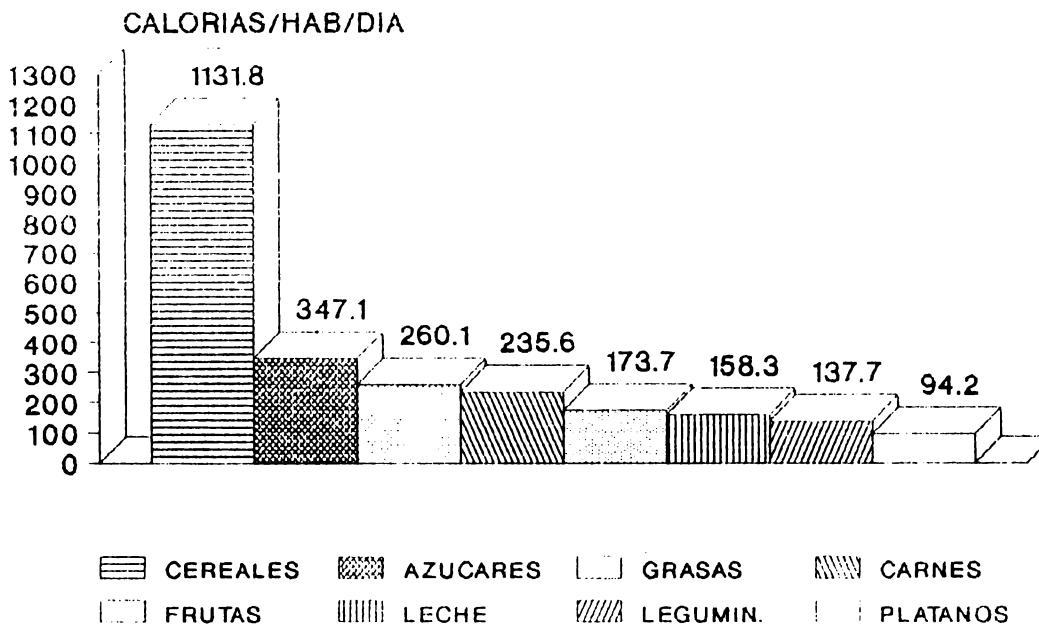
- Que de cada una de las 11 regiones agrícolas de la fig. 3.5 se seleccione por lo menos un cultivar y área representativo.

### **Cereales**

Según el Instituto Nacional de Nutrición y la Fundación Polar (1988) los cereales constituyen en nuestro país la fuente más importante de calorías y proteínas en la dieta promedio del venezolano, importancia que debería mantenerse por lo menos hasta el año 2010 según el Plan Agrícola a Largo Plazo propuesto en 1983 por MAC-MARNR-CORDIPLAN (véase las figuras 3.6 y 3.7).

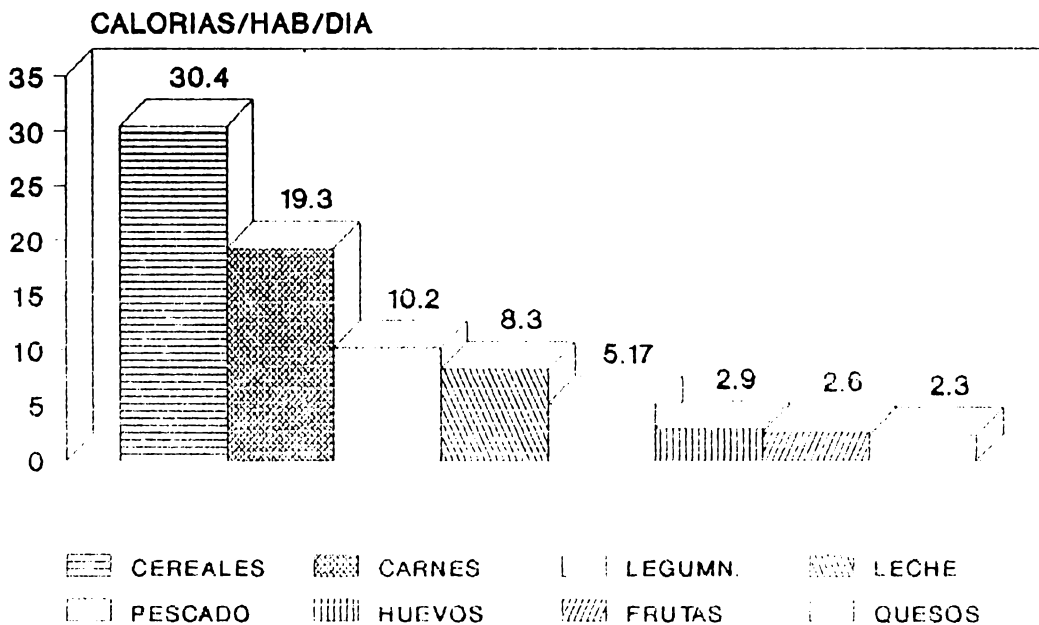
Durante el período 1985-88 la mayor superficie cosechada correspondió a los cereales; por otra parte, durante 1986-88 generaron el mayor valor de producción (figs. 3.8 y 3.9 respectivamente). Este comportamiento se mantuvo para el año de 1990 de acuerdo las cifras aportadas por el Ministerio de Agricultura y Cría (MAC, Memorias y Cuentas, 1991). Por otra parte, los cereales entre 1986 y 1988 fueron segundos después

**FIG. 3.6 VENEZUELA. CALORIAS PARA CONSUMO HUMANO SEGUN GRUPOS DE ALIMENTOS AÑO 2010**



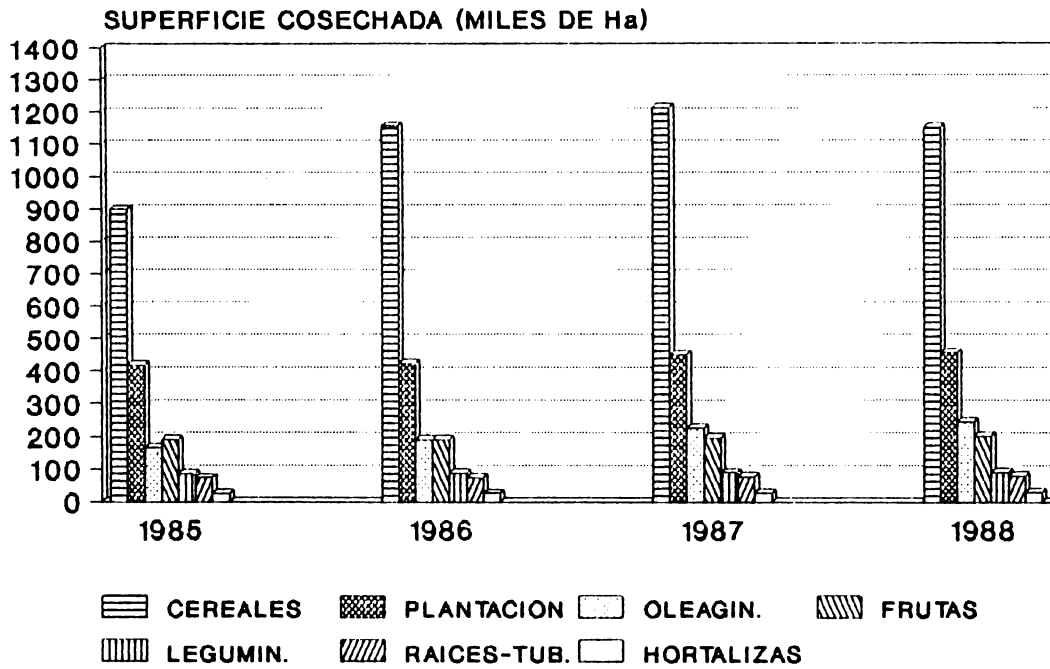
FUENTE: MAC-MARNR-CORDIPLAN (1983)

**FIG. 3.7 VENEZUELA. PROTEINAS PARA CONSUMO HUMANO SEGUN GRUPOS DE ALIMENTOS AÑO 2010**



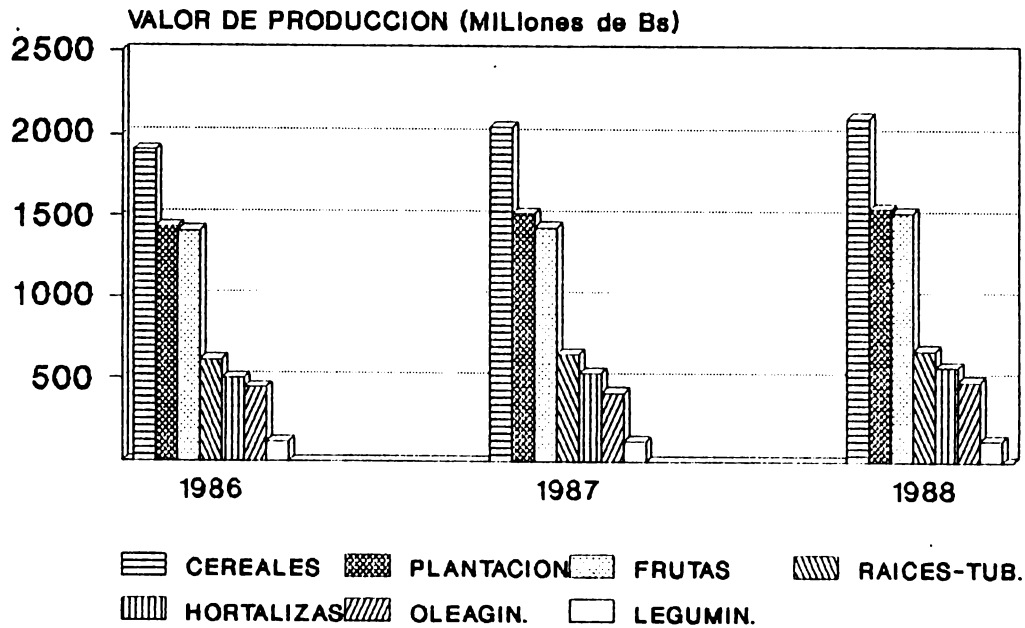
FUENTE: MAC-MARNR-CORDIPLAN (1983)

**FIG. 3.8 VENEZUELA. SUPERFICIE COSECHADA SEGUN GRUPOS DE CULTIVOS. PERIODO 1985-1988**



FUENTE: OCEI, ANUARIO ESTADISTICO (1988)

**FIG. 3.9 VENEZUELA. VALOR DE PRODUCCION SEGUN GRUPOS DE CULTIVOS. PERIODO 1986-88 (PRECIO DE 1978)**



FUENTE: OCEI, ANUARIO ESTADISTICO (1988)



de los cultivos de plantación en cuanto a producción bruta (fig 3.10), habiendo destacado dentro de los cereales el maíz, por lo menos entre 1985 y 1990 (fig. 3.11).

Si se consideran los estimados sobre necesidades de superficie de cultivo y producción para el año 2010 según el plan agrícola citado anteriormente, el maíz, el arroz y el sorgo vuelven a ser considerados de primera importancia, ya que serían los rubros que como en la actualidad ocuparían mayor espacio (fig, 3.12) y después de los cultivos de plantación generarían la mayor producción (fig. 3.13).

Se debe destacar que Marín et. al (sin fecha, citado por León, 1983) alertan sobre el hecho de que para el año 2000 la demanda de tierras para cultivos de cereales se acercará a la oferta disponible, por lo cual la necesidad de investigar el posible impacto de cambios climáticos en los cereales se ve reforzada.

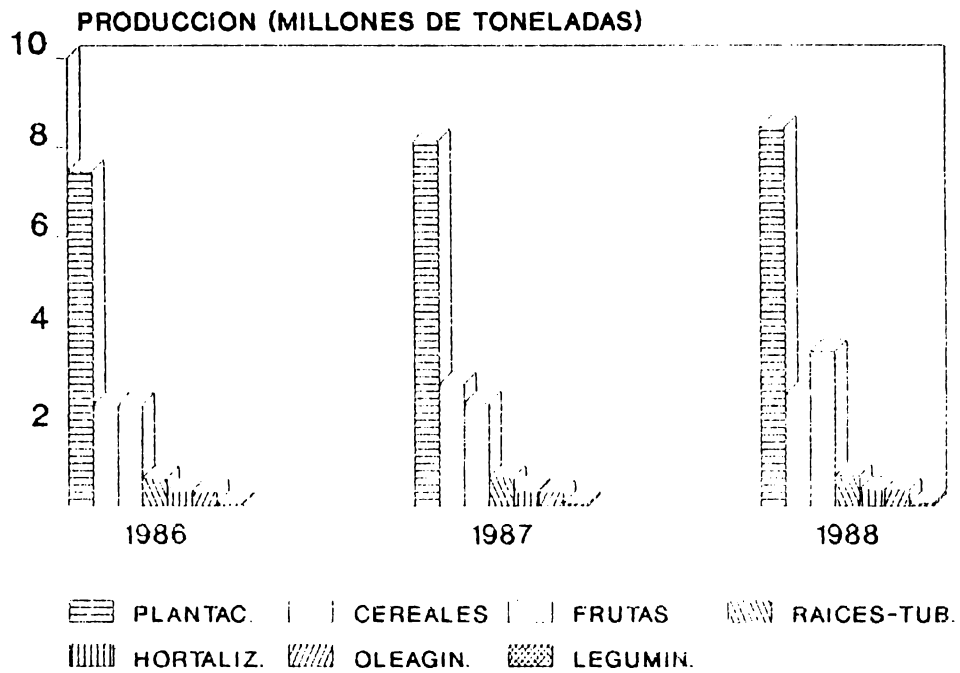
Podemos concluir que en nuestro país los cereales como el maíz, el arroz y el sorgo constituyen rubros básicos, tanto por su importancia actual como por los estimados futuros de necesidades para suplir la demanda de alimentos para consumo humano o animal. Esto nos lleva a seleccionarlos como cultivos prioritarios para fines de evaluación de impacto por cambio climático; además, a nivel general se conocen bastante bien sus necesidades agroclimáticas y ya tienen desarrollados modelos de simulación de tipo biofísico, en especial el maíz (CERES-Maíz, Jones y Kiniry, 1986) y el arroz (CERES-Rice, Godwin et al., 1990); para sorgo existe el modelo CERES-Sorghum (Ritchie et al., 1989).

~~En el caso específico del trigo,~~ Si bien la producción de trigo en Venezuela no es importante su consumo si lo es. En este sentido, se deberían analizar las implicaciones que para Venezuela tienen los resultados de las investigaciones sobre efectos de cambios climáticos en dicho cultivo que se realicen en los principales países productores a nivel mundial, de manera tal que se puedan tomar previsiones para facilitar nuestro acceso a los mercados.

#### **Areas Representativas para Cereales**

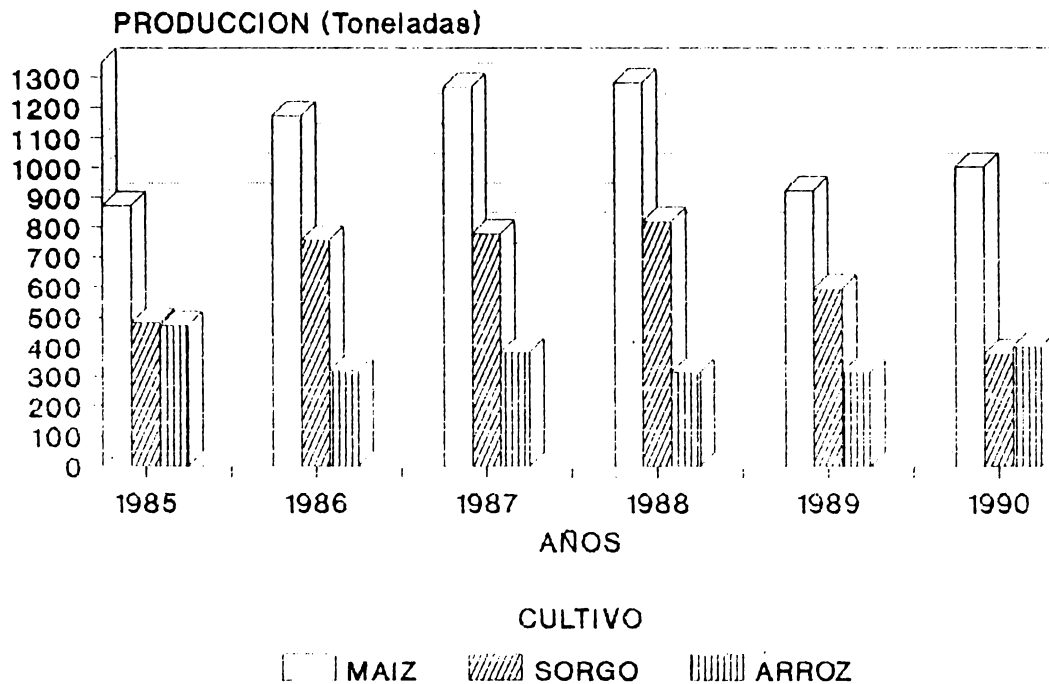
Según la OCEI (1988) para el período 1984-85 las entidades federales que más superficie cosecharon de cereales fueron Portuguesa (arroz, maíz y en menor proporción sorgo), Guárico (maíz, sorgo y arroz), Cojedes (superficie cosechada parecida de arroz, maíz y sorgo) y Barinas (sobre todo maíz y sorgo). En el caso específico del maíz hay que destacar que el estado Bolívar para 1984-85 fue la tercera entidad en cuanto a superficie cosechada después de Guárico y Portuguesa (Barinas fue cuarto; véase la tabla 3.4).

**FIG. 3.10 VENEZUELA. PRODUCCION SEGUN GRUPOS DE CULTIVOS. PERIODO 1986-1988**



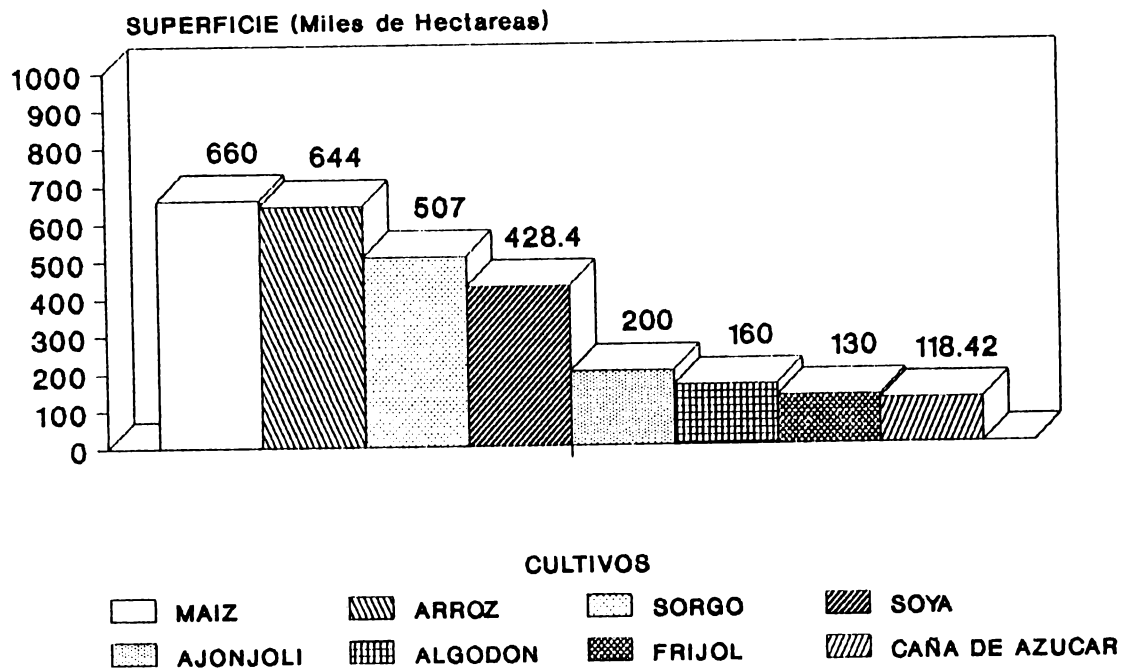
FUENTE: OCEI, ANUARIO ESTADISTICO (1988)

**FIG. 3.11 VENEZUELA. PRODUCCION DE MAIZ, ARROZ Y SORGO. PERIODO 1985-90**



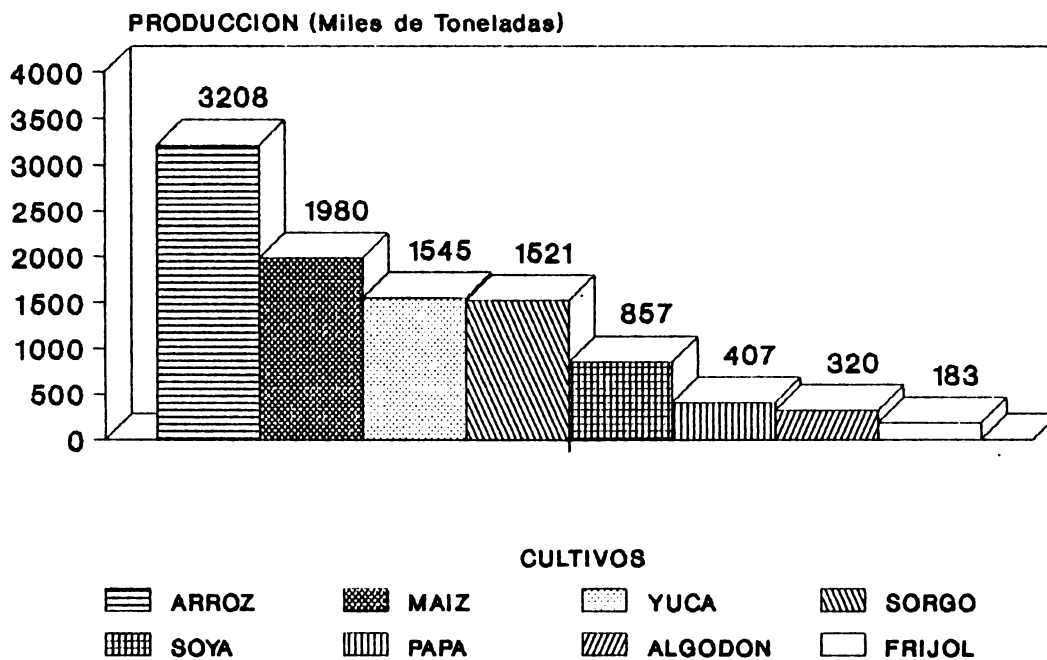
FUENTE: MAC (1990), MEMORIAS Y CUENTAS.

**FIG. 3.12 NECESIDAD DE SUPERFICIE PARA CULTIVOS EN EL AÑO 2010 EN VENEZUELA**



FUENTE: MAC (1983), CUADRO 8.3.5.

**FIG. 3.13 VENEZUELA. METAS DE PRODUCCION PARA ALGUNOS CULTIVOS. AÑO 2010**



FUENTE: MAC (1983), CUADRO 8.3.3.

Tabla 3.4  
Superficie Cosechada (Ha) de Maíz, Arroz y Sorgo para  
1984-85 en los Principales Estados Cerealeros de Venezuela

Entidad Federal	Maíz	Arroz	Sorgo
Guárico	203.933	38.156	198.327
Portuguesa	103.983	157.076	74.976
Cojedes	25.540	25.794	25.030
Barinas	48.371	5.849	24.007
Monagas	39.090	46	18.419
Bolivar	49.805	1.123	4.048
<b>Total</b>	<b>470.772</b>	<b>228.044</b>	<b>334.807</b>

Fuente: V Censo Agrícola (OCEI, 1988)

Para el año de 1990 el estado Guárico siguió siendo la principal entidad federal en cuanto a superficie cosechada de maíz y sorgo y la segunda en arroz, ya que para este último cultivo fue el estado Portuguesa el de mayor superficie cosechada (véase la tabla 3.5).

Tabla 3.5  
Superficie Cosechada (Ha) de Maíz, Arroz y Sorgo para  
1990 en los Principales Estados Cerealeros de Venezuela

Entidad Federal	Maíz	Arroz	Sorgo
Guárico	147.540	55.574	88.270
Portuguesa	104.000	63.050	12.602
Cojedes	15.930	4.944	10.185
Barinas	65.483	2.713	7.517
Monagas	33.020	-	10.007
Bolivar	20.979	-	8.601
Yaracuy	23.527	-	1.759
Aragua	17.959	-	12.774
<b>TOTAL</b>	<b>428.438</b>	<b>126.281</b>	<b>151.715</b>

Fuente: MAC, Oficina Sectorial de Planificación, Oficina Sectorial de Planificación, Dirección de Estadística (Sistema de Control y Coyuntura, 1990).

Algunas áreas en las que se podrían implementar las evaluaciones iniciales de los posibles efectos de los cambios climáticos en los tres principales cereales del país, son las siguientes:

Estado Guárico: a) al sur del Sistema de Riego del Río Guárico, en localidades como Guariquito y Camaguán, sobre todo para arroz, presentándose la ventaja de que existe una

estación agroexperimental del FONAIAP relativamente cercana, con estación climatológica principal (en Calabozo); b) eje El Sombrero-Valle de La Pascua-Tucupido-Zaraza, sobre todo para maíz y sorgo;

Estado Portuguesa: a) Colonia Agrícola de Turén para arroz y maíz (existe estación agroexperimental del FONAIAP con estación climatológica principal); b) eje Acarigua-Araure para sorgo; sur-este del estado para arroz;

Estado Cojedes: a) área entre San Carlos, Libertad, El Amparo, Cojedes y Apartaderos, para maíz y sorgo; se localiza cercano el sistema de riego Cojedes basado en el embalse de Las Majaguas (localizado en el sector limítrofe nor-este del estado Portuguesa con el estado Cojedes); sur del estado para arroz;

Estado Barinas: a) área entre la ciudad de Barinas, Obispos, Sabaneta y Mijagual para maíz y sorgo; b) áreas al sur de la ciudad de Barinas, adyacentes a carretera que va a Torunos y San Silvestre, para maíz, sorgo y arroz (existe estación experimental FONAIAP relativamente cercana); nor-oeste del Distrito Arismendi (limítrofe con el sur de los estados Portuguesa y Cojedes) para arroz;

Estado Monagas: área entre Maturín, Santa Bárbara, Aragua de Maturín y Quiriquire para maíz y sorgo;

Estado Bolívar: a) áreas cercanas al centro poblado de La Paragua para maíz (existe estación climatológica principal cercana manejada por EDELCA).

### **Plantaciones**

Después de los cereales el grupo de cultivo al que se le dedica más superficie y genera mayor valor de producción es el de las plantaciones (figuras 3.8 Y 3.9 respectivamente); además, como ya se señaló, es el que aporta la mayor producción bruta en Venezuela (figura 3.10), destacándose la caña de azúcar.

La caña de azúcar es un cultivo básico en nuestro país ya que es la principal fuente de materia prima para la producción de azúcar, renglón de consumo diario en la dieta de gran parte de la población venezolana, aportando parte importante de las calorías, ya que en este sentido es después de los cereales (maíz y arroz) el segundo rubro en importancia, jerarquía que debería conservar para el año 2010 según el plan a largo plazo ya citado (figura 3.6).

Otro cultivo de plantación importante en Venezuela es el café, ya que junto a la caña de azúcar generan dentro de

su grupo más del 50% de valor de producción (unos 670 y 550 millones de Bs respectivamente); así mismo, el plátano generó para 1988 unos 227 millones de bolívares.

En el caso del café si bien no es un producto que sea necesario para la alimentación de la población, su consumo es tradicional y es bastante característico de la región andina. El plátano es otro rubro alimenticio de amplio consumo por parte de nuestra población.

#### Áreas Representativas para Cultivos de Plantación

La entidad federal que más produce caña de azúcar en Venezuela es Yaracuy, con unas 30.144 hectáreas cosechadas para 1984-85, siguiendo los estados Portuguesa, Lara y Aragua con unas 23.234, 13.172 y 6856 hectáreas cosechadas respectivamente. Entre los cuatro estados citados cosecharon 73.406 hectáreas para 1984-85, lo que representa un 66.1% respecto al total nacional que fue de unas 110.304 hectáreas.

Las localidades seleccionadas para las evaluaciones en caña de azúcar son las siguientes:

Estado Yaracuy: Yaritagua, área que cuenta con estación del FONAIAP; además, relativamente cercana se encuentra la estación agroexperimental del Central Matilde.

Estado Portuguesa: a) Acarigua-Araure, b) Guanare.

Estado Lara: a) Valle del Río Turbio.

Estado Aragua: a) área entre San Mateo y El Palmar (cercano se encuentra el Central El Palmar); b) estación experimental de la Facultad de Agronomía de la UCV.

En el caso del café los estados más productores son Táchira, Trujillo, Mérida y Lara en el occidente de Venezuela, siendo la selección de áreas la siguiente:

Estado Táchira: Bramón (cuenta con estación del FONAIAP).

Estado Trujillo: a) Trujillo, b) Boconó-Niquitao.

Estado Mérida: Santa Cruz de Mora.

Estado Lara: Anzoátegui-Guárico.

En cuanto a los plátanos el principal productor en el país es el estado Zulia, donde constituye el rubro agrícola que genera mayor valor de producción. El área seleccionada en este caso es la zona sur del Lago de Maracaibo.

## **Oleaginosas**

Entre 1985 y 1986 el grupo de oleaginosas, cuyos cultivos principales en Venezuela son el ajonjolí, el algodón y maní, presentó la mayor superficie cosechada después de los cereales y los cultivos de plantación (figura 3.8). En el caso del algodón y el maní hay que destacar que poseen modelos de simulación: para algodón el modelo COTTAM, Jackson et al., 1988; mientras que para maní el modelo PNUFGRO, Boote et al., 1989.

Según la figura 3.12 para el año 2010 oleaginosas como el ajonjolí y el algodón deberían demandar la mayor superficie de cultivo después de rubros como el maíz, el arroz, el sorgo y la soya.

A nivel de valor de producción el algodón para el año 2010 debería ser el séptimo cultivos, después del arroz, el maíz, la yuca, el sorgo, la soya y la papa (figura 3.13). El maní tiene menor importancia a nivel nacional, aunque si es el principal rubro en Mesa de Guanipa, estado Anzoátegui.

### **Áreas Representativas para Oleaginosas**

El estado Portuguesa es el principal productor de ajonjolí del país, habiendo concentrado entre 1984-85 un 85.4% de la superficie cosechada a nivel nacional (unas 106.772 hectáreas) y constituyendo el segundo producto agrícola en cuanto a valor de producción en dicho estado. El área seleccionada es la Colonia Agrícola de Turén.

En el caso del algodón la producción se concentra en el estado Barinas, representando junto al sorgo los cultivos que generan el mayor valor de producción en dicho estado. El área seleccionada para evaluación es una especie de triángulo en cuyos extremos se localizan la ciudad de Barinas y los centros poblados de Sabaneta y Libertad. El maní se cultiva casi en su totalidad en la Mesa de Guanipa, estado Anzoátegui, por lo cual se selecciona dicha localidad, la que además cuenta estación agroexperimental del FONAIAP.

## **Leguminosas**

Después de los cereales y las carnes las leguminosas constituyen la principal fuente de proteínas en la dieta de la población venezolana; inclusive, para el 2010 deberían superar a las carnes respecto a dichos aportes (figura 3.7).

Las leguminosas más importantes en Venezuela son la caraota y el frijol, aunque también se cultivan el quinchoncho y las arvejas (tabla 3.6).

Tabla 3.6  
Cantidad (Ton.) y Valor de Producción (miles de Bs.) de  
las Leguminosas en Venezuela Durante el Período 1986-1988

Leguminosa	1986		1987		1988	
	Prod.	Valor	Prod.	Valor	Prod.	Valor
Caraota	29.599	79.325	30.697	82.268	31.376	84.088
Frijol	9.948	25.170	11.270	28.412	11.986	30.217
Quinchoncho	4.791	9.582	5.161	10.322	5.326	10.652
Arveja	1.655	3.730	1.683	3.770	1.819	4.075
Totales	46.039	117.807	48.811	124.772	50.507	129.032

Fuente: (OCEI, Anuario Estadístico de Venezuela, 1988)

En el caso específico de la caraota hay que agregar que se dispone de un modelo de simulación de tipo biofísico (BEANGRO; Hoogemboom et al., 1987).

En relación a la soya, para el año 2010 vendría a ser el segundo en cuanto a valor de producción (figura 3.14), el cuarto cultivo en importancia tomando en cuenta la demanda de superficie después del maíz, arroz y sorgo (figura 3.12) y el quinto respecto a producción bruta (figura 3.13). Un aspecto que facilitaría la evaluaciones en el cultivo de la soya es que tiene desarrollado un modelo de simulación de tipo biofísico (SOYGRO; Wilkerson et al., 1983 y 1985).

#### Áreas Representativas para Leguminosas

Los estados Lara, Guárico, Miranda y Aragua cosecharon la mayor cantidad de caraotas entre 1985 y 1987 (tabla 3.7).

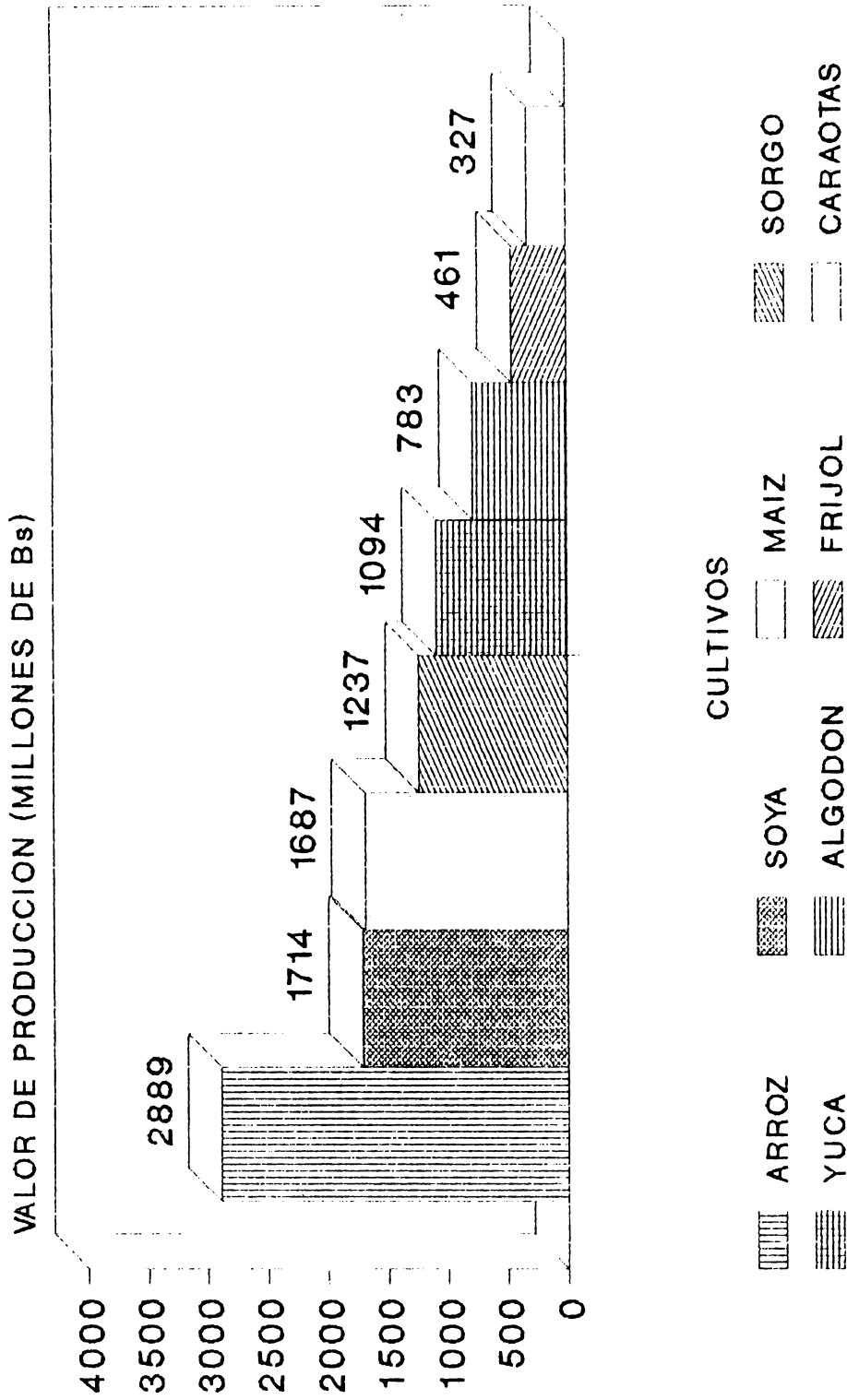
Tabla No. 3.7  
Superficie Cosechada (Ha) y Producción (Ton) de  
Caraotas en los Principales Estados Productores

ESTADO	1985		1986		1987	
	SUP.	PROD.	SUP.	PROD.	SUP.	PROD.
Lara	1.190	2.106	1.362	647	6.406	3.606
Guárico	865	502	381	226	4.310	2.441
Miranda	1.798	938	2.345	1.230	4.220	2.217
Aragua	1.575	1.528	0	0	3.860	4.631
Subtotales	5.428	5.074	4.088	2.103	18.796	12.895
Total Nac.	12.749	8.320	13.206	8.763	30.233	20.512

Fuente: MAC, Oficina de Planificación del Sector Agrícola, División de Informática e Información.



FIG. 3.14 VENEZUELA. VALOR DE LA PRODUCCION PARA ALGUNOS CULTIVOS. AÑO 2010



FUENTE: MAC-MARNR-CORDIPLAN (1983)

Las áreas seleccionadas para las evaluaciones son:

Estado Lara: Valle del Río Turbio.

Estado Guárico: a) Calabozo, b) Altagracia de Orituco.

Estado Aragua: falta por seleccionar

Estado Miranda: falta por seleccionar

La soya no ocupa todavía extensiones importantes en el país, pero el MAC está tratando de promover su desarrollo en Yaracuy, Anzoátegui, Barinas y Guárico (MAC, Memorias y Cuentas, 1990). En este caso las áreas seleccionadas son:

Estado Yaracuy: Valles de los ríos Aroa y Tocuyo.

Anzoátegui: sur del estado

Barinas: área comprendida entre la ciudad de Barinas y Paguey al norte y Torunos-San Silvestre al sur.

Guárico: Calabozo

#### Raíces y Tubérculos

Las raíces y tubérculos, después de los cultivos de plantación, los cereales y los frutales, constituyen el grupo de alimentos de origen vegetal que generaron el mayor valor y volumen de producción en Venezuela durante el período 1986-88 (figuras 3.9 y 3.10). Por otra parte, según el INN y la Fundación Polar (op. cit) representan después de los cereales, los azúcares y la leche y sus derivados, la principal fuente de calorías a nuestra población. De las raíces y tubérculos cultivados en Venezuela destacan la yuca y la papa al comparar con ocumo y ñame (tabla 3.8).

Tabla 3.8

Volumen (Ton) y Valor de Producción (miles de Bs) de Raíces y Tubérculos en Venezuela Durante el Período 1986-1988

Rubro	1986		1987		1988	
	Vol.	Prod.	Vol.	Prod.	Vol.	Prod.
Yuca	312.909	221.540	317.776	224.985	327.648	231.975
Papa	196.349	177.303	215.849	194.912	221.236	199.776
Ocumo	47.086	97.562	51.553	106.818	54.758	113.459
Ñame	36.616	71.987	38.652	75.990	40.387	79.401
Total	618.096	614.317	650.068	650.827	671.169	674.531

Fuente: OCEI, Anuario Estadístico de Venezuela (1988)

La yuca constituye un rubro agrícola de gran futuro en nuestro país como fuente barata de energía para alimentación humana y animal. Se agrega en este último caso la importancia como fuente de proteínas, ya que follaje de la planta presenta contenidos de hasta un 22%, aunque es deficiente en metionina (Montaldo y Montilla, 1976); por otra parte, investigadores como Varghese et al. (1976) demuestran que procesos de fermentación con hongos (Rhizopus, Aspergillus y Neurospora) aumenta significativamente el nivel protéico de las raíces. En consecuencia, aparte del gran valor como fuente de energía barata para alimentación humana y animal, la yuca puede ser la base de la alimentación protéica animal complementándose con aportes (más costosos provenientes de cereales, leguminosas, oleaginosas y pescado.

La papa es bastante común en la dieta del venezolano, pero no se considera como rubro esencial para un patrón de consumo estratégico mínimo (CONICIT, 1977); como alimento tiene más valor energético que protéico, pero también presenta buen contenido del aminoácido lisina, lo que es la base de propuestas que promueven a la papa como complemento alimenticio en la dieta de animales que se basen en cereales como el sorgo y el maíz (deficientes en en lisina, Gallardo, 1986). Por otra parte, la papa es uno de los cultivos más característicos en los valles altos andinos, donde genera el mayor valor de producción. En este caso resulta conveniente incluirlo en las evaluaciones de los posibles impactos de los cambios climáticos en esas áreas.

#### Areas para Yuca y Papa

Las principales entidades federales que cultivan yuca en nuestro país son Bolívar, Monagas, Barinas, Zulia y Sucre, habiéndolo concentrado aproximadamente un 52% de la superficie cosechada para 1984-85 (tabla 3.9).

Tabla 3.9  
Superficie (Ha) Cosechada de Yuca en las  
las Principales Entidades Productoras de  
Venezuela en 1984-85 y 1990

Estado	1984-85	1990
Bolivar	8.401	364.0
Monagas	6.840	0.0
Barinas	6.349	1.910
Zulia	4.801	991.5
Sucre	4.425	413.5
Total	30.816	

Fuente: MAC, Div. de Estadística

En cada uno de los estados señalados en la tabla 3.9 las áreas seleccionadas para evaluación de impacto por cambio climático en el cultivo de la yuca son las siguientes:

Estado Bolívar: a) Upata, b) La Paragua.

Estado Monagas: **falta seleccionar**

Estado Barinas: entre Barinas y Torunos

Estado Zulia: Sur del lago

Estado Sucre: **falta seleccionar**

En el caso de la papa, los principales estados productores para 1984-85 fueron Lara (7817 hectáreas ha), Mérida (5167 ha), Trujillo (3602 ha), Aragua (2331 ha) y Táchira (2075 ha). La selección preliminar de áreas para evaluación es la siguiente:

Estado Lara: Anzoátegui-Guárico.

Estado Mérida: Mucuchíes.

Estado Trujillo: Mesa de Esnujaque.

Estado Aragua: **falta seleccionar**

Estado Táchira: La Grita

### **Frutales**

Las frutas, entre las cuales destacan ampliamente la naranja y el cambur constituyeron durante los años 1987 y 1988 el grupo de cultivos que después de los cereales y las plantaciones generaron el mayor valor de producción en nuestro país; además a nivel de superficie cosechada los frutales también son importantes, habiendo ocupando para 1984-85 el cuarto lugar en importancia a nivel nacional, después de los cereales, las plantaciones y los textiles y oleaginosas (OCEI, V Censo Agrícola, 1988). Se puede agregar que los frutales por su alto nivel de inversión y sensibilidad al clima resulta un grupo de interés para las evaluaciones de impacto por cambio climático.

### **Áreas para Frutales**

La naranja se cultiva especialmente en los estados Carabobo y Yaracuy, donde se concentran el mayor número de matas y las explotaciones de mayor tamaño. Las áreas seleccionadas en cada caso son las siguientes:

Estado Carabobo: a) Áreas cercanas al Lago de Valencia,

b) áreas entre Bejuma, Miranda y Montalbán

Estado Yaracuy: Nirgua

En el caso del cambur es el estado Mérida el mayor productor (de acuerdo al número total de matas), aunque es un cultivo ampliamente distribuido en el país. El área seleccionada en dicho estado es el Vigía.

### **Hortalizas**

El grupo de las hortalizas si bien no ocupa una gran extensión areal en el país constituye la la tercera fuente de vitamina A y C a nuestra población, después de la leche y las carnes en el primer caso y de las frutas y raíces-tubérculos en el segundo (INN-Fundación Polar, 1988). Por otra parte, superan en cantidad y valor de producción a las oleaginosas y leguminosas (figuras 3.9 y 3.10 respectivamente.

En Venezuela a nivel de hortalizas individuales destaca por el valor de producción generado el tomate; luego vienen la cebolla, el ajo, y el pimentón. Estos rubros tendrían gran importancia en situaciones críticas, aunque su condición estratégica depende de los hábitos de consumo y de la disponibilidad de semillas (CONICIT, 1977; Sedek, 1983).

### **Areas para Hortalizas**

En el caso del tomate, los dos estados que dedicaron mayor superficie (superior a 2000 ha) durante 1984-85 fueron Lara (2764 ha) y Guárico (2287 ha). Las áreas seleccionadas son:

Estado Lara: eje El Tocuyo-Quibor.

Estado Guárico: Altagracia de Orituco.

La cebolla se concentra principalmente en el estado Lara (67.5% de la superficie del país, 3802 ha), siendo el eje El Tocuyo-Quibor el área seleccionada para iniciar las evaluaciones.

El ajo se cultiva sobre todo en los estados Trujillo y Mérida, siendo las localidades seleccionadas:

Estado Trujillo: **falta seleccionar**

Estado Mérida: Mucuchíes

El pimentón se cultiva sobre todo en el estado Lara, siendo el área seleccionada el eje El Tocuyo-Quibor.

Síntesis de Areas y Cultivares Representativos

Tabla 3.10  
 Areas y Culivares Propuestos Preliminarmente para  
 Evaluaciones de Impacto por Cambio Climático en Venezuela

AREA	ESTADO	CULTIVARES REPRESENTATIVOS
Calabozo	Guárico	arroz, maíz, sorgo, caraota, soya
Guariquito	Guárico	arroz
Altagracia de Orituco	Guárico	tomate, caraota
Eje El Sombrero Zaraza	Guárico	maíz, sorgo
Colonia Turén	Portuguesa	maíz, arroz, ajonjolí
Acarigua-Araure	Portuguesa	sorgo, caña de azúcar
Sureste del Edo. Portuguesa	Portuguesa	arroz
Valle Río Turbio	Lara	caña de azúcar, caraota
Tocuyo-Quibor	Lara	tomate, cebolla, pimentón
Anzoátegui-Guárico	Lara	café, papa
Entre Barinas Obispo, Sabaneta y Mijagual	Barinas	algodón, sorgo, maíz, soya,
Entre Barinas, y Torunos; San Silvestre	Barinas	maíz, sorgo, arroz, yuca, soya
Entre S. Carlos Libertad, El Amparo, Cojedes y Apartadero	Cojedes	maíz, sorgo
Sur de Edo. Cojedes	Cojedes	arroz
Yaritagua	Yaracuy	caña de azúcar
Valles de los ríos Aroa y Tocuyo	Yaracuy	soya

Cont. Tabla 3.10

AREA	ESTADO	CULTIVARES REPRESENTATIVOS
Nirgua	Yaracuy	naranja
Entre Bejuma, Montalbán y Miranda	Carabobo	naranja
Mesa de Guanipa	Anzoátegui	maní
Entre Maturín, S. Bárbara, Aragua de Maturín y Quiriquire	Monagas	maíz, sorgo
Sur del Lago	Zulia	plátanos, yuca
La Paragua	Bolívar	maíz, yuca
Upata	Bolívar	Yuca
Entre S. Mateo y El Palmar	Aragua	caña de azúcar
Bramón	Táchira	café
Mucuchíes	Mérida	papa
Sta. Cruz de Mora	Mérida	café
El Vigía	Mérida	plátanos y yuca
Mesa de Esnujaque	Trujillo	papa

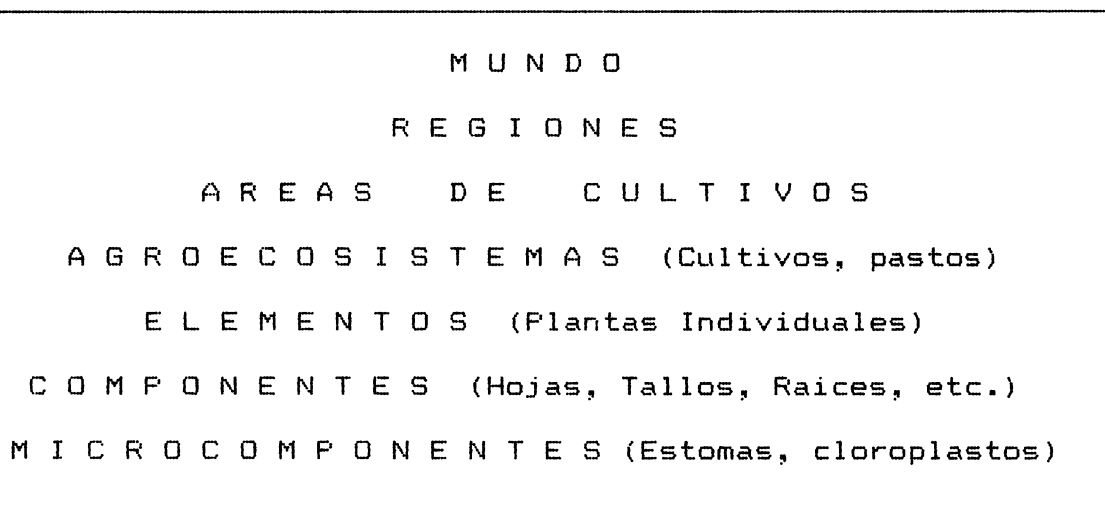
La selección de cultivos representativos que se ha realizado en esta sección puede resultar bastante amplia; sin embargo, se ha partido de la base de que no sólo se debían seleccionar aquellos cultivos que tengan desarrollados modelos de simulación de tipo biofísico, ya que así se excluían varios rubros representativos de áreas agrícolas importantes en nuestro país, tal como por ejemplo es el caso de las hortalizas de piso alto y el café para la región andina. En el caso de las áreas sucede algo parecido, ya que la amplia selección busca que se evalúen localidades importantes de la mayoría de las regiones agrícolas del país, contribuyendo a un posterior proceso de extrapolación de impactos a nivel regional y nacional.

### 3.3. EVALUACION DE IMPACTOS AGRICOLAS DE CAMBIOS CLIMATICOS A TRAVES DE MODELOS DE SIMULACION

En los últimos años ha existido un gran avance en el campo del modelaje de uno o varios componentes de los sistemas agrícolas y sobre todo en cuanto al desarrollo y aplicación de modelos biofísicos de crecimiento y productividad para rubros como maíz, arroz, sorgo, soya, papa, caraoatas, maní, algodón, y trigo, todos en mayor o menor medida cultivados y consumidos en nuestro país.

En el esquema de la figura 3.15 se muestra una jerarquía de modelos de simulación utilizados en la investigación agrícola (Jones et al., 1990).

Fig. 3.15 : Jerarquía de Modelos Utilizados en Agricultura



Fuente: Jones et al. (1987, fig. No. 1)

Entre los niveles de modelos que se muestran en la figura 3.15 se considera que los más útiles para fines de evaluación de impacto por cambios climáticos en agricultura son los de agroecosistemas, o aquellos de jerarquía superior (modelos sobre áreas o regiones de cultivo y los modelos agrícolas a nivel internacional). No obstante, los modelos de jerarquía inferior como los asociados al comportamiento de plantas individuales o subsistemas de éstas (hojas, raíces, etc) también son útiles, sobre todo para aquellos casos en que no se cuenta aún con modelos a nivel de cultivos; además, estos últimos están por lo general estructurados en base a esos modelos de jerarquía inferior.

La mayoría de los modelos de crecimiento y productividad de cultivo se basan en un tipo de modelo básico que es el de compartimiento. Este último permite conceptualizar al sistema estudiado, destacando los intercambios de materia, energía e



información (flujos) entre compartimientos y los almacenamientos dentro de cada compartimientos; además, pueden representar sistemas continuos y a partir de ellos se derivan los sistemas de ecuaciones diferenciales que describen la estructura de esos sistemas, originándose así los modelo de simulación matemáticos.

Entre los modelos de simulación matemáticos interesarían sobre todo aquellos que pueden representar a sistemas espacialmente distribuidos. Estos modelos se basan en series de ecuaciones diferenciales parciales, siendo necesario definir para su utilización algunas condiciones iniciales (tiempo cero); por ejemplo, en el modelo de dinámica hídrica de un suelo conformado por varios horizontes se debería definir el contenido de agua inicial en un momento cero ( $\emptyset$ ), que podría ser el de siembra o el momento de inicio en el riego de presiembra.

### **Limitantes y Ventajas de los Modelos de Simulación para Análisis de Impacto por Cambio Climático**

#### **Limitantes**

- Algunos procesos que se suceden a nivel de cultivares o de agroecosistemas no son bien conocidos, por lo cual o no se incluyen en los modelos o su tratamiento es muy simplista;

- Ciertos factores claves para la comprensión de las posibles respuestas de uno a varios componentes de los sistemas agrícolas no son tomados en cuenta; por ejemplo, a menudo los modelos de cultivo no consideran el efecto de la competencia por malezas o del ataque de pestes, problema que podría agudizarse en caso de cambios climáticos. En otros casos no se incluyen factores climáticos de importancia como la velocidad del viento o el déficit de saturación del aire, los cuales son necesarios para una más confiable simulación de procesos como la evapotranspiración;

- Algunos modelos requieren de datos de entrada a nivel muy detallado y de difícil obtención; por ejemplo, datos climáticos que sólo se consiguen en registros provenientes de estaciones de primer orden ( $C_1$ ), lo mismo puede decirse en cuanto a las exigencias de información de suelo, que a veces sólo puede obtenerse de estudios muy detallados, los cuales son menos numerosos y asociados a sectores muy localizados, dificultando el proceso de extrapolación de resultados a nivel regional y nacional; además, también se dificulta el necesario proceso de calibración y validación de los modelos;

- No todos los cultivos importantes tienen desarrollados modelos de simulación o sólo han sido creados para híbridos o variedades de latitudes medias, existiendo un evidente menor

desarrollo en cuanto a modelaje de cultivos intertropicales; por otra parte, el grado de desarrollo de los modelos de cultivos es desigual.

- El análisis de las salidas de los modelos de simulación a menudo es engorroso, especialmente si esas salidas incluyen elementos estocásticos; por otra parte, los modelos de simulación sólo dan un estimado de las propiedades del sistema, por lo que se requiere del uso de estadística para generar conclusiones lo suficientemente fundamentadas acerca de las propiedades del sistema.

#### Ventajas

- Su desarrollo permite conocer mejor la estructura, funcionamiento y sensibilidad de uno o varios componentes de sistemas muy complejos, tal como sería el caso de los sistemas agrícolas, y ésto en relación a los cambios de clima; por ejemplo, Van Keulen (1981) utilizó modelos de simulación para mostrar que el factor clave en la respuesta de los cultivos ante el incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico sería el control estomático;

- Guían el establecimiento de prioridades de investigación para mejorar el conocimiento de uno o varios componentes de los sistemas agrícolas reales; así mismo, constituyen un efectivo ambiente de entrenamiento de personal que se requiera formar para efectuar las evaluaciones de impacto por cambio climático. Por otra parte, no demandan de una formulación estricta de hipótesis previa a su implementación en estudios de aplicación, tal como sucede en los modelos de tipo analítico.

- Una vez calibrados y validados para un área específica los modelos de simulación permiten predecir con razonable exactitud el comportamiento de variables de interés agrícola por su importancia económica y que son sensibles ante el cambio de las condiciones climáticas, siendo el caso más común el de la predicción de los niveles de productividad de los cultivos;

- Dado que los cambios climáticos son de ocurrencia futura y aún es incierta su magnitud y distribución espacio-temporal, los modelos de simulación que incluyen variables climáticas como datos de entrada permiten realizar a priori la evaluación de los posibles efectos de aquellos escenarios de cambios climáticos que se consideren como más probables de ocurrir en un área y tiempo determinado. Esto a su vez permite preparar de antemano estrategias para la minimización de posibles impactos negativos (o aprovechar los positivos) por parte de los planificadores agrícolas y los propios agricultores, en cada uno de los tipos de escenarios

evaluados. En este último caso son muy útiles los modelos que incluyen variables de entrada asociadas a técnicas de manejo como profundidad, espaciamiento, densidad y fecha de siembra; riego, selección del tipo de cultivar, etc.

- Algunos modelos de simulación no requieren de equipos de computación sofisticados, pudiendo ser utilizados en computadoras personales, aumentando así el número posible de usuarios interesados en la evaluación del impacto de los cambios climáticos en la agricultura y facilitando el intercambio de información entre los mismos; además, el uso de computadoras para utilizar esos modelos permite ganar tiempo, lo que es de suma importancia a la hora de tener que tomar ciertas decisiones a nivel de planificación agrícola.

### **Modelos de Simulación Disponibles en Venezuela para Análisis de Impacto por Cambios Climáticos**

Existen actualmene sistemas manejadores de modelos de simulación de cultivo que pueden ser instalados en computadoras personales, lo que facilita ampliamente su uso por parte de diferentes usuarios. Uno de los sistemas que en este sentido ha tenido más aceptación a nivel mundial es el denominado DSSAT (Sistema de Soporte para la Toma de Decisiones sobre Transferencia de Agrotecnología), debiéndose destacar que entre las ventajas de este tipo de sistema está el hecho de que los modelos de cultivos que incluye requieren de una serie de datos mínimos que en gran medida son independientes del tipo de cultivo; las diferencias se establecen sobre todo a nivel de las características genéticas de cada tipo de cultivar, pero datos como los asociados al clima, suelo y manejo son de aplicación más común.

Otra ventaja del DSSAT es que tiene una serie de utilidades para realizar evaluaciones de estrategias por parte de los agricultores o planificadores, lo que permiten obtener las soluciones de manejo óptimas para ciertas condiciones climáticas dadas por una secuencia de años con características meteorológicas definidas (incluye para ésto modelos de tipo prescriptivos y probabilísticos); además, como ya se señaló, se ha comenzado a realizar un proceso de integración del DSSAT con sistemas de información geográfica e información satelitaria, lo que debe ser aprovechado en los estudios a realizar en Venezuela.

Modelos de cereales como los de la serie CERES (CERES-Maíz, CERES-Arroz y CERES-Trigo) y de leguminosas como SOYGRO, PNUYGRO y BEANGRO (para soya, maní y caraotas

respectivamente) ya están disponibles dentro del sistema DSSAT para ser utilizados en las evaluaciones. Se espera que pronto estén a la disposición modelos para sorgo (CERES-Sorgo) y papa (modelo SUBSTOR).

A continuación se describen algunas características generales y necesidades de información para la utilización de los modelos actualmente disponibles dentro del DSSAT y que son de interés para la evaluación del impacto de cambios climáticos en la agricultura venezolana. Se incluyen igualmente aspectos asociados al proceso de calibración y validación de esos modelos en Venezuela.

- Modelo CERES-Maíz (Jones y Kiniry, 1986)

El modelo CERES-Maíz simula importantes procesos a nivel de plantas, los cuales permiten evaluar aspectos agrícolas de interés como crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos. Entre estos procesos destacan:

- fases fenológicas, al relacionar características genéticas del cultivar seleccionado con las variables atmosféricas, en especial con la temperatura;

- Fotosíntesis y respiración, así como la acumulación y distribución de asimilados para la elaboración de biomasa;

- Transpiración y déficits hídricos, incluyendo la capacidad de simular el balance hídrico del suelo;

- Desarrollo de hojas, tallos, raíces y órganos reproductivos (flores masculinas y femeninas).

- Asimilación, transformación y distribución de nitrógeno en la planta y su dinámica en el suelo.

Se debe destacar que el nivel temporal de las salidas del modelo pueden ser seleccionadas a conveniencia por el investigador y con resolución máxima a nivel diario.

Cuatro tipos básicos de información se requieren para utilizar el modelo CERES-Maíz: a) características del cultivar (coeficientes genéticos), b) características de suelos, c) técnicas de manejo y d) datos diarios de clima.

Coeficientes Genéticos

El modelo CERES-Maíz requiere que se le suministre información acerca de cinco (5) coeficientes genéticos:

- Duración de la Fase Juvenil ( $P_1$ ): grados días acumulados en base a  $10^{\circ}\text{C}$  durante la fase no reproductiva (juvenil) de

los cultivares, que se asume termina cuando el cuello de la sexta hoja es bien visible en por lo menos un 50% de las plantas de una parcela;

- Sensibilidad al Fotoperíodo ( $P_2$ ): sensibilidad de la velocidad de desarrollo de los cultivares ante el cambio en la duración del día en base a una duración de 12.5 horas, la cual se considera como la duración del día en la que el desarrollo procede a la máxima velocidad. Este coeficiente determina la respuesta del cultivar en el período que va del final de la fase juvenil a la inducción floral;

- Duración del Período de Llenado de Granos ( $P_3$ ): grados días acumulados (base  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en la fase lineal de llenado.

- Máximo Número de Granos por Planta ( $G_2$ );

- Tasa Máxima de Llenado de los Granos ( $G_3$ ), que se mide en miligramos por día.

En Venezuela desde hace varios años se ha estado desarrollando un proceso de investigación tendiente a la determinación de los coeficientes genéticos de los principales cultivares de maíz en Venezuela (Comerma et al. 1984; Marrero, 1987; Urbina, 1990; Zuvia, 1990). Las investigaciones se han enfocado sobre todo a la determinación de los coeficientes  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $G_2$  y  $G_3$ , ya que para en caso de la sensibilidad al fotoperíodo no se ha contado con los instrumentos necesarios, utilizándose en los procesos de simulación la sensibilidad al fotoperíodo asociada a cultivares típicos de regiones intertropicales, tal como ha sido determinada en investigaciones realizadas en otros países (sur de USA e isla de Hawaii) y cuyo valor es cercano a 0.5.

Una característica importante de los coeficientes genéticos es que una vez determinados para un cultivar específico pueden utilizarse en cualquier localidad (Comerma, comunicación personal), lo que facilita la implementación de evaluaciones de impactos de cambios climáticos a nivel regional y nacional. Así mismo, existen modelos no incluidos en el DSSAT pero útiles para el caso venezolano que también se basan en los coeficientes genéticos de los cultivares (modelo AQUA, Radulovich 1987, desarrollado para evaluar efectos de excesos o falta de agua en cultivos tropicales).

En la tabla No. 3.11 se muestran los coeficientes genéticos de cultivares de maíz venezolanos y foráneos.

Tabla 3.11  
 Coeficientes Genéticos de Cultivares de Maíz Desarrollados  
 en Venezuela y en otras Areas Intertropicales

Cultivares	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>
<b>Venezolanos</b>				
EPA-81	275.8	858.3	763.0	9.75
OBREGON	276.1	903.3	596.0	9.03
FM-6	276.1	868.2	567.0	10.7
PB-8	275.8	921.7	598.0	9.00
TOCORON-127	276.1	868.2	761.0	8.12
DMR	292.8	912.5	709.0	9.07
Fuente: Marrero (1987), experimentos realizados en Maracay				
PB-8	293.0	987.0	438.0	8.61
DMR	338.0	923.0	518.0	7.14
MAQUINA	311.0	894.0	546.0	5.73
Fuente: Urbina (1990), experimentos realizados en Barinas				
<b>Foráneos</b>				
H610	340.0	900.0	520.0	6.50
PI0x304C	360.0	900.0	550.0	5.60
P10-3147	255.0	685.0	834.0	10.0
B56xC11A	318.0	700.0	805.0	6.40
PV825	260.0	750.0	600.0	8.50
Según DSSAT	200-600	700-1000	500-700	6-8
Según Jones y Kiniry (1986)	100-355	685-900	560-834	6-11

#### Datos de Suelo

A nivel general se requiere conocer el coeficiente de drenaje, el número de la curva de escorrentía y el albedo superficial, mientras que para cada horizonte y hasta 2 m. de profundidad debe contarse con los siguientes datos:

- Grosor (cm);
- Densidad aparente (gr/cm<sup>3</sup>);
- Contenido de materia orgánica (%);
- pH (en agua);
- Textura (% de arena, limo y arcilla; fracción gruesa)
- Saturación de Aluminio (%);
- Factor de distribución de raíces;
- Conductividad hidráulica en suelo saturado

El modelo CERES-Maíz con algunos de los datos de suelo citados anteriormente calcula para cada horizonte tres variables importantes para simular el balance hídrico y sus efectos sobre el desarrollo y productividad del cultivo:

- Límite inferior de agua que puede extraer la planta de un horizonte determinado (%), calculado a partir de la textura, densidad aparente y contenido de materia orgánica;

- Límite superior de drenaje, que es equivalente a lo que se conoce como capacidad de campo; es decir, la máxima cantidad de agua que puede retener el suelo en contra de la fuerza de la gravedad después que ha cesado el exceso de drenaje debido a la previa saturación (calculado con los mismos datos que el límite anterior);

- Contenido de agua a saturación, o mayor cantidad de agua que puede presentar un horizonte determinado; se calcula en base a los mismos datos que las dos variables anteriores aunque con algoritmos diferentes en cada caso.

#### Datos Climáticos

El modelo CERES-Maíz requiere de datos diarios de radiación solar ( $\text{cal/cm}^2/\text{min.}$ ) o su equivalente en mega Joules/ $\text{m}^2$ , temperaturas máximas y mínimas ( $^{\circ}\text{C}$ ) y precipitación (mm). Con estas variables es que se construyen los escenarios de cambios climáticos a nivel general para todo los modelos incluidos en el DSSAT.

#### Datos sobre Técnicas de Manejo

- Cultivar
- Día de siembra;
- Profundidad y densidad de sembrado;
- Espaciamiento entre hileras;
- Tipo, frecuencia y cantidad de riego;
- Tipo, frecuencia, cantidad y forma de aplicación de fertilizante nirogenado (CERES-Maíz hasta hora sólo toma en cuenta nitrógeno).

#### Calibración y Validación de CERES-Maíz en Venezuela

El proceso de calibración del modelo CERES-Maíz se puede realizar en relación a los coeficientes genéticos de los cultivares, comparándose resultados de campo acerca del tiempo y acumulación de grados días entre fases fenológicas definidas, número de granos por mazorca, tasas de llenado, rendimiento, etc., con los resultados de las simulaciones del modelo. De acuerdo al grado de similitud entre los valores observados y simulados será necesario o no un ajuste o calibración de algunos de los coeficientes genéticos

respectivos. En la mayoría de los casos el ajuste se logra por una metodología de ensayo y error, hasta que la similitud entre valores observados y simulados sea la mínima requerida. En el caso de la producción, investigadores del FONAIAP (Comerma et al., 1989) establecen que las diferencias menores a un 25-30% se consideran adecuadas para considerar buena una simulación por parte del modelo.

Se debe destacar que la calibración del modelo CERES-Maíz puede también realizarse por modificación de las diferentes ecuaciones y algoritmos que lo conforman. Sin embargo, este tipo de procedimiento aún no ha sido aplicado en Venezuela.

El proceso de validación del modelo CERES-Maíz en nuestro país ha sido llevado a cabo principalmente por investigadores del FONAIAP y en diversas regiones agroecológicas del país (Comerma et al., 1988). En este sentido, se han realizado validaciones de aspectos fenológicos y productivos, resumiéndose los principales resultados en las figuras 3.16 y 3.17 respectivamente.

La figura 3.16 muestra que para la ocurrencia de la polinización y la madurez fisiológica la precisión de la simulación por parte del modelo es bastante buena. Sin embargo, simulaciones realizadas por Maytín (1991a) indican que en el modelo no reproduce el conocido acortamiento de la fase reproductiva de los cultivares cuando se presentan problemas de falta de agua.

La figura 3.17 muestra como las simulaciones de producción son bastante aceptables (a excepción de los obtenidos en la Mesa de Guanipa); sin embargo, los experimentos de campo fueron realizados bajo condiciones de buena provisión hídrica, no conociéndose aún la exactitud del modelo en Venezuela para predecir la producción bajo los efectos de la falta o excesos de agua. Por otra parte, las versiones del modelo CERES-Maíz utilizadas hasta ahora en las evaluaciones de impacto por cambios climáticos en Venezuela, no tienen la capacidad para evaluar problemas de excesos hídricos, los cuales son importantes para un cultivo como el maíz.

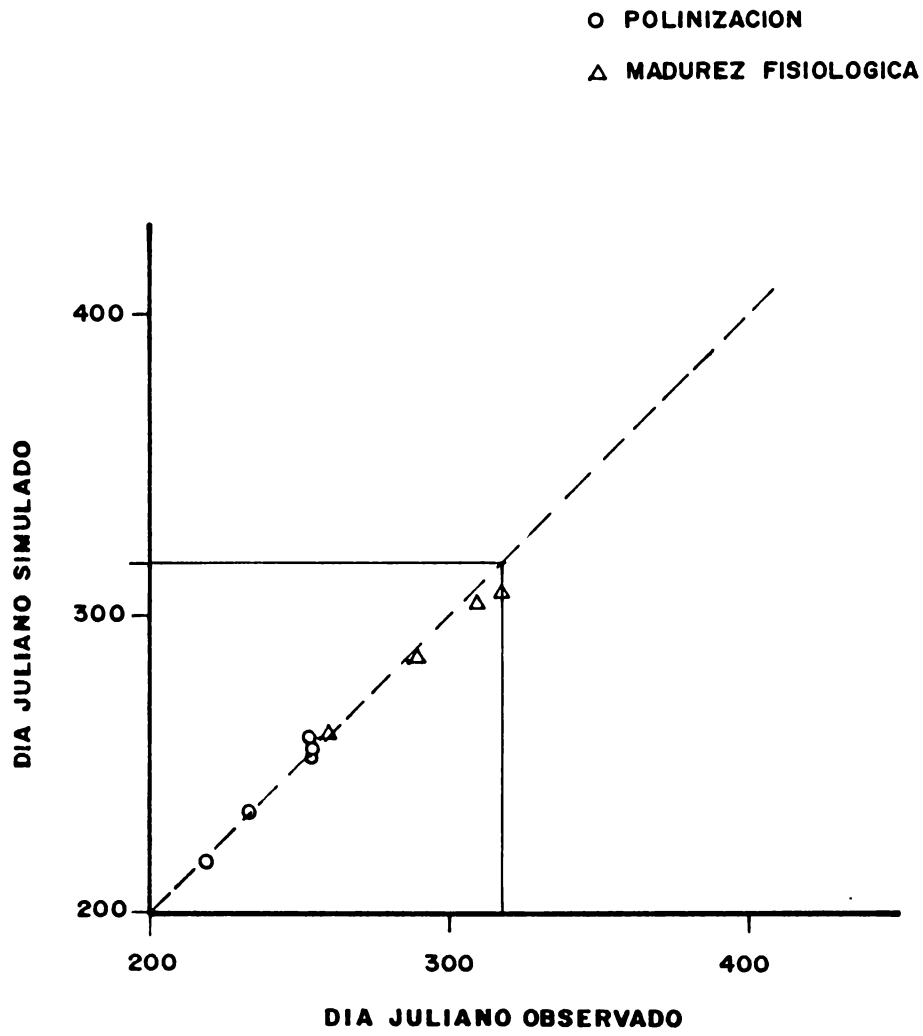
#### - Modelo SOYGR0 (Soya)

El modelo SOYGR0 ha sido desarrollado por investigadores de la Universidad de Florida (USA) con una primera versión (V. 4.2) realizada entre 1980 y 1983 (Wilkerson et al., 1983) y la última versión (V. 5.4) reseñada por Jones et al. (1987).

Al igual que el modelo CERES-Maíz, SYGR0 simula crecimiento, fenología y producción del cultivo y no toma en cuenta ataques de pestes, competencia por malezas ni otro

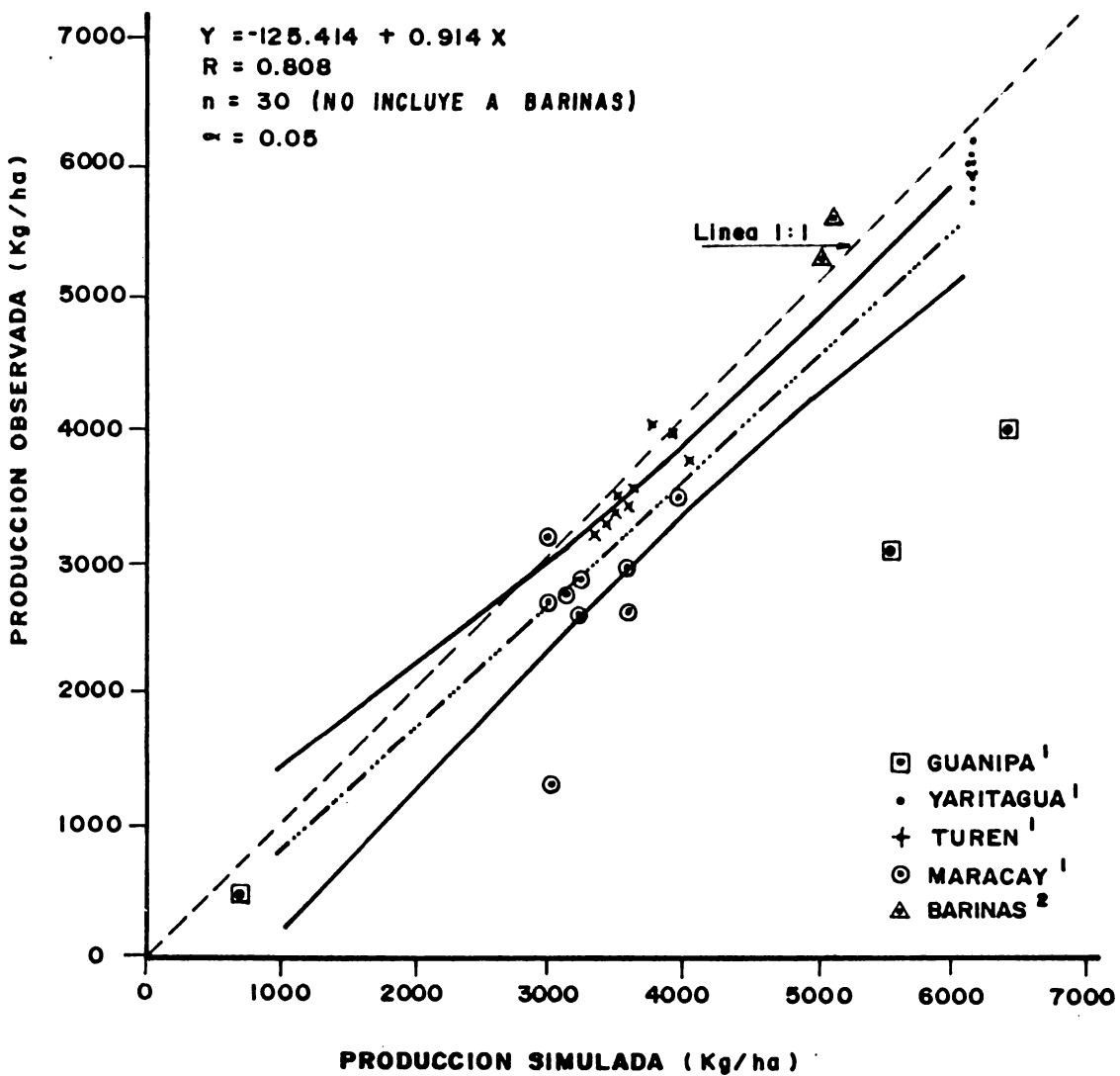


**FIGURA 3.16** COMPARACION DE EVENTOS FENOLOGICOS DEL MAIZ POR EL MODELO CERES - MAIZ EN VENEZUELA.



FUENTE. COMERMA ET AL (1984)

FIGURA 3.17 COMPARACION DE LAS PRODUCCIONES DE MAIZ  
SIMULADAS Y OBSERVADAS POR EL MODELO  
CERES - MAIZ EN VENEZUELA



FUENTES:

1: COMERMA ET AL. (1984)

2: ZUVIA (1990)

nutriente diferente al nitrógeno. Sin embargo, el cultivo de la soya es mucho más sensible que el maíz a las variaciones del fotoperíodo durante el ciclo de vida, en especial en cuanto a la duración de la noche (Jones et al., 1990), lo que ha sido considerado a la hora de desarrollar el modelo SOYGRO.

A pesar de que ha existido una amplia controversia acerca de si al cultivo de la soya lo afecta más la temperaturas diurnas o la nocturnas, en el modelo SOYGRO se asume que esta última es más importante, lo que establece otra diferencia básica con el modelo CERES-Maíz, ya que en éste es la temperatura diurna la que más afectaría.

Por estar integrado al DSSAT, el modelo SOYGRO requiere de los mismos datos de suelo, clima y manejo que se citaron para el modelo CERES-Maíz, pero se destacan diferencias notables en cuanto número y tipo de coeficientes genéticos:

VARNO: Acortamiento de la longitud de la noche en la cual el tiempo tomado para la inducción floral es aún mínimo;

VARTH: Número de días al óptimo de temperatura desde el final del período juvenil a la iniciación floral, bajo condiciones de días largos, dividido por la duración del mismo período pero bajo días cortos;

VARTH (4): Duración (días) a temperatura óptima de la fase de inducción floral;

VARTH (6): Duración (días) a temperatura óptima entre la aparición de la primera flor hasta el comienzo del crecimiento de las vainas;

VARTH (8): Duración (días) a temperatura óptima del período que va entre la aparición de la primera hoja hasta la máxima expansión de la última hoja;

VARTH (10): Duración (días) a temperatura óptima del período que va entre la primera flor y la madurez fisiológica.

TRIFOL: Número de hojas trifoliadas producidas por día a la temperatura óptima;

SIZELF: Área de la hoja normal en los nodos 8 a 10;

PODVAR: Número de vainas producidas por día con la planta creciendo bajo días cortos y a temperatura óptima;

FLVAR: Número de flores producidas por día con la planta creciendo bajo días cortos y a temperatura óptima;

SHVAR: Tasa de acumulación de materia seca a temperatura óptima de las vainas, desde el momento en que éstas tienen la mitad de su máximo tamaño hasta que alcanzan este último (pero antes de que las semillas comiencen a crecer);

SDPDVR: Número medio de semillas por vaina;

SDVAR: Tasa de llenado de granos o semillas durante la fase lineal del estado de llenado bajo condiciones óptimas.

Los datos necesarios para el cálculo de los coeficientes señalados anteriormente son los siguientes:

- Primera hoja verdadera (fecha de aparición);
- Fecha del 50% de plantas con flores;
- Fecha del 50% de plantas con vainas en el comienzo de su expansión (>de 50 cm. de longitud y en cualquier lugar de la planta);
- Fecha del 50% de plantas con la última hoja expandida;
- Fecha con 50% de las plantas en la madurez fisiológica;
- Peso seco total ( $\text{g}/\text{m}^2$ );
- Biomasa foliar ( $\text{g}/\text{m}^2$ );
- Número de vainas/ $\text{m}^2$ ;
- LAI;
- Número de semillas/ $\text{m}^2$ ;
- Materia seca sobre la superficie del suelo ( $\text{g}/\text{m}^2$ );
- Peso de las vainas y/o semillas ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), en cuatro o más mediciones en la época de crecimiento y en la cosecha.

Al igual que en el caso del cultivo del maíz, son los investigadores del FONAIAP quienes han estado adelantando el proceso de determinación de los coeficientes genéticos de los principales cultivares de soya en el país, incluyendo algunas determinaciones respecto a la sensibilidad al fotoperíodo con el uso de lámparas en parcelas de campo. Si bien aún no se cuenta con determinación de todos los coeficientes genéticos necesarios para utilizar el modelo SOYGRD, se puede trabajar preliminarmente con los coeficientes que vienen incluidos en el sistema DSSAT para variedades de localización intertropical (entre 0 y 25g

de latitud, grupo de maduración 10; véase la tabla 3.12).

Tabla 3.12  
Coeficientes Genéticos de Soya para el Grupo  
de Maduración 10 (de 0° a 25° de latitud)

VARNO	VARTH	VARTHR-4	VARTHR-6	VARTHR-8	VARTHR-10	
12.0	31.0	5.88	6.1	9.9	43.16	
TRIFOL	SIZELF	SLAVAR	PODVAR	SHVAR	SDPDVR	SDVAR
0.35	172	350	200	11.5	2.1	6.0

Fuente: IBSNAT 1990 (Manuales Técnicos)

En Venezuela no se ha llevado a cabo un proceso de validación del modelo SOYGRO.

#### - Modelo de Caracota (BEANGRO, versión 1.0)

Al igual que los modelos CERES-MAIZ y SOYGRO, el modelo BEANGRO V1.00 (Hoogenboom et al., 1991) está integrado al sistema DSSAT. El modelo se ha venido desarrollando desde el año 1986 (Hoogenboom et al. 1986) y la primera versión incorpora la predicción de fotosíntesis horaria, la cual se calcula en base a la intercepción de la luz tanto de hojas expuestas directamente a la radiación solar como para aquellas hojas sombreadas.

La predicción de la fenología en el crecimiento vegetativo y reproductivo dependen fundamentalmente de la temperatura y el fotoperiodo. La tasa de crecimiento está directamente relacionada con la fotosíntesis, respiración y distribución de asimilado que dependen de la etapa de crecimiento y condiciones ambientales.

El modelo BEANGRO permite tener varias opciones de cambio para análisis de sensibilidades. Es posible realizar cambios en densidades y fecha de siembra, manejos de riego, tipos de suelo, cultivares y además incorpora la opción de realizar modificaciones en los parámetros climáticos (precipitación, temperatura máxima y mínima y radiación), longitud del día y radiación fotosintéticamente activa; además tiene la alternativa de realizar cambios en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, característica de mucha utilidad para las evaluaciones de impactos de cambios climáticos por efecto invernadero, ya que permite conocer como afectan al cultivo diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub> en los procesos de fotosíntesis y transpiración (eficiencia del uso de agua).

Al igual que en otros modelos incluidos en el DSSAT, en el

modelo BEANGRO no se incluye el efecto de ataques por insecto y enfermedades, pero se están realizando esfuerzos para incluir este factor en una versión futura del modelo; tampoco se incluye la interrelación de nutrientes en el suelo (a excepción del nitrógeno), por lo cual los resultados del modelo deben verse como las producciones del cultivar bajo ciertas características específicas de clima, fertilización óptima y manejo del cultivo.

### **Validación y Calibración de BEANGRO.**

Para la validación del modelo BEANGRO es necesario tener los siguientes datos del cultivar de (obtenidos en ensayos experimentales): crecimiento ( $\text{gr/m}^2$ ) de tallo, hojas, semilla, índice de área foliar y número vainas en por lo menos cuatro mediciones a lo largo del crecimiento del cultivar. De la cosecha final el modelo requiere datos del número de semillas y vainas ( $\text{No/m}^2$ ) y peso de semillas y plantas ( $\text{gr/m}^2$ ). Los datos fenológicos necesarios incluyen la duración en días desde siembra hasta los eventos de floración, con vainas justo comenzando a expandirse, última hoja expandida y madurez fisiológica.

Evaluaciones y validaciones del modelo han sido realizadas para ensayos llevados a cabo en Gainesville (USA) y Cali (Colombia) con el cultivar Porrillo sintético (Jones et al., 1990). BEANGRO ha sido liberado recientemente y ya se ha utilizado en países como Guatemala (IBSNAT, 1990), Puerto Rico y Costa Rica (Hoogenboom et al., 1990).

En Venezuela la validación del modelo BEANGRO ha sido llevada a cabo por Jaimes (1991) en base a datos de experimentos realizados para los principales cultivares de caña de azúcar en varios ensayos conducidos en diferentes años en las estaciones experimentales del FONAIAP y de la Universidad Central de Venezuela en Maracay (Mora et al., 1980; Mora y Borges, 1981; Mora et al., 1982; Gómez, 1982; Mora, 1983 y Ortega y Barrios, 1972). La predicción de la fenología del modelo difiere entre 2 a 5 días con los datos de los cultivares venezolanos; de igual manera las diferencias en los rendimientos simulados y observados no son significativas. Sin embargo es necesario continuar estas investigaciones.

### **Otros Modelos incluidos en el DSSAT**

DSSAT incluye también los modelos de arroz (CERES-Rice), trigo (CERES-Wheat) y maní (PNUTGRO), esperándose que en poco tiempo sean incorporados los modelos para papa (SUBSTOR-Potato) y sorgo (CERES-Sorghum), aunque en Venezuela se dispone de las versiones preliminar de estos dos últimos modelos, y en el caso del modelo para papa ya se está adelantando una revisión de experimentos hechos por

investigadores del FONAIAP-Región Mérida y proponiéndose la realización de nuevos experimentos para obtener los coeficientes genéticos de las variedades Granola y Merideña (las más utilizadas en los Andes venezolanos) y la serie de datos mínimos necesarios para utilizar el modelo SUBSTOR-Potato. En el caso del modelo para arroz todavía no se han realizado investigaciones en Venezuela sobre coeficientes genéticos. Dentro del DSSAT se contempla también incluir un modelo para yuca (SUBSTOR-Cassava), con lo cual en un futuro se podrá contar con una serie de modelos de cultivos que pueden ser utilizados en las investigaciones sobre impacto de cambios climáticos en la agricultura venezolana.

#### Modelos de Simulación de Cultivos no Incluidos en DSSAT

Como se señaló al principio, en los últimos años se han venido desarrollando una serie de modelos de simulación de cultivos. Algunos de estos modelos no forman parte del DSSAT, pero podrían ser útiles en las evaluaciones del impacto de cambios climáticos en nuestra agricultura (tabla 3.13)

Tabla 3.13: Modelos de Simulación para Cultivos Desarrollados en Venezuela y no Incluidos en el DSSAT

Cultivos	Modelos	Autores
MAIZ	CORNF	Staper y Arkin 1980
	SIMAIZ	Duncan 1975
	CONGRO	Childs et al. 1977
	CORNMOD	Baker y Horrocks 1976
	VT-Maize	Newkirk et al. 1989
	GAPS	Buttler 1989
	CUPID	Norman y Campbell 1983
ARROZ	IRRIMOD	Whisler et al. (?)
SORGO	SORGF	Arkin et al. 1976
	SORKAM	Rosenthal et al. 1989
	RESCAF	Monteith et al. 1989
SOYA	GLYCIM	Acock et al. 1983
	REALSOY	Meyer 1985
	SOYMOD	Curry et al. 1975
ALGODON	COTCROP	Brown et al. 1985
	COTTAM	Jackson et al. 1988
TRIGO	TAMW	Maas y Arkin 1980
	SIMTAG	Staper 1984

Fuente: Jones y Ritchie 1990

### 3.4 EVALUACION DE IMPACTOS DE CAMBIOS CLIMATICOS EN EL SECTOR VEGETAL DE LA AGRICULTURA VENEZOLANA

La mayoría de las evaluaciones de impactos agrícolas de cambios climáticos en nuestro país han estado referidas al cultivo del maíz y utilizando para ello el modelo de simulación CERES-Maíz. Las localidades seleccionadas incluyen a Barinas, Colonia Agrícola de Turén, Yaritagua y el Tigre. Otro cultivo que también se ha empezado a evaluar es el de la caraota, utilizando el modelo BEANGRO.

Un primer intento para evaluar algunos efectos de cambios climáticos sobre el cultivo de maíz en Venezuela, fue realizado en noviembre de 1989 en un taller de entrenamiento sobre el manejo del sistema DSSAT, organizado por el Proyecto PAN-EARTH (estudio de Caso Venezuela) y el FONAIAP (PAN-EARTH PROJECT/FONAIAP, 1989). En este taller se evaluó a través del modelo CERES-Maíz (versión 2.1) el efecto de un incremento de 2 °C en las temperaturas máximas y mínimas diarias y de cambios en la precipitación de + y - 25%, aplicados a días que en una base de datos climáticos sin modificar ya presentaban precipitación (cambios en la intensidad de los eventos pero no de su número). Se encontró que las mayores diferencias de productividad (disminución), índice de área foliar y biomasa se debieron a los cambios térmicos, ya que los cambios de precipitación no ejercieron efectos.

Otra evaluación de impactos de cambios climáticos con el modelo CERES-Maíz se realizó en abril de 1990 durante el Taller de Variabilidad Climática y Cambios de Clima en Venezuela y la Región del Caribe y sus Efectos sobre la Agricultura (AN-EARTH/CEAT, 1990). Los escenarios de cambios climáticos y los resultados de su impacto productivo en el maíz híbrido venezolano Obregón, se sintetizan en la tabla 3.14 (escenarios para la época lluviosa: abril a noviembre):

Tabla 3.14: Escenarios de Cambios Climáticos para Venezuela y su Impacto sobre el Maíz Híbrido Obregón

T Máx.	T Mín.	Precip.	Radiación	Producción
+3.5 °C	+3.5 °C	0%	0%	-25%
+3.5 °C	+3.5 °C	+20%	-20%	-40%
+3.5 °C	+3.5 °C	+40%	-20%	-40%

Fuente: PAN-EARTH/CEACT 1990.

En la tabla 3.14 se puede observar como cualquiera de los tres escenarios de cambios climáticos considerados causan



una disminución de productividad. Además, ya que en los tres casos los incrementos térmicos son iguales y no se nota efecto de los cambios de precipitación (debido a que los escenarios 2 y 3 presentan igual reducción a pesar de la notable variación en la precipitación), significa que los factores climáticos que mejor explican la disminución de productividad son la temperatura y la radiación solar.

Bisbal y Comerma (1991) estudiaron los posibles efectos de cambios climáticos sobre el cultivo de maíz en Venezuela, utilizando el modelo CERES-Maíz y analizando además la potencialidad del modelo para este tipo de estudios: "El modelo fue evaluado en un conjunto de escenarios en tres importantes localidades agrícolas del país: Yaritagua, Turén y El Tigre. Como entradas básicas se utilizaron los datos de clima y suelo de cada localidad. Entre los escenarios se incluyeron incrementos de 2, 3 y 4 °C de temperatura e incrementos/decrecimientos de un 10, 15 y 25% en la precipitación con un 10% de incremento/decremento de radiación solar respectivamente. Todos los escenarios fueron evaluados a 330 660 p.p.m. de CO<sub>2</sub> atmosférico. Los incrementos de temperatura determinaron una reducción en el rendimiento promedio en todas las localidades. Un incremento de 4 °C ocasionó una disminución de 1552 y 2267 Kg/ha en el rendimiento en Yaritagua y el Tigre respectivamente. Estas disminuciones fueron atribuidas al acortamiento en el ciclo del crecimiento del cultivo (16 y 14 días grado respectivamente). Una reducción en la precipitación generó una reducción en el rendimiento promedio pero sus valores fueron determinados por las características de retención de humedad de los diferentes suelos. En el caso de suelos arcillosos como los de Yaritagua una disminución de 25% en la precipitación durante el período de crecimiento del cultivo produjo una reducción de 1253 Kg/ha, mientras que en los suelos francos de El Tigre la reducción fue de 2600 Kg/ha".

Otro resultado importante aportado por Bisbal y Comerma es que en los escenarios con reducciones de precipitación se simuló un efecto benéfico de los incrementos del CO<sub>2</sub> atmosférico, al contrarrestar la menor disponibilidad de hídrica en el suelo a través del aumento de la eficiencia de uso de agua, concluyéndose que el modelo CERES-Maíz muestra ser una herramienta con buena confianza en estudios del impacto de los cambios climáticos en el crecimiento y desarrollo del cultivo, pero éste debe ser calibrado y validado para predicciones regionales. Una vez completado este proceso el modelo puede ser usado para identificar los mejores cultivares y estrategias de manejo del cultivo que permitan maximizar los beneficios y minimizar los riesgos asociados a los futuros cambios climáticos.

Maytín (1991) utilizó el modelo CERES-Maíz para simular las variaciones de productividad del maíz híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén, ante el impacto de escenarios de cambios climáticos asociados al efecto invernadero ( $2 \times \text{CO}_2$ ) o al proceso de deforestación de los bosques amazónicos. A continuación se especifican las estrategias de manejo y los escenarios de cambios climáticos evaluados, para luego exponer los principales resultados.

Se analizó sobre todo el período que va entre abril y septiembre, ya que en éste se produce por lo general la preparación de tierras (abril-mayo), la siembra (mayo) y el posterior desarrollo y maduración del cultivo (esto último a mediados de septiembre) en Barinas y Turén.

Se evaluaron las estrategias de sembrar a capacidad de campo (aplicación de riego presiembra) a 40 y al 20% del agua aprovechable en los suelos seleccionados (Hapulstoll en la Colonia Turén y Tropustalf de la Serie barinas en Barinas). Los datos de saturación, capacidad de campo y límite inferior de agua extraíble por los cultivares en Barinas se obtuvieron de experimentos de campo (Maytín et al. 1991a), mientras que para Turén se utilizaron las simulaciones del modelo basadas en datos de suelo suministrados por el FONAIAP (calicata realizada por el Dr. Juan Comerma). Se asumió además que no existían problemas de disponibilidad de nutrientes, ataques de enfermedades o plagas, lo que significa una estrategia de manejo óptima.

Para los escenarios asociados al efecto invernadero se aplicaron aumentos similares o no en las temperaturas extremas diarias (los cuales variaron entre 2 y 3.5 °C). En el caso de aumentos diferentes en las temperaturas extremas diarias se asumió que la mínima se incrementaba un grado más que la máxima. En el caso de los escenarios de cambios climáticos por deforestación las temperaturas extremas diarias se aumentaron en 1 °C.

Los cambios de precipitación para efecto invernadero (+20 a +40) se aplicaron de dos formas: a días que en la base de datos ya presentaban precipitación (aumento de la intensidad de la precipitación), y a días que en la base de datos no presentaban precipitación (aumento del número de días de precipitación en un mes determinado; método propuesto por el Dr. H. Riehl). En este último caso siempre se seleccionó un día sin precipitación en la base de datos y que fuera inmediatamente previo o posterior a una secuencia de días pluviosos, para que al agregarle precipitación pasara a extender esa secuencia de días con precipitación. Esto se hizo para tomar en cuenta que en Barinas y Turén durante la época pluviosa es más común varios días seguidos con

precipitación que días pluviosos aislados. Para deforestación se disminuyó la precipitación en 25% (menos eventos).

A los días seleccionados en un mes para agregar eventos de precipitación en los escenarios de efecto invernadero, se les aplicó una disminución de la radiación solar en un porcentaje similar al aumento de precipitación propuesto para ese mes. Para el resto de los días del mes se disminuyó la radiación a la mitad de dicho aumento. Para deforestación la radiación solar fue incrementada uniformemente en un 10%.

También se evaluaron escenarios por efecto invernadero que combinan un aumento de precipitación y de radiación solar (+20% de precipitación y +5% en radiación; +40% en precipitación y +10% en radiación), tal como lo sugieren algunas simulaciones hechas con los modelos GFDL y GISS para la zona intertropical (Wheterald y Manabe, 1986).

Por otra parte, se simularon los impactos de cambios climáticos que contemplan para Barinas y Turén en julio y agosto un aumento térmico entre 3 y 4 °C, combinado con disminución de precipitación de -25%; es decir, condiciones termohídricas que podrían ser desfavorables en aquellos meses en que se desarrolla el proceso de floración femenina, polinización y formación de granos, con la floración comenzando unos 60 días después de la siembra, entre mediados y finales de mayo. Este tipo de escenario de cambio climático se basó en el análisis de las propuestas del modelo de circulación atmosférica UKMO para para la región de los Llanos Occidentales venezolanos.

Por último, ya que para efecto invernadero se asume como más probable un mayor nivel de pluviosidad, se determinó cuánto aumento de precipitación sería necesario para que en el futuro lloviera en abril como en la actualidad ocurre en mayo y en marzo como llueve en abril, tratando así de determinar cuánto aumento de precipitación sería necesario en los meses de marzo y abril para poder sembrar en este último mes. (adelanto de la época de siembra respecto al clima actual). Este procedimiento se fundamenta en que en los años muy pluviosos del clima actual por lo general el período de lluvias se adelanta y la época seca es más corta, lo que pudiera ocurrir con más frecuencia en el futuro si se incrementa la pluviosidad a causa del efecto invernadero. Esto podría obligar a los agricultores a adelantar la fecha de siembra hacia el mes de abril.

#### Resultados de las Evaluaciones.

En la figuras 3.18 y 3.19 pueden observarse los impactos productivos de algunos escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero o deforestación en Barinas y Turén, si se

siembra a capacidad de campo, mientras que la figura 3.20 corresponde a la siembra al 20% de agua aprovechable en el suelo (véase la explicación de la simbología de los escenarios de cambios climáticos en la tabla No. 3.15; nótese que sólo se muestran escenarios que asumen incrementos térmicos similares en las temperaturas extremas diarias, ya que no se encontraron diferencias significativas con el método que aumenta 1 °C más la temperatura mínima).

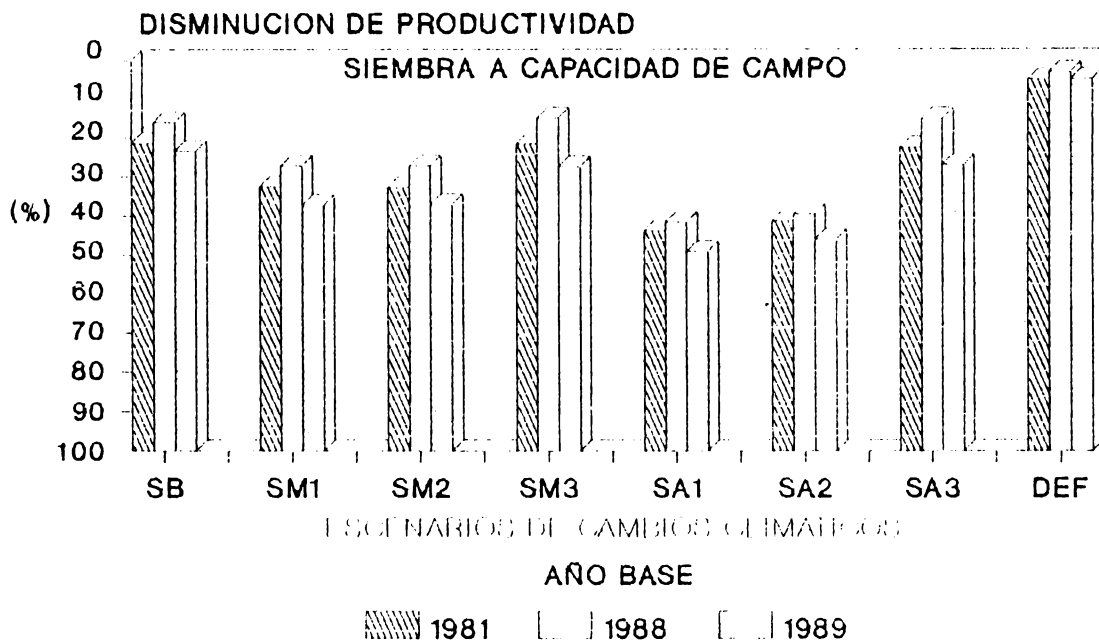
Tabla 3.15 : Simbología de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación (figs. 3.18 a 3.20)

Sensibilidad del Sistema Climático	Estación de Crecimiento	Temperatura (°C)		Precipitación (%)	Rad. S. (%)
		Máx	Mín		
SA1	PLUVIOSA	+3.5	+3.5	+40Ps	-40Rs
					-20Rd
SA2	PLUVIOSA	+3.5	+3.5	+40Pd	-20Rd
SA3	PLUVIOSA	+3.5	+3.5	+40Pd	+10Rd
SM1	PLUVIOSA	+2.5	+2.5	+20Ps	-20Rs
					-10Rd
SM2	PLUVIOSA	+2.5	+2.5	+20Pd	-10Rd
SM3	PLUVIOSA	+2.5	+2.5	+20Pd	+5%Rd
SB	PLUVIOSA	+2.0	+2.0	0	0
DEF	PLUVIOSA	+1.0	+1.0	-25Pds	+10Rd

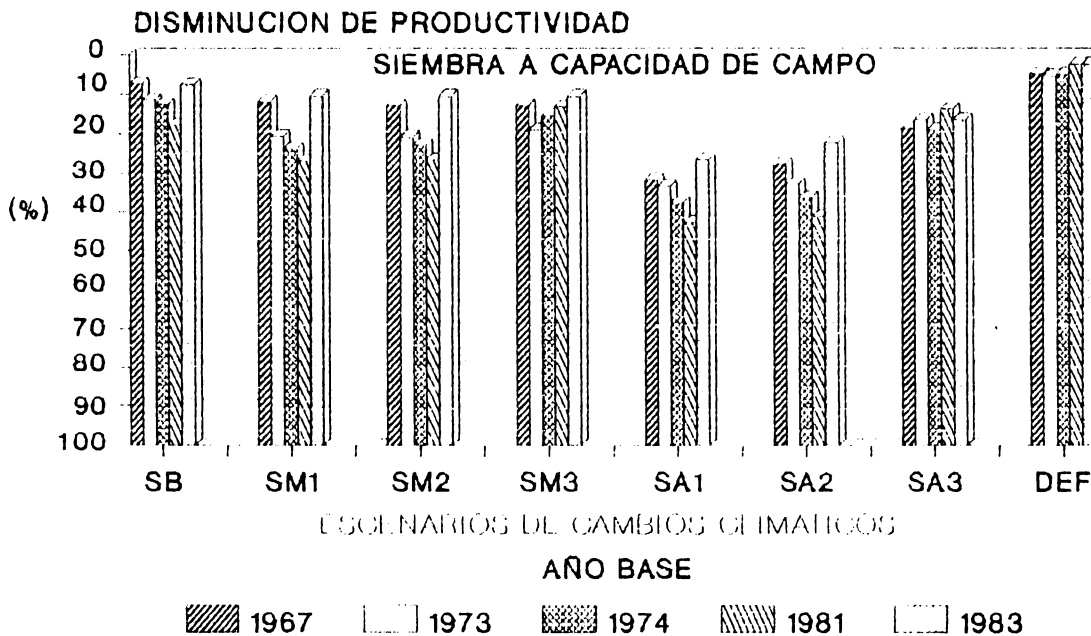
Ps = cambios aplicados a días en que la base de datos sin modificar no presentó precipitación (aumento del número de eventos pero no de su intensidad, método propuesto por el Prof. H. Riehl); Rs = cambios aplicados a días Ps; Pd = cambios aplicados a los días que en la base de datos presentaron precipitación (método aplicado por la mayoría de las investigaciones sobre efectos de cambios climáticos en la agricultura, aunque no es sinópticamente consistente); Rd = cambios en días que no se utilizó Rs, o en todos los días si se aplicó Pd. SB = sensibilidad baja del sistema climático ante el incremento del CO<sub>2</sub>; SM = sensibilidad media; SA = sensibilidad alta. Meses de la época pluviosa son aquellos con precipitaciones promedios mayores a 50 mm: abril a noviembre en Turén y Barinas. DEF: deforestación.

En las figuras 3.18 y 3.19 se puede notar que cualquiera de

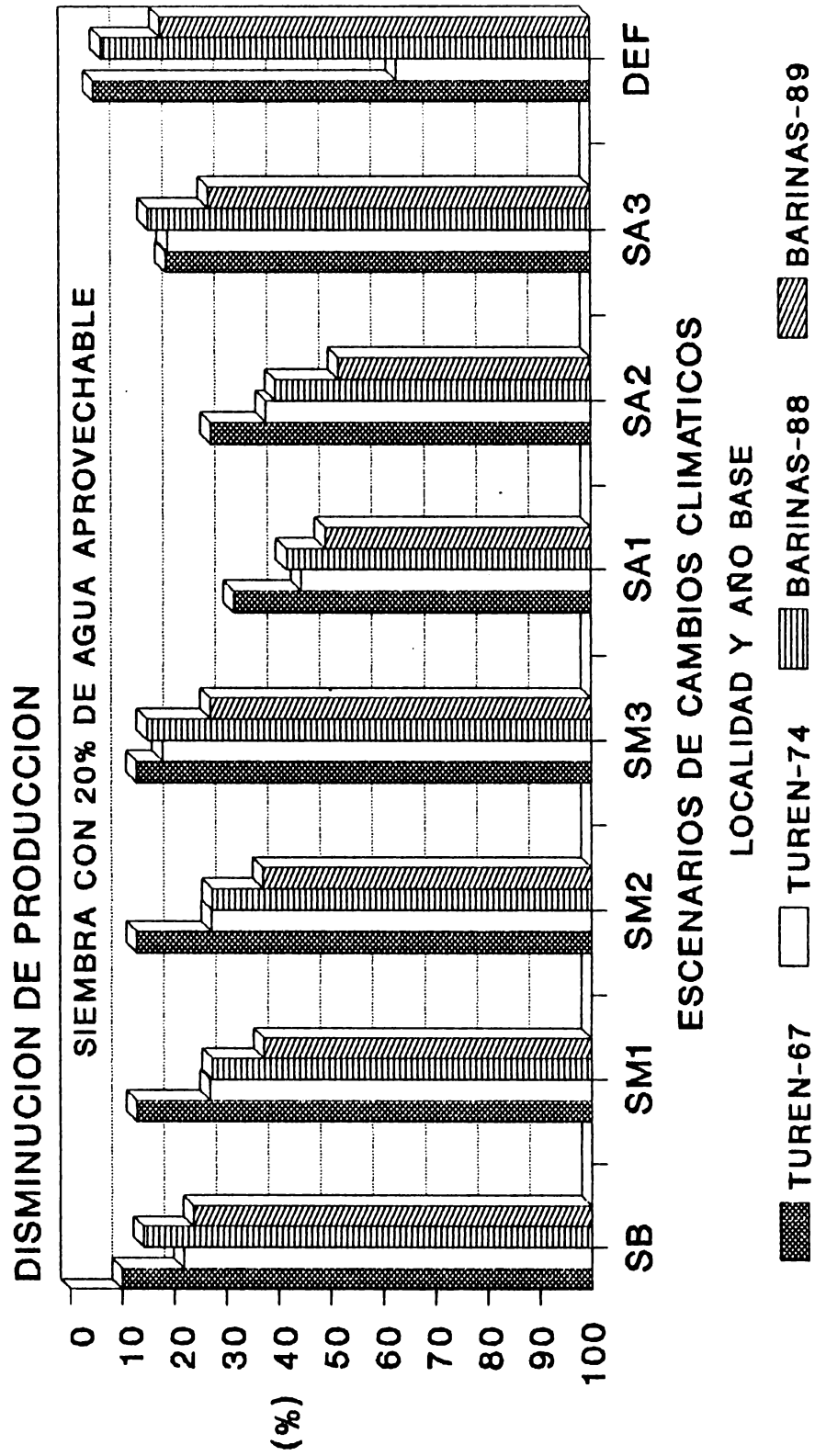
**FIG. 3.18 IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION SOBRE EL MAIZ HIBRIDO PB-8 EN BARINAS**



**FIG. 3.19 IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION SOBRE EL MAIZ HIBRIDO PB-8 EN TUREN**



**FIG. 3.20 IMPACTO PRODUCTIVO DE CAMBIOS CLIMATICOS  
 POR EFECTO INVERNADERO O DEFORESTACION  
 SOBRE EL MAIZ HIBRIDO CENIAP PB-8**



los escenarios de cambios climáticos evaluados causan una disminución de productividad, aún cuando se siembre a capacidad de campo y no se hayan asumido problemas de fertilización, plagas o enfermedades, lo que quiere decir que si no se produce un impacto directo positivo y suficiente por el efecto de la fertilización a causa del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico, los impactos productivos probablemente van a ser mayores que los que se muestran en las figuras citadas.

Los escenarios de deforestación y siembra a capacidad de campo tienen un menor impacto y siempre con reducciones menores del 10% tanto en Barinas como en Turén. Para el caso de que se sembrara al 20% del agua aprovechable (figura 3.19) los escenarios de deforestación si causan un efecto significativo en los niveles de productividad, ya que en el caso de Turén se simulan las mayores reducciones de productividad de todos los escenarios evaluados: -63% en Turén (-17.6 % en Barinas).

En la tabla 3.16 se sintetizan las variaciones productivas (en %) asociadas al impacto de los diferentes escenarios de cambios climáticos de las figuras 3.18 a 3.20.

Tabla 3.16: Impactos Productivo de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación en el Híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén

Escenario	Barinas	Colonia Turén
<b>SB</b>	hasta -23.5%	hasta -17.7%
<b>SM1</b>	hasta -37.0%	hasta -26.5%
<b>SM2</b>	hasta -38.5%	hasta -28.0%
<b>SM3</b>	hasta -27.0%	hasta -18.0%
<b>SA1</b>	hasta -49.0%	hasta -42.6%
<b>SA2</b>	hasta -45.0%	hasta -40.0%
<b>SA3</b>	hasta -27.5%	hasta -18.5%
<b>DEF-CC</b>	hasta - 6.0%	hasta - 5.0%
<b>DEF-20%</b>	hasta -17.6%	hasta -63.0%

Fuente: Maytín 1991a.

La causa de que no se produjeran diferencias significativas al aplicar aumentos uniformes o diferenciales en las

temperaturas extremas diarias, se asoció al hecho de que la fórmula que utiliza el modelo CERES-Maíz para calcular la producción neta diaria propone un menor efecto de las temperaturas mínimas en los niveles de consumo de producción bruta por respiración. Los aumentos térmicos independiente del método de aplicación siempre causaron reducción de productividad a causa de que las temperaturas medias diarias en los años bases seleccionados en Barinas y Turén fueron frecuentemente superiores al óptimo para fotosíntesis neta que según el modelo es de 26 °C.

El efecto de aumento térmico en la fase vegetativa trajo como consecuencia un menor desarrollo foliar al momento de la polinización, lo que incide negativamente la producción de granos y su posterior llenado. Por otra parte, los aumentos de temperatura también afectan negativamente estos dos últimos procesos al acortar su duración, contribuyendo de igual forma que lo anterior a disminuir la productividad.

En aquellos escenarios de cambios climáticos que contemplan la combinación de reducción de precipitación y aumento de temperatura en los meses típicos de polinización y formación de los granos (julio-agosto), se encontró que los aumentos de temperatura explican mejor las reducciones de productividad, ya que el modelo CERES-Maíz no simuló efectos de las reducciones de precipitación. Esto último a causa de que los aumentos aplicados en meses previos (mayo-junio) aseguran una reserva de agua en el suelo suficiente como para contrarrestar la disminución de un 25 % de precipitación en julio y agosto, lo que inclusive sucedió si sólo se había sembrado con el 20% del agua aprovechables.

A nivel general no se notaron efectos diferentes cuando se aplicaron los métodos propuestos para realizar los cambios de precipitación (cambio en el número de eventos o de la intensidad). Tampoco se simularon efectos de los incrementos de pluviosidad, lo que pudiera estar asociado a la incapacidad del modelo CERES-Maíz para evaluar problemas de excesos hídricos. Sin embargo, los incrementos de precipitación para Barinas y Turén bajo el efecto invernadero podrían tener un efecto productivo negativo, ya que debe tomarse en cuenta que sus niveles actuales de precipitación son ya excesivos para un cultivo como el maíz, sobre todo al final del periodo de madurez, cuando se requiere precisamente que las precipitaciones no sean muy altas (Brito et al., 1988).

Cuando se asumió siembra con un 20% del agua aprovechable sí se produjeron efectos productivos negativos a causa de las disminuciones de precipitación. El resultado es similar al que ejercen los incrementos térmicos, ya que en esencia la planta desarrolla menor superficie fotosintetizante con los



ya señalados efectos negativos en la fase de formación y llenado de granos.

En el caso del elemento radiación solar su impacto productivo dependió de los niveles radiativos del clima base en cada localidad. En este sentido, la disminución de radiación produjo mayor impacto negativo en Barinas a causa de sus más bajos niveles de radiación actual, los cuales según el modelo CERES-Maíz no son suficientes para lograr el número máximo de granos por mazorca de acuerdo al potencial genético del maíz híbrido CENIAP PB-8. La disminución de radiación también implica menores tasas de llenado de los granos.

Cuando se aumento la radiación solar se produjo en algunos casos (los años bases menos radiativos) un incremento del número de granos por mazorca, sobre todo en Barinas. Sin embargo, este aumento no fue suficiente como para contrarrestar el impacto negativo de los incrementos térmicos o de la falta de agua en caso de que se sembrara al 20% de la reserva en el suelo.

En relación al posible adelanto de la época de siembra al mes de abril a causa del incremento de precipitación bajo efecto invernadero, se encontró que para marzo sería necesario un incremento promedio de precipitación de 269% en Barinas y 249% en Turén, mientras que para abril el incremento sería de un 50% en Barinas y 106% en Turén.

Como vemos, los porcentajes de cambio de precipitación mensual citados son mayores que los propuestos en los escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero, a lo que se debe agregar que los incrementos térmicos significan mayores tasas de evapotranspiración, con lo cual los incrementos necesarios para trasladar la época de siembra al mes de abril probablemente sean mayores, disminuyendo así las posibilidades de que tal traslado ocurra en el futuro. Sin embargo, este análisis es sólo a nivel de promedios, ya que si tomamos en cuenta el comportamiento año a año encontramos que en Barinas en los últimos 17 años (desde 1975) se han presentado 8 años (47.1%) con precipitación mayor de 50 mm. en el mes de marzo y 12 años (70.6 %) con precipitaciones mayores de 100 mm. en el mes de abril. Si aplicamos un incremento de 40% en la precipitación significaría 70 mm. en marzo y 140 mm. en abril, niveles que parecen suficientes como para sembrar en este último mes (hacia finales de mes). En Turén desde 1951 sólo han ocurrido cuatro (4) años en que la precipitación del mes de marzo sea mayor de 50 mm., por lo cual se ve poco probable que en el futuro su precipitación sea suficiente como para que se pueda sembrar en el mes de abril, salvo en años excepcionalmente pluviosos.

Maytín et al. (1991b) evaluaron a través del modelo CERES-Maíz los impactos productivos de cambios climáticos asociados al efecto invernadero o la deforestación, sobre los maíces híbridos CENIAP PB-8 y Obregón en Barinas, Turén y Yaritagua. Los escenarios evaluados se sintetizan a continuación:

**Escenario 1:** La temperatura máxima se incrementó en 1 °C y la mínima en 2 °C;

**Escenario 2:** La temperatura máxima se incrementó en 2 °C y la mínima en 3 °C;

**Escenario 3:** El mismo incremento térmico como en el escenario 2 combinado con aumento de precipitación de 20% aplicado a días que en la base de datos no presentaban precipitación. La radiación solar se redujo en 10% para los días en que se agregó precipitación y en 5% en el resto de los días.

**Escenario 4:** La temperatura máxima se incrementó en 3 °C y la mínima en 4 °C. La precipitación se incrementó en 40% en días seleccionados y en 20% para el resto de los días. La radiación solar se disminuyó en 40% en los días seleccionados para aplicar los aumentos de precipitación y en 20% en el resto de los días.

**Escenario de Deforestación:** se aumentaron las temperaturas extremas diarias en 1 °C y la radiación en 10%, mientras que la precipitación se redujo en 25%.

En cada localidad los escenarios descritos se aplicaron a dos años bases, uno con precipitación promedio y otro por debajo de este promedio. En el primer caso los años seleccionados fueron los siguientes: 1987 en Yaritagua con 894 mm. entre junio y octubre, 1988 en Barinas con 1151 mm. entre mayo y septiembre, y 1967 en Turén con 1109 mm. entre mayo y septiembre. Los años bases con precipitación por debajo del promedio fueron: 1989 en Barinas, con 746.7 mm. entre mayo y septiembre, y 1974 en Turén y Yaritagua, con 871 y 791 mm. entre mayo y septiembre y entre junio y octubre respectivamente.

Cuando se aplicaron los cambios por efecto invernadero se asumió que se sembraba a capacidad de campo, ya que se espera un aumento en los niveles de precipitación y por tanto de la disponibilidad hídrica. En los escenarios de los cambios climáticos por deforestación, que implican menor precipitación, se asumió que se sembraba a capacidad de campo o al 20% del agua aprovechable en el suelo. Este último nivel se seleccionó de acuerdo a un análisis de sensibilidad que indicó que entre 20 y 25% del agua aprovechable al momento de siembra es el rango en que los

déficits hídricos reducen significativamente la productividad en los años bases promedios.

Los principales resultados encontrados por Maytín et al. (1991b) son lo siguientes:

- A excepción de la emergencia que mantiene su duración constante respecto al día de siembra (4 días), un aumento de las temperaturas produce disminución de la duración de las diferentes fases fenológicas de los cultivos, notándose mayor efecto en las fases correspondientes al periodo reproductivo. Un aumento de temperatura de 1 °C en la máxima y 2 °C en la mínima (escenario 1) puede disminuir el periodo de siembra a madurez entre seis y nueve días en cada una de las tres localidades seleccionadas. Para un incremento de la temperatura máxima de 2 °C y 3 °C en la mínima (escenario No. 2) el ciclo total se adelanta entre nueve y trece días.

- El modelo sugiere que la temperatura es el factor más importante en la determinación de las fases del cultivo, ya que para los escenarios 2 y 3 la duración de las diferentes fases fue la misma a pesar del incremento de la precipitación y disminución de la radiación en el escenario No. 3. El incremento de la temperatura de 3 °C en la máxima y 4 °C en la mínima produce un adelanto en el ciclo del cultivo entre trece a diez y seis días;

- En general, los escenarios de cambios climáticos asociados al efecto invernadero ocasionan una disminución de los niveles productivos en los híbridos Obregón y PB8 en las tres localidades seleccionadas. El escenario 1 causa una disminución en la producción que varía entre 5 y 25% con respecto al año base. En el escenario 2 la productividad disminuiría entre 11 y 30%. Para el escenario 3 la productividad disminuye entre 14 y 37%, mientras que para el escenario 4 la disminución de productividad están entre 35 y 54 %;

- En Turén y Barinas el híbrido Obregon sería al parecer menos afectado por los cambios de clima, mientras que para Yaritagua el híbrido PB8 es el que presenta menos disminución de productividad;

- En Yaritagua por ser una localidad menos pluviosa que Barinas y Turén, presenta en el clima actual una mayor frecuencia de años con problemas de falta de agua para un normal desarrollo de los cultivos. En este sentido, un cambio climático hacia niveles de pluviosidad mayor (efecto invernadero) podría ser positivo. Por otra parte, un clima más pluvioso se asocia por lo general a mayores niveles de nubosidad y en consecuencia menores niveles de radiación,

factor negativo común para las tres localidades, en especial Barinas.

Una aplicación del modelo BEANGRO a la evaluación de impactos de cambios climáticos en la variedad de caraota Tacarigua en Turén, Barinas y Maracay, fue llevada a cabo por Jaimes y White (1991). En este estudio se incrementaron las temperaturas de 1 a 5 °C en corridas separadas y se aumentaron las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico a 429 ppm. (+30%) y 528 ppm. (60%), dando un total de 18 tratamientos. No se incluyeron variaciones de precipitación y radiación solar.

Algunos resultados del estudio citado son los siguientes:

- El modelo BEANGRO no simuló cambios significativos en la duración del ciclo de vida de la caraota (figuras 3.21a y 3.21\_b), a diferencia de lo obtenido en simulaciones realizadas para cultivos como el maíz (Peart et al., 1988; Maytín 1991 y Maytín et al. 1991b) y el maní (Hoogenboom et al., 1990), las cuales muestran una significativa reducción del tiempo entre emergencia y los otros eventos fenológicos.

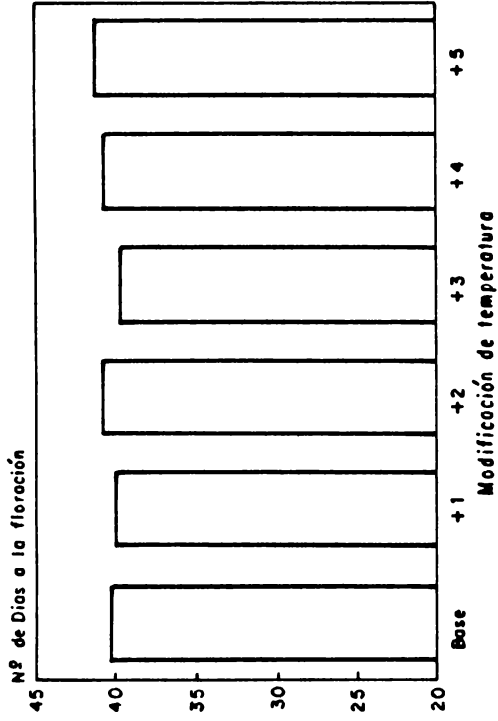
- 1 °C de incremento en las temperaturas extremas diarias y 30% de aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico (424 ppm.) produce un aumento de la producción cercano al 10%; sin embargo, si el incremento de temperatura varía entre 2 y 5 °C la producción se reduce 2 y 68% respectivamente. (figura 3.21c). Cuando se incrementó la concentración de CO<sub>2</sub> en 60% (528 ppm.) y las temperaturas en 1 y 2 °C la producción aumentó 27 y 12 % respectivamente. Para incrementos térmicos entre 3 y 5 °C la producción se redujo entre 2 y 48%. Con incrementos térmicos de 5 °C se podrían presentar problemas de estrés hídrico, con reducciones de productividad de un 26% respecto a simulaciones sin limitantes de agua. Obsérvese en la figura 3.21c que el patrón de respuesta de la biomasa es bastante similar al de la productividad.

- El mayor efecto de las temperaturas se notó en la reducción del número de vainas, consecuencia de una disminución en las tasas de fotosíntesis neta.

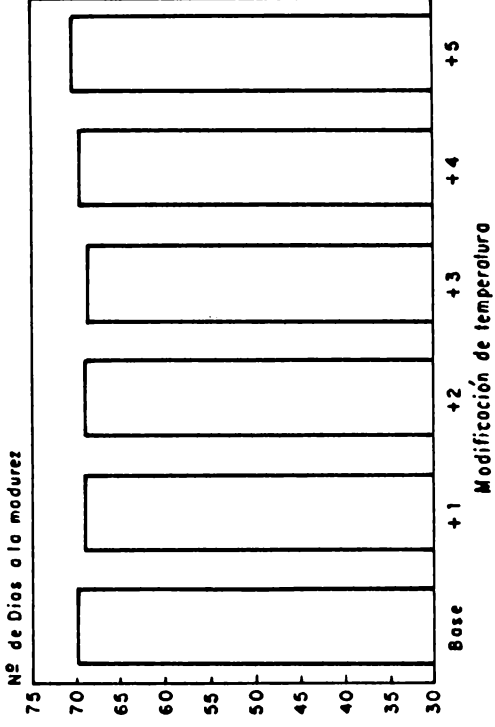
- La producción se redujo más en Turén al comparar con Yaritagua y Maracay, lo que está asociado a su clima base más cálido, lo que hace que los incrementos térmicos produzcan un mayor efecto negativo.

Comparando los resultados anteriores con los aportados por Bisbal y Comerma (1991), se nota como el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico puede revertir los efectos negativos de los incrementos térmicos en un cultivo C<sub>3</sub> como caraota pero no en uno C<sub>4</sub> como el maíz. Sin embargo, en el caso de escenarios

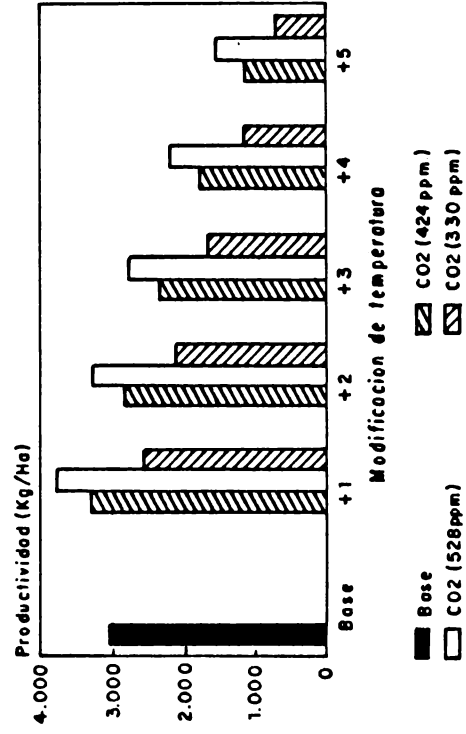
( a )



( b )



( c )



( d )

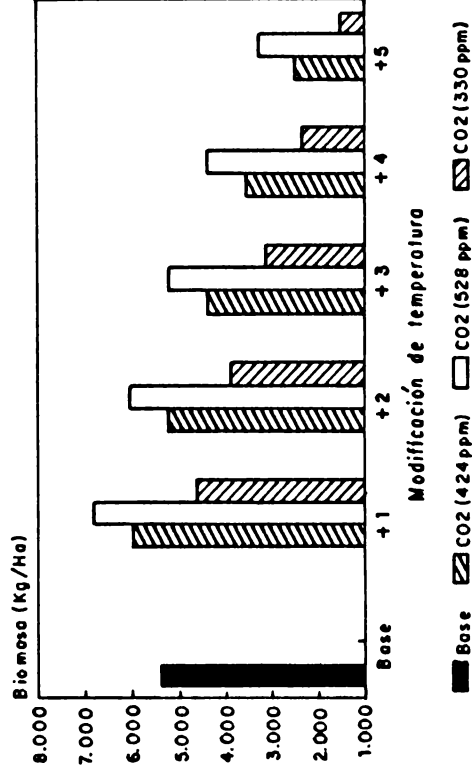


Figura 3.2) Impacto de cambios climáticos sobre fenología, productividad y biomasa de la caraota en Maracay  
Fuente: Jaimes y White 1991

de cambios climáticos que impliquen reducción de precipitación, el maíz sí podría aprovechar la ventaja de un sensible incremento de la eficiencia del uso de agua, al contrario de lo que podría pasar con la caraota. Finalmente, con aumentos de temperatura iguales o superiores a 3 °C las reducciones de productividad tanto para maíz como para caraota parecen ser superiores al 35%, independientemente de que se tome en cuenta el efecto del aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico sobre el cultivo de la caraota.

### **3.5.- ESTRATEGIAS E INVESTIGACIONES NECESARIAS PARA LA EVALUACION DEL IMPACTO AGRICOLA DE LOS CAMBIOS CLIMATICOS EN VENEZUELA**

Tal como se ha podido observar en la sección anterior, la evaluación del impacto de los cambios climáticos en la agricultura venezolana tiene relativamente poco tiempo de haber comenzado y sólo se han simulado algunas probables respuestas de cultivos como maíz y caraota. Por otra parte; los estudios reseñados son a nivel local y todavía insuficientes como para realizar un proceso de extrapolación de impactos a nivel regional y nacional. En consecuencia, resulta necesario desarrollar estrategias que nos permitan realizar a una evaluación más completa, de manera que exista una adecuada correspondencia entre la información generada y la requerida. En este sentido, por lo menos tres (3) aspectos se consideran prioritarios para mejorar el proceso de evaluación del impacto de los cambios climáticos en la agricultura venezolana:

a) Creación de una base de datos mínimos para aplicar las metodologías de evaluación disponibles;

b) Calibración, validación e integración de los modelos agrícolas con los sistemas de información geográficas;

c) Evaluaciones locales y extrapolación de impactos a nivel regional y nacional;

#### **Base de Datos Mínimos Necesarios para Aplicar las Metodologías Disponibles**

##### **Datos Climáticos**

Se requiere una base de datos computarizada y con capacidad de cálculo y graficación, y que incluya las principales variables agroclimáticas del país: precipitación, temperatura, radiación solar, vientos, humedad y ETP, y con una resolución temporal que incluya los niveles diario, cada diez (10) días (sobre todo precipitación y ETP), mensual, estacional (período de crecimiento de cada cultivo), anual y multianual.

Sería deseable que la longitud de los registros de las estaciones seleccionadas tengan por lo menos 20 años, en especial cuando se requiera de análisis de tipo estadístico. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que para evaluación de impacto por cambios climáticos también se utiliza la selección de años individuales como base de datos a quienes aplicar los escenarios de cambios climáticos (años secos o pluviosos, cálidos, etc), lo que resuelve el problema de no contar en principio con series suficientemente largas como

para aplicar procedimientos estadísticos.

Otro aspecto de interés en relación a la base de datos climáticos es la calidad de los registros, habiéndose planteado como problema fundamental que la mayoría de las series climáticas disponibles del país presentan datos faltantes, sobre todo en temperaturas máximas y mínimas y en la radiación solar global (Taller PAN-EARTH - MARNR - FONAIAP en Choroni; agosto del presente año). Resulta necesario entonces un proceso de estimación con algunas metodologías confiable. En este sentido, El MARNR a través de la sección de Hidrología y Meteorología tiene a la disposición el programa Solomón elaborado en Canada y que ha sido validado para Venezuela.

En el caso específico de la radiación solar se debe agregar la necesidad de verificar la exactitud de los registros históricos, debiéndose aprovechar al máximo el primer Taller Nacional de "Piranometría" que se va a realizar en Diciembre de este año en Margarita, para recalibrar algunos actinógrafos y con éstos recalibrar el resto de los disponibles; posteriormente se deberán encontrar factores de ajustes que permitan mejorar los registros en aquellas estaciones donde el aparato no haya medido correctamente.

Hay que definir qué estaciones climatológicas deben incluirse para generar la información para la base de datos agroclimáticos. En principio se pueden seleccionar las que forman la red de estaciones agroclimáticas del Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, representativas de las principales zonas agroclícolas del país, por lo cual se podrán utilizar para estudios de impacto a nivel regional y nacional. Sin embargo, una red que complementa a la anterior se podría crear agregando las estaciones climatológicas principales (C1) del MARNR y la Fuerza Aérea, aunque en este último caso habrá que verificar la utilidad de los datos de temperatura, ya que están muy afectados por la localización de las estaciones en aeropuertos con amplias zonas urbanas cercanas. En algunos casos se debería considerar la utilidad de incluir la información proveniente de estaciones tipo C<sub>2</sub>, mientras que para los estudios detallados de la precipitación en algunas áreas agrícolas seleccionadas se será necesario incluir estaciones tipo PR.

La base de datos agroclimática debería incluir las diferentes propuestas de escenarios de cambios climáticos, las que se pueden sintetizar en diversas tablas y mapas, para lo que se debe aprovechar la utilidad que en este sentido aportan los sistemas de información geográfica. Así mismo, resulta necesario incluir la información agroclimática disponible en imágenes tomadas desde satélites u otros



dispositivos.

A nivel general se necesita una integración de información agroclimática que es controlada por varias instituciones, entre ellas el MARNR, FONAIAP, FAV, EDELCA, los centrales azucareros y algunas universidades.

#### Datos de Suelo

Se considera que los datos de suelo que requieren los modelos del sistemas DSSAT para ser calibrados, validados y utilizados, resultan adecuados a las necesidades de las evaluaciones de impacto por cambio climático, ya que en esencia provienen de estudios bastante detallados y de experimentos con los cultivares, tal como sucede con el límite inferior de agua extraible de cada horizonte del suelo, incluyendo además datos de capacidad de campo y la saturación, necesarios también para elaborar balances hídricos y mediciones de efectos agrícolas de los déficits o excesos de agua.

Se deberá tratar de centralizar la información útil proveniente de varios estudios de suelo que se han realizado en el país a nivel de campo y/o laboratorio, en especial aquellos realizados por el MARNR, FONAIAP, PALMAVEN y diversas universidades, incluyendo la información que haya sido mapeada, sobre todo en escalas de 1:250.000 o mayores.

Hay que realizar esfuerzos importantes para determinar el límite inferior de agua extraible por los cultivares en los principales suelos (modales) de las diferentes áreas seleccionadas y en las principales variedades o híbridos, ya que como se ha señalado el límite inferior no sólo depende de las características del suelo sino también del tipo de cultivar. La capacidad de campo y saturación, que dependen más de las características del suelo, también se deben determinar en campo. En los tres límites hídricos citados una correlación con los valores obtenidos en ollas de presión es necesaria, ya que permitirá con relativo poco esfuerzo obtener esos límites para los principales suelos agrícolas del país.

Si bien los modelos del DSSAT no incluyen como datos de entrada a los niveles de fertilidad en nutrientes diferentes al nitrógeno, no se debe descartar la recolección de información de sobre otros nutrientes importantes en nuestro medio, tal como sería el fósforo a causa de su conocida poca disponibilidad en la mayoría de los suelos venezolanos. El potasio es otro nutriente importante a considerar.

Otros datos de suelo necesarios son los asociados a las

características de estabilidad estructural ante los agentes erosivos, en especial ante la precipitación.

#### Datos sobre Características Genéticas de los Cultivares

Si bien para los maíces híbridos más importantes del país se conocen las principales características genéticas que requieren los modelos de simulación del DSSAT, no se conocen aún para rubros importantes como arroz, sorgo y papa. En el caso de la soya investigadores del FONAIAP en Maracay ya han realizado importantes adelantos.

Otros modelos de carácter más general que los del DSSAT y útiles para las evaluaciones de impacto por cambios climático (AQUA, para evaluación de excesos y déficits hídricos en cultivos tropicales) también requieren de coeficientes genéticos. La determinación de estos coeficientes permitirá incluir en las evaluaciones de impacto por cambios climáticos a otros cultivos importantes que no cuentan con modelos de simulación de tipo biofísico.

Para estudio de las características genéticas de nuestros principales es necesaria una estrecha colaboración entre investigadores del FONAIAP, las universidades, el IVIC y diversos institutos privados que apoyan y/o realizan investigaciones sobre genética del cultivos.

#### Datos sobre Técnicas de Manejo y Productividad

Es importante analizar la influencias que las diferentes estrategias de manejo de nuestros agricultores han tenido sobre los niveles productivos a través del tiempo. En este sentido, se deben recopilar datos como fechas, profundidades, y densidades de siembra; nivel de agua en el momento de la siembra; variedades o híbridos seleccionados; tipo, cantidad y frecuencia de fertilización y/o riego; control de plagas y malezas y otros vectores perjudiciales; rotación de cultivos, etc. Por otro lado, se deberán tener a la disposición registros históricos de superficie sembrada y cosechada, producción bruta y productividad en las principales áreas agrícolas del país. Para esto último los datos deberán estar convenientemente espacializados.

#### **Calibración, Validación e Integración de Modelos con Sistemas de Información Geográfica**

Para una confiable utilización y aplicación de diversos modelos agrícolas es necesaria su previa calibración y validación. En este sentido, es conveniente mantener y reforzar el proceso de calibración y validación de diferentes modelos agrícolas que se ha estado realizando en Venezuela desde hace varios años.

Se estima que en Venezuela desde 1989 está validado el modelo CERES-MAíz para la región de los llanos. Así mismo, para soya el FONAIAP tiene el modelo SOYGRO validado en varias localidades, restando realizar las evaluaciones de impacto por cambios climáticos.

En la validación del modelo de sorgo (SORGHUM) el FONAIAP ha seleccionado la región del norte de Guárico, Turén y El Tigre (Mesa de Guanipa) para llevar a cabo los ensayos que permitan la obtención de suficiente información básica. Se considera conveniente incluir alguna localidad del estado Barinas para los experimentos de validación, para lo cual se puede aprovechar la estación experimental que el mismo FONAIAP tiene en dicho estado.

En el caso del modelo frijol-caraota (BEANGRO) se han llevado a cabo los primeros intentos de validación, siendo necesario realizar ensayos varias localidades para así evaluar mejor la exactitud del modelo. En general, es recomendable ampliar los estudios en el cultivo de frijol debido a su gran potencial y utilidad en la rotación de cultivos en la zona norte del estado Guárico y oriente del país.

Ya que aún no existe un proyecto concreto para la validación del modelo de arroz (CERES-Rice) se deben realizar esfuerzos para la implementación de los ensayos respectivos. En este sentido, se recomienda seleccionar algunas localidades en los estados Guárico, Cojedes, Portuguesa y Barinas para realizar los experimentos de campo.

El FONAIAP y el Convenio ULA-ORSTOM están programando ensayos con la finalidad de calibrar y validar el modelo de papa (SUBSTOR) para la región de los andes. Posteriormente se intentarán ensayos para el estado Lara.

A nivel general, en la calibración y validación de los modelos de simulación disponibles se requiere investigar, entre otros, los siguientes aspectos:

- fenología: para el maíz ya se vió que el modelo CERES-Maíz es bastante acertado para predecir la ocurrencia de diferentes fases fenológicas bajo condiciones de buen suministro de agua; sin embargo, también se señaló que el modelo no simula bien el retardo de las fases vegetativas o el aceleramiento de las reproductivas si se producen problemas de falta de agua, por lo cual se deberán realizar los ajustes necesarios y verificar si este es un problema general de los modelos que incluye el DSSAT;

- cálculo de los límites inferior, capacidad de campo y saturación de los suelos: si bien en algunos casos la

concordancia entre valores simulados y observados ha sido aceptable, en otros las diferencias han sido significativas, tal como lo demuestran estudios realizados por Comerma et al. (1985), Delgado (1988) y Maytín et al. (1991a) en sectores de suelos aluviales de nuestro país. Las diferencias encontradas posiblemente se asocian al hecho de que las fórmulas propuestas en los modelos no toman en cuenta los efectos de la estratificación característica del perfil en ese tipo de medio; además, nuestras condiciones pedológicas en cuanto a tipo de arcilla (caolinita preferentemente) y contenido de materia orgánica (bajo o medio) no están bien representadas las fórmulas de los modelos del DSSAT, ya que fueron desarrolladas para suelos de latitudes medias donde predominan otros tipos de arcillas y por lo general existe un mayor contenido de materia orgánica. Por otra parte, en el caso específico del límite inferior de agua extraíble por los cultivos, ya se ha señalado que no sólo depende de las propiedades del suelo como asumen los modelos del DSSAT sino también del tipo de cultivar. Será necesario entonces adaptar o crear algoritmos apropiados que permitan un cálculo más acertado de los tres límites hídricos mencionados.

- simulación de los impactos productivos de los excesos hídricos: dado que para efecto invernadero se esperan aumentos sustanciales en los niveles de precipitación para el territorio venezolano, y que los modelos de simulación del DSSAT no tienen capacidad para evaluar problemas de excesos hídricos, resulta altamente recomendable tratar de modificar los modelos para que puedan simular reducciones de producción a causa de esos excesos, fenómeno que por lo demás es ya bastante perjudicial bajo el clima actual en algunas áreas agrícolas y cultivos de nuestro país (el maíz es un caso típico en este sentido).

- simulación de la dinámica del nitrógeno en el sistema suelo-planta: en este caso ya existe en Venezuela una serie de estudios por parte de investigadores del FONAIAP y del Convenio ULA-ORSTOM, siendo necesario apoyar decididamente la continuidad de estos esfuerzos, dada la gran importancia que tienen los problemas de la nutrición de los cultivos en nuestro país en la actualidad y bajo la perspectiva de que se produzcan cambios climáticos en el futuro. Por otra parte, se deberá tratar de integrar en esos modelos subrutinas que tomen en cuenta otros nutrientes como fósforo y potasio.

- simulación del impacto directo del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico: otro aspecto muy importante en la calibración y validación de los modelos de simulación, es el relativo a los efectos directos del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico, ya que la respuesta productiva ante el cambio en los parámetros climáticos dependerá de la sensibilidad de los cultivos ante

la fertilización por  $\text{CO}_2$ . En este sentido, para el caso de cultivos  $\text{C}_4$  como el maíz, el sorgo y la caña de azúcar es recomendable realizar estudios donde se evalúe sus respuestas productivas dependiendo de los niveles de radiación solar, ya que si estos niveles son menores en un futuro (tal como se espera para ciertos escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero) y llegan a valores muy bajos, se podría producir un cerrado estomático muy pronunciado, lo que no sólo es negativo para el necesario intercambio gaseoso de los cultivos, sino que favorece un mayor calentamiento de las hojas (promoviendo también el cerrado estomático) a causa de la disminución de las tasas de transpiración.

Por otra parte, en la evaluación de los efectos directos del aumento de  $\text{CO}_2$  también se deberán incluir los efectos de diferentes densidades de siembra, ya que estas densidades determinan en gran parte el aprovechamiento general de la radiación solar incidente en un cultivo dado, e inclusive afectan el mismo aprovechamiento del  $\text{CO}_2$  atmosférico. Además, se deberá verificar si las temperaturas medias diarias óptimas para fotosíntesis establecidas por los modelos serán las mismas al considerar una atmósfera con mayor contenido de  $\text{CO}_2$ .

- simulación de los efectos de la competencia por malezas y ataques de hongos e insectos: para esto se considera importante realizar un inventario y descripción de las principales malezas, hongos e insectos asociados a los cultivos prioritarios, incluyendo lo relativo a las relaciones entre su ciclo de vida y la severidad de sus ataques con las condiciones agroclimáticas, de manera tal que se puedan generar algoritmos apropiados que nos permitan simular el desarrollo y los efectos de estos vectores si cambian las condiciones del clima en el futuro. Especial atención deberá darse a los estudios de evaluación de los cambios de competitividad de las malezas por el efecto directo del incremento de  $\text{CO}_2$  atmosférico, sobre todo si esas malezas son de mecanismo fotosintético  $\text{C}_3$ , las cuales teóricamente podrían volverse más competitivas al aumentar su capacidad de desarrollar biomasa.

- integración de modelos socioeconómicos con los modelos de cultivos: es necesario integrar los modelos de cultivos con modelos que representen las principales características socioeconómicas de nuestra agricultura o de aspectos de nuestra economía asociados a la agricultura, tal como son por ejemplo los mercados urbanos. Se podrá así evaluar las respuestas socioeconómicas ante las variaciones de productividad agrícola a causa de los cambios climáticos, considerándose altamente recomendable la unión de esfuerzos de ingenieros agrónomos, economistas, sociólogos, ingenieros hidrometeorólogos, agroecólogos y geógrafos, para que los

modelos desarrollados sean lo más completo posibles.

- integración de los modelos de simulación con sistemas de información geográfica: ya que parte de los datos que requieren los modelos agrícolas se refieren a características que varían espacialmente (datos de clima, características de los suelos y técnicas de manejo, etc), es recomendable integrar las bases de datos de esos modelos con las que conforman a los sistemas de información geográfica. De esta manera se pueden mapear diferentes aspectos de interés; por ejemplo, el mapeo de las variaciones espaciales de productividad asociadas a un escenario de cambio climático específico. Por otra parte, se deberá aprovechar la ventaja de algunos sistemas de información geográfica en el sentido de que pueden aceptar datos provenientes de imágenes de satélites, lo que inclusive es útil para comparar las estimaciones de productividad provenientes de los índices de vegetación en imágenes de satélites con las simuladas por los modelos, facilitando así el proceso de calibración y validación de estos últimos.

### **Extrapolación de Impactos a Nivel Regional y Nacional**

Para realizar la extrapolación de impactos a nivel regional y nacional, es necesario establecer áreas edafoclimáticas homogéneas a las que puedan extenderse los resultados de las evaluaciones locales.

Dentro del marco de las investigaciones del Proyecto PAN-EARTH en el caso de estudio Venezuela, ya se tienen definidas preliminarmente algunas áreas homoclimáticas para la región de los llanos, las cuales han sido establecidas a través de técnicas de análisis de componentes principales y cluster, quedando por definir los contornos de esas áreas y la selección de estaciones representativas. Será menester entonces agregar a estas áreas la información necesaria a nivel de suelos modales para convertirlas en áreas edafoclimáticas homogéneas. Este proceso deberá ser repetido para otras regiones diferentes a los llanos, de manera tal que se pueda realizar extrapolaciones que permitan evaluar los impactos agrícolas de cambios climáticos a nivel regional y nacional.

En la evaluación de impactos agrícolas de cambios climáticos a nivel regional y nacional no sólo se deben aplicar los modelos de simulación, ya que de esta forma quedarían excluidos varios cultivos importantes debido a que no tienen desarrollado su modelo respectivo y sin embargo constituyen rubros importantes en ciertas regiones, tal como es el caso de las hortalizas o el café en la región andina. En este sentido, se sugiere la utilización de análisis basados en las variaciones de la zonificación de áreas potenciales para el

desarrollo de cada cultivo de acuerdo a sus necesidades agroclimáticas, por efecto de los cambios de clima. Para ésto se puede tomar como punto de referencia la metodología que se piensa aplicar en estudios conjuntos a realizar por investigadores del MARNR, FONAIAP y PAN-EARTH, con el objetivo de evaluar a nivel regional y nacional el impacto de cambios climáticos en el cultivo del maíz, y que se sintetiza a continuación:

- Recopilación del mapa de aptitud edáfica para el desarrollo del cultivo respectivo (mapas a escala 1:250.000 o menor);

- Recopilación del mapa de zonificación edafo-climática del cultivo a escala 1:250.000 o menor;

- Modificación de las series de tiempo en los parámetros de radiación, temperatura y precipitación del período de estudio usado en el punto anterior;

- Determinar el efecto que produce la modificación de los escenarios de cambio climático en la ETP;

- Obtención de fechas de inicio y duración de los períodos de crecimiento y del período húmedo, para determinar los nuevos calendarios agrícolas y los mapas respectivos.

- Realización de balances hídricos decadales generales con las nuevas series climáticas para determinar áreas con riesgos climáticos como excesos de agua, déficits hídricos y veranillos.

- Realizar balances hídricos decadales para el cultivo para precisar las áreas potenciales y producir el mapa de aptitud climática basada en los requerimientos hídricos.

- Superposición de mapas suelo-cultivo y clima-cultivo y obtención del mapa de zonificación edafo-climática del cultivo según la siguiente leyenda: apto, moderadamente apto, marginalmente apto y no apto.

- Comparación de los mapas de zonificación edafoclimática actual con los que resultan de los cambios climáticos.

Para el proceso de extrapolación de impactos a nivel regional y nacional también será necesario contar con planes agrícolas a mediano y largo plazo, donde se determinen los posibles niveles de demanda de tierras y productividad de nuestros principales cultivos para poder cumplir con las necesidades de alimentación en una población lógicamente incrementada en el futuro. De esta forma, tendremos un nivel de referencia adecuado para poder evaluar el verdadero

impacto que los cambios climáticos en la agricultura de nuestro país, ya que se podrán comparar los niveles necesarios de producción para cumplir con esa demanda incrementada y los estimados de producción de acuerdo al impacto de los cambios climáticos en los cultivos y áreas prioritarias. Por otra parte, resultará de utilidad determinar cuáles estrategias de manejo minimizan los efectos negativos o maximizan los efectos positivos de los cambios climáticos, ya que ésto contribuye también a generar un marco de referencia adecuado para medir el impacto agrícola de los cambios climáticos incluyendo los efectos en otros sectores importantes para el normal desarrollo de nuestro país.



## BIBLIOGRAFIA

Adams, M. R., Rosenzweig, C., Peart, R. M., Ritchie, J. T., McCarl, B. A., Glyder, D. J., Curry, B. R., Jones, W. J., Kenneth, J. B., and Hartwell, L. A. Jr., 1990: **Global Climate Change and US Agriculture.** Nature 354, 219-223.

Ackerman, P. T, and Wendell P. Cropper, Jr. 1988: **Scaling Global Climate Projections to Local Biological Assessments.** Environment, 30 (5), pp. 31-34.

Baier, W. 1983: **Modelos Agroclimáticos: Reseña Literaria.** En Información Agroclimática para el Desarrollo. Reviviendo la Revolución Verde. Cusack, D., Benacchio, S. y Jedamus, J. (eds.). Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Banco Interamericano de Desarrollo, 93-136.

Balteanu, D., Ozende, P., Huhn, M., Kerschner, H., Tanquillini, W., and Borteenschlager, S. 1987: **Impact Analysis of Climatic Change in the Central European Mountain Ranges, Vol G.** In: European Workshop on Interrelated Bioclimatic and Land Use Changes, Noodwijkerhout, The Netherland, October.

Benacchio, S., Canizales, R., Riccelli, M., y Avilán, W. 1987: **Zonificación Agroecológica del Cultivo del Sorgo en el País.** Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP) y Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP), Serie C No. 10-02, pp. 44.

Bisbal, C. E., y Comerma, J. A., 1991: **El Modelos Ceres como Herramienta para Estimar los Efectos de los Cambios Climáticos en la Producción de Maíz en Venezuela.** Ponencia presentada en el Primer Congreso Venezolano de Ecología, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, 15-17 de abril.

Bolin, B., Jager, J., and Doos, B. 1986: **The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystem: A Synthesis of Present Knowledge,** in B. Bolin., B. Doos., Jager, J., and R. Warrick (eds.), The Greenhouse Effect, Climatic change and Ecosystem, Jhon Wiley and Sons, New York.

Bravo, R. E., Canadas Cruz, L, Estrada, W., Hodges, T Knapp, G. Ravelo., Pachuelos-Ravelo, A. M., Rovere, O., Salcedo Solis., and Yugcha, T. 1988: **The Effects of Climatic Variations on Agriculture in the Central Sierra Ecuador.** In: The Impact of Climatic Variation on Agriculture Vol. 2 Assessments in Semi-arid Region, M. L. Parry, T. R. Carter and N. T. Konijn (eds.), Kluwer, Dordrecht, The Netherland.

Brito, P. A., de Brito, J. G. y García, E. 1988: **Caracterización Agroclimática de las Areas Rurales de**

**Desarrollo Integrado de los Estados Barinas, Cojedes y Portuguesa Considerando Capacidad de Retención de Humedad de los Suelos.** Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Serie C No. 29, pp. 134.

Comerma, J., 1984: **The Use of Simulation Model for Agrothechnology Transfer in Venezuela.** Congreso Internacional de Suelos, Hamburgo (Alemania), pp. 14.

Environmental Protection Agency (EPA, USA), 1989: **The Potential Effect of Climate Change on the United States** Draf to Report to Congress. Smith, J., and Tirpak, D (eds).

Frere, M., and Popov, G. F. 1979: **Agrometeorology Crop Monitoring and Forecasting.** FAO Plant Prod. and Protection Paper 17, FAO, Rome.

Gifford, R. M. 1988: **Direct Effect of Higher Carbon Dioxide Levels Concentration on Vegetation.** In: Greenhouse: Planing for Climatic Change, pp 506-519, G.I. Pearman (Ed.), CSIRO Australia.

Handler, P. 1985: **Possible Asociation Between the Climatic Effect of Stratospheric Aerosols and Corn Yield in the United States.** Agricultural and Forest Meteorology, 35, 205-228.

Haggett, P. 1964: **Toward a Statistical Definition of Ecological Range: The Case of Quercus Suber,** Ecology, 45, 662-625.

Hanus, H. 1978: **Forecasting of Crop Yields from Meteorological Data in the E.C. Countries.** Agricultural Statistical Studies, No. 21, Statistical Office of the European Communities.

Hayes, J. T., O'Rourke, P. A., Terjun, W. H., and Todhunter, P. E. 1982: **YIELD: A Numerical Crop Yield Model of Irrigated and Rainfed Agriculture.** Publ. Climatol. 35, C. W. Thornthwaite Assoc. and cen. for Clim. Res., Elmer, N. J.

Hodges, T., Botner, D., Sakamoto, C., and Hays, J. 1987: **Using the CERES-Maize Model to Estimate Production for the U.S. Cornbelt.** Agricultural and Forest Meteorology, 40 (4), 293-304.

Hoogemboom, G., and Thorton P. K. 1989: **A Geographic Information System for Agrotechnology Transfer Application in Guatemala.** In IBSNAT SYMPOSIUM, Part II: Poster Session, 81st Annual Meeting of the American Society for Agronomy, Las Vegas, Nevada, October.

Idso, S. B. I., Kimball, B. A., and Mauney, J. R., 1988: **Atmospheric CO<sub>2</sub> Enrichment and Plant Dry Matter Content.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 43, pp. 171-181.

Jaimes, R., and White, 1991: **Modeling the Impact of Climate Change on Production of Black Beans in Western Venezuela.** (unpublished paper), pp 18.

Jones, J. W., Mishoe, W. J., and Boote, K. J. 1987: **Introduction to Simulation and Modeling.** Fodd and Fertilizer Technology Center, Technical Bulletin No. 100.

Jones, C., and Kiniry, J., 1986: **CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development.** College Station: Texas A and M University Press, pp. 193.

Kazt, R., 1977: **Assessing The Impact of Climatic Change on Food Production.** *Climatic Change*, 1, pp. 85-96.

King, D. 1989: **Remote Sensing and Agrometeorological Models for Yield Forecast.** Ispra, Italy, Institute for Remote Sensing Application.

Lal, H., Jones, J. W., Beinroth, F. H., and R. M. Peart. 1989: **Regional Agricultural Planning Information and Decision Support System.** In IBSNAT SYMPOSIUM, Part II: Poster Session, 81st Annual Meeting of the American Society for Agronomy, Las Vegas, Nevada, October.

Lamb, H. H. 1969: **The New Look of Climatology.** *Nature*, 254, pp. 1209-1215.

Liu, W. T. H., Botner, D. M., and Sakamoto, C. M. 1989: **Application of CERES-Maize Model to Yield Prediction of a Brazilian Maize Hybrid.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 45, 299-312.

Liverman, D., Terjun, W., Hayes, J., and Mearns, L., 1986: **Climatic Change and Grain Corn Yield in the North American Plains.** *Climatic Change*, Vol 9, No. 3, pp. 327-347.

Mabbutt, J. A. 1989: **Impacts of Carbon Dioxide Warming on Climate and Man in the Semi-Arid Tropics.** *Climatic Change*, 15, pp. 191-221.

Martin, P., Rosenberg, N., and Mckenney M. S. 1989: **Sensitivity of Evapotranspiration in a Wheath Field, a Forest, and Grassland to Changes in Climate and Direct Effect of Carbon Dioxide.** *Climatic Change*, 14, pp. 117-151.

Marrero, J., 1987: **Determinación de los Coeficientes Genéticos del Modelo CERES-Maíz en 6 Cultivares de Maíces**

**Venezolanos para Predecir sus Relaciones Genotipo-Ambiente.** Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay estado Aragua, Tesis de Grado, pp 86.

Maytín, C. E., 1991 : **Impacto de Cambios Climáticos por Efecto Invernadero o Deforestación sobre el Maíz Híbrido CENIAP PB-8 en Barinas y Turén.** Tesis de Maestría en Ecología Tropical, Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, Mérida, 148 pp.

Maytín, C. E., Zuvia, M., Acevedo, D., Hétier, J., y Pérez, J., 1991a: **Determinación de Parámetros del Balance Hídrico para el Modelo CERES-Maíz.** Primer Congreso Venezolano de Ecología, Universidad Simón Bolívar, Sarteneja, 15-17 de abril de 1991.

Maytín, C. E., Jaimes, R., Acevedo, M., Andressen, R., Robock, A., Azócar, A., Hartwell, M., and Tonella, G.. 1991b: **Effects of Climatic Change on the Phenology and Yield on Two Hybrid Maize Cultivars in Venezuela.** Trabajo a ser enviado a la Revista Climatic Change.

Montaldo, A. y Montilla, J. 1976: **Producción de Follaje de Yuca.** IV Simposio Internacional de Cultivos de Raíces Tropicales, Sociedad Internacional de Cultivos de Raíces Tropicales y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, 1-8 de Agosto, pp. 30-51

Monteith, J. L. 1965: **Evaporation and Environment,** Symposium of Society for Experimental Biology, 19, 205-234.

National Defense University (NDU). 1988: **Crop Yields and Climatic Change to the Year 2000,** Vol. 1, Washington D. C., Fort Lesley J. McNair.

Neild, R., Richman, H., and Seeley, M., 1979: **Impact of Different Types of Temperature Change on the Growing Season for Maize.** Agricultural Meteorology, 20, pp. 367-374.

Nicholls, N. 1986: **Use of the Southern Oscillation to Predict Australian Sorghum Yield.** Agricultural and Forest Meteorology, 38, pp. 9-15.

PAN-EARTH PROJECT, 1989: **Venezuela Case Study.** PAN-EARTH/FONAIAP Workshop on Crop Model Training and Calibration. Maracay, Venezuela, 13-16 November, pp 37.

\_\_\_\_\_, 1990: **Venezuela Case Study.** PAN-EARTH/CEACT International Workshop on Climate Variability and Climate Change in Venezuela and Caribbean Region. Mérida, Venezuela, April, pp 20.

Parry, M. L., and Carter, T. R. (eds) 1984: **Assessing the Impact of Climatic Change in Cold Region**, Summary Report SR-84-1, International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 42.

\_\_\_\_\_, 1989: **An Assessment of the Effect on Climatic Change on Agriculture**. *Climatic Change*, 15, pp. 95-116.

Peart, R., Jones, J., Curry, B., Boote, K., and Hartwell L. Jr., 1988: **Impact of Climate Change on Crop Yield in the Southern U.S.A.: A Simulation Study for USA Environmental Protection Agency**. Report Final, pp. 56.

Rasmidatta, V. 1976: **The Climatic Fluctuation and Problems in Corn Production in Thailand**. In: *Climatic Change and Food Production*, International Symposium on Recent Climatic Change and Food Production. Held October 4-8, Tsukuba and Tokyo, pp. 147-153.

Robock, A., 1979: **The Little Ice Age: Northern Hemisphere Average Observation and Model Calculation**. *Science*, 206, pp. 1402-1404.

\_\_\_\_\_, 1989: **GCM Greenhouse Warming Scenarios for Africa**. Paper presented at PAN-EARTH Workshop on Effect of Climate Change with Emphasis on Sub-Saharan Africa, Saly, Senegal, September 11-15, pp. 9.

\_\_\_\_\_, 1990: **Use of GCM Output in the Creation of Climate Change Scenarios for Impact Analysis**. Submitted to Mitchell Prize Competition, pp. 51.

Rosenberg, N., 1981: **The Increasing CO<sub>2</sub> Concentration in the Atmosphere and its Implications on Agricultural Productivity, I : Effect on Photosynthesis, Transpiration and Water Use Efficiency**. *Climatic Change*, Vol. 3, No. 3, pp. 251-265.

\_\_\_\_\_, 1982: **The Increasing CO<sub>2</sub> Concentration in the Atmosphere and its Implications, II: Effect Throught CO<sub>2</sub> Induced Climatic Change**. *Climatic Change*, Vol 4, No. 3, pp. 282-239.

Rovira, A. J., y Eder M. H. 1986: **Sistemas y Regiones Agrícolas de Venezuela**. Fundación Polar y Ministerio de Agricultura y Cría, pp. 162

Salinger, M. J. 1989: **The Effect of the Greehouse Gas Warming on Forestry and Agriculture**. Draft report for WMO Commission of Agrometeorology, pp. 20.

Sánchez, A. J., Arias, L., y Comerma, J. 1982: **Delimitación y Definición de Unidades Agroecológicas**. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP) y Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP), Serie C No. 1-02, pp. 32.

Santer, B. 1985: **The Use of general Circulation Model in Climatic impact Analysis: A Preliminary Study of the Impact of a CO<sub>2</sub>-Induced Climatic Change on West European Agriculture**. *Climatic Change*, 7, pp. 71-93.

Sequera de Segnini, Isbelia. 1978: **Dinámica de la Agricultura y su Expresión en Venezuela**. Editorial Ariel Seix-Barral Venezolana, 1978, pp. 331.

Smith, B., Braklaci, M., Stewart, R., McBride, R., Brown, M., Bond, D., 1989: **Sensitivity of Crop Yield and Land Resource Potential Change in Ontario, Canada**. *Climatic Change*, 14, pp. 153-174.

Sudar, R. A., Saxton, K. E., and Spomer, R. G., 1981: **A Predictive Model of Water Stress in Corn and Soybeans**. *Trans. ASAE* 24, 97-102.

Takami, S., and Bavel, Vam. C., 1975: **Numerical Experiments on the Influence of CO<sub>2</sub> Release at Ground Level on Crop Assimilation and Water Use**. *Agricultural Meteorology*, 15, pp. 193-203.

Takahashi, K. and J. Nemoto. 1976: **Relationships Between Climatic Change, Rice Production and Population**. In: *Climatic Change and Food Production, International Symposium on Recent Climatic Change and Food Production*. Held October 4-8, Tsukuba and Tokyo, pp. 183-196.

Tanaka, M. 1976: **Aspects of Recent Rainfall Fluctuations with Regard to Land Utilization in Sri Lanka**. In: *Climatic Change and Food Production, International Symposium on Recent Climatic Change and Food Production*. Held October 4-8, Tsukuba and Tokyo, pp. 81-100.

Terjun, W. H., Ji H-Y., Hayes, J. T., O'Rourke, P. A. and Todhunter, P. E. 1984: **Actual and Potential Yield for Rainfed and Irrigated Maize in China**. In: *International Journal of Biometeorology*, 28, pp. 115-135.

Thorntwaite, C. W. 1948: **An Approach Toward a Rational Classification of Climate**. *Geogr. Rev.*, 38 (1), 55-94.

Turc, L., and Lecerf, H. 1972: **Indice Climatique de Potentielle Agricole**. *Science du Sol*, 2, pp. 81-102.

Van Keulen, H., H. H. van Laar., W. Louwerse and J. Goudriaan. 1981: **Physiological Aspect of Increased CO<sub>2</sub> Concentration.** *Esperientia* 36, pp. 786-792.

Varghese, G., Thambirajah, J. y F. M. Wong. 1976: **Proteina Enriquecida de Yuca por Fermentación con Hongos: El Papel de Suplementos Nitrogenados Naturales.** IV Simposio Internacional de Cultivos de Raíces Tropicales, Sociedad Internacional de Cultivos de Raíces Tropicales y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, 1-8 de Agosto, pp. 23.

Venezuela (Instituto Nacional de Nutrición) y Fundación Polar. 1988: **Hoja de Balance de Alimentos 1980-1984.** Editorial Artes, pp. 537

Venezuela (Oficina central de Información, OCEI). 1988: **V Censo Agrícola.**

Wada, H., 1976: **Ultralong-range Weather Forecasting and Food Problems.** In: **Climatic Change and Food Production, International Symposium on Recent Climatic Change and Food Production.** Held October 4-8, Tsukuba and Tokyo, , 391-400

Wenda, W. I and Hanks, R. J.. 1981: **Corn Yield and Evapotranspiration Under Simulated Drought Conditions.** *Irrigation Science* 2, 193-204

Wheterald, R. T., and Manabe, W., 1986: **An Investigation of Cloud Cover Change in Response to Thermal Forcing.** *Climatic Change* 8 (1), 5-23.

William, G. D. V. 1985: **Estimated Bioresource Sensitivity to Climatic Change in Alberta, Canada.** *Climatic Change*, 7, 45-54.

William, G. D. V., Fautley, R. A., Jones, K. H. Stewart, R. B., and Wheaton, E. E. 1988: **Estimating Effects of Climatic Change on Agriculture in Saskatchewan, Canada.** In: **The Impact of Climatic change on Agriculture: Vol. 1, Assessment in Cool, Temperate and Cold Region,** pp. 219-379. M. L. Parry, T. R. Carter and N. T. Konijn (eds.), Kluwer, Dordrecht, The Netherland.

## 4.- IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES VENEZOLANOS

### 4.1.- INTRODUCCION

Un cambio en las condiciones climáticas de nuestro planeta podría modificar los ecosistemas terrestres, dependiendo de la capacidad de éstos para adaptarse a dichos cambios (Urban y Shugart 1989; Graham y Grimm 1990). En algunos casos se esperar una reducción en la distribución geográfica de ciertos ecosistemas, debido a que aparentemente sus límites más cálidos (siempre y cuando la capacidad de migración sea adecuada) por lo general avanzan más rápido que los límites menos cálidos (Zabinski y Davies 1989). Aquellas especies o ecosistemas no adaptados a las nuevas condiciones climáticas podrían ser afectados hasta el extremo de extinción, mientras que los ecosistemas que se adaptasen a las nuevas condiciones climáticas posiblemente lo harían al costo de una variación en la proporción de crecimiento y productividad que afectarían sus patrones de distribución (Holt 1990).

Se ha destacado aquí las posibilidades de extinción de ecosistemas, ya que los procesos de adaptación y migración tomarían mucho más tiempo que el estimado para los cambios climáticos, sobre todo si éstos últimos son rápidos. En este sentido, el tipo de polen encontrado en barrenos de hielo provenientes de glaciares, indica que huó ecosistemas de épocas interglaciales pasadas que pudieron emigrar a zonas adecuadas para su desarrollo, ya que los cambios de temperatura fueron menos acelerados (en el orden de miles de años) en comparación a los que se pronostican para el siglo entrante a causa del efecto invernadero (Guiot et al. 1989).

#### 4.1.1. Objetivos

- Destacar algunos resultados de interés obtenidos en evaluaciones de posibles efectos de cambios climáticos en ecosistemas terrestres de países diferentes a Venezuela;

- Reseñar algunas metodologías aplicadas en la evaluación del impacto de cambios climáticos sobre los ecosistemas terrestres y que tengan potencial de ser aplicadas en nuestro país, haciendo especial énfasis en métodos que se basan en el uso de modelos de simulación.

- Seleccionar algunos ecosistemas terrestres importantes del territorio venezolano, donde resulte prioritario iniciar las evaluaciones del impacto de cambios climáticos.

- Discutir los resultados obtenidos hasta ahora en



la evaluación de posibles impactos de cambios climáticos en los ecosistemas terrestres venezolanos.

- Proponer una serie de estrategias e investigaciones necesarias para una evaluación más detallada de los efectos de los cambios climáticos en los ecosistemas terrestres venezolanos.

#### **4.1.2. Experiencia en otras Regiones y Países.**

El estudio de los cambios globales del ambiente se originó en los años veinte por medio del mineralogista ruso Vladimir I. Vernadsky en sus trabajos sobre la biósfera (Clark 1989). Tales trabajos recibieron impulsos importantes desde el Año Geofísico Internacional en 1957 y son actualmente continuados en base a investigaciones científicas promovidas alrededor del mundo a través de organizaciones y redes que incluyen, entre otros: el Programa Internacional de la Geósfera y la Biósfera (IGBP), la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA) y la Red de Evaluación Predictiva de las Respuestas Ecológicas y Agrícolas a las Actividades Humanas (PAN-EARTH).

#### **- Actividades del Programa Internacional sobre la Geosfera y la Biosfera (IGBP).**

El IGBP es una red de investigaciones en el marco del Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU), que se dedica al estudio interdisciplinario de los cambios en el ambiente global, a través de las interacciones entre los ciclos biogeoquímicos y los procesos físicos del planeta. El IGBP tiene como objetivo principal: "la descripción y el conocimiento de los procesos interactivos físicos, químicos y biológicos que regulan el sistema total de la Tierra; el ambiente único de vida que éste provee, los cambios que están ocurriendo en este sistema y la manera en la cual éstos son influenciados por actividades humanas". Como meta principal se pretende entender y predecir el funcionamiento del sistema Tierra, especialmente en relación a cambios que afectan la biósfera (IGBP 1990).

Entre los diversos proyectos establecidos por el IGBP para el estudio de la biósfera se destacan el Proyecto Internacional y Global sobre la Química de la Atmósfera (IGAC), el Estudio Conjunto de los Flujos Océánicos Globales (JGOFS), los Aspectos Biosféricos del Ciclo Hidrológico (BAHC), el Cambio Global y los Ecosistemas Terrestres (GCTE), y los Cambios Globales del Pasado (PAGES). A continuación se mencionarán los puntos importantes que forman parte del proyecto GCTE.

El GCTE tiene como objetivo el desarrollo de la capacidad

para predecir los efectos de cambios en la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico y el clima sobre los ecosistemas terrestres, y como éstos efectos pueden inducir mecanismos de retroalimentación del sistema físico del clima. Los tres principales focos de estudio en este proyecto son los siguientes:

- la fisiología de los ecosistemas en relación a las formas de intercambio de energía y materia y los procesos de cambio de biomasa y almacenamiento de elementos;

- las dinámicas de los ecosistemas en función a los cambios de composición y estructura fisionómica en ellos y sus distribuciones espaciales;

- los impactos sobre ecosistemas agrícolas y forestales concerniente con los efectos sobre cultivos y bosques importantes en relación a la producción.

- Investigaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).

A nivel regional la EPA compiló una serie de trabajos relacionados a los efectos potenciales en EE.UU a raíz de los cambios climáticos globales (EPA 1989). Entre los puntos tratados se encuentran los posibles efectos sobre los ecosistemas forestales y la biodiversidad y cómo éstos efectos impactan a su vez a las condiciones socioeconómicas de la población.

Desde el punto de vista forestal, entre los estudios compilados por el EPA se destacan aquellos en los cuales se examinan cambios geográficos de bosques a través de correlaciones entre temperatura y precipitación estimadas por medio de modelos de circulación general de la atmósfera. También se utiliza para éstos estudios la información paleontológica. Por otra parte, se incluye también el análisis de los cambios de estructura, composición y abundancia de bosques estimados por medio de modelos específicos.

Cabe destacar que de los resultados obtenidos por el EPA a través de modelos empíricos y relaciones estadísticas, se desprende que la sensibilidad de los ecosistemas forestales de EE.UU pudieran ser afectados significativamente debido al calentamiento global (EPA, 1989). También se estima que estos cambios pudieran presentarse en un período de 30 a 80 años, dependiendo de la región y la proporción del cambio climático. Se considera que cambios en la composición de bosques y así como en su productividad puedan resultar a raíz de las proporciones diferentes de migración y de sensibilidades climáticas.

## Actividades del Proyecto PAN-EARTH

El Proyecto PAN-EARTH, aparte de la evaluación de impactos de cambios climáticos en los agroecosistemas, ha hecho también énfasis en la necesidad de evaluar los posibles impactos de esos cambios sobre los ecosistemas terrestres, en especial los de bosques y sabanas.

En el estudio de Caso de China resalta la evaluación del los efectos de cambios climáticos sobre el potencial de producción de vegetación, la estructura típica de comunidades gramínoideas y la productividad primaria. Los resultados de estos estudios están todavía por publicarse.

Entre los trabajos realizados por PAN-EARTH en la región del Sub-Sahara del Africa destacan:

- los estudios de los efectos de cambios climáticos sobre ecosistemas forestales realizados por el Dr. Yaya Sangare (1989), habiéndose observado a través de un análisis de las precipitaciones en los últimos 30 años (desde 1950), un traslado en isoyetas hacia las zonas sureñas y la desaparición casi total de la estación corta de lluvias con disminución de algunas áreas forestales.

- los estudios de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la región del Sahel (Bonkoungou 1989), donde se ha observado grandes variaciones de precipitación en estaciones 5 km. aparte, aunque la variabilidad interanual en cada estación no es muy marcada como en otras regiones del mundo. Al parecer existe un patrón de déficits y excesos en precipitación anual que son seguidos intermitentemente en base a incrementos decadales. También se nota una distribución de eventos muy intensos que pueden ocurrir dentro de muy cortos intervalos temporales.

Los resultados anteriores, en conjunto con otros en el sector agrícola, indican mayores cambios en la distribución y frecuencia de las lluvias, lo que lleva a pensar que los mayores cambios climáticos en la región del Sub-Sahara se están evidenciando a través de cambios temporales y espaciales en la estación de lluvias. Actualmente, los científicos Africanos están trabajando en determinar los períodos de comienzo y finalización de las lluvias, y aquellas regiones más afectadas por los cambios climáticos.

### Otras Investigaciones

#### - Impacto de Cambios Climáticos Pasados.

En un estudio de efectos de cambios climáticos pasados sobre bosques intertropicales pluviosos, Keining y Boyle

(1985) encontraron que la expansión de dichos bosques en el este de Africa ocurrió hace unos 3.3 millones de años (finales del terciario), pero luego ocurrió una disminución a causa de los periodos glaciales, encontrándose en base a la relación entre isótopos de carbón y el carbón estable que existieron cambios marcados en la biomasa, lo que se asoció a cambios térmicos globales modulados por parámetros orbitales en periodos de 20.000 a 40.000 años.

En el caso de la alta montaña intertropical suramericana, Vander Hammen (1981) encontró en base a estudios de polen evidencias de migraciones altitudinales de ecosistemas de páramos y de sabanas, a consecuencia de cambios climáticos ocurridos en la última secuencia de eventos glaciales e interglaciales, reportando un periodo húmedo y cálido entre 50.000 y 25.000 antes del presente, en el cual los páramos alcanzaron mayor altura al comparar con el periodo siguiente ocurrido entre 21.000 y 13.000 antes del presente, el cual fue más frío y seco (último gran avance glacial).

Ball (1986) comparó los límites actuales entre los bosques boreales y la tundra en Canadá, con aquellos propuestos en un mapa por Samuel Hearne's en 1772, encontrando diferencias que se atribuyen al efecto causado por la finalización de la llamada "Pequeña Edad del Hielo", periodo de enfriamiento que parece haberse extendido desde mediados del siglo 15 hasta finales del siglo pasado.

Un factor que según Ball parece haber sido determinante en la variación de la localización del límite entre los bosques boreales y la tundra, fue la posición del frente polar ártico y la intensidad de la penetración de la masa de aire polar marítimo en el oeste de Canadá y de la masa de aire polar continental en la parte central de dicho país. Se concluye que las observaciones de Hearne's son consistentes con el rango de cambios climáticos asociados con la "Pequeña Edad del Hielo" y que su delimitación de bosques boreales y tundra permite comparar con los límites actuales para así tener una idea de los efectos de cambios en las condiciones climáticas sobre la distribución geográfica de esos ecosistemas.

Sinhg y Powell (1986) analizaron las tendencias climáticas de las temperaturas y precipitaciones mensuales y anuales entre 1872 y 1981 en tres subregiones ecológicas: a) áreas de transición entre tierras de bosques boreales y tierras de gramíneas, b) sectores donde el bosque es predominante y c) las regiones limítrofe entre bosque y tundra. Se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) en las medias mensuales de temperatura entre las tres regiones para cada mes y similares diferencias para precipitación en la mayoría de los meses, destacándose un leve pero altamente significativo

incremento de temperatura, sobre todo en la región boscosa, lo que probablemente está afectando a los bosques boreales, ya que su distribución espacial responde bastante bien a los límites impuesto sobre todo por la temperatura.

#### - Efecto de Cambios Climáticos Futuros

##### a) Estudios que no Incluyen el Efecto Directo del CO<sub>2</sub>.

Emanuel et al. (1985) evaluaron los posibles cambios en los límites de las zonas de vida de Holdridge (1964) a causa de los aumentos de temperatura asociados al efecto invernadero (2 x CO<sub>2</sub>, condiciones de equilibrio). En este sentido, se encontró que la mayoría de las zonas de vida del mundo podrían desplazarse, en especial las de latitudes medias y altas donde se pronostican los mayores aumentos térmicos, destacándose el efecto sobre los bosques boreales (coníferas), debido a la ya señalada estrecha correlación entre la temperatura y la distribución espacial de dichos bosques y a que los cambios térmicos esperados (entre 3.1 y 4.4 °C; basado en Manabe y Stoufer, 1980) son mayores que los rangos de temperatura que definen la zona de vida de bosques boreales.

A nivel general la zona de vida de bosque boreal se desplazarían en cada hemisferio hacia el polo respectivo a causa de un calentamiento, ocupando en su límite más polar terrenos actualmente dominados por los ecosistemas de tundra, mientras que hacia su lado más cálido podrían ser reemplazados por los bosques o estepas templadas frías. En el caso de zonas de vida de latitudes más bajas, los resultados de Emanuel et al. (1985) indican que las zonas subtropicales se desplazarían a tierras hoy en día templadas cálidas; además, los bosques tropicales húmedos podrían ser en parte reemplazados por bosques tropicales secos.

Los desplazamientos de bosque boreales a causa de los cambios climáticos también han sido sugeridos por Kauppi y Posch (1987), estableciendo que bajo los escenarios de cambios climáticos simuladas por el modelo GISS esos bosques se desplazarían entre 500 y 1000 Km. hacia el norte (válido sólo para el hemisferio norte). En el caso específico de Canadá tal desplazamiento sería de 470 a 920 Km en los límites norte de los bosques boreales (límites con la tundra) y de 80 a 720 Km. en el límite sur; sin embargo, de acuerdo a investigaciones realizadas por Smith y Tirpak (1989) para los escenarios simulados por el modelo GFDL los desplazamientos de los bosques boreales hacia el norte estarían entre 250 y 900 Km. en el límite norte y de 100 a 730 Km. en el límite sur. Al sur este de EE.UU se podría esperar cambio de tierras actualmente boscosas por

tierras de arbustos y sabanas.

Otros resultados importantes aportados por Smith y Tirpak (1989) son los siguientes:

- Los cambios de temperatura y precipitación causarían un incremento de la mortalidad de especies arbóreas en muchas localizaciones, especialmente en las áreas de bosques deciduos templados (coníferas) y en su límite sur;

- Se notan respuestas transientes en composición de especies y almacenaje de carbón, aún 300 años después de terminar los cambios climáticos (Salomon, 1986);

- Un importante factor de las respuestas de los stand ante el incremento térmico es la disponibilidad de agua en el suelo, esperándose que en los límites entre bosques boreales y bosques templados fríos la productividad y la biomasa deben crecer si la disponibilidad hídrica en los suelos es adecuada y decrecer en el caso contrario.

Pittock y Nix (1986) realizaron un estudio preliminar de las variaciones de productividad neta para el continente australiano a causa de cambios de temperatura y precipitación para mediados del próximo siglo si ocurre el efecto invernadero. Para este estudio se utilizó un modelo propuesto por Lieth (1975 y 1978), el cual asocia la productividad primaria neta (ton/ha/año) al promedio anual de temperatura y al total anual de precipitación a través de ecuaciones de regresión no lineales. Se evaluaron los siguientes escenarios de cambios climáticos: la temperatura media anual se incrementó en 0.1 °C por cada grado de latitud; por ejemplo, +1 °C a 10° sur y 4 °C a 40° sur; la precipitación entre noviembre y abril (que incluye los meses de verano) se incrementó en 40%, mientras que entre mayo y octubre se redujo en 20%. Los principales resultados fueron:

- Se nota un apreciable incremento de productividad neta en la mayor parte de Australia pero sin cambios muy marcados en la productividad relativa entre diferentes regiones;

- La única área con un descenso de productividad neta en Australia bajo efecto invernadero sería la situada a lo largo de la costa del sur-oeste;

- las productividades más altas continuarían localizadas a lo largo de la costa este desde Cabo York hasta Tasmania, en el sur-oeste y en el norte, mientras que las productividades más bajas se localizarían en Simpson y el desierto central.

Pittock y Nix destacan que los resultados anteriores

constituyen una amplia generalización, ya que se basan en escenarios de cambios climáticos muy simplistas (no toman en cuenta variaciones de radiación solar, vientos, humedad e interacciones con el factor suelo) y en un modelo de regresión de productividad muy crudo que no incluye el efecto directo del incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico en la vegetación, el cual podría afectar de manera determinante el almacenamiento de CO<sub>2</sub> por parte de la vegetación. En este sentido, un incremento promedio de productividad primaria que genere sólo un aumento de 1% en el almacenamiento del carbono total en la vegetación, sería del mismo orden que la liberación anual de CO<sub>2</sub> debido a la quema de combustibles fósiles, que se estimó en unas 5 a 6 Gton. para 1980. Esto implica según Pittock y Nix que los cambios climáticos inducidos por el incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico y el incremento esperado en la productividad primaria neta podrían disminuir considerablemente el incremento en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (retroalimentación negativa).

Schimel et al. (1990) presentaron un modelo de biogeoquímica del carbón y nitrógeno (modelo CENTURY) para la Región Central de Gramíneas en los Estados Unidos (dominada por especies C<sub>4</sub>), con el cual evaluaron posibles impactos de cambios climáticos de dos escenarios futuros: a) caso transiente en base a simulaciones de 50 años, b) nuevo equilibrio del clima para dentro de 500 años. En los dos casos se utilizaron las salidas del modelo de circulación general de la atmósfera GISS, pero no se incluyó el efecto directo del aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico; además se asumió que las gramíneas consumían una fracción constante de la productividad primaria neta aérea, destacándose que en realidad los cambios en las relaciones entre carbono fijado y consumo de agua y nitrógeno podrían producir una vegetación con menor calidad de litter (amplia relación carbono/nitrógeno). Se efectuaron cambios de temperatura de +4 °C combinados con variaciones de precipitación de + 7.7% al norte del área estudiada y de -3.5 al sur. Los principales impactos de los cambios climáticos evaluados fueron:

- Los cambios climáticos asociados al efecto invernadero influyen procesos heterotróficos como los ciclos de descomposición y liberación de nutrientes, lo que determina en parte las respuestas de la vegetación ante dichos cambios;

- La producción simulada de gases en la región estudiada indica que las tasas de producción varían geográficamente por más de un factor de dos (2) dentro del bioma estudiado y dependiendo más de los cambios de precipitación que de los cambios térmicos;

- A pesar del incremento de productividad primaria neta que se notó en la fase transiente de las respuestas biogeoquímicas, los cambios climáticos simulados resultan en una pérdida neta de carbón y en consecuencia liberación del mismo hacia la atmósfera, favoreciendo así el incremento del efecto invernadero y contradiciendo a Pittock y Nix (1986).

Overpeck et al. (1990) utilizaron el modelo estocástico de claros FORENA (también llamado FORET) para simular el impacto de cambios climáticos por efecto invernadero sobre cuatro tipos de bosques localizados en el este de norteamérica. Las simulaciones se hicieron corriendo el modelo desde las condiciones presentes hasta 800 años, para así reproducir la variabilidad natural del bosque; posteriormente se cambió el clima en los siguientes 400 años hacia condiciones de efecto invernadero, incluyéndose el posible efecto de perturbancias causadas por eventos catastróficos como fuegos y vientos violentos. Se encontró que una atmósfera más cálida, húmeda y ventosa, debido al incremento de la intensidad y altura de la convección y formación de nubes en la tropósfera, aumentaría el grado de perturbancia de los bosques, lo que promueve una sucesión ecológica con mayor presencia de elementos colonizadores tempranos (intolerantes al sombreado), variando de manera determinante la biomasa de los bosques y la sensibilidad de los mismos ante los cambios climáticos. La mayor frecuencia de sequía en verano/otoño sería otro tipo de cambio climático de gran efecto negativo sobre los bosques citados. Sin embargo, debe destacarse también que se encontraron retardos de 50 a 100 años en las respuestas ante los cambios climáticos evaluados.

Otros estudios recientes de los cambios climáticos y sus efectos sobre ecosistemas forestales basados en los modelos de claros son los Botkin et al. (1989) y Urban y Shugart (1989).

### c) Estudios que Incluyen el Efecto Directo del CO<sub>2</sub>

Ketwren y Wright (1977) realizaron experimentos de campo para evaluar las respuestas de plántulas pino (Ponderosa Pine) ante el incremento de 150 ppmv en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico respecto al nivel de la época, encontrándose que las tasas de fotosíntesis se incrementaron en un 84%, respuesta que no fue alterada por el incremento en la temperatura o la disminución del potencial hídrico; así mismo, la mayor concentración de CO<sub>2</sub> compensó los efectos de la reducción de los niveles de luz. Los aumentos de fotosíntesis neta ante el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico resultaron lineales.

Otro aspecto que hay que tomar en cuenta en relación a los efectos directos del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico, es su



impacto sobre el número y densidad de los estomas. En este sentido, Woodward (1987) encontró evidencias de disminución de 40% en la densidad de estomas de siete especies arbóreas de bosques templados y de una especie de arbusto, como respuesta al incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico en los últimos 200 años.

Una disminución de la densidad de estomas combinada con la conocida respuesta de una menor conductancia, puede causar una eficiencia del uso de agua mucho menor que la esperada para bajos niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico, contradiciendo los estudios que sólo consideran el cerrado estomático por el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Martin et al. (1989) evaluaron el impacto de cambios climáticos por efecto invernadero sobre la evapotranspiración (ET) de bosques deciduos y tierras de gramíneas en el centro-este de Kansas, utilizando para ello la conocida ecuación de Penman-Monteith. En específico se evaluaron los efectos de variables climáticas como temperatura, velocidad del viento, humedad y radiación neta, y de características diferenciales entre la vegetación boscosa y la de gramíneas que afectan las tasas de evapotranspiración (índice de área foliar, y resistencia estomática característica, arquitectura del dosel). Los cambios en las variables que conforman la ecuación de Penman-Monteith se hicieron también tomando en cuenta el posible efecto de la fertilización por el incremento del CO<sub>2</sub> atmosférico. Los principales resultados de esta investigación se sintetizan a continuación.

- Se encontró que a nivel de variables individuales los cambios en la velocidad del viento (-20 a +20% respecto a las condiciones actuales) no ejercieron un efecto marcado sobre las tasas de ET, mientras que los cambios de temperatura (-10 a +10 K) si lo tuvieron, sobre todo en el ecosistema de bosque deciduo, ya que los aumentos de temperatura causan incrementos de las tasas de evapotranspiración.

- En el caso de cambios en radiación neta (-30 a +30%), humedad atmosférica (-20 a +20%), resistencia estomática (-60 a +60%) e índice de área foliar (-30 a +30%) los resultados fueron variables, pero siendo dominante los efectos de los cambios de radiación neta y humedad atmosférica en la mayoría de los casos.

- Ante aumentos combinados de temperatura del aire y resistencia estomática y con condiciones promedios de iluminación, se notó disminución de las tasas de ET tanto en el ecosistema boscoso como en el de gramíneas (un poco mayor la disminución en el caso del ecosistema

boscoso), con respuestas lineales a los cambios de temperatura para cada nivel de resistencia estomática.

- Cuando se evaluaron las respuestas de la ET ante los cambios de radiación neta combinados con los cambios de las otras variables, se notó que bajos niveles de radiación tienden a aumentar el efecto de los cambios en los otros factores ambientales o bióticos sobre la ET. Por ejemplo, en el ecosistema de gramíneas un aumento de +3 °C implica un incremento de evapotranspiración de 12% en condiciones de alta radiación y de 26% en condiciones de baja radiación.

- Si se incluye el posible efecto directo del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico, se estima que el índice de área foliar y la evapotranspiración deberían ser mayor, pero a condición de que no se presenten problemas de falta de agua. Por otra parte, la resistencia estomática pudiera aumentar hasta un 60% debido a la disminución de la densidad de estomas que se produce como respuesta al mayor contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico. En este caso el incremento esperado de ET por el mayor índice de área foliar pudiera ser contrarrestado por el efecto del menor número de estomas.

- Se notó un impacto más o menos similar de los cambios climáticos al comparar con los provocados por los cambios de variables biológicas como el índice de área foliar, y la resistencia estomática, etc.

- En aquellos escenarios de cambios climáticos que implican baja demanda evaporativa las plantas pueden responder mejor para compensar los efectos del cambio en las otras variables climáticas.

- Si bien los aumentos de temperatura por si solos causan incremento de ET, se pueden producir disminuciones si se hacen intervenir otras variables, en especial la resistencia estomática y el índice de área foliar.

- Se hace especial énfasis en el hecho de que el efecto de los cambios térmicos sobre la evapotranspiración pueden ser contrarrestados por la regulación estomática y el cambio en la densidad de los estomas.

- Se tienen reservas en cuanto a la extrapolación de los resultados anteriores a nivel regional, sobre todo por que que por lo general la vegetación boscosa tiene mayor control sobre la transpiración, a diferencia de la vegetación baja que depende en este sentido más de las variables climáticas (Jarvis y McNaughton 1986) .

- Se concluye que las respuestas de la ET ante los cambios climáticos utilizando la ecuación de Penman-

Monteith no pueden considerarse concluyentes, ya que falta parametrizar mejor ciertos factores superficiales asociados a la arquitectura de los doseles en los dos tipos de ecosistemas, en especial aquellos conformados por gramíneas, debido a que éstas exponen más las irregularidades del suelo al contacto con la atmósfera. Por otra parte, el cambio de la vegetación como respuesta ante los cambios de clima probablemente introducirá mecanismos de retroalimentación que en cierta medida determinarán el comportamiento de las variables atmosféricas.

Cambios en las relaciones de competencia entre especies  $C_3$  y  $C_4$  también se pueden producir a causa de un aumento del  $CO_2$  atmosférico, tal como lo reportan Bazzaz y Garbutt (1988). Estos investigadores evaluaron el efecto del incremento de  $CO_2$  atmosférico a concentraciones de 500 y 700 ppmv (base a 350 ppmv) y con adecuada iluminación, habiendo encontrado que el aumento de  $CO_2$  atmosférico aumenta la competitividad de las especies  $C_3$  al incrementar su biomasa, al tiempo que disminuye la de las especies  $C_4$ . Se sugiere que el incremento del  $CO_2$  atmosférico puede tener un gran efecto sobre las relaciones de competencia entre especies que se desarrollan juntas en el espacio, sobre todo si son de mecanismos fotosintéticos diferentes.

Walker (1991) también estudió el problema del impacto de cambios climáticos en la competitividad de diferentes especies pero en un estudio para el hemisferio sur, destacando que el mayor efecto directo de los cambios atmosféricos sobre la vegetación será a nivel de productividad primaria neta, alterando las relaciones competitivas entre especies a causa de variaciones en la cantidad y calidad de biomasa (cambios en la relación carbono/nitrógeno) y modificando además la clase y abundancia de herbívoros.

Walker también plantea que a causa de que los suelos del hemisferio sur generalmente son muy evoluconados y poco fértiles, un aumento en la productividad primaria podría favorecer un un aumento en la relación carbono/nitrógeno, concordando con lo citado anteriormente en Schimel et al. (1990). Además, el incremento de  $CO_2$  atmosférico significaría un aumento de la eficiencia del uso de agua en un hemisferio donde actualmente existen amplias áreas áridas y semiáridas con problemas de limitación de suministros hídricos, ayudando así a soportar mejor esas limitantes; sin embargo, se enfatiza que las respuestas de la eficiencia del uso de agua ante el incremento de  $CO_2$  atmosférico se conocen sobre todo a nivel de plantas individuales, siendo menos claro el comportamiento a nivel de comunidades; por otra parte, se debería considerar el efecto ya citado de una disminución del número de estomas (Wodward, 1987), aunque

Walker establece que en plantas sometidas a estreses hídricos, de temperatura y de nitrógeno, un aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico resultará en un incremento de la productividad primaria, aunque no se sabe en qué magnitud se produciría tal incremento.

Otros resultados importantes de la investigación de Walker (1991), dependiendo del tipo de escenario de cambios climáticos, son los siguientes:

#### Escenarios con Aumentos de Temperatura:

- El efecto general en sectores no boscosos debería ser una reducción de productividad primaria neta y biomasa;

- Se incrementaría la relación entre gramíneas perennes y anuales, la decidúes de las plantas leñosas y la proporción de plantas CAM (suculentas) en regiones secas;

- Los efectos de los cambios de temperaturas se expresarán sobre todo a través de un cambios en la intensidad y frecuencia de eventos extremos; por ejemplo, una menor ocurrencia de heladas en los subtrópicos favorecería a las especies no resistentes a ese tipo de fenómeno;

- los incrementos térmicos deberían afectar la mortalidad edad-específica de algunas especies, ya que las plantas jóvenes son más susceptibles a las altas temperaturas y a la poca disponibilidad hídrica.

- los insectos en particular responden marcadamente a los cambios de temperatura, siendo el ejemplo clásico el de las langostas. Estas, de acuerdo a los tipos, tienen el inicio de su ciclo de desarrollo en rangos de temperatura que oscilan entre 20 °C (*Camnula pellucida*) y 30 °C (*Calliptamus italicus*); sin embargo, las langostas adultas tienen capacidad de termoregulación ya que pueden mantener su temperatura corporal cercana a los 35 °C aún si las temperaturas ambientales varían entre 10 y 40 °C, a causa de que adaptan su posición ante los rayos solares para evitar los cambios bruscos de temperatura corporal.

#### Escenarios con Aumento en Precipitación y Temperaturas:

- Se puede esperar un cambio en la abundancia de plantas C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> actuando dos tendencias opuestas: por un lado las plantas C<sub>4</sub> están mejor adaptadas a las altas temperaturas pero las plantas C<sub>3</sub> aprovecharían mejor la fertilización a causa del aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico. Por otra parte, el incremento de productividad (mayor temperatura y precipitación) acoplado con mayores tasas de descomposición de materia orgánica favorecerán a corto plazo un incremento

en el ciclado y disponibilidad del nitrógeno. No obstante, a largo plazo es probable que la materia orgánica del suelo disminuya (en concordancia con la tendencia observada a lo largo de gradientes térmicos); además, las altas tasas de acumulación de biomasa no deben ser acompañadas por incrementos comparables en la disponibilidad de nitrógeno. El efecto neto en consecuencia debería ser un incremento de la relación carbono/nitrógeno de la biomasa de la vegetación, lo que a su vez favorecería una posterior reducción de la disponibilidad de nitrógeno a partir de la descomposición de la materia orgánica, tal como también lo propusieron Bryant et al. (1983) para el caso de bosques boreales.

- La frecuencia de fuegos causados naturalmente es determinada por el tipo de material y el clima. En este sentido, los cambios en biomasa y el aumento en la relación carbono/nitrógeno podrían producir hojarasca con menor tendencia a la descomposición y en consecuencia aumentando su contenido de material inflamable, pero el incremento de precipitación podría reducir la frecuencia de fuegos, especialmente en sectores boscosos.

- En el caso de los ecosistemas de sabanas, los más ampliamente extendidos en el hemisferio sur, un incremento de la precipitación sin modificarse la estación de crecimiento favorecería la presencia de especies arbustivas (leñosas) a causa de la mayor disponibilidad hídrica en los suelos. El efecto secundario sobre la frecuencia de fuegos podría favorecer el incremento de esta frecuencia, pero esto dependerá del control humano asociado al uso de las áreas de sabanas.

#### Escenarios con Cambios en la Estacionalidad de las Precipitaciones:

- En el norte de Australia se ha encontrado un fuerte patrón fenológico asociado al tiempo del inicio de las precipitaciones monzónicas, segregándose diferentes tipos de especies dominantes durante la estación de crecimiento en un año determinado. En consecuencia, condiciones de cambios climáticos que implique variaciones en la estacionalidad de las precipitaciones, podrían favorecerla predominancia de algunas especies y el detrimento de otras.

#### c) Estudios sobre Impacto de Cambios Climáticos Asociados a Guerras Nucleares (Invierno Nuclear)

En un reporte para la presidencia de los EE.UU elaborado por un panel ad hoc establecido por el Comité de Interagencias de Investigación y Coordinación de Políticas sobre Radiación (CIRRPC, 1988), se establecen algunas consecuencias que los cambios de clima por guerras nucleares

causarían sobre los ecosistemas terrestres:

- Las bajas temperaturas asociadas al invierno nuclear serían el factor climático de mayor importancia para explicar las respuestas de los ecosistemas terrestres, destacándose la posibilidad de una mayor mortalidad tanto en las regiones templadas y de latitudes altas como en las regiones intertropicales. En este último caso la falta de mecanismos de evasión o tolerancia a las heladas y el hecho de que en general las bajas temperaturas sin que sean congelantes producen daños (chilling), determinan condiciones de poca adaptación para situaciones de bajas temperaturas como las asociadas al invierno nuclear. Por otra parte, los ecosistemas intertropicales se desarrollan bajos climas que no presentan marcados contrastes estacionales de temperaturas, precipitación y radiación, en especial las selvas tropicales pluviosas. Los ecosistemas tropicales más estacionales (bosques deciduos, semideciduos y sabanas) serían menos susceptibles de ser afectados por las bajas temperaturas, sobre todo en la estación seca a causa de la menor área foliar y el metabolismo más lento.

- En aquellos ecosistemas sometidos a limitantes hídricas como es el caso de algunas sabanas y los ecosistemas de ambientes semiáridos, una disminución moderada de temperatura entre 1 y 2 °C podría resultar favorable, al mejorar la relación entre disponibilidad y consumo de agua ya que las necesidades de evapotranspiración serían menores.

- La disminución de la radiación solar por efecto del humo y el hollín generados por los incendios que siguen a las explosiones nucleares, tendrían menor efecto en especies tolerantes al sombreado; sin embargo, ya que la adaptación a un ambiente menos radiativo toma por lo general varias semanas, algunas especies no tendrían tiempo para adaptarse, en especial las de crecimiento lento.

- A nivel de fauna los animales homeotermos serían más afectados que los poiquilotermos; igualmente, los animales de regiones intertropicales al comparar con los de latitudes medias y altas, aunque en estos últimos será importante el tiempo que duren las condiciones de baja temperatura. La mayoría de los invertebrados en estados inmaduros y gran parte de la pedofauna sobrevivirían a los cambios climáticos asociados a guerras nucleares.

Podemos concluir que la mayoría de las investigaciones en otros países sobre evaluación de impactos de cambios climáticos en ecosistemas terrestres se han hecho para ecosistemas boscosos, especialmente los de latitudes medias y altas. A nivel general se espera que a causa de los incrementos térmicos asociados al efecto invernadero se

produzcan desplazamientos de los bosques boreales y templados fríos hacia el polo respectivo, pero condicionado por los cambios de la disponibilidad hídrica y de la fertilidad de los suelos en los ambientes a colonizar. En el límite sur de los ecosistemas boscosos boreales se podría producir una sustitución por elementos arbustivos y gramíneas de sabanas.

Resulta notoria la menor cantidad de estudios que incluyen a los ecosistemas terrestres intertropicales, pudiéndose destacar para nuestro interés aquellos que proponen cambios en los bosques amazónicos, los cuales a causa de los incrementos térmicos asociados al efecto invernadero tenderían a ser sustituidos en cierta medida por bosques secos, aunque se debe considerar que estos estimados no incluyen la posibilidad de aumento en las precipitaciones, tal como se ha planteado en el capítulo No 2 (escenarios de cambios climáticos). Otros ecosistemas terrestres existentes en Venezuela que pudieran ser afectados por los cambios climáticos son las sabanas, los bosques estacionales y los de montaña. No se pudieron detectar estudios de impactos de cambios climáticos en ecosistemas terrestres de otros países a causa del proceso de deforestación.

#### **4.1.3. Metodologías para Evaluación de Impactos de Cambios Climáticos en Ecosistemas Terrestres.**

Al igual que en la evaluación de los impactos de cambios climáticos en la agricultura, para el caso de los ecosistemas terrestres se cuenta también con una serie de procedimientos que en forma individual o combinada pueden aplicarse.

##### **a) Análisis de Coponentes Principales y Técnicas de Ordenación**

El análisis de componentes principales es una técnica muy útil para reducir el número de variables en un estudio y encontrar una combinación lineal de ellas que tengan la propiedad de explicar la mayoría de la variabilidad de los atributos de los sistemas que se estén estudiando. Para esto se necesita construir una matriz de correlación o covariancia de las variables originales. Los autovalores de esas matrices permitirán definir los componentes principales.

Para estudios de impacto por cambios climático en ecosistemas terrestres se trataría de encontrar aquella combinación lineal de variables climáticas que mejor explique la variabilidad de los atributos de esos ecosistemas, tanto en condiciones actuales como bajo los efectos de cambios climáticos. Por su parte, las técnicas de ordenación nos permitirán colocar muestras respecto a

uno a más ejes que pueden corresponder o no a gradientes ambientales y en el cual la posición relativa de cada muestra es la resultante de sus relaciones con las demás; además, nos permitirán apreciar el cambio de posición de las estaciones y la dirección de su movimiento en el espacio climático como resultado de cambios en este último.

#### **b) Experimentos de Laboratorio**

Por razones prácticas experimentos de laboratorio para evaluar los posibles impactos de cambios en ecosistemas terrestres debido a un incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico son extremadamente difíciles, sino imposibles a realizar. Existen dificultades substanciales en el análisis o la integración de información desde escalas menores a escalas mayores en un intento de identificar las posibles consecuencias de los cambios climáticos; además siempre subsiste el problema de la falta de similitud entre condiciones experimentales y condiciones naturales. Sin embargo, los ambientes artificiales como cámaras de crecimiento e invernaderos donde se pudieran controlar ciertas variables atmosféricas incluyendo las concentraciones de CO<sub>2</sub>, podrían resultar muy útiles para obtener información acerca de las posibles respuestas de la vegetación ante los cambios de clima.

#### **c) Estudios de Campo**

Tal como se reseñó en la sección anterior, se han realizado experimentos de campo para investigar las posibles respuesta a nivel de grupos de plantas individuales (plántulas de pino); sin embargo, los experimentos a nivel de comunidades son dificultosos, sobre todo en el caso de querer reproducir una atmósfera con mayor contenido de CO<sub>2</sub> o controlar en grandes espacios los niveles de temperatura, radiación y entradas de agua.

#### **d) Analogías Históricas**

Se pueden seleccionar épocas pasadas en las que se produjeron cambios climáticos que guardan cierta analogía con los que pudieran presentarse en el futuro, para luego proceder a estudiar las características de los ecosistemas terrestres en dichas épocas y así tener una idea de las posibles respuestas estos ecosistemas ante los cambios climáticos futuros.

La aplicación del método de las analogías históricas para evaluar el posible impacto de los cambios climáticos sobre los ecosistemas terrestres, implica seleccionar técnicas que no sólo permitan identificar y reconstruir las características climáticas en épocas pasadas pero que



guarden cierta analogía con el posible clima futuro, sino que también deben incluir aquellas técnicas que permitan identificar los respuestas que hubo a nivel de ecosistemas al producirse esos cambios.

Los análisis de polen en los cuales ya se tiene experiencia en nuestro país (véase por ejemplo a Salgado-Laboriau, 1980 y 1986 ), junto a otras técnicas como el estudio de las variaciones en los anillos de crecimiento de los árboles, podrían aportar una valiosa información para la aplicación del método de las analogías históricas, aunque en el caso de cambios climáticos por efecto invernadero habrá que tomar en cuenta que si bién los cambios climáticos pueden ser de magnitud similar a aquellos ocurridos en el pasado, ya se ha señalado que probablemente ocurrirán a un paso mucho más acelerado con respecto a los cambios históricos, lo que hace perder cierto grado de analogía, agregándose la también ya señalada falta de precedente históricos en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico respecto a lo que se espera para mediados del próximo siglo.

#### e) Clasificaciones y Regionalizaciones Bioclimáticas

Otra forma de evaluar el posible impacto de los cambios climáticos en los ecosistemas terrestres venezolanos, es a través de la comparación de los mapas que contienen las distribuciones actuales de esos ecosistemas con aquellos que resultarían de producirse los cambios climáticos. En este sentido, resulta de mucha utilidad la aplicación de mapas con regionalizaciones bioclimáticas, tal como el mapa de Zonas de Vida propuesta por Holdridge (1964), del cual ya existe uno para Venezuela a escala 1: 2000.000.

También pueden obtenerse regionalizaciones de la productividad primaria neta (PPN) en función de características climáticas. En este caso se podría utilizar la relación propuesta por Lieth (1975):

$$PPN = 30 (1 + e^{1.315 - 0.017T})$$
$$PPN = 30 (1 - e^{-0.000664P})$$

En las fórmulas anteriores la productividad primaria neta PPN viene expresada ton/ha/año; T y P son respectivamente la temperatura y precipitación media anual.

Se debería tomar en cuenta que la mayoría de los sistemas bioclimáticos citados se basan en condiciones de equilibrio entre vegetación y clima, lo que significa que si el cambio climático es rápido la vegetación actual probablemente no podrá adaptarse. En este caso resultará de utilidad la inclusión criterios basados en las teorías aceptadas de sucesión ecológica, para estudiar las respuestas transientes

y así identificar los diferentes ecosistemas que podrían desarrollarse hasta llegar al nuevo equilibrio con las condiciones climáticas. Un limitante a resaltar es que los sistemas de clasificación citados no toman en cuenta los efectos de eventos extremos, de la variabilidad interanual del clima y del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico en los procesos ecofisiológicos y de competencia entre especies, debiéndose entonces complementar con los resultados de otras metodologías.

Como todo enfoque que depende en parte de la creación y superposición de mapas, al aplicar clasificaciones y regionalizaciones bioclimáticas se deberá aprovechar las ventajas de los sistemas de información geográfica e integrar datos aportado por sensores remotos.

#### **f) Evaluación Mediante Modelos de Simulación**

Existen modelos de simulación a nivel de ecosistemas, especialmente para bosques y sabanas. Algunos modelos simulan procesos como la evapotranspiración, la fotosíntesis, la respiración de mantenimiento, la distribución de carbono sobre y por debajo de la superficie del suelo, la descomposición y la mineralización de nitrógeno, los cuales son integrados diariamente para la predicción del crecimiento anual de la biomasa o la distribución de carbono. Algunos de estos modelos ya están disponibles en Venezuela para las investigaciones de impacto por cambio climático, pero se deberán realizar los ajustes necesarios a nuestras condiciones ambientales. Más detalles de la aplicabilidad y descripción de los modelos de simulación de ecosistemas terrestres se dará en la sección No. 4.3.

### **4.2.- AREAS Y ECOSISTEMAS REPRESENTATIVOS**

Dada la gran diversidad de suelos, climas, fauna y vegetación que presenta Venezuela, se hace necesario seleccionar algunos ecosistemas terrestres representativos para fines de evaluación de impacto por cambios climáticos. En consecuencia, esta sección analiza la prioridad de evaluar algunos ecosistemas terrestres venezolanos en base a los siguientes criterios:

- Extensión y Distribución del ecosistema en la superficie total del país;
- Información existente acerca de cada ecosistema;
- Importancia económica;
- Diversidad biótica y fragilidad.

Se tomará el criterio de extensión areal como el más importante, motivado a la necesidad de contar preliminarmente con evaluaciones que den un estimado global del impacto de los futuros cambios de clima en el territorio venezolano. En este sentido, nos remitiremos a datos del mapa de la vegetación de Venezuela (MARNR, 1982) en el cual se establece que aproximadamente el 58% del territorio nacional es ocupado por bosques y el 24.5 % por sabanas (82.5 % entre los dos tipos de ecosistemas. Luego vienen los matorrales con el 5.83%. y el resto de los ecosistemas con 11.67%. Estos estimados deben tener pocas variaciones comparado con la situación actual y dejan entrever que Venezuela en gran parte es un país forestal, especialmente al sur del río Orinoco.

Como acabamos de ver, el 82.5% del territorio venezolano está ocupado fundamentalmente por los ecosistemas de bosques y sabanas, constituyendo sin duda los ecosistemas terrestres prioritarios para análisis de impacto por cambio climático. Debemos ahora seleccionar algunas regiones donde estos ecosistemas abarquen la mayor superficie, para lo cual el mismo documento citado anteriormente establece la distribución de la siguiente manera:

- Guayana (estado Bolívar y T. F. Amazonas): 70.8 %
- Andes (estados Trujillo, Tachira y Mérida): 8,08 %
- Zuliana: 7,37 %
- Centro Occidental: 5,68 %
- Central, Insular, Nor oriental, Llanos: 8 %

La distribución anteriormente citada sugiere a la región de Guayana como área prioritaria, debiéndose agregar en el caso de las sabanas la gran extensión de tierras asociadas a nuestra región llanera.

En relación a los ecosistemas boscosos es necesario recalcar que no sólo son un recurso de enorme importancia porque los planes de desarrollo concebidos para el Edo. Bolívar y en menor grado para el Territorio Federal Amazonas imponen la necesidad de su utilización a corto plazo como fuente de materia prima, energía, asiento de centros poblados, y desarrollos agrícolas y/o pecuarios, sino porque compartimos con otros países suramericanos la responsabilidad de un buen aprovechamiento con miras a una productividad económica sostenible que no provoque su deterioro progresivo. Además, estos bosques constituyen una buena proporción del área verde que a nivel mundial produce la mayor cantidad de oxígeno y recursos hídricos, aparte de

que constituyen uno de los reservorios biogenéticos más importantes, estimándose que la flora de la región Guayana incluyendo la venezolana, consiste en unas 10.000 especies del cual se calcula que el 75% son endémicas (MARNR, 1985).

La región de Guayana cuenta con una proporción elevada (83 %) del total de bosque productivo en Venezuela, el cual se estima en 30 millones (otros 23 millones de ha. en Venezuela no se considera como bosque productivo; MARNR-POA, 1988). Además, el mismo informe señala que la masa boscosa al sur de Orinoco posee un volumen estimado entre 78 y 190 m<sup>3</sup>/ha con un 50% de especies potencialmente comerciales.

El estado venezolano ha decretado alrededor de 11.329.994 has. entre reservas forestales y lotes boscosos al sur del Orinoco, pero se estima que 1/3 de esta superficie tiene un real potencial de producción forestal bajo esquemas de manejo técnico, debido a las limitaciones por altos riesgos de erosión y degradación física, química y biológica de los suelos o por mal drenaje de ciertas áreas (Franco, 1988).

La siguiente región de bosques después de la señalada anteriormente es la andina. En esta se localizan importantes bosques como los de selva nublada entre los 1500-3200 m.s.n.m. (también hay selvas nubladas en la Cordillera de la Costa). La fragilidad de los bosques nublados se asocia sobre todo a su situación altitudinal en función de la temperatura, por lo que un cambio de esta variable podría tener efectos importantes, destacándose en este sentido dos factores: por un lado la adaptación relativamente rápida que tendrán que realizar las especies a territorios ocupados actualmente por ecosistemas de páramos, donde los suelos generalmente son menos fértiles; por otro, la competencia con especies de selvas estacionales ubicadas a alturas menores, y cuya adaptación será posiblemente más rápida a las condiciones de los terrenos donde hoy en día se desarrolla la selva nublada. Por supuesto, el factor precipitación jugará un importante rol, además de la capacidad potencial de las especies que conforman dichos ecosistemas para poder adaptarse a los cambios de clima.

Las sabanas, segundo ecosistema en importancia en cuanto extensión en el territorio venezolano, forman parte de la región que abarca desde el río Guaviare en Colombia hasta las costas de Venezuela, ocupando aproximadamente unos 500.000 Km<sup>2</sup> (Sarmiento 1983a).

Las sabanas venezolanas presentan patrones de variación de la estructura y productividad muy correlacionados con la duración de disponibilidad de agua para las plantas y con la duración y frecuencia de las quemadas (Medina y Silva 1990). En consecuencia, si cambia el patrón de la disponibilidad

de agua y la duración y frecuencia de los incendios a causa de los cambios climáticos, la diversidad de los diferentes estratos que conforman estas sabanas posiblemente sufrirían cambios por variaciones en la interacción de competencia entre especies, lo que podría determinar diferentes probabilidades para el crecimiento.

Los ecosistemas de sabanas en Venezuela están dedicados sobre todo a actividades ganaderas, especialmente en los estados de Apure y Guárico. Es de importancia conocer cuáles serían los cambios en la productividad y la variabilidad florística ya que estos afectaría ese tipo de actividad.

También se encuentran sabanas al sur del río Orinoco, acupando las de tipo macrotérmico una extensa zona al norte del estado Bolívar, mientras que al sureste, entre 300 y 1300 m.s.n.m., se localizan las sabanas frescas de la Gran Sabana. Estas últimas son abiertas y están intercaladas por islas o grandes parches de vegetación de rastrojo o vegetación achaparrada, extendiéndose desde su límite norte en las vecindades de Luepa, Kavanayen y Canaima, hasta el sur en las cercanías de Santa Elena de Uairén, Icabaru y el río Branco en el norte de Brasil. Por su parte, las sabanas del T.F.A. se localizan a alturas mucho más bajas (entre los 100-250 m.s.n.m.) y son prominentes en las vecindades de los ríos bajo Ventuari, Pacimoni, Guainía, Pimichin y Atabapo (MARNR, 1985; MARNR-ORSTOM, 1987).

Los páramos si bien representan una baja proporción areal al comparar con los ecosistemas de bosques y sabanas (0.22%, MARNR 1982), tienen gran significación por la potencialidad biótica de sus especies a adaptarse a los posibles cambios de clima que se esperan para el próximo siglo, estimándose que estos ecosistemas podrían ser muy sensibles a esos cambios a causa de su distribución espacial hacia los sectores superiores de las montañas andinas, constituyendo ecosistemas frágiles que podrían tal vez mantenerse o restringirse a área más pequeñas que las actuales o en el peor de los casos a desaparecer. Otro aspecto a considerar es que en los páramos se encuentran especies endémicas que contribuyen al patrimonio florístico global y de las cuales todavía son no se tiene información de acerca de posibles usos tales como farmacéticos y a nivel industrial en general. Se incluyen así a los páramos como ecosistemas prioritarios para fines de evaluación de impacto por cambios climáticos.

#### **4.3.- EVALUACION MEDIANTE MODELOS DE SIMULACION**

##### **4.3.1.- Modelos de Bosques**

Durante los últimos 20 años se han venido desarrollando y

aplicando una serie de modelos que tienen por objetivo la simulación de la dinámicas de sucesión en bosques de especies mixtas. La mayoría de estos modelos han sido desarrollados para situaciones de latitudes medias y altas, por lo que para su utilización se deberá realizar un proceso de calibración y validación de acuerdo a nuestras condiciones.

FORET (Shugart y West, 1976) es un modelo estocástico de claros desarrollado por modificaciones hechas al modelo JABOWA de Botkin et al. (1972), siendo considerado como el primer modelo que reproduce las mayores características de bosques de especies mixtas y edad variada. FORET simula las dinámicas de sucesión y las interrelaciones competitivas entre las especies que forman parte de una unidad espacial específica en un bosque. Los claros son simulados como resultado del proceso de mortalidad de las especies que conforman algún sector dentro del bosque inicialmente no disturbado, generándose un proceso de sucesión natural o recolonización del claro, el cual es simulado mediante tres facetas importantes:

a) Primero se estima determinísticamente el incremento anual de crecimiento de cada árbol, dependiendo de las dimensiones de los árboles y los efectos sobre el crecimiento introducidos por la cantidad de radiación solar interceptada y los niveles de humedad y nutrientes en el suelo.

b) Luego se determina estocásticamente las especies y el número de plantas que se establecen anualmente en los claros producidos por la mortalidad en ciertas áreas del bosque. Esto se basa principalmente en la cantidad de radiación que penetra el dosel y llega al sotobosque.

c) Por último se determina estocásticamente la creación de claros mediante la muerte de árboles causada por mortalidad intrínseca y por factores como vientos severos, pestes, defoliación y otros.

A continuación se describen algunos de los submodelos importantes que integran el modelo FORET.

#### - Submodelo de Crecimiento

La aplicación del submodelo de crecimiento para cada especie es función del clima, el área de las hojas por árbol, la canopia de otros árboles y sobre todo las dimensiones de cada árbol en el claro. El crecimiento óptimo está dado por una relación volumétrica:

$$\frac{d(D^2H)}{dt} = R \cdot LA \cdot \left(1 - \frac{DH}{D_{ma} \times H_{min}}\right)$$

En la relación anterior  $R$  representa un parámetro de proporción de crecimiento (volumen/tiempo),  $LA$  es el área foliar por árbol,  $D$  es el diámetro a la altura de pecho (dbh),  $H$  es la altura del árbol y  $D_{max}$  y  $H_{min}$  representan los máximos valores de  $D$  y  $H$  para cada especie. Esta ecuación indica que bajo condiciones óptimas el cambio volumétrico de un árbol  $s(D^2H)$  por año es proporcional a la cantidad de radiación interceptada por la canopia en términos de  $LA$ , la cual disminuye con la expresión entre paréntesis al aumentar su segundo término con las dimensiones del árbol, indicando así el costo energético por mantenimiento (Botkin et.al., 1972).

La ecuación analizada es multiplicada por funciones que toman valores de 0 a 1 y que reflejan condiciones actuales diferentes a las óptimas. Estas funciones incluyen factores para tomar en cuenta la sensibilidad de las especies al efecto foliar de sombra por la canopia de los árboles más altos, los efectos climáticos representados por la temperatura en forma de grados-días de crecimiento y los efectos edáficos mediante la competencia entre las especies por agua y nutrientes en el suelo del claro simulado.

Es importante destacar que todas las expresiones que forman parte del submodelo de crecimiento son determinísticamente basadas en parámetros obtenidos mediante datos de biomasa para una serie de especies específicas de una región en especial. Por ejemplo, el modelo JABOWA fue diseñado para ser usado en un estudio del ecosistema de Hubbard Brook en el noreste de los EE.UU., siendo la descripción del medio ambiente restringida a las características de ese ecosistema (Botkin et. al., 1972). Sin embargo, debido a la utilidad de este modelo en la simulación de las dinámicas en el crecimiento forestal, nuevas aplicaciones y versiones han surgido, tal como es el caso de su aplicación para evaluar el efecto sobre el crecimiento forestal a causa del parásito fungal *Endothia* parasitica, introducido en 1904 en la región del Appalachian en el este de los EE.UU. (Shugart y West, 1976).

#### - Submodelo de Reproducción

El submodelo de reproducción tiene la función de determinar las especies y el número de plantas de semillero nuevas que se establecen en el claro durante cada año, para lo cual se estima estocásticamente las plantas de semillero nuevas de cada especie que se pueden establecer en el claro en base a la tolerancia relativa de las especies al efecto foliar de sombra y a las condiciones climáticas necesarias para permitir el crecimiento de las plantas nuevas.

FORET identifica aquellas especies que pudiesen

recolonizar el claro en base a disponibilidad mineral en el suelo, caída de hojas sobre el suelo, temperatura promedio anual e intervención de mamíferos y roedores. Las dos primeras condiciones son determinadas mediante el índice del área foliar, mientras que la temperatura se incluye por el cálculo de grados-días. El efecto de la intervención de mamíferos y roedores es estimado mediante una función de probabilidad de azar. Basándose en estas cuatro condiciones, el modelo determina los requerimientos de las especies en base a las características del claro para un año determinado y así selecciona las especies con potencialidad de establecimiento en el claro. El proceso de establecimiento de las especies seleccionadas se basa en una función de probabilidad de azar mediante la cual el modelo planta de 0 a 7 especies con un dbh promedio de 1.27 cm.

#### - Submodelo de Mortalidad

En éste submodelo se asume que desde la etapa de plantas de semillero hasta la madurez algunas causas de mortandad de árboles son independientes de la edad. También se asume que no más del 2% de las plantas de semillero de una especie dada alcanzarán su madurez o edad máxima para esa especie. De esta forma, la probabilidad de que un árbol muera en un año dado está representada estocásticamente. En caso de que un árbol presente un incremento anual por debajo de un valor determinado, se considera que éste árbol solamente tendrá una probabilidad de sobrevivencia del 1% en un periodo de 10 años, en éste caso la probabilidad de que el árbol muera en un año dado es del 36.8% (Botkin et. al. 1972).

Aunque una tasa mínima de crecimiento es importante para la sobrevivencia de una planta de semillero establecida, FORET considera también otros factores que afectan tal sobrevivencia, como por ejemplo, fuertes vientos, desfoliación, enfermedades o pestes e intervención de mamíferos.

A nivel general los modelos de claros realizan la simulación del crecimiento de árboles individuales o pequeñas parcelas. Para obtener la descripción estadística de un bosque o una región se debe realizar la simulación de muchas parcelas. Estos modelos han sido calibrados para una amplia variedad de bosques en el mundo pero su utilización para la evaluación de cambios climáticos debe realizarse con precaución, debido a que el efecto de las variables sobre el crecimiento en estos modelos es frecuentemente simulado de una manera no muy fina. Además, la parameterización del clima es usualmente basada sobre rangos de especies, pero no toma en cuenta las interacciones biológicas que pueden afectar los rangos geográficos.



Otro modelo de bosques es el desarrollado para el Pino Slash (*Pinus elliotti*; Cropper, manuscrito), el cual ha sido ampliamente plantado en las costas del sureste de los EE.UU., al norte del estado de Florida. Estas plantaciones se encuentran en zonas que contienen suelos arenosos de pobre fertilidad pero con mínimos problemas de disponibilidad de agua ya que la irrigación es utilizada ampliamente. Durante los últimos 10 años se han estado realizando medidas relacionadas con los procesos de fotosíntesis, respiración, contenido de nutrientes y la dinámica de la biomasa.

El modelo de simulación del Pino Slash usa datos climáticos horarios, unidad de tiempo también aplicada a los procesos fisiológicos y el cálculo de biomasa. El follaje es simulado tomando en cuenta el crecimiento de nuevas acículas y la acumulación de caída de hojarasca mediante funciones logísticas normalizadas. La dinámica del área de la hoja es un factor importante en el balance de carbono. El follaje es dividido en 9 capas verticales. La penetración de la luz es modelada mediante formulación de Beer-Lambert modificada y la asimilación es simulada con las ecuaciones de Michaelis-Menten.

La acumulación de biomasa es simulada por 2 vías; mediante funciones fenológicas teniendo como dato de entrada los incrementos de crecimiento anual, o utilizando coeficientes de partición aplicado al carbono de crecimiento diario disponible, en otras palabras, la asimilación neta del follaje y/o la respiración de mantenimiento total.

En algunas de las aplicaciones del modelo de pino se han realizado varias simulaciones con aumentos de temperatura y se encontraron respuestas positivas en la disponibilidad de carbono para el crecimiento; por ejemplo, un incremento en el CO<sub>2</sub> condujo a un incremento del 38% en el crecimiento.

El modelo del Pino Slash se puede utilizar para la simulación del comportamiento del Pino Caribe (*Pinus Caribea*) en Venezuela, aunque existen ciertas limitaciones, ya que este modelo no contempla problemas de falta de agua, por lo cual se deberá asumir una estrategia de manejo basada en el riego, además, todavía no se conoce muy bien la fisiología *P. Caribe* aunque existe información acerca de algunos aspectos fisiológicos, debiéndose sobre todo realizar algunas investigaciones adicionales para completar información de balance de carbono. Algunos trabajos en este aspecto se han venido desarrollando en el Centro de Ecología del IVIC.

#### 4.3.2.- Modelos de Sabanas

Coughenour (1990) ha desarrollado dos modelos de simulación

de sabanas de zonas tropicales semiáridas y áridas en el Africa. Un primer modelo permite relacionar el paisaje, clima distribución de las especies, dosel de los árboles y tipos de vegetación; y ha sido aplicado para la región de Turkana, donde los gradientes de paisaje y precipitación influyen notablemente en la vegetación. Las interacciones entre la precipitación y los patrones de drenaje ejercen un control notable en la altura de los árboles. Los doseles están controlados principalmente por la precipitación, mientras que la composición de las especies esta controlada por interacciones entre la elevación, sustrato y drenaje. Los árboles están asociados a cursos intermitentes de agua y a la escorrentía; mientras que la productividad primaria esta estrechamente relacionada a la lluvias.

El otro modelo desarrollado por Coughenour es denominado GRASS y fue diseñado para el análisis de la vegetación en gramíneas del Africa donde se considera la herbivoría y su relación con el crecimiento, fotosíntesis, uso del agua e intercepción de luz. El modelo GRASS fue acoplado a un modelo que describe los flujos de radiación, calor y agua del sistema suelo-planta. La fotosíntesis está representada a un nivel de resolución que permite examinar las relaciones entre los balances de agua y carbono y se calcula en función de la concentración interna de  $CO_2$ , conductancias interna y estomatal y condiciones ambientales.

GRASS presenta un submodelo de intercepción y penetración de la luz que está relacionado con la geometría del dosel. La producción de vástagos depende de la tasa de producción de meristemas apicales y tasa de crecimiento de los meristemas. La tasa de transpiración es calculada como parte del balance de energía en función de la resistencia estomatal determinada por la luz, humedad de la hoja, contenido de nitrógeno, edad y temperatura. La extracción de agua del suelo por las raíces está representada por un submodelo a escala macroscópica y relacionada con los potenciales de agua del suelo y raíces, conductividad hidráulica del suelo y biomasa de raíces.

El modelo GRASS fue diseñado a un nivel de resolución tal que examina la dinámica intra-estacional. No tiene capacidad para simular la germinación de semillas o la reproducción. Es un modelo fisiológico-morfológico de gramíneas diseñado para Serengeti (Tanzania) que simula la biomasa, el nitrógeno y el agua (planta y suelo). Los nutrientes son reciclados y mineralizados en el suelo instantáneamente. No hay capacidad de ciclaje de nutrientes, aunque se están realizando esfuerzos para acoplar este modelo con el modelo CENTURY el cual simula la transferencia de residuos dentro del suelo en los diferentes compartimientos. Estas transferencias dependen de las tasas de renovación, los cual

permite predecir la fertilidad del suelo en base a periodos desde años hasta centurias.

El modelo GRASS tiene la capacidad de usar archivos diarios de precipitación, temperatura (máxima y mínima) y humedad. También presenta archivos para velocidad del viento y horas de luz. La radiación difusa y directa es calculada en base a la latitud para diferentes horas del día. Estos parámetros son utilizados para cálculos de fotosíntesis, crecimiento, densidad de plantas y propiedades del suelo. En el submodelo de fotosíntesis la conductancia total es afectada por la edad fisiológica de la hoja, contenido de nitrógeno, temperatura y luz. El contenido de agua afecta la conductancia interna y estomatal. El submodelo de flujo de agua calcula flujos de agua en el suelo, también deriva potenciales de agua en el suelo y contenidos volumétricos de agua. Hay una subrutina para cálculos de flujos de calor en el suelo y balance de energía. Un submodelo ejecuta el crecimiento para intervalos de dos días, mientras el resto de los submodelos opera para tiempo de dos horas.

#### **4.4.- EVALUACION DE IMPACTOS DE CAMBIOS CLIMATICOS SOBRE LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES EN VENEZUELA**

Son pocos los estudios de de evaluación de impactos por cambios climáticos sobre ecosistemas terrestres realizados en Venezuela, pudiéndose separar dos tipos de evaluaciones: evaluación de impactos de cambios climáticos pasados y aquellos evaluaciones sobre impactos asociados a cambios climáticos de posible ocurrencia futura.

##### **4.4.1.- Impacto de Cambios Climáticos Pasados.**

Salgado-Labouriau (1982) en base a registros de polen tomados de sedimentos del Lago de Valencia, sugiere que hace unos 13.000 y hasta por los menos 11.500 años antes del presente, cuando el clima fue más frío y seco a causa de el último período glacial, no había bosques en el área que actualmente ocupa el lago y que la vegetación dominante era de sabana. Posteriormente, se produjeron condiciones de mayor humedad como lo indican también registros de polen obtenidos en los sedimentos de Lago de Valencia (Bradbury, 1981), pero al parecer hace unos 6000 años se produjeron otros episodios secos (probablemente correlacionados con el período cálido denominado Hypsithermal), tal como parece haber ocurrido en el área de San Carlos de Río Negro según investigaciones llevadas a cabo por Sanford et al. (1985).

Shubert (1988) realizó una revisión bibliográfica acerca de cambios paleoclimáticos en el norte de suramérica y el caribe, reseñando que durante la última glaciación el norte

del continente suramericano fue más frío y árido que hoy en día, con disminuciones de precipitación entre 730 y 1825 mm./año (Manabe y Hahn, 1977). Esto provocó que una vegetación de sabanas sustituyera a la vegetación boscosa, la cual sólo pudo subsistir en refugios dentro de las extensivas áreas de sabana (CLIMAP Project Member, 1981).

Análisis palinológicos y de carbono radioactivo en barrenos de sedimentos localizados en el centro del Lago de Valencia, revelan que hace unos 12.900 años no existía el Lago de Valencia y que la vegetación dominante era de gramíneas entre esa fecha; posteriormente el área se convirtió en un pantano hace unos 11.500 años (Salgado-Laboriau 1986).

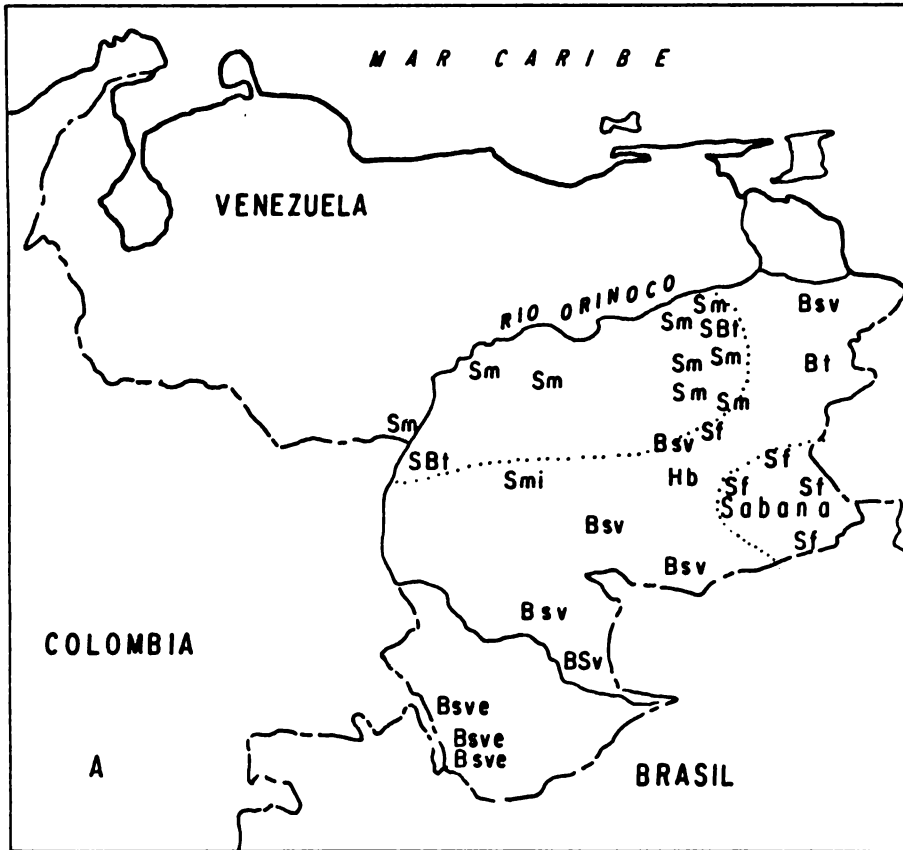
En el caso de los bosques nublados de montaña, Shubert reseñó que sus límites durante las glaciaciones bajaron y sólo alcanzaron sus posiciones actuales en el Holoceno. Por otra parte en Guayana también existen al parecer evidencias haber tenido un clima más frío y árido durante las últimas glaciaciones, habiéndose encontrado (Eden, 1974) lo que parecen ser refugios de sabanas dentro de sectores hoy en día boscosos y que se mantienen gracias a las quemas.

Resulta interesante el comportamiento observado a nivel general en los límites de los ecosistemas terrestres por efecto de las glaciaciones, ya que según lo reportado por Shubert al comparar los mapas actuales de vegetación con las reconstrucciones paleoecológicas se observa una evidente contracción latitudinal de las áreas de distribución, especialmente en el caso de las áreas boscosas.

#### 4.4.2.- Impacto de Cambios Climáticos Futuros

Fariñas et al. (Convención Anual de ASOVAC, 1990) aplicaron técnicas de análisis de componentes principales y ordenación para estudiar las relaciones entre clima y ecosistemas, utilizando los datos de 30 estaciones seleccionadas al sur del Río Orinoco en un área comprendida entre los 61-68,50° de longitud oeste y 0° 44' a 8° 30' de latitud norte, abarcando parte de las cuencas de los ríos Orinoco y Negro y varias cadenas montañosas (véase la figura 4.1a). Este trabajo se fundamenta en la hipótesis de que si los ecosistemas están en equilibrio con el ambiente y los cambios climáticos se mantienen por un tiempo suficientemente largo, se inducirían cambios en la vegetación.

Las treinta estaciones seleccionadas por Fariñas et al. fueron catalogadas con el tipo de vegetación circundante y proyectadas en un diagrama de ordenamiento una vez realizado el ACP. Para ésto utilizaron varios set de datos, entre ellos: temperatura y precipitación media anual, latitud,



Sm = Sabanas macrotérmicas  
 SMI = Sabanas macrotérmicas inundables  
 Sf = Sabanas frescas  
 SBT = Sabana y Bosque trópílicos  
 Hb = Herbazales  
 Bt = Bosque tropófilo  
 Bsv = Bosque siempre verde  
 Bsv = Bosque siempre verde esclerófilo

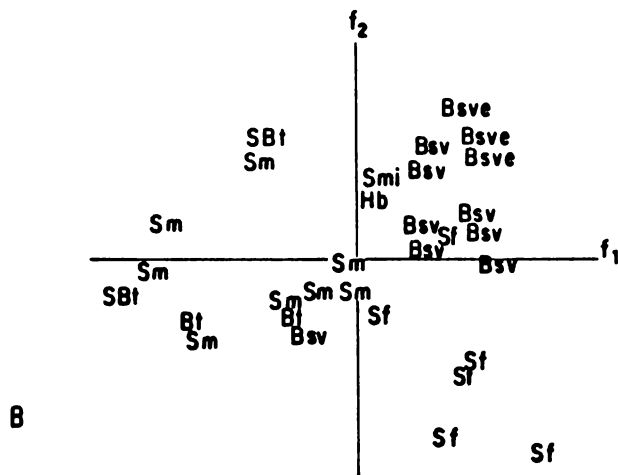
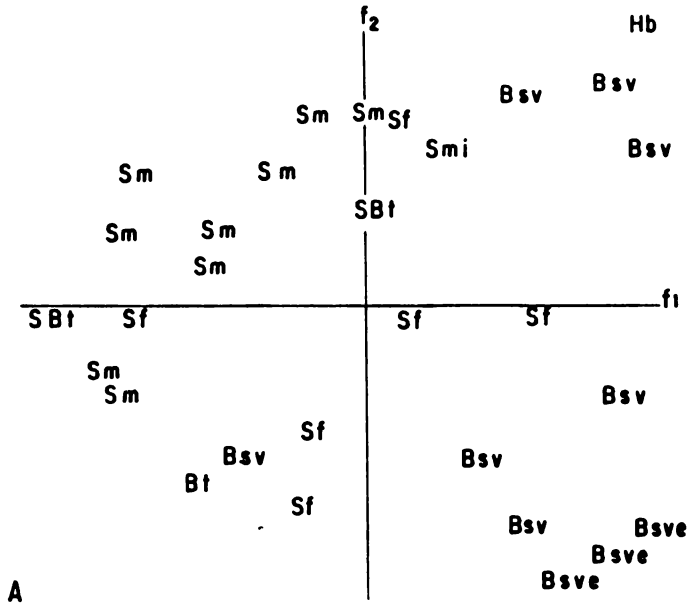
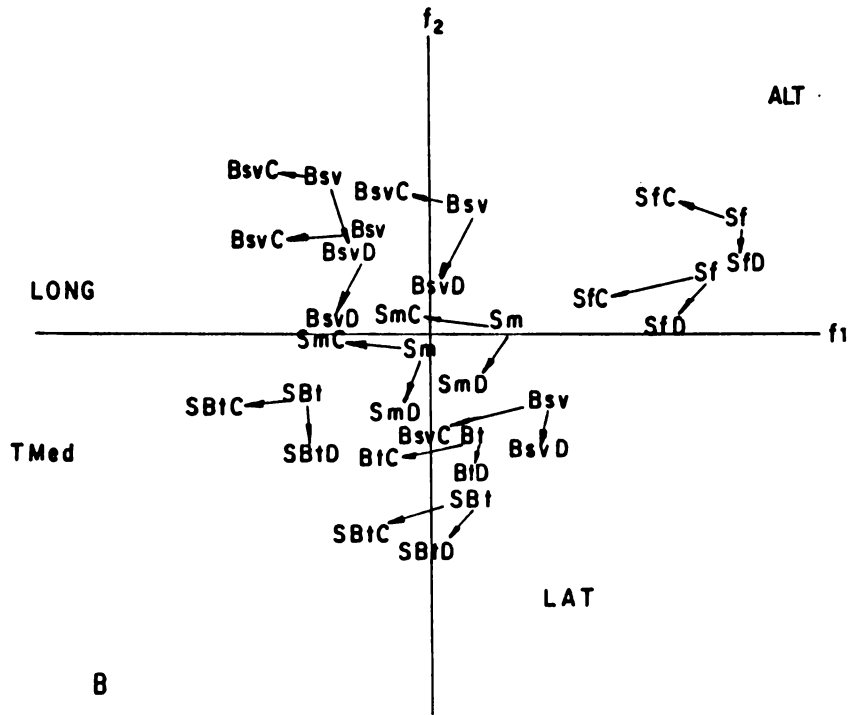


Figura 4.1 A: Localización geográfica de las estaciones seleccionadas.  
 B: Ordenamiento de las estaciones en el primer plano del análisis de componentes principales (Clima actual).



A



B

Figura 4.2 A Ordenamiento de las estaciones de acuerdo a diferentes variables relacionadas con la precipitación.

B Efectos de cambios climaticos en las estaciones seleccionadas.  
 Nota: Las flechas indican el movimiento hipotetico como repuesta a los cambios climaticos.



y longitud.

En la figura 4.1 b se muestra el ordenamiento de las 30 estaciones en el primer plano del análisis de componentes principales, observándose en el primer cuadrante a las estaciones representativas de vegetación boscosa, en el segundo y tercer cuadrante a las estaciones de sabana estacional macrotérmica y en el cuarto cuadrante a las de sabanas frescas.

En la figura 4.2a podemos ver el ordenamiento de las estaciones de acuerdo a diferentes variables. De izquierda a derecha se señala un gradiente de precipitación, con los bosques en el extremo derecho y las sabanas estacionales en el izquierdo. En la parte superior del plano se separan las localidades boscosas con cierta estacionalidad, mientras que en la parte baja se separan las localidades boscosas sin estacionalidad, tal como es el caso del Bosque Siempre Verde Esclerófilo de San Carlos de Río Negro.

Para el estudio del impacto de los cambio de clima se modificaron los valores de precipitación y temperatura de acuerdo a escenarios de efecto invernadero ( $2 \times \text{CO}_2$ ) y deforestación. Estos escenarios fueron los propuesto en el "Taller de Cambios de Clima y Variabilidad Climática en Venezuela y la Región del Caribe" (PAN-EARTH/CEACT, 1990).

En la figura 4.2b se muestran los impactos de escenarios de cambios climáticos por efecto invernadero o deforestación en las localidades seleccionadas al sur del río Orinoco. A partir de cada estación se desprenden dos líneas que indican el posible desplazamiento de ocurrir los cambios climáticos mencionados (se agrega **C** si el desplazamiento se asocia con el efecto invernadero y **D** si se asocia a los cambios de clima por deforestación). El eje horizontal del primer cuadrante representa el aumento de la altitud (disminución de temperatura) y se opone al eje horizontal de tercer cuadrante que representa el aumento de la temperatura media; el eje vertical superior representa el aumento de precipitación mientras que el opuesto el aumento de latitud.

Fariñas et al. (1990) también calcularon regresiones lineales en componentes principales (Lebart, 1978) usando las coordenadas sobre los ejes de ordenamiento como variables predictorias de la coordenada geográfica. Esto permitió estimar la latitud y la longitud correspondiente a las nuevas condiciones de las estaciones una vez realizado cambios en la precipitación y la temperatura.



#### **4.5.- ESTRATEGIAS E INVESTIGACIONES NECESARIAS PARA EVALUAR EL IMPACTO DE CAMBIOS CLIMATICOS EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES VENEZOLANOS**

Por lo menos tres estrategias de investigación resultan prioritarias para lograr un avance significativo en las evaluaciones de los posibles efectos de los cambios climáticos en los ecosistemas terrestres venezolanos:

- Creación de una base de datos para la aplicación de las metodologías disponibles;

- Calibración, validación y en general desarrollo de modelos sobre los principales ecosistemas terrestres venezolanos, incluyendo la integración con sistemas de información geográfica y la utilización de datos derivados de sensores remotos;

- Evaluaciones a nivel local, regional y nacional.

##### **Base de Datos para Aplicar las Metodologías Disponibles**

Se requiere de una base de datos computarizada con capacidad no sólo para almacenar información, sino que debe ser de fácil acceso a diferentes tipos de usuarios (investigadores, planificadores), tener capacidad para evaluar la calidad de esa información, dar resúmenes de datos y graficar; además, deberá estar integrada con sistemas de información geográfica para facilitar la realización e integración de mapas y en general manipular datos espaciales, incluyendo los provenientes de sensores remotos.

La organización de la base de datos debe tomar en cuenta las necesidades de información (tipo, cantidad y formatos) de las diferentes metodologías disponibles para evaluación de impacto por cambios climáticos, incluyendo como aspecto importante la recopilación de información para la calibración y validación de diferentes tipos de modelos ecológicos.

##### **- Datos Climáticos**

Se requiere tener a la disposición series de datos suficientemente largas de precipitación, temperatura, radiación solar, humedad, y vientos (con pocos registros faltantes o englobados), contemplándose la necesidad en un futuro de incluir registros de CO<sub>2</sub> atmosférico. La resolución temporal de algunas variables climáticas puede ir desde el nivel horario cuando se vayan a utilizar modelos como el del Pino Slash, pasando por datos a nivel diario y mensual que son los requeridos por la mayoría de las metodologías de evaluación, pero también incluyendo datos a

nivel, estacional, anual y multianual.

Según las necesidades de investigación se utilizarán diferentes tipos de estaciones climatológicas, las cuales serán seleccionadas entre otros criterios por su representatividad de las condiciones bioclimáticas en aquellas áreas y ecosistemas considerados como prioritarios para evaluación de impacto por cambio climático (bosques de tierras bajas, sabanas, bosques nublados de montaña, páramos, etc). Se considera conveniente aumentar la densidad de la red de estaciones climatológicas en algunas áreas, en especial al sur del río Orinoco.

La base de datos climáticas deberá estar acoplada con un sistema de información geográfica para poder obtener rápidamente los mapas de isolíneas de las variables climáticas de interés en un estudio determinado, incluyendo a variables derivadas que resultan de la superposición de varios mapas de isolíneas individuales. Esto permitirá realizar los mapas con diferentes regionalizaciones bioclimáticas del país y que servirían para comparación con los que resultan de aplicar los cambios climáticos.

#### **- Datos de Geología, Relieve, Suelos y Drenaje.**

A nivel de regiones y subregiones naturales se pueden establecer diferencias ecológicas asociadas a patrones particulares de materiales geológicos, relieve, suelos y drenaje. En consecuencia, la base de datos debe contener información sobre estos aspectos.

En el caso específico de la información de suelos es necesario contar con datos de pendiente, albedo, profundidad de los horizontes, densidad aparente, textura, estructura y estabilidad estructural ante los agentes erosivos, pH, disponibilidad y flujos de nutrientes (sobre todo N y P) y de la materia orgánica. Además, es necesario conocer los niveles de agua a saturación, capacidad de campo y punto de marchitez, para así calcular el agua disponible para evapotranspiración.

#### **- Datos sobre Características de Los Ecosistemas**

Se requieren datos sobre fotosíntesis, respiración, transpiración, eficiencia de uso de agua, necesidad y disponibilidad de nutrientes, productividad primaria neta y patrones de alocaión de biomasa; especies principales ( $C_3$ ,  $C_4$ , CAM) y biodiversidad; autoecología; patrones de producción, dispersión y germinación de semillas; establecimiento, crecimiento, reproducción, migraciones y relaciones de competencia; mortalidad edad-específica o independiente de la edad; necesidad de recursos

bioclimáticos como agua, radiación solar, temperatura, etc, incluyendo sensibilidad ante las variaciones de esos recursos (sensibilidad a los extremos climáticos); nutrientes; albedo y rugosidad superficial; arquitectura de hojas y doseles en relación al balance energético; estructura vertical (estratos); fauna representativa y agentes patógenos; sensibilidad al fuego y en general a diferentes tipos de disturbancias.

Dado que mucha de las características anteriormente señaladas son dependientes de los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico, será necesario realizar un esfuerzo por compilar la información que pueda estar disponible al respecto, tanto para el caso de mediciones hechas en nuestro país como aquella información generada en otros países pero con ecosistemas parecidos a los nuestros.

Una valiosa información sobre nuestros ecosistemas terrestres está contenida en imágenes de los satélites LANDSAT y SPOT, por lo cual deberá ser aprovechada. En especial datos asociados a los denominados índices de productividad de la vegetación resultan de mucha utilidad.

En el caso específico de datos fisiológicos de análisis de máxima y mínima tolerancia a variables climáticas provenientes de estudios en invernaderos con condiciones controladas, así como también de experimentos de campo en pequeñas parcelas, han servido como herramienta necesaria para el estudio de los posibles efectos inducidos por esas variables sobre ecosistemas terrestres. Sin embargo, el uso de este tipo de datos en forma exclusiva para la interpretación directa de las respuestas de comunidades naturales puede ocasionar algunos problemas debido a la diferencia de escalas. No obstante, no debe excluirse la recabación de este tipo de información, sobre todo por que es la que en mayor medida está disponible en la actualidad.

#### **- Datos sobre Uso de los Ecosistemas**

La mayoría de los ecosistemas terrestres en Venezuela están en mayor o menor medida utilizados por la población, afectando su composición, estructura, dinámica y distribución espacial. En este sentido, será necesarios recabar información sobre el uso actual de nuestros principales ecosistemas, la probable demanda futura de recursos proveniente de estos ecosistemas

#### **Calibración, Validación, Desarrollo e Integración de Modelos con Sistemas de Información Geográfica**

Hasta ahora en Venezuela no existe ningún modelo de simulación a nivel de ecosistemas que esté calibrado y

validado, por lo que resulta altamente prioritario realizar esfuerzos en esta dirección.

A nivel general una manera de probar la exactitud de los modelos a utilizar será evaluando su capacidad para reproducir las condiciones ecológicas actuales y en especial en aquellos sectores donde se produzcan cambios notables de variables ambientales y que estén reflejados en diferencias de estructura, composición y dinámica de los ecosistemas; además, el modelo debe estar en capacidad de simular con razonable exactitud los cambios producidos por las variaciones interanuales de las condiciones climáticas, incluyendo aquellas variaciones de carácter extremo. Otro aspecto a evaluar en los modelos es su capacidad de simular los flujos de materia y energía, y los retardos característicos en las respuestas de algunos tipos de vegetación ante el cambio en las variables climáticas, incluyendo el efecto que en este sentido puede tener una concentración más elevada de CO<sub>2</sub> atmosférico.

Para las evaluaciones anteriormente propuestas se deberá aprovechar la valiosa información proveniente de imágenes de sensores remotos, sobre todo la que está disponible en imágenes de satélites. Esta tecnología también permite monitorear el comportamiento de los ecosistemas para así asociar este comportamiento a las variaciones de las condiciones ambientales.

Se deberá tratar de integrar adecuadamente diferentes tipos de modelos, sobre todo los modelos de ecosistemas con los de tipo hidrológico y de ciclos biogeoquímicos; además, en algunos casos será necesario relacionar modelos que tengan escalas espaciales y temporales distintas, de manera tal que entre ellos exista un flujo de información que los alimente recíprocamente.

Modelos de sabanas: Para la calibración y validación del modelo GRASS en Venezuela la mayoría de los datos existen pero no están estructurados de acuerdo a las necesidades de la base de datos respectiva. También es necesario realizar modificaciones en tres aspectos muy importantes que se presentan en las sabanas venezolanas a diferencias de las africanas para las cuales se desarrolló el modelo GRASS:

- a) De árboles deciduos cambiar a árboles siempre verde.
- b) De gramíneas anuales cambiar a perennes.
- c) Incluir el efecto estocástico del fuego, ya que es capaz de sincronizar la floración de plantas leñosas y afectar la productividad.

Modelos de Bosques: En la utilización de los modelos de bosque se debe evaluar las alternativas de utilizarlos para estudiar bosque naturales, entre ellos bosque siempre verde, nublado, ribereños, etc, y bosques manejados como es el caso de las plantaciones de pino en el oriente del país.

Para estudiar las comunidades de bosques naturales se sugiere como mejor alternativa la de utilizar los modelos de claro tipo FORET. La mayoría de estos modelos han sido desarrollados para varias regiones templadas a nivel de especies, pero ya existen versiones adaptadas al estudio de bosques multiespecíficos, lo que es de sumo interés para una correcta simulación de la estructura y dinámica de nuestros principales bosques.

Los modelos de bosques por lo general requieren un conocimiento detallado de la autoecología de las especies, tales como crecimiento anual, tasa de mortalidad y otros variables. En este sentido, una base de datos valiosa es la del Prof. Pierre Veillon, pero no está siendo utilizada actualmente. Por otra parte la posibilidad de adaptar estos modelos a los bosques tropicales implica la realización sistemática de ensayos con la finalidad de recopilar información fisiológica, de crecimiento y otros datos que permitan construir una base de datos más consona con las necesidades de los modelos. Es importante tomar en consideración que estos modelos realizan la simulación del crecimiento de árboles individuales o pequeñas parcelas, por lo que se deberán realizar esfuerzos para extrapolar los resultados a nivel del bosque completo.

La utilización de los modelos de claros para evaluación de impactos por cambios de clima debe realizarse con la debida precaución, debido que el efecto de las variables sobre el crecimiento en estos modelos frecuentemente es simulada de una manera no muy fina. Además, por lo general se asume una tasa de crecimiento máxima y ya sabemos que el clima, la competencia y otros factores pueden reducir esa tasa de crecimiento. Por otra parte, la parametrización del clima está usualmente basada sobre rangos de especies, pero no toma en cuenta las interacciones biológicas que pueden afectar los rangos geográficos. Los métodos estocásticos de los típicos modelos de claros no son los suficientemente apropiados para simular los eventos reproductivos que son críticos para simular las respuestas a cambio de clima.

Para el estudio de las posibles respuestas de los bosques de pino en nuestro país ya se señaló que se encuentra a disposición un modelo realizado en la Universidad de Florida y adaptado para el Pino *elliotti*. Este tipo de pino presenta

características de crecimiento y fisiológicas más o menos parecidas al Pino Caribe, que es la variedad sembrada en Venezuela. Sin embargo existen algunas limitantes que deberá ser tomadas en cuenta:

a) El modelo no contempla limitaciones de disponibilidad de agua (asume riego óptimo), factor importante para las plantaciones en Venezuela, ya que existen periodos de escasez de agua que afectan a nuestras plantaciones.

b) No se conoce aún el patrón fisiológico completo del P. Caribe. aunque existe información acerca de algunos aspectos fisiológicos y además la fisiología de P. Caribe y el Pino ellioti deben presentar similitudes. Resulta necesario sobre todo realizar investigaciones adicionales para completar información de balance de carbono. Algunos trabajos en este aspecto se han venido desarrollando en el Centro de Ecología del IVIC, por lo que se espera en el futuro se pueda calibrar y validar el modelo para las plantaciones de pinos de Venezuela.

Es propicio insistir en la necesidad de recalcar que cerca del 75 % del territorio nacional esta cubierto o por bosques o por sabanas, por lo que la aplicabilidad y desarrollo de los modelos respectivos en el futuro serán de gran utilidad.

Se debe destacar la necesidad de desarrollar modelos de simulación para ecosistemas que están localizados en áreas donde los cambios de temperatura pudenser muy fuertes, tal como es al caso de las áreas montañosas. Sería en este sentido deseable poder contar en un futuro con modelos representativos de los ecosistemas de páramo.

A nivel general resultará de utilidad relacionar los modelos de simulación de ecosistemas a los sistemas de información geográfica, espacializando los datos de entrada necesarios para correr dichos modelos y sus salidas. Esto permitirá simular las respuestas espacio-temporales de algunos atributos de los ecosistemas y que sean de interés para evaluar las respuestas ante posibles cambios de clima. Se deberá prestar especial atención al hecho de que la dinámica de los ecosistemas está asociada al efecto de las variables climáticas en varios niveles de escala espacial y temporal, por lo cual se necesita una adecuada estructuración jerárquica que incluya por lo menos los niveles global y regional.

#### **Evaluaciones a Nivel Local, Racional y Nacional**

Es necesario realizar evaluaciones de impacto por cambios climático en aquellas áreas y ecosistemas más representativos, tomando como guía general la selección

preliminar propuesta en este informe. Sin embargo, esta selección deberá también ser complementada por los resultados de estudios de sensibilidad con algunos modelos disponibles, incluyendo los de tipo Holdridge, productividad primaria neta en función de variables como precipitación, temperatura y radiación, etc, de manera tal que se tome en cuenta la mayor o menor sensibilidad de los ecosistemas ante el cambio en las condiciones climáticas.

A continuación se propone una metodología general para el estudio de posibles impactos de cambios climáticos en bosques y sabanas.

El objetivo general se basa en determinar cuáles serían los patrones regionales de cambios de vegetación en respuestas a cambios climáticos en el área del sur del Río Orinoco y los llanos venezolanos. Los objetivos específicos están basados en la determinación de variables climáticas (de acuerdo a los escenarios), edáficas y geológicas, que determinan las unidades de vegetación; como también analizar el futuro de las unidades ambientales.

El Sur del Orinoco comprende un área de unos 800 Km de longitud por lo que puede incluirse en seis cartas (dos de alto por tres de largo) de aproximadamente 80 cm por un poco más de un metro cada una. Para los llanos venezolanos serían necesarias solamente tres cartas. Se propone además que sería necesario hacer estudios a otros niveles de resolución, por ejemplo usando los enfoques Thornwhaite, Holdridge, Box y sus combinaciones, o tomando en cuenta los límites entre diferentes formaciones vegetales. Bajo estas bases se propone la siguiente secuencia de actividades:

- 1) Establecer base cartográfica 1/250.000: Usar planes de ordenación del territorio, y mapas de: Bolívar, Amazonas, Anzoátegui, Guárico, Barinas, Cojedes, Monagas, Portuguesa y Apure. Utilizar cartas de Cartografía Nacional con curvas de nivel.

- 2) Obtener información sobre Áreas Naturales Homogéneas del Proyecto Macrosistemas Ambientales Venezolanos.

- 3) Organización de datos obtenidos de los mapas. Verificar áreas semejantes. Recabar información climática. Estas serían las unidades de análisis.

- 4) Complementación de variables a incluir en un estudio utilizando la técnica de Análisis Multivariante: clima, textura de suelos, retención de agua, ETP, Geología, Geomorfología, y relieve.

- 5) Confrontación de la regionalización de las estaciones

llaneras con la información de unidades naturales. El MARNR ya ha realizado una regionalización de estaciones a nivel nacional.

6) Análisis a mayor escala de la información para la extrapolación de impactos a nivel nacional.

Por último, se recomienda continuar realizando estudios de efectos de cambios climáticos pasados en los ecosistemas del territorio venezolano, ya que nos permitirán tener una idea de la sensibilidad de estos ecosistemas a posibles cambios climáticos futuros.



## BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, M., Franco, W. y Jaimez, R. 1989: **Información sobre los bosques al Sur del Río Orinoco.** Informe Técnico. Secciones I, II, III. Proyecto Orinoco- Apure. MARNR.
- Ashmore, M. 1990: **The Greenhouse Gases.** Trends in Ecology and Evolution (TREE) 5, No. 9, 293-294.
- Ball, F. T. 1986: **Historical Evidence and Climatic Implication of a Shift in the Boreal Forest Tundra in Central Canada.** Climatic Change 8 (2), 121-134.
- Bazzaz, F. A., and Garbutt, K., 1988: **The Response of Annuals in Competitive Neighborhoods: Effects of Elevated CO<sub>2</sub>.** Ecology 69, 937-946.
- Bonkougou E. G., 1989: **Effects of Climate Changes on the Sahelian Ecology.** En Reporte de Taller de Trabajo Africano por PAN-EARTH (Septiembre 1989) Saly, Senegal. p. 46.
- Bradbury, J. P. 1981: **Late Quaternary Environmental History of Lake Valencia.** Science, 214, 1299-1305.
- Bryant, P. J., Stuart, C. F. III, and Klein, D. R. 1983: **Carbon/Nutrient Balance of Boreal Plants in Relation to Vertebrate Herbivory.** Oikos 40, 357-368.
- Clark William C., 1989: **Managing Planet Earth.** Scientific American 261, No. 3, p.47-54.
- CLIMAP Project Member, 1981: **Seasonal Reconstruction of the Earth's Surface at the Last Glacial Maximun.** Geol. Soc. America, Map and Chart Series MC-36, 1-18.
- Committee on Interagency Radiation Research and Policy Coordination (CIRRPC, USA) 1988: **Review of SCOPE 28 Report on Environmental Consequences of Nuclear War: Vol !!, Ecological and Agricultural Effects.** Science Panel Report No. 5
- Davies, T. 1989: **The Potential Effects of Global Climate Change on the United States.** Executive Summary. EPA's Report to Congress. Smith Joel B. y Tirpak Dennis (eds.), 25-54.
- Dickinson, R. E. 1986 : **How will Climate Change? The Climate System and Modelling of Future Climate.** In The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems. Ed. por Bolin B., Doos B., Hager J. y Warrick R. (SCOPE 29), 207-270.
- ááááááááá, y Cicerone Ralph, 1986 : **Future Global Warming from Atmospheric Trace Gases.** NATURE 319, 109-115.

- Eden, M. J. 1974: **Paleoclimatic Influences and the Development of Savannas in Southern Venezuela.** Jour. Biogeo. J., 95-109.
- Emanuel, W. R., Shugart, H. H., and Stevenson, M. P. 1985: **Climatic Change and the Broad-scale Distribution of Terrestrial Ecosystem Complexes.** Climatic Change 7, 29-43.
- Franco, W. 1988: **Los suelos del lote boscoso San Pedro y las Reserva Forestal de Imataca, Gurapiche y Ticoporo.** Trabajo de Ascenso. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela, pp. 309.
- Graedel Thomas E. y Crutzen Paul J., 1989: **The Changing Atmosphere.** Scientific American 261, No. 3, 58-68.
- Graham Russell W. y Grimm Eric C., 1990: **Effects of Global Climate Change on the Patterns of Terrestrial Biological Communities.** TREE 5, No. 9, 289-292.
- Guiot J., Pons A., de Beaulieu J. L., y Reille M., 1989: **A 140,000-year Continental Climate Reconstruction from two European Pollen Records.** NATURE, 338, 309-313.
- Holdridge, L. R. 1964: **Life Zone Ecology.** Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Holt Robert D., 1990: **The Microevolutionary Consequences of Climate Change.** TREE 5, No. 9, 311-315.
- IGBP, 1990: **The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Climate Change, The Initial Core Projects.** IGBP Reporte 12 (Junio 1990).
- Katween, ., and Wright, R. 1977: **Field Response of Photosynthesis to CO<sub>2</sub> Enhancement in Ponderosa Pine.** Ecology 58 (3), 607-?
- Kauppi, P., and Posch, M. 1985: **Sensitivity of Boreal Forest to Possible Climatic Warming.** Climatic Change 7, 45-54.
- Keignin, L. D., and Boyle, E. A. 1985: **Carbon Isotope in Deep-sea Benthic Foraminifera: Precession and Changes in Low Latitudes Biomass.** In E. T. Sundquist and W. S. Broecker (eds.), The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variation Archean to Present, Geophysical Monography 32, American Geophysical Union, Washington D. C.
- Lieth, H. 1975: **Modeling the Primary Productivity of the World.** In Lieth, H. and Whittaker, R. H. (eds.), Primary Productivity of the Biosphere, Springer-Verlag New York, pp. 237-263.

----- 1978: **Vegetation and CO<sub>2</sub> Changes**. In William, J. (ed.), **Carbon Dioxide, Climate and Society**, Pergamon Press, pp. 103-109.

Manabe, S., and Hahn, D. 1977: **Simulation of the Tropical Climate of an Ice-age**. Jour Geophys. Res. 82, 3889-3911.

MARNR, 1982: **Mapa de la Vegetación Actual de Venezuela**. Proyecto Ven/79/001. Sistemas Ambientales Venezolanos.

MARNR, 1985: **Atlas de la Vegetación de Venezuela**

MARNR-ORSTOM, 1987: **Atlas del inventario de tierras del Territorio Federal Amazonas**. Dirección General Sectorial de Información e Investigación del Ambiente. MARNR Caracas Venezuela

MARNR-POA, 1988: **Plan Nacional de Desarrollo de los Recursos Forestales**. DGSPOA. pag. 165. MARNR, Caracas Venezuela.

Martin, P., Rosenberg, N. J., and McKenney. 1989: **Sensitivity of Evapotranspiration in a Wheat, a Forest, and a Grassland to Changes in Climate and Direct of Carbon Dioxide**. Climatic Change 14, 117-151.

Medina E. and Silva, J. 1990: **The Savannas of Northern South America: A Steady State Regulated by Water-Fire Interactions on a Background of Low Nutrient Availability**. Journal of Biogeography. 17: 1-11 Paper 573.

Mitchell J. B. F., 1988: **Local Effects of Greenhouse Gases**. NATURE 332, 399-400.

Overpeck, J. T, Rind, D, and Goldberg, R. 1990: **Climate-induced Changes in Forest Disturbance and Vegetation**. Nature 343, 51-53.

Pastor J. y Post W. M., 1988: **Response of Northern Forests to CO<sub>2</sub>-induced Climate Change**. NATURE 334, 55-58.

Patrusky Ben, 1989: **Dirtying the Infrared Window**. MOSAIC 19, No. 3/4, 25-37.

Pittock, A. B., and Nix, H. A. 1986: **The Effect of Changing Climate on Australian Biomass Production: A Preliminary Study**. Climatic Change 8 (3), 243-255.

Robock Alan, 1989: **Global Climate Change**". In **The Potential Effects of Global Climate Change on the United States**. EPA's Report to Congress. Smith Joel B. y Tirpak Dennis (eds.).

Rosenberg Norman J., Blad Blaine L. y Verma Shashi B., 1983: **Microclimate: The Biological Environment**. 2nd Ed. John Wiley & Sons.

Salgado-Labouriau, M. L. 1980: **A Pollen Diagram of the Pleistocene-Holocene Boundary of Lake Valencia, Venezuela**. *Rev. Palaeobot. Palynol.* **30**, 297-312.

-----1982: **Climatic Change at the Pleistocene-Holocene Boundary**. In G. T. Prance (ed.): **Biological Diversification in the Tropic**, Columbia University Press, New York.

----- 1986: **Estudios Paleoecológicos de la Región de Rancho Grande, Venezuela**. En: *La Selva Nublada de Rancho Grande, Parque Nacional Henry Pittier*. O. Huber (Ed.), Fondo Ed. Acta Científica Venezolana, Caracas, 109-130.

Sangare Yaya, 1989: **The Effects of Climate Changes on Forest Ecosystems with Particular Reference to Cultivation of Tree Crops in Côte d'Ivoire**. En *Reporte de Taller de Trabajo del Proyecto PAN-EARTH (Septiembre 1989)* Saly, Senegal. p.45.

San Jose J. y Medina E. 1976: **Organic matter production in the Trachypogon savanna at Calabozo, Venezuela**. *Tropical Ecology*, 17:113-124.

Sarmiento, G. 1983: **The savannas of Tropical America. Tropical Savannas**. (ed. by F. Bourliere,) mpp. 245-288. *Ecosystems of the World*. Elsevier Publ. Co., Amsterdam.

Shimel, D. S., Parton, W. J., Kittel, T. G. F., Djima, D. S., and Cole, C. V. 1990: **Grassland Biogeochemistry: Links to Atmospheric Processes**. *Climatic Change* 17 (1), 13-25.

Schneider Stephen H., 1989. "The Changing Climate", *Scientific American* Vo. 261, No. 3, p.70-79.

Shubert, C. 1988: **Climatic Change During the Last Glacial Maximun in Northern South America and the Caribbean: A Review**. *Interciencias* 13, No. 3, 128-137.

\_\_\_\_\_, 1990: **Aspects of Paleoclimate in Venezuela**. En *Reporte de Taller de Trabajo sobre Climatología, Estudio de Caso Venezuela por PAN-EARTH/CEACT (Abril 1990)* Merida, Venezuela, pp. 6.

Singh, T., and Powell, M. 1986: **Climatic Variation and Trend in the Boreal Forest Region of Western Canada**. *Climatic Change* 8 (3), 267-278.

Urban Dean B. y Shugart Herman H., 1989: **Forest Response to Climatic Change: A Simulation Study for Southeastern Forests.** In The Potential Effects of Global Climate Change on the United States, EPA's Report to Congress, Appendix D. Smith Joel B. y Tirpak Dennis (eds.), 3, 1-45.

van der Hammen, T., Barelds, J., de Jong, H., and de Veer, A., 1981: **Glacial Sequences and Environmental History in the Sierra Nevada del Cocuy.** Palaeogeog. Paleoclim. Palaeoecol. 32, 247-340.

Walker, B. H. 1991: **Ecological Consequences of Atmospheric and Climate Change.** Climatic Change 18 (2-3), 301-316.

Woodward, F. I. 1987: **Stomatal Number are Sensitive to Increase in CO<sub>2</sub> from pre-Industrial Levels.** Nature 327, 617-618.

Zabinski Catherine y Davies Margaret B., 1989: **Hard Times Ahead for Great Lakes Forests: A Climate Threshold Model Predicts Responses to CO<sub>2</sub>-induced Climate Change.** In The Potential Effects of Global Climate Change on the United States, EPA's Report to Congress, Appendix D. Smith Joel B. y Tirpak Dennis (eds.), 5, 1-19.

